ESTUDIO FAO:
RIEGO Y
DRENAJE

ISSN 0254-5284

66

Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua

Ilustraciones de la portada:
Margherita Bongiovanni
(Anteriormente docente titular de Diseño e Historia del Arte,
y Bellas Artes; Ministerio de Educación, Roma, Italia)

Los ejemplares de las publicaciones de la FAO se pueden solicitar en:
GRUPO DE VENTAS Y MARKETING
Oficina de intercambio de conocimiento, investigación y extensión
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Vialle delle terme Caracalla
00153 Roma, Italia.

Correo electrónico: publications-sales@fao.org
Fax: +39 06 57053360
Sitio web: www.fao.org

ESTUDIO FAO: RIEGO Y DRENAJE

66

Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua

por

Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierra y Agua, Roma, Italia)

Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE.UU.)

Elias Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)

Dirk Raes
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica)

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA
Roma, 2012

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

E-ISBN 978-92-5-308564-4 (PDF)

© FAO, 2014

La FAO fomenta el uso, la reproducción y la difusión del material contenido en este producto informativo. Salvo que se indique lo contrario, se podrá copiar, descargar e imprimir el material con fines de estudio privado, investigación y docencia, o para su uso en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca de forma adecuada a la FAO como la fuente y titular de los derechos de autor y que ello no implique en modo alguno que la FAO aprueba los puntos de vista, productos o servicios de los usuarios.

Todas las solicitudes relativas a la traducción y los derechos de adaptación así como a la reventa y otros derechos de uso comercial deberán dirigirse a www.fao.org/contact-us/licence-request o a copyright@fao.org.

Los productos de información de la FAO están disponibles en el sitio web de la Organización (www.fao.org/publications) y pueden adquirirse mediante solicitud por correo electrónico a publications-sales@fao.org.

Prólogo

La gestión y utilización sostenible de los recursos naturales forma parte de las *Metas globales* de los países miembros de la FAO y es esencial para el mandato de la organización.

El diagnóstico más reciente de la FAO sobre el estado de los recursos del suelo y del agua a nivel global reveló claramente que estos recursos, actualmente escasos, lo serán gradualmente aún más en el futuro, lo cual representa una amenaza para la seguridad alimentaria. De hecho, la excepcional demanda de alimentos que se proyecta para las próximas décadas, debido al crecimiento de la población mundial y al cambio previsto en los patrones de consumo, deberá hacer frente a oportunidades muy limitadas para la expansión de las tierras agrícolas y la disponibilidad finita de recursos hídricos. Tal demanda únicamente se podrá suplir si logramos actuar de manera efectiva y sostenible en los dos lados de la ecuación *alimentaria;* es decir, *producción* y *consumo,* y en las interrelaciones entre estas dos variables, incluidas comercialización, distribución y acceso.

La FAO está realizando esfuerzos para abordar los principales problemas en el lado de la *producción*, con respecto a la equidad en la comercialización, y en el lado del *consumo* (reducción de las pérdidas post-cosecha y de desperdicio de alimentos, y el fomento de la adopción de hábitos alimentarios nutritivos y saludables) y otros desafíos emergentes. Dentro de éstos últimos se incluyen: *la volatilidad de los precios de los alimentos,* lo cual deja al descubierto la vulnerabilidad de algunos países debido a su dependencia de las importaciones y conduce al aumento de la producción dentro de sus fronteras nacionales; *el cambio climático,* que ocasiona mayor incertidumbre sobre los patrones de precipitación y por tanto exige mayor capacidad de adaptación y resiliencia de los sistemas de producción local; ríos *transfronterizos* y *competencia por la demanda* de recursos de suelo y agua por parte de otros sectores de la sociedad y de los ecosistemas.

Dadas estas circunstancias y considerando la demanda de alimentos en el futuro, es imperativo que la agriultura mejore la eficiencia del uso de los recursos limitados y garantice un incremento sustancial en la *productividad*. En el caso del agua, su escasez representa la principal amenaza a la sostenibilidad de la producción de alimentos en muchas zonas del mundo. De esta manera, el manejo eficiente del agua en la agricultura de secano y regadío es una importante alternativa basada en el conocimiento para incrementar la *productividad* y los ingresos de los agricultores. Representará un reto combinar el aumento de la productividad con el manejo sostenible de los recursos naturales, sin repetir los errores que se cometieron en el pasado.

Con el aporte de numerosos expertos, profesionales e instituciones científicas de todo el mundo, incluidos varios *Institutos* del *Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional* (CGIAR), se publica "*Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*" en un momento de alta demanda entre los países miembros, con el fin de implementar estrategias y prácticas de manejo de agua eficientes, que no deterioren el medio ambiente y se adapten a las condiciones meteorológicas y aumenten la productividad hídrica sostenible y el rendimiento de los sistemas agrícolas, de modo que se mitiguen los riesgos de la inseguridad alimentaria.

José Graziano da Silva
Director General
Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura

Prefacio

La *División de Tierras y Agua* de la FAO participa activamente en la mejora de la producción agrícola a nivel global. Parte de este esfuerzo es la elaboración de importantes publicaciones y directrices que abordan los problemas de la producción de alimentos y el uso del agua, utilizando métodos analíticos que a menudo se convierten en normas en todo el mundo.

Frente a la creciente escasez de agua, el deterioro de la calidad de los recursos hídricos y las incertidumbres del cambio climático, mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua en los cultivos, al tiempo que se reduce el impacto negativo sobre el medio ambiente, es de suma importancia para responder a la creciente demanda de alimentos de la población mundial en aumento. Para lograr este objetivo, la agricultura de secano y regadío debe adoptar soluciones de gestión que se basen más en el conocimiento.

Adicionalmente, continuará aumentando la competencia que se genera por la demanda de agua de otros sectores económicos y aquella dirigida a las necesidades de los ecosistemas. Dado que la agricultura es, por mucho, la principal actividad consumidora de agua, los avances en eficiencia y productividad que se presenten en este sector liberarán cantidades significativas de agua para otros usos.

Partiendo del conocimiento científico y los avances tecnológicos desarrollados en las últimas décadas, y con la colaboración de una red de instituciones científicas, la FAO ha recopilado un conjunto de herramientas en este *Estudio de Riego y Drenaje*, para evaluar de mejor manera y aumentar la respuesta del rendimiento del cultivo al agua. Estas herramientas brindan medios para perfeccionar las capacidades de diagnóstico y gestión que se requieren para: intensificar la producción de los cultivos de manera sostenible, reducir la brecha de producción en muchas regiones del mundo, cuantificar el impacto de la variabilidad y los cambios climáticos en los sistemas de cultivo, utilizar los recursos naturales de forma más eficiente y minimizar el impacto negativo ocasionado por la agricultura en el medio ambiente. Estas herramientas tienen un valor incalculable para varios actores de la industria agrícola, entre ellos: gestores y planificadores del suministro hídrico, servicios de extensión, ingenieros consultores, organismos gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y asociaciones de agricultores, economistas agrícolas y científicos investigadores.

Al presentar el trabajo de vanguardia de la FAO sobre productividad del agua y de los cultivos, esperamos que esta publicación proporcione fácil acceso a las complejas relaciones entre el agua y la producción de alimentos, así como una mejor comprensión de las mismas; y de este modo, contribuya a mejorar la gestión de nuestros valiosos recursos hídricos.

Alexander Müller
Subdirector General
Recursos Naturales y Medio Ambiente

Parviz Koohafkan
Director
División de Tierras y Aguas

Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS VII

SIGLAS DE INSTITUCIONES IX

LISTA DE LOS PRINCIPALES SÍMBOLOS Y SIGLAS XI

1. INTRODUCCIÓN 1

2. RESPUESTA DEL RENDIMIENTO AL AGUA: FUNCIÓN ORIGINAL DE PRODUCCIÓN DEL AGUA DE LA FAO 6

3. RESPUESTA DEL RENDIMIENTO DE CULTIVOS HERBÁCEOS AL AGUA: EL MODELO DE SIMULACIÓN AQUACROP 15

3.1 *AquaCrop:* conceptos, fundamento y funcionamiento *17*

3.2 Aplicaciones de *AquaCrop* *53*

3.3 Guía de parametrización, calibración y validación de *AquaCrop* *73*

3.4 Cultivos herbáceos *94*

Trigo 97

Arroz 109

Maíz 119

Soya o soja 130

Cebada 141

Sorgo 151

Algodón 161

Girasol 171

Caña de azúcar 181

Papa o patata 190

Tomate 198

Remolacha azucarera 207

Alfalfa 217

Maní bambara 227

Quinua 235

Tef 244

4. RESPUESTA DEL RENDIMIENTO DE ÁRBOLES FRUTALES Y VIDES AL AGUA: GUÍAS 251

4.1 Árboles frutales y vides 306

Olivo 308

Cítricos 324

Manzano..... 340
Ciruelo..... 356
Almendro..... 365
Peral..... 383
Durazno o melocotonero..... 398
Nogal..... 416
Pistacho..... 422
Albaricoque..... 441
Aguacate..... 450
Cerezo dulce..... 457
Vid..... 467
Kiwi..... 498
5. Epílogo..... 509

Agradecimientos

Esta publicación contó con aportes de un gran número de personas e instituciones que contribuyeron de diversas maneras, entre ellas: asesoramiento por parte de expertos, participación activa en talleres del proyecto, datos experimentales y autoría.

Universidades e instituciones de investigación nacionales e internacionales, de muchas regiones del mundo, colaboraron en la recopilación de datos y apreciaciones que forman parte del vasto cúmulo de información y conocimiento condensado en esta publicación de vanguardia, *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*

Fue particularmente significativa la participación de los centros clave del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), específicamente el Instituto Internacional de Investigación sobre el Arroz (IRRI), el Centro Internacional de Investigación Agrícola en las Zonas Secas (ICARDA), el Instituto Internacional de Investigación de Cultivos para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT), el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y el Centro Internacional de la Papa (CIP), así como la división conjunta de la FAO y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Trabajar junto con los colegas de estos centros fortaleció la cooperación institucional y mejoró la sinergia encaminada a reducir la brecha entre la investigación científica y la implementación en el campo, el conocimiento teórico y la práctica de campo, la investigación y el funcionamiento real.

La mayoría de estos científicos, expertos y colegas se mencionan en esta publicación, ya sea como editores, autores o científicos que aportaron datos y pruebas para el modelo "AquaCrop". Agradecemos a todos ellos por sus invaluables aportes.

Quisiéramos expresar nuestro agradecimiento a los siguientes expertos que participaron en la etapa inicial de este esfuerzo: John Passioura (CSIRO, Canberra, Australia), Luigi Cavazza (Universidad de Bolonia, Italia), Hugh Turral (anteriormente IWMI, Colombo, Sri Lanka), John Annandale (Universidad de Pretoria, Sudáfrica), Dogo Seck (CERAAS, Dakar, Senegal), Lamourdia Thiombiano (FAO, Oficina Subregional para África Central, Libreville, Gabón), Netij Ben-Mechlia (INAT, Túnez, Túnez), Claudio Stockle (Universidad del Estado de Washington, Pullman, Estados Unidos), Florent Maraux (CIRAD, Montpellier, Francia), Francois Tardieu (INRA, Montpellier, Francia), Tsugihiro Watanabe (RIHN, Tokio, Japón), Hiroshi Nakagawa (Universidad de la Prefectura de Ishikawa, Ishikawa, Japón), Long Nguyen (División conjunta FAO/OIEA, Viena, Austria), Tim Wheeler (Universidad de Reading, Reading, Reino Unido), Jan Doorenbos y Amir Kassam (anteriormente FAO, División de Tierras y Aguas, Roma, Italia) y Gerardo van Halsema (Universidad y Centro de Investigación de Wageningen, Wageningen, Países Bajos). Sus aportes fueron cruciales para determinar de manera correcta el estado inicial de este trabajo.

El apoyo de los colegas de la FAO en diferentes etapas fue indispensable para esta publicación. Un agradecimiento especial para Martin Smith, quien inició el proceso y luego revisó los diferentes capítulos, realizó aportes y brindó retroalimentación a los editores para mejorar la armonización entre los capítulos y con respecto a recientes y antiguas publicaciones de la FAO. Martin contó con la acertada colaboración de Giovanni Muñoz y Robina Wahaj. Poco después de la fase inicial, comenzó un periodo de trabajo intenso. Agradecemos de manera especial a Gabriella Izzi y Lee K. Heng, quienes gestionaron el amplio conjunto de datos experimentales recopilados para la calibración, mantuvieron la comunicación entre todos los colaboradores y contribuyeron de manera considerable con la calibración y las diversas pruebas de "AquaCrop". Después de un año de esfuerzos diligentes en la FAO, Lee se trasladó a la División conjunta de la FAO/OIEA en Viena, pero continuó colaborando con igual ímpetu en la calibración y pruebas del modelo. Gabriella se vinculó

al Banco Mundial después de dos años de trabajo intenso con el modelo en la FAO. Más recientemente, el proyecto contó con el apoyo de Michela Marinelli, Patricia Mejías Moreno y Jippe Hoogeveen. Les agradecemos por su ayuda continua y compromiso crucial en aras de la culminación de este producto.

El diseño y la precisa ejecución de la maquetación y edición del documento son de suma importancia para esta publicación, dado que requieren atención meticulosa a un gran número de detalles en el texto, gráficas, imágenes, dibujos, ecuaciones, símbolos y citas. Agradecemos a los colaboradores de la FAO, Gabriele Zanolli, Paolo Mander, Rosemary Allison y Jim Morgan, por la dedicación, la profesionalidad y la paciencia que demostraron en la ejecución de estas tareas. Un agradecimiento muy especial para Margherita Bongiovanni por contribuir con ilustraciones botánicas artísticas, hermosas y precisas de los cultivos.

Finalmente, agradecemos a la ex subdirectora general del Departamento de Agricultura y Protección del Consumidor, Louise Fresco, por su respaldo y apoyo a la iniciativa desde el principio; y al director de la División de Tierras y Aguas, Parviz Koohafkan, y al subdirector general del Departamento de Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Alexander Müller, por su apoyo decidido y continuo al programa de 'Agua', lo que hizo posible esta publicación y el desarrollo del modelo “AquaCrop”.

Sin este esfuerzo colectivo e interdisciplinario, este resultado no habría sido posible.

SIGLAS DE INSTITUCIONES

CER:	Canale Emiliano Romagnolo, Italia
CNR:	Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia
CMMYT:	Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo, México
CIP:	Centro Internacional de la Papa, Perú
CONICET:	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina
CRA:	Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Italia
CRI:	Cotton Research Institute, Uzbekistan
CSIRO:	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia
DSIR:	Department of Scientific & Industrial Research, India
EEAD-CSIC:	Estación Experimental de Aula Dei - Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España
EMBRAPA:	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, Brasil
FAO:	Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italia
GRI:	Golan Research Institute, Israel
GRC:	Geisenheim Research Centre for Viticulture and Grapevine Breeding, Germany
IAM-B:	Mediterranean Agronomic Institute of Bari, Italy
IAEA:	International Atomic Energy Agency, Austria
IAS-CSIC:	Instituto de Agricultura Sostenible-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España
ICARDA:	International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, Siria
ICREA:	Instituci Catalana de Recerca i Estudis Avançats, Spain
ICRISAT:	International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, India
INIA:	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Chile
INRA:	Institute National de la Recherche Agronomique, Francia
INTA:	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina
IRD CEFE-CNRS:	Institut de Recherche pour le Developpement Centre d'Ecologie Fonctionnelle & Evolutive – Centre National de la Recherche Scientifique, Francia
IRRI:	International Rice Research Institute, Filipinas

IRTA:	Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries, Spain
ISPA:	Istituto di Scienze delle Produzioni Alimentari, Italia
IVIA:	Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, España
KESREF:	Kenya Sugar Research Foundation, Kenia
LARI:	Lebanese Agricultural Research Institute, Líbano
LLNL:	Laurence Livermore National Laboratory, USA
SARDI:	South Australian Research and Development Institute, Australia
SASRI:	South African Sugarcane Research Institute, Sudáfrica
SIA:	Servicio de Investigación Agraria, España
USDA-ARS:	United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service, USA
WB:	World Bank, USA
VLIR-UOS:	Flemish Inter-University Council, Bélgica
ZIS:	Zhanghe Irrigation System, China

Lista de los principales símbolos y siglas

B	Biomasa seca, de brotes para cultivos que no son de raíz, y de brotes más las raíces reservantes o tubérculos para cultivos de raíz [ton/ha o kg/m^2]
C_a	Concentración atmosférica media actual de CO_2 [ppm]
$C_{a,o}$	Concentración atmosférica media de CO_2 para el año 2000 [ppm]
cc_o	Cobertura del dosel del promedio de plántulas al 90 % de emergencia [cm^2]
CC	Cobertura del dosel verde [porcentaje o fracción]
CC^*	Cobertura del dosel verde ajustada por micro-advección [porcentaje o fracción]
CC_{meas}	Cobertura del dosel medida[porcentaje o fracción]
CC_{sim}	Cobertura del dosel simulada [porcentaje o fracción]
CC_o	Cobertura del dosel inicial al 90 % de la emergencia [porcentaje o fracción]
CC_{pot}	Cobertura del dosel potencial [porcentaje o fracción]
CC_x	Cobertura del dosel máxima [porcentaje o fracción]
CDC	Coeficiente de disminución del dosel [porcentaje o fracción de disminución del dosel por unidad de tiempo]
CGC	Coeficiente de crecimiento del dosel [porcentaje o fracción de crecimiento del dosel por unidad de tiempo]
CN	Curva número o coeficiente de escorrentía superficial
$[CO_2]$	Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera [ppm]
CWSI	Índice de estrés hídrico del cultivo
d	Día
d_p	Densidad de plantas [plantas por unidad de superficie]
d_{ref}	Densidad de plantas de referencia [plantas por unidad de superficie]
D_r	Agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular [mm]
DAE	Días después de emergencia [días]
DAP	Días después de la plantación [días]
DI	Riego deficitario

DP	Percolación profunda [mm por unidad de tiempo]
DU	Uniformidad de distribución
E	Evaporación del suelo [mm por unidad de tiempo]
E_{dz}	Evaporación superficial desde el resto de superficie del suelo fuera del patrón de humedecimiento del emisor [mm por unidad de tiempo]
$E_{Stage\ I}$	Evaporación del suelo en la fase I (superficie del suelo húmedo) [mm por unidad de tiempo]
$E_{Stage\ II}$	Evaporación del suelo en la fase II (superficie del suelo en proceso de secado) [mm por unidad de tiempo]
E_{wz}	Evaporación de la superficie del suelo humedecido por emisores [mm por unidad de tiempo]
ECe	Conductividad eléctrica del extracto de suelo saturado [dS/m]
ECe_n	Conductividad eléctrica del extracto de suelo saturado: umbral inferior (cuando empieza a ocurrir el estrés salino del suelo) [dS/m]
ECe_x	Conductividad eléctrica del extracto de suelo saturado: umbral superior (cuando el estrés salino alcanza su efecto máximo) [dS/m]
ET	Evapotranspiración [mm por unidad de tiempo]
ET_a	Evapotranspiración real [mm por unidad de tiempo]
ET_c	Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar [mm por unidad de tiempo]
ET_x	Evapotranspiración máxima [mm por unidad de tiempo]
ET_o	Evapotranspiración de referencia [mm por unidad de tiempo]
f_{age}	Coeficiente de reducción que describe el efecto del envejecimiento en K_{cTrx} [1/d]
f_{cc}	Fracción de la superficie del terreno del huerto ocupada por el cultivo de cobertura
f_{CO2}	Factor de CO_2 para normalización porCO_2 admosférico
f_{HI}	Factor de ajuste para HIo
FC	Capacidad de campo
FI	Riego completo
FDR	Reflectometría en el dominio de la frecuencia
FTSW	Fracción de agua edáfica transpirable
g_s	Conductancia estomática [m/s]
G	Fracción de la superficie del suelo cubierta por la copa de los árboles

GDD	Grados día acumulados [°C d]
GIR	Requerimientos brutos de riego [mm o m^3/ha por unidad de tiempo]
GIS	Sistemas de Información Geográfica
HI	Índice de cosecha [porcentaje o fracción]
HI_o	Índice de cosecha de referencia [porcentaje o fracción]
I	Infiltración [mm por unidad de tiempo]
K_c	Coeficiente de cultivo
K_{cb}	Coeficiente basal del cultivo que representa el K_c para una superficie de suelo seco que tiene poca evaporación, pero transpiración elevada
K_{cc}	Coeficiente de cultivo de cobertura
K_{ext}	Coeficiente de extinción de radiación
K_p	Coeficiente de tanque (evaporación por el método de tanque para determinar la ET_o)
$K_{r,t}$	Coeficiente empírico que relaciona la ET_c de un huerto de cobertura incompleta con la de un huerto maduro
K_{sat}	Conductividad hidráulica saturada [mm por unidad de tiempo]
$K_{s,e}$	Coeficiente empírico de evaporación del suelo
K_y	Factor de respuesta del rendimiento
$K_{c,Tr}$	Coeficiente de transpiración de cultivo
$K_{c,Tr\ x}$	Coeficiente de transpiración de cultivo cuando el dosel cubre completamente el terreno (CC = 1) y no hay estrés
Ke	Coeficiente de evaporación del suelo cuando la superficie de suelo está totalmente húmeda
Ke_x	Coeficiente de evaporación del suelo cuando la superficie de suelo está totalmente húmeda y no hay sombra
Kr	Coeficiente de reducción de la evaporación
Ks	Coeficiente de estrés
$Ks_{b,c}$	Coeficiente de estrés por frío para la producción de biomasa
$Ks_{pol,c}$	Coeficiente de estrés por frío para la polinización
$Ks_{pol,h}$	Coeficiente de estrés por calor para la polinización
Ks_{aer}	Coeficiente de estrés hídrico para el encharcamiento (estrés de aireación)
$Ks_{exp,w}$	Coeficiente de estrés hídrico para expansión del dosel

Ks_{sen}	Coeficiente de estrés hídrico para la senescencia del dosel
Ks_{sto}	Coeficiente de estrés hídrico para el cierre estomático
LAI	Índice de área foliar [área foliar en m^2/superficie del suelo en m^2]
LAI_{ref}	LAI del mismo cultivo sembrado a una densidad de referencia
LWP	Potencial hídrico foliar [MPa]
NIR	Requerimientos netos de riego [mm por unidad de tiempo o m^3/ha por unidad de tiempo]
p	Factor de agotamiento del agua en el suelo
p_{upper}	Umbral superior de p (sin estrés hídrico: Ks = 1)
p_{lower}	Umbral inferior de p (máximo estrés hídrico: Ks = 0)
p	Precipitación o lluvia [mm]
PAR	Radiación fotosintéticamente activa [μmol por m^2 de superficie por s]
PRD	Secado parcial de raíces
PWP	Punto de marchitez permanente
RDI	Riego deficitario regulado
RAW	Agua fácilmente aprovechable de la zona radicular del suelo [mm]
REW	Agua fácilmente evaporable de la capa superficial del perfil del suelo [mm]
RUE	Eficiencia del uso de la radiación [Kg de biomasa por MJ de radiación solar interceptada]
RO	Escorrentía superficial [mm por unidad de tiempo]
SDI	Riego deficitario sostenido (o continuo)
t	Tiempo [GDD o d]
T	Temperatura del aire [°C]
T_{base}	Temperatura base (por debajo de la cual el desarrollo del cultivo se detiene) [°C]
T_c	Temperatura del dosel [°C]
$T_{max} = T_x$	Temperatura máxima diaria del aire [°C]
$T_{min} = T_n$	Temperatura mínima diaria del aire [°C]
$T_{n,cold}$	Temperatura mínima del aire en el umbral superior para estrés por frío que afecta a la polinización [°C]
$T_{x,heat}$	Temperatura máxima del aire en el umbral inferior para estrés por calor que afecta a la

	polinización [°C]
T_{opt}	Temperatura diaria óptima para el cultivo [°C]
T_{upper}	Temperatura superior (temperatura por encima de la cual la velocidad de desarrollo del cultivo no se incrementa con un incremento de la temperatura del aire) [°C]
Tr	Transpiración del cultivo [mm por unidad de tiempo]
Tr_{cc}	Transpiración de la cobertura vegetal del cultivo [mm por unidad de tiempo]
Tr_x	Transpiración máxima del cultivo (para un cultivo bien regado) [mm por unidad de tiempo]
TAW	Agua disponible total en el suelo (entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente), equivalente a la capacidad de retención de agua del suelo en la zona radicular [mm/m]
TDR	Reflectometría de dominio de tiempo
TE	Eficiencia de la transpiración [Kg de biomasa por unidad de agua transpirada]
VPD	Déficit de presión de vapor de agua [kPa]
wz	Fracción de la superficie del suelo humedecida por los emisores
Wr	Contenido de agua del suelo de la zona radicular, expresado como profundidad equivalente [mm]
WP	Productividad del agua del cultivo para la biomasa [toneladas de biomasa por ha y por mm de agua transpirada o kg de biomasa por m^3 de agua transpirada]
WP*	Productividad del agua normalizada por ET_o y concentración de CO_2 en el aire [ton/ha o kg/m^2]
$WP_{B/ET}$	Productividad del agua como el cociente entre la biomasa y la ET [kg/m^3]
$WP_{B/Tr}$	Productividad del agua como el cociente entre la biomasa y la Tr [kg/m^3]
$WP_{fresh\ Y/ET}$	Productividad del agua como el cociente entre el rendimiento medido como biomasa fresca y la ET [kg/m^3]
$WP_{lint/ET}$	Productividad del agua como el cociente entre la fibra (de algodón) y la ET [kg/m^3]
$WP_{sucrose/ET}$	Productividad del agua como el cociente entre la sacarosa (de la caña de azúcar) y la ET [kg/m^3]
$WP_{Y/ET}$	Productividad del agua como el cociente entre el rendimiento (en materia seca) y la ET [kg/m^3]
$WP_{Y/Tr}$	Productividad del agua como el cociente entre el rendimiento (en materia seca) y la Tr [kg/m^3]

X	Lámina de riego [mm]
X_R	Lámina de riego requerida [mm]
Y	Rendimiento [ton/ha o kg/ha]
Y_a	Rendimiento real [ton/ha o kg/ha]
Y_x	Rendimiento máximo [ton/ha o kg/ha]
Z_e	Profundidad efectiva de las raíces [m]
Z_x	Profundidad máxima efectiva de las raíces [m]
Z_n	Profundidad mínima efectiva de las raíces [m]
θ	Contenido volumétrico de agua en el suelo [m^3 de agua / m^3 de suelo]
ψ_{stem} = SWP	Potencial hídrico del tallo [MPa]
ψ_{leaf} = LWP	Potencial hídrico foliar [MPa]

1. Introducción

La producción de alimentos y el uso de agua están relacionados de forma inseparable. El agua siempre ha sido el principal factor que limita la producción agrícola en gran parte del mundo, donde la precipitación no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Con la competencia cada vez mayor por recursos hídricos no renovables en todo el mundo y la creciente demanda de productos agrícolas, nunca antes ha sido tan apremiante la necesidad de mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua para la producción de cultivos, a fin de garantizar la seguridad alimentaria en el futuro y enfrentar las incertidumbres asociadas con el cambio climático.

Con el fin de analizar las alternativas para incrementar la eficiencia y productividad en el uso del agua, es necesario conocer la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. La naturaleza de esta relación es compleja, y se han realizado varios intentos para establecer planteamientos simplificados, pero razonables, que recopilen las características básicas de la respuesta.

La primera publicación de la FAO que presentó la relación entre el rendimiento de los cultivos y el consumo de agua fue la publicación N.º 33 del *Estudio de Riego y Drenaje*, *Yield Response to Water (Respuesta del rendimiento a la disponibilidad de agua)* (Doorenbos y Kassam, 1979). Este enfoque, que abordaremos en el capítulo 2, está basado en una única ecuación que indica la relación entre la pérdida relativa de rendimiento de cualquier cultivo (sea de una especie herbácea o leñosa) y la reducción relativa del consumo de agua (evapotranspiración), por medio de un coeficiente (k_y), específico para cada cultivo y condiciones. Este enfoque proporcionó un estándar ampliamente utilizado para las funciones de productividad del agua sintéticas, que aún se aplican en la actualidad. No obstante, esta simplificación convirtió este enfoque en una alternativa más adecuada para efectos de planificación general, diseño de proyectos y diagnóstico rápido, al ofrecer con frecuencia una aproximación básica.

Durante los últimos 35 años, nuevos descubrimientos han esclarecido los procesos que subyacen a la relación entre el rendimiento de los cultivos y el uso del agua, acompañados para la mejora de los recursos tecnológicos. Adicionalmente, han surgido nuevas necesidades en relación con la planificación y gestión del agua en la agricultura, incluidas aquellas que se derivan del cambio climático. En consecuencia, la FAO emprendió la tarea de revisar el enfoque para determinar el rendimiento de los cultivos en respuesta al uso y el déficit del agua. El producto final de este esfuerzo es un modelo de simulación de cultivos denominado *AquaCrop*, a través del cual se logra un equilibrio entre la precisión, simplicidad y solidez, como se describirá en el Capítulo 3. La conceptualización y el desarrollo de este enfoque de modelado son el resultado de muchos años de asesoramiento y cooperación con científicos, especialistas en cultivos y profesionales a nivel mundial, con el fin de consolidar el vasto cúmulo de conocimientos e información disponible desde 1979.

AquaCrop utiliza la ecuación original de Doorenbos y Kassam (1979) como punto de partida para calcular la biomasa del cultivo, en base a la cantidad de agua transpirada, y el rendimiento del cultivo como la proporción de biomasa que se concentra en las zonas cosechables. Una mejora importante es la diferenciación entre el consumo de agua no productivo (evaporación del suelo) y el consumo de agua productivo (transpiración). Además, la escala de tiempo en la ecuación original corresponde a las estaciones o etapas de crecimiento que duran varias semanas, mientras que *AquaCrop* usa una escala de tiempo diaria, a fin de representar de mejor manera la dinámica de la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua. Finalmente, el modelo permite realizar la

evaluación de las respuestas en diferentes escenarios derivados del cambio climático, en términos de los regímenes irregulares de agua y temperatura y la alta concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. *AquaCrop* simula el crecimiento, la productividad y el uso de agua de un cultivo día a día, según se vea afectado por condiciones cambiantes en la disponibilidad de agua y las condiciones ambientales. Los resultados de la calibración y las pruebas a las que se ha sometido el modelo hasta el momento constituyen una base sólida para confiar en su funcionamiento.

El desarrollo de parámetros estándar para cultivos ha permitido que el modelo esté disponible para diversos tipos de usuarios en diferentes disciplinas y en una amplia gama de aplicaciones. *AquaCrop* está dirigido principalmente a usuarios profesionales, como aquellos que trabajan en servicios de extensión, ingenieros consultores, distritos de riego, agencias gubernamentales y no gubernamentales, y varios tipos de asociaciones de agricultores, para su uso en el desarrollo de calendarios de riego y decisiones sobre gestión. Economistas y especialistas en la elaboración de políticas también pueden utilizar este modelo para la planificación y el análisis de escenarios. Además, los investigadores científicos pueden considerar el modelo útil como herramienta para el análisis y la conceptualización. En resumen, *AquaCrop* permite realizar una investigación adecuada para determinar la planificación y gestión estratégicas, a fin de mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua en la producción de cultivos herbáceos. No está diseñado para ser usado con árboles y vides.

El Capítulo 3 no sólo describe *AquaCrop*, sino que también presenta ejemplos de aplicaciones para propósitos específicos y lineamientos para la calibración.

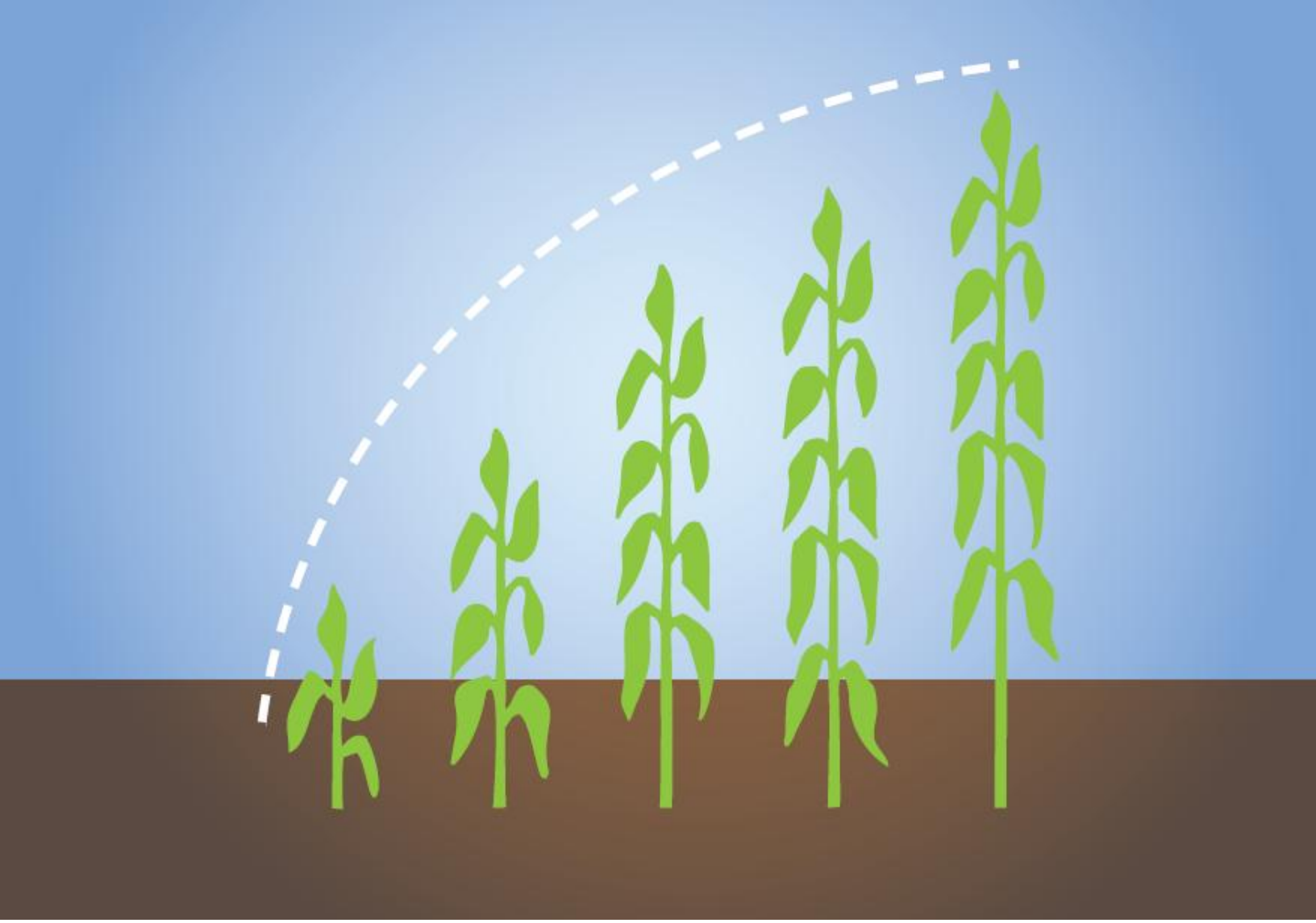
Además, el Capítulo 3 describe las características agronómicas de los 16 cultivos para los cuales el modelo ha sido calibrado y validado. Los cultivos incluidos son: trigo, arroz, maíz, soya o soja, cebada, sorgo, algodón, girasol, caña de azúcar, papa o patata, tomate, remolacha azucarera, alfalfa, maní bambara (guandsú), quinua y tef. Pronto se calibrarán otros cultivos y se describirán sus características agronómicas. El objetivo es presentar una descripción general de la fisiología y agronomía de cada cultivo para los usuarios interesados en implementar el modelo en un cultivo particular en una ubicación determinada. Asimismo, la descripción puede servir como referencia para la calibración del modelo en diferentes clases de cultivos. La descripción de cada cultivo incluye su crecimiento y desarrollo, uso del agua y productividad, respuestas ante el déficit hídrico y rendimientos esperados.

La producción de fruta o frutos ha cobrado mayor importancia en las últimas décadas, en el incremento de la productividad y competitividad de los pequeños agricultores en todo el mundo. La fruta o fruto no solamente ofrece mejores oportunidades de ingresos para los productores, sino que también es esencial para brindar a los consumidores productos alimenticios más saludables. La respuesta del rendimiento a la disponibilidad de agua de los árboles frutales y las vides constituye la segunda parte principal de esta *publicación*, la cual se presenta en el Capítulo 4. No obstante, la complejidad de los cultivos arbóreos, que resulta de los efectos de arrastre de un año a otro y de la amplia divergencia entre las variedades cultivadas, impide el uso de un enfoque de modelado relativamente sencillo como el que se utiliza en los cultivos herbáceos. Por tanto, en su lugar se presenta una *Guía*, la cual incluye una sección general sobre el sistema de riego de árboles frutales y vides, y una sección especial que abarca las características fisiológicas y agronómicas de cada especie de cultivo. Si bien la *sección general* presenta la información técnica y los lineamientos para lograr una gestión de riego eficiente, las secciones sobre cultivos individuales describen las respuestas específicas a la disponibilidad de agua, en un formato común que incluye los siguientes aspectos clave: crecimiento y desarrollo, requerimientos hídricos de los cultivos, respuesta del rendimiento al suministro de agua y estrategias sugeridas para el riego deficitario. El objetivo del Capítulo 4 es sintetizar los datos disponibles y generar funciones de producción para detectar las oportunidades que, en muchos casos, podrían ayudar a reducir el suministro de agua sin comprometer el rendimiento o los ingresos netos. Este capítulo enfatiza particularmente cómo proteger los ingresos netos de los agricultores y, en algunos casos, cómo mejorar la calidad del

fruto. Algunos de los cultivos que se incluyen en el Capítulo 4 son: olivos, cítricos, manzano, ciruelo, almendro, peral, durazno o melocotonero, nogal, pistacho, albaricoque, aguacate, cerezo dulce, vid y kiwi. A medida que se recopile más información, otros cultivos frutales y plantaciones se describirán y divulgarán a los usuarios a través de Internet.

Por último, el Capítulo 4 incluye algunos comentarios finales y las perspectivas hacia el futuro a partir de este *Estudio de investigación y desarrollo* N.º 66. Esta publicación viene acompañada por un disco compacto, donde el usuario encontrará la mayoría de productos informativos y directrices relevantes para su trabajo.

Esta nueva publicación proporcionará a los profesionales herramientas más sólidas para: evaluar la incidencia de la escasez de agua en la producción de cultivos; investigar el impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos; comparar los resultados de varios planes de suministro hídrico; optimizar los calendarios de riego (ya sean máximos, deficitarios o complementarios), y mejorar las estrategias de gestión para aumentar la productividad y el ahorro del agua.



Respuesta del rendimiento al agua: función original de producción del agua de la FAO

AUTORES PRINCIPALES
Martin Smith
(anteriormente FAO, División de Tierras y Aguas, Roma, Italia; jubilado actualmente)

Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Aguas, Roma, Italia)

2. Respuesta del rendimiento al agua: función original de producción del agua de la FAO

DESCRIPCIÓN GENERAL

A finales de los setenta, la **FAO** abordó la relación entre el rendimiento del cultivo y el uso del agua y propuso una ecuación sencilla que relacionaba la disminución relativa del rendimiento con la disminución relativa correspondiente en la evapotranspiración (ET). Concretamente, la respuesta del rendimiento a la ET se expresa como:

$$\left(1-\frac{Y_a}{Y_x}\right)=K_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

donde Y_x y Y_a son los rendimientos máximo y real, ET_x y ET_a son la evapotranspiración máxima y real, y K_y es el factor de respuesta del rendimiento que representa el efecto de una disminución de la evapotranspiración sobre las pérdidas de rendimiento. La ecuación 1 es una función de productividad del agua y puede ser aplicada a todos los cultivos agrícolas; es decir, herbáceos, arbóreos y vides.

El factor de respuesta del rendimiento (K_y) capta la esencia de las complejas relaciones que existen entre la producción y el uso del agua en un cultivo, donde ocurren procesos biológicos, físicos y químicos. La relación ha demostrado una notable validez y ha brindado un procedimiento utilizable para cuantificar los efectos de los déficits de agua sobre el rendimiento.

Este enfoque y los procedimientos de cálculo para estimar la respuesta del rendimiento al agua se publicaron en el *Estudio FAO: Riego y Drenaje* N.º 33 (Doorenbos y Kassam, 1979), considerado como una de las publicaciones hito de la FAO, y usado ampliamente en todo el mundo para múltiples aplicaciones.

En este capítulo, se exponen brevemente los procedimientos empleados para cuantificar la respuesta del rendimiento a los déficits de agua, usando la ecuación 1. Con el fin de que esté bien familiarizado con los procedimientos originales, el uso del factor K_y y sus aplicaciones, se remite al lector a la publicación original.

EL FACTOR DE RESPUESTA DEL RENDIMIENTO (K_y)

Los valores de K_y son específicos para cada cultivo y varían durante el período de crecimiento, según las etapas de crecimiento, así:

K_y >1: la respuesta del cultivo es altamente sensible al déficit hídrico, con una disminución del rendimiento proporcionalmente mayor que la disminución del uso del agua debido al estrés.

K_y <1: el cultivo es más tolerante al déficit hídrico y se recupera parcialmente del estrés, mostrando disminuciones del rendimiento proporcionalmente menores, debidas a la disminución del uso del agua.

K_y =1: la disminución del rendimiento es directamente proporcional a la disminución del uso del agua.

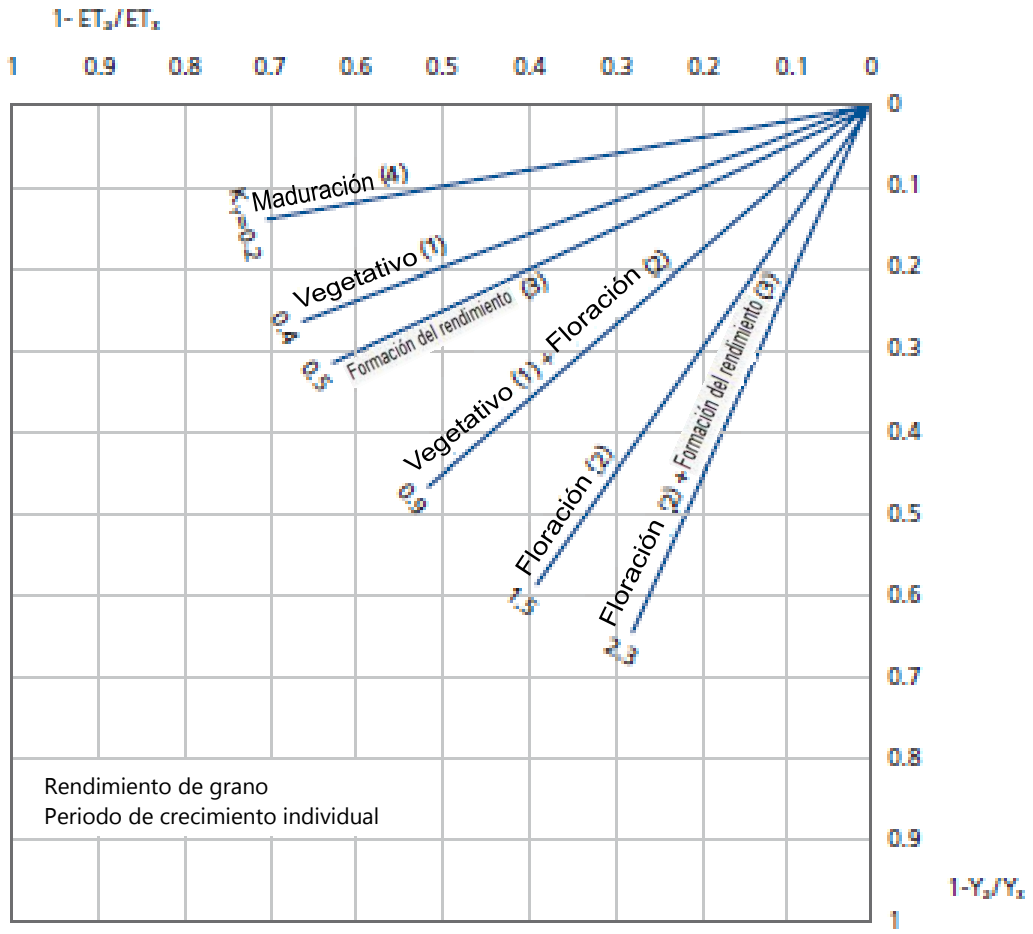
En base al análisis de una cantidad considerable de bibliografía disponible sobre las relaciones entre agua y rendimiento del cultivo, y riego deficitario, se obtuvieron los valores de K_y para varios cultivos (Tabla 1).

TABLA 1 Valores estacionales de Ky tomados del Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 33.

Cultivo	K_y	Cultivo	K_y
Alfalfa	1.1	Alazor o cártamo	0.8
Banano o plátano	1.2-1.35	Sorgo	0.9
Fríjol o judías	1.15	Soya o soja	0.85
Repollo	0.95	Trigo de primavera	1.15
Algodón	0.85	Remolacha azucarera	1.0
Maní o cacahuete	0.70	Caña de azúcar	1.2
Maíz	1.25	Girasol	0.95
Cebolla	1.1	Tomate	1.05
Guisantes o arvejas	1.15	Sandía	1.1
Pimiento	1.1	Trigo de invierno	1.5
Papa o patata	1.1		

El análisis de los estudios de riego deficitario también permitió –para la mayoría de cultivos– desarrollar funciones de respuesta del cultivo cuando se presentaba el déficit hídrico en distintas etapas del cultivo. Como se muestra en la Figura 1, para el maíz, la respuesta del rendimiento diferirá en gran medida dependiendo de la etapa en la que ocurra el estrés hídrico. Normalmente, las etapas de floración y formación del rendimiento son sensibles al estrés, mientras que el estrés que ocurre durante las fases de maduración tiene un impacto limitado –al igual que en la fase vegetativa– siempre que el cultivo pueda recuperarse del estrés en las etapas subsiguientes.

FIGURA 1 Funciones lineales de productividad del agua para el maíz, sujetas a déficits hídricos durante los períodos vegetativo, de floración, de formación del rendimiento y de maduración. A mayor pendiente (es decir, mayor valor de K_y), mayor será la disminución del rendimiento para una disminución dada de ET por déficits hídricos en el período específico.



PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO

El procedimiento de cálculo de la ecuación 1 para determinar el rendimiento real Y_a consta de cuatro pasos:

i. Estimar el máximo rendimiento (Y_x) de una variedad adaptada de cultivo, según su comportamiento genético y el clima, suponiendo que los factores agronómicos (p. ej., agua, fertilizantes, plagas y enfermedades) no son limitantes.
ii. Calcular la evapotranspiración máxima (ET_x) según metodologías establecidas y teniendo en cuenta que se han suministrado todos los requerimientos de agua del cultivo.
iii. Determinar la evapotranspiración real (ET_a) del cultivo en el caso específico, de acuerdo con el suministro de agua disponible para el cultivo.
iv. Evaluar el rendimiento real (Y_a) mediante la selección apropiada del factor de respuesta (Ky) para todo el período de crecimiento o en cada una de las distintas etapas de crecimiento.

RENDIMIENTO MÁXIMO (Y_x)

El *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 33* recomendó procedimientos para estimar el máximo rendimiento a partir de datos locales disponibles de rendimientos máximos de cultivos o basados en el cálculo de la biomasa máxima y el índice de cosecha correspondiente, mediante dos procedimientos diferentes:

I. Procedimiento de Wageningen (De Wit, 1968; Slabbers, 1978)
II. Enfoque de zona ecológica (Kassam, 1977)

Estos procedimientos de estimación del rendimiento fueron desarrollados a finales de los sesenta y en los setenta. Sin embargo, los avances importantes en agronomía y fisiología del cultivo permiten el uso de métodos más precisos para estimar los rendimientos máximos.

EVAPOTRANSPIRACIÓN MÁXIMA DEL CULTIVO (ET_x)

Los procedimientos para determinar la ET_x se basaron en las guías de la FAO para los requerimientos de agua en los cultivos (ET_c), y el componente ET_x de la ecuación 1, equivalente a ET_c, determinada como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) por el coeficiente de cultivo (K_c), es decir:

$$ET_x = K_c\, ET_o \qquad (2)$$

Los procedimientos originales para determinar la ET_o se describen en el *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 24* (Doorenbos y Pruitt, 1977), el cual presenta diferentes ecuaciones para calcularlo, de acuerdo con los datos climáticos disponibles. Se proporcionaron los valores del K_c para un gran número de cultivos y procedimientos para determinar la ET_C durante el período de crecimiento. Posteriormente, en el *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 56* (Allen et al., 1998), se introdujeron procedimientos modificados para calcular la ET_o según la ecuación Penman-Monteith de la FAO, que se ha convertido en el estándar para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia.

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DEL CULTIVO (ET_a)

Es muy difícil estimar con precisión la evapotranspiración real del cultivo. El *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 33* proporcionó tablas que podrían usarse para estimar la ET_a, a partir de datos de tasas de evapotranspiración, agua disponible en el suelo e intervalos de humedad. Sin embargo, las tablas eran engorrosas y más adelante fueron sustituidas por cálculos más precisos de la ET_a, basados en los cálculos diarios de balance de agua y métodos digitales de computación.

Los cálculos de balance de agua permiten determinar diariamente el nivel de agua disponible en el suelo en la zona radicular. Siempre que haya agua fácilmente extraíble del suelo para el cultivo, la $ET_a = ET_x$. Cuando se alcance el nivel de humedad crítico del suelo, definido como una fracción del contenido total de humedad del suelo (p), la transpiración disminuye por el cierre de los estomas, y por lo tanto, la $ET_a < ET_x$, hasta que el nivel de humedad del suelo en la zona radicular alcance el punto de marchitez permanente, cuando se asume ET_a como cero. Este contenido crítico de humedad del suelo se estima a partir de las características del suelo , del cultivo y del enraizamiento y de la tasa de ET_o. El agotamiento del contenido de humedad del suelo entre p y el punto de marchitez permanente dará como resultado una disminución proporcional de la ET_a.

El *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 56* proporciona procedimientos detallados para evaluar el impacto del estrés en la reducción de la evapotranspiración, con base en los cálculos del balance de agua, con parámetros sobre los valores de contenido crítico de humedad del suelo y profundidad de raíces.

RENDIMIENTO REAL DEL CULTIVO (Y_a) Y DISMINUCIÓN DEL RENDIMIENTO

Con base en el Y_x estimado y la ET_x y ET_a calculadas, el rendimiento real (Y_a) se puede determinar usando la ecuación (1).

Sin embargo, en muchos estudios de planificación y manejo que requieren la estimación del rendimiento según la disponibilidad de agua, la disminución del rendimiento se expresa en términos relativos; por ejemplo, como fracción o porcentaje $\left(1-\frac{Y_a}{Y_x}\right)$ más que como valor absoluto (Y_a).

De hecho, los errores de estimación del rendimiento real usando las funciones de productividad del agua son considerables, dada la naturaleza empírica de las relaciones y la incertidumbre al estimar los parámetros indicados anteriormente.

PROCEDIMIENTOS COMPUTARIZADOS DE CÁLCULO (CROPWAT)

El uso de funciones de productividad del agua, ecuación (1), se facilita usando el modelo CROPWAT (Smith, 1992), que proporciona procedimientos de computación para determinar las disminuciones del rendimiento en base al enfoque del *Estudio FAO: Riego y Drenaje* N.º 33, usando cálculos diarios de balance hídrico. CROPWAT ha sido usado ampliamente como una herramienta práctica de manejo del calendario de riego y para estimar las disminuciones del rendimiento en condiciones de déficit hídrico. Valores estándar de los parámetros del cultivo (K_c, p, profundidad de raíces, etc.) y de K_y se incluyen en el modelo y se pueden modificar para ajustarse a las condiciones locales.

CROPWAT incluye varios modelos para calcular la evapotranspiración de referencia a partir de datos climáticos diarios, decenales o mensuales, requerimientos de agua de los cultivos y requerimientos de riego a partir de los datos climáticos y del cultivo, además de los esquemas de suministro de agua para diversos patrones de cultivo. CROPWAT se diseñó como una herramienta práctica para realizar cálculos estándar para el diseño y manejo de los esquemas de riego, y para mejorar las prácticas de riego. También se puede emplear para los calendarios de riego en condiciones de riego completo o deficitario, y para esto emplea los factores de respuesta de rendimiento obtenidos a partir de las funciones de producción cultivo-agua sintetizadas en el *Estudio FAO: Riego y Drenaje* N.º 33. Para poder hacer los cálculos en un gran número de países, en el software CROPWAT se ha incluido una base de datos climáticos, CLIMWAT (Smith, 1993), con base en datos agrometeorológicos compilados por el servicio agrometeorológico de la FAO, que cuenta con más de 3 200 estaciones en 144 países y abarca desde 1961 hasta 1990.

LIMITACIONES Y APLICACIONES DEL ESTUDIO FAO: RIEGO Y DRENAJE N.º 33

Los procedimientos para estimar la respuesta de rendimiento al agua desarrollados por el *Estudio FAO: Riego y Drenaje* N.º 33 han tenido gran acogida entre los economistas e ingenieros, y se han usado en varias aplicaciones prácticas a nivel de campo, distrito, región, y nación. Durante muchos años, este enfoque en la función de producción del agua ha sido el estándar para la planificación y fue una contribución para muchos modelos económicos que tratan sobre la asignación del agua. Aún es útil cuando se necesita una primera aproximación rápida de la disminución del rendimiento relacionado con limitaciones hídricas, especialmente cuando se tienen que considerar simultáneamente cultivos herbáceos, arbóreos y vides. Se pueden encontrar ejemplos recientes de aplicaciones a nivel de cuencas (p. ej., Xiaojuan *et al.,* 2011), a nivel de campo (p. ej., Yacoubi *et al.,* 2010) y en sistemas de apoyo a la toma de decisiones (p. ej., Gastélum *et al.,* 2008).

Mientras que el enfoque del Estudio *FAO: Riego y Drenaje N.º 33* se basa firmemente en los principios del consumo de agua en los cultivos, la simplificación introducida usando un factor empírico de respuesta de rendimiento (K_y) para integrar las relaciones complejas entre la producción y el consumo de agua para la producción del cultivo, limita su aplicabilidad para realizar estimaciones precisas de las respuestas del rendimiento al agua. Además, aparte del agua, otros factores como los nutrientes, las distintas variedades cultivadas, etc., también influyen en la respuesta al agua. De hecho, si se busca más precisión, habría que hacer ajustes para las condiciones específicas del sitio. La determinación de los valores del K_y después de la investigación adaptativa se ha llevado a cabo en numerosos estudios para varios cultivos y en diferentes ambientes. Los resultados han mostrado un amplio rango de variaciones de los valores del K_y y sugieren que la variación del K_y en el cultivo puede ser tan marcada como la que ocurre entre un cultivo y otro (Stanhill *et al., 1985).*

Para ejemplificar las diferencias en los valores del K_y obtenidos en diferentes estudios, a manera de ilustración, se pueden comparar los resultados de un programa cooperativo de investigación llevado a cabo por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) con los valores originales del K_y que aparecen en el *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 33*. La Tabla 2 presenta un resumen de la comparación de los valores del K_y, como aparecen publicados en el *Informe sobre el agua, FAO, N.º 22, Riego deficitario,* 2002.

A pesar de la solidez del enfoque de la función de producción, las diferencias en los valores del K_y de las dos publicaciones son considerables, y no se puede extraer una tendencia específica de las desviaciones de los valores del K_y bajo condiciones distintas. Se puede concluir que la aplicación del enfoque de la función de producción del agua ha demostrado ser útil para la planificación general, el diseño y el funcionamiento de los proyectos de riego y para la evaluación rápida de las disminuciones del rendimiento en condiciones limitadas de suministro de agua. Se han encontrado aplicaciones que van desde las asignaciones del suministro de agua entre cultivos durante períodos de escasez de agua, hasta diversos estudios en el ámbito nacional o regional, donde prevalecen las condiciones generalizadas de cultivo.

Para la mejora de prácticas y estrategias relacionadas con el manejo agrícola del agua, con el fin de mejorar la eficiencia y la productividad del uso del agua, la ecuación 1 es de uso limitado y se requieren predicciones más precisas de la respuesta del rendimiento bajo las condiciones reales del campo. *AquaCrop* (capítulo 3) proporciona una alternativa válida para los cultivos herbáceos, puesto que la incorporación de conocimientos avanzados de las relaciones entre agua y cultivo permiten modelar con más precisión los procesos de formación del rendimiento y crecimiento del cultivo real, bajo diversas condiciones de fertilidad del suelo, clima y disponibilidad de agua.

TABLA 2 Comparación de los valores del K_y del *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 33* con los de las investigaciones del IAEA (FAO, 2002) en diferentes etapas de desarrollo del cultivo. Tr-0000=déficit de agua que se presenta durante todo el período; Tr-0111=déficit de agua que se presenta durante la etapa inicial del cultivo; Tr-1011=déficit de agua que se presenta durante el desarrollo del cultivo; Tr-1101=déficit de agua que se presenta a mediados del período; Tr-1110=déficit de agua que se presenta al final del período. Cuando el IAEA reporta valores diferentes del K_y para el mismo cultivo, se refieren a resultados experimentales de distintos países o a resultados experimentales de distintas ubicaciones en el mismo país

Cultivo	Tr-0000			Tr-0111			Tr-1011			Tr-1101			Tr-1110		
	FAO	IAEA	(%)	FAO	IAEA	(%)	FAO	IAEA	(%)	FAO	IAEA	(%)	FAO	IAEA	(%)
Fríjol o judías	1.15	0.59	-49	0.20	0.38	90	1.10	1.75	59	0.75	1.44	92	0.20	0.06	-70
	1.15	1.43	24	0.20	0.56	180	1.10	1.35	23	0.75	0.87	16	0.20	0.17	-15
Algodón	0.85	1.02	20	0.20	0.75	275	0.50	0.48	-4				0.25		
	0.85	0.71	-16	0.20	0.80	300	0.50	0.60	20		0.05				
	0.85	0.99	16				0.50	0.76	52						
Maní o cacahuete	0.70			0.20			0.80	0.74	-8	0.60			0.20		
Maíz	1.25	1.33	6	0.40			1.50			0.50			0.20		
Papa o patata	1.10			0.60	0.40	-33		0.33		0.70	0.46	-34	0.20		
Soya o soja	0.85			0.20	0.56	180	0.80	1.13	41	1.00	1.76	76			
Caña de azúcar	1.20			0.75	0.20	-73		1.20		0.50	1.20	1.40	0.10		
	1.20			0.75	0.40	-47		1.20		0.50	1.20	140			
Girasol	0.95	0.91	-4	0.40	1.19	198	1.00	0.94	-6	0.80	1.14	43			
Trigo de primavera	1.15	1.32	15	0.20	0.55	175	0.65	0.90	38	0.55	0.44	-20		0.25	
Trigo de invierno	1.00	0.87	-13	0.20	2.24	1170	0.60	0.81	35	0.50	0.48	-4		0.62	

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. En: *Estudio FAO: Riego y drenaje* N.º 56. Roma, FAO.

De Wit, C.T. 1968. *Plant production.* En: Miscellaneous Papers Landbouw Hogeschool, Wageningen N.º 3: 25-50.

Doorenbos, J. y Kassam, A.H. 1979. Respuesta del rendimiento al agua. *Estudio FAO: Riego y drenaje* N.º 33. Roma, FAO.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1977. Requerimientos de agua en el cultivo. *Estudio FAO: Riego y drenaje* N.º 24. Roma, FAO.

FAO. 2002. Prácticas de riego deficitario. Informes sobre el agua N.º 22. Roma.

Gastélum, J. R., Valdés, J.B. y Stewart, S. 2008. A decision support system to improve water resources management in the Conchos basin. *Water Resources Management* 23:1519-1548.

Kassam, A.H. 1977. Net biomass production and yield of crops. *Present and potential land use by agro-ecological zones project.* Roma, FAO.

Slabbers, P.J., Sorbello, V. y Stapper, M. 1978. Evaluation of simplified water-crop yield models. *Agricultural Water Management.*

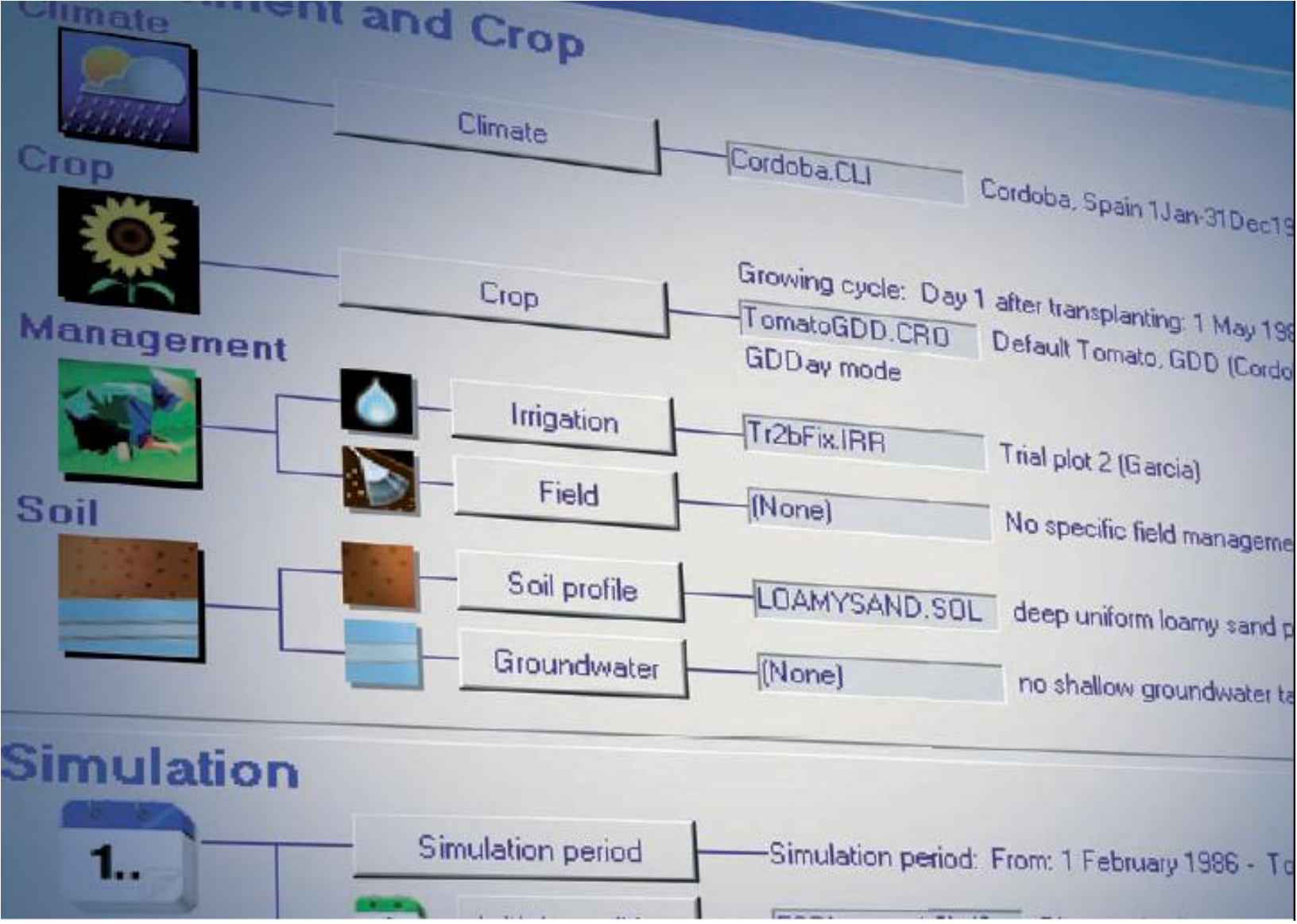
Smith, M. 1992. CROPWAT. A computer programme for irrigation planning and management. En: *Estudio FAO: Riego y drenaje* N.º 46. Roma, FAO.

Smith M. 1993. CLIMWAT para CROPWAT. Estudio FAO: *Riego y drenaje* N.º 49. Roma, FAO.

Stanhill, G., Lake, J.V. y Rudd-Jones, D. 1985. The Water Resource for Agriculture. *Philosophical Transactions. Royal Society Biological Series.* Londres 310:161-173.

Xiaojuan, L., Ling, T., Shaozhong, K. y Fusheng, L. 2011. Comparison of spatial interpolation methods for yield response factor of winter wheat and its spatial distribution in Haihe basin of north China. *Irrigation Science,* Voulmen 29, Edición 6, págs. 455-468.

Yacoubi, S., Zayani, K., Zapata, N., Zairi, A., Slatni, A., Salvador, R. y Playa'n, E. 2010. Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield. *Biosystems Engineering,* Volumen 107, Págs. 25-35.



Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación *AquaCrop*

Editores:

Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia)

Dirk Raes
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica)

3. Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación *AquaCrop*

Este capítulo presenta las principales características de *AquaCrop,* el modelo dinámico de crecimiento de cultivos desarrollado para predecir la respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua. El fundamento científico de *AquaCrop* ha sido descrito previamente (Steduto *et al.,* 2009; Raes *et al.,* 2009; Hsiao *et al.,* 2009), y aquí únicamente se explican brevemente los conceptos básicos y los procedimientos fundamentales de cálculo, acompañados de descripciones adicionales relacionadas con los requerimientos de datos de entrada, la interfaz del usuario y los resultados del modelo. Se presentan algunos ejemplos de aplicaciones con el fin de ilustrar la utilidad de *AquaCrop* para efectos de evaluación comparativa, programación del riego, y para estudiar los efectos de varios tipos de suelos, prácticas de manejo de los cultivos y el impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos y la productividad del agua. Por último, se incluyen guías para parametrización, calibración y validación de*AquaCrop*. Se recomienda al lector consultar el *Manual de Referencia de AquaCrop* (Raes *et al.,* 2011) si desea conocer más acerca del funcionamiento del modelo y los detalles completos de los algoritmos.

3.1 *AquaCrop:* conceptos, fundamento y funcionamiento

AUTORES PRINCIPALES

Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia)

Dirk Raes
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica)

Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.)

Elias Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)

EVOLUCIÓN DE LOS CONCEPTOS EN LA RESPUESTA DEL RENDIMIENTO AL AGUA

La radiación solar interceptada es la fuerza que impulsa la transpiración y la fotosíntesis del cultivo. Por tanto, existe una relación directa entre la producción de biomasa y el agua consumida a través de la transpiración. El estrés hídrico y la disminución de la transpiración tienen como resultado una reducción en la producción de biomasa, lo cual generalmente también reduce el rendimiento. El enfoque de la respuesta del rendimiento al agua adoptado en el *Estudio FAO: Riego y Drenaje* N.º 33 (Doorenbos y Kassam, 1979), relaciona una reducción de la evapotranspiración con una disminución proporcional del rendimiento. Como se mencionó en el Capítulo 2, el enfoque presenta dos inconvenientes como resultado de la agregación de variables; es decir, rendimiento final en lugar de sus componentes y evapotranspiración en lugar de transpiración solamente. En consecuencia, el factor de respuesta del rendimiento demostró ser significativamente variable en varios casos.

Conservando el concepto original de un vínculo directo entre el uso del agua en el cultivo y su rendimiento, el modelo *AquaCrop* evolucionó a partir del enfoque del *Estudio FAO: Riego y Drenaje* N.º 33 (Ecuación 1, Capítulo 2), al separar la evaporación del suelo no productiva (E) de la transpiración del cultivo productiva (Tr) y al estimar la producción de biomasa directamente a partir de la transpiración del cultivo real mediante un parámetro de productividad del agua. Los cambios conducen a la siguiente ecuación, que es fundamental para el motor de crecimiento de *AquaCrop*:

$$B = WP \cdot \Sigma Tr \qquad (1)$$

Donde B es la biomasa acumulada producida (kg por m^2), Tr es la transpiración del cultivo (ya sea mm o m^3 por unidad de superficie), con la suma respecto al tiempo en el que se produce la biomasa; y WP es el parámetro de productividad del agua (kg de biomasa por m^2 y por mm, o kg de biomasa por m^3 de agua transpirada).

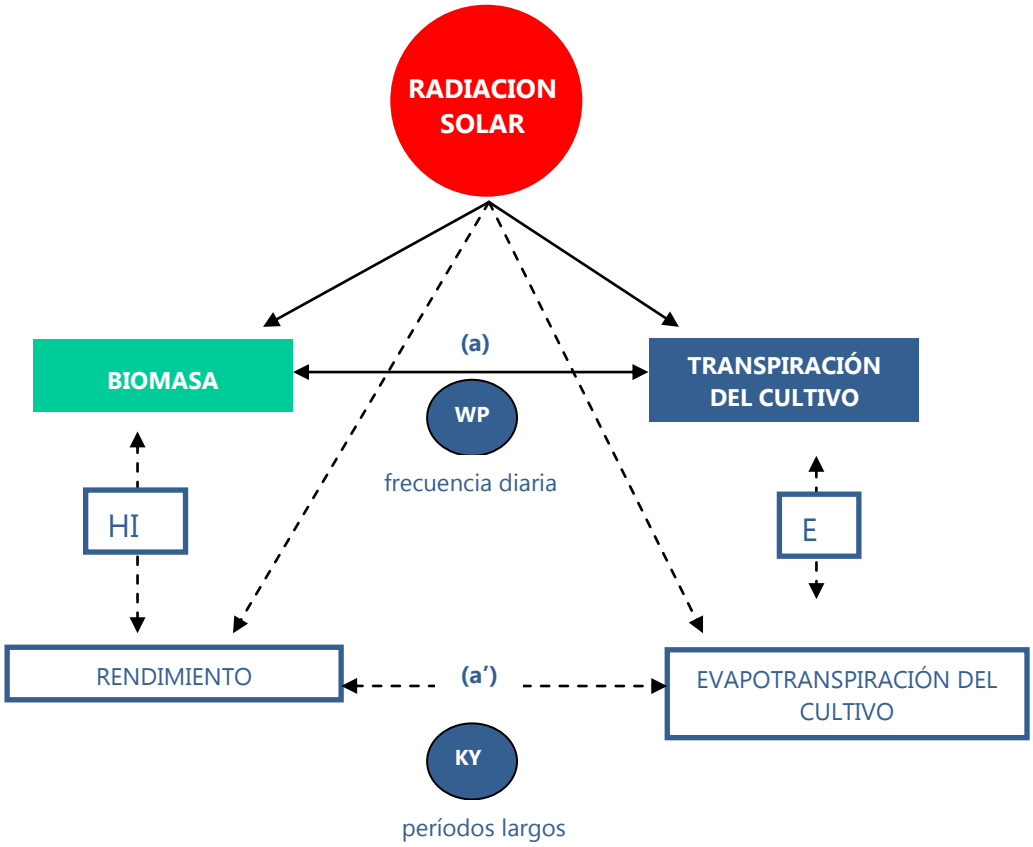
En la mayoría de los cultivos, solo una parte de la biomasa producida se destina a los órganos cosechables para producir rendimiento (Y), y la relación entre el rendimiento y la biomasa se conoce como índice de cosecha (HI), por tanto:

$$Y = HI \cdot B \qquad (2)$$

Los procesos subyacentes que culminan en B y HI se diferencian claramente entre sí. En consecuencia, la separación de Y en B y HI permite considerar los efectos de las condiciones ambientales y el estrés en B y HI por separado.

La comprensión de las relaciones cultivo-agua-rendimiento ha mejorado notablemente desde 1979 y ha permitido dar un paso adelante a partir de la ecuación (1) del Capítulo 2 hacia las ecuaciones (1) y (2) de este Capítulo. La WP, cuando se normaliza por la demanda evaporativa, se comporta de forma conservativa (Steduto *et al,* 2007). Es decir, que la WP normalizada (designada como WP*) se mantiene prácticamente constante en diversos ambientes. Esto tiene implicaciones cruciales para la solidez del modelo, el cual se ve reforzado aún más a través del cálculo día a día del índice de cosecha durante el período de formación del rendimiento. Un mayor conocimiento sobre las respuestas de las plantas al estrés hídrico en escalas cortas de tiempo (de segundos a horas), la capacidad de cálculo mejorada y procedimientos más precisos para determinar a diario el estado de humedad del suelo hicieron posible la simulación en intervalos diarios. Esto permitió el importante cambio de un enfoque estático a un modelo dinámico de crecimiento. La figura 1 muestra un esquema de la evolución de *AquaCrop,* de la ecuación (1) del Capítulo 2 a las Ecuaciones (1) y (2) de este Capítulo.

FIGURA 1 Evolución de *AquaCrop,* de la ecuación (1) del Capítulo 2, con base en la incorporación de dos pasos intermedios: la separación de la evaporación del suelo (E) de la transpiración del cultivo (Tr) y la obtención del rendimiento (Y) de la biomasa (B) y el índice de cosecha (HI). La relación **(a'),** que vincula el rendimiento con la evapotranspiración del cultivo se expresa a través de la ecuación (1) del Capítulo 2 mediante el parámetro K_y y generalmente se aplica a períodos largos. La relación **(a),** que vincula la biomasa a la transpiración del cultivo, se expresa a través de la ecuación (1) de este capítulo mediante el parámetro WP y tiene una frecuencia diaria.



ESTRUCTURA Y COMPONENTES DEL *AQUACROP*

AquaCrop es un modelo dinámico que simula el rendimiento alcanzable de los cultivos herbáceos como una función del consumo de agua. Además de sus funciones principales, representadas en las ecuaciones (1) y (2), se incorporó un amplio conjunto de componentes adicionales del modelo, entre ellos:

- el **clima,** con su régimen térmico, precipitaciones, demanda de evaporación y concentración de dióxido de carbono;
- el **cultivo,** con sus procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento;
- el **suelo,** con su balance de agua (y de sales);
- el **manejo,** con prácticas que incluyen riego, fertilización y acolchado del suelo.

AquaCrop permite realizar simulaciones de la respuesta del rendimiento al agua bajo diversas condiciones ambientales y de manejo, incluidos escenarios derivados del cambio climático; sin embargo, al igual que la mayoría de los modelos de cultivo, no contempla los efectos de plagas ni enfermedades.

En esta Sección se describen brevemente estos componentes fundamentales de *AquaCrop* y sus funciones. Para obtener información más detallada, se recomienda al usuario consultar el *Manual de Referencia de AquaCrop* (Raes *et al.,* 2011), el cual se actualiza con frecuencia a medida que se desarrolla el modelo.

El clima

El ambiente atmosférico se identifica mediante cuatro variables meteorológicas diarias: temperaturas máxima y mínima del aire (T_x y T_n, respectivamente), precipitación y demanda de evaporación de la atmósfera expresada como evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se calcula de acuerdo a la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Además, se requiere la concentración media anual de dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera. La temperatura incide en el desarrollo de los cultivos (fenología). Los efectos adicionales de temperaturas más extremas son la reducción de WP (por tanto la acumulación de biomasa) cuando el clima es demasiado frío, y reducción de la polinización (por ende, del HI) cuando el clima es demasiado frío o cálido. La precipitación, el riego y la ET_o son aspectos determinantes del balance de agua de la zona radicular del suelo y del estrés hídrico. La concentración atmosférica de CO_2 incide en la WP, la expansión del dosel y la conductancia estomática. T_x, T_n, ET_o y la precipitación se derivan de los registros habituales de las estaciones agrometeorológicas. Sin tener en cuenta su aumento constante a través de los años, la concentración atmosférica de CO_2 varía con un ciclo anual y también según la ubicación. Estas fluctuaciones son menores y de poca importancia si se considera su impacto en los cultivos. Para simplificar, *AquaCrop* proporciona, como valores predeterminados, la concentración atmosférica media anual de CO_2 desde 1902 hasta el último año medido en el Observatorio de Mauna Loa en Hawái. Los usuarios pueden introducir su propio set de datos o la concentración de CO_2 prevista de acuerdo con escenarios de cambio climático determinados previamente.

El cultivo

El componente de cultivo en el modelo incluye los siguientes subcomponentes: fenología, cobertura del dosel, profundidad de raíces, transpiración del cultivo, evaporación del suelo, producción de biomasa y rendimiento cosechable.

Después de su emergencia, el cultivo crece y se desarrolla durante su ciclo de crecimiento, en el cual amplía su dosel y profundiza su sistema radicular, transpira agua y acumula biomasa, al tiempo que avanza por sus etapas fenológicas. El índice de cosecha (HI) modifica el porcentaje de biomasa

que será aprovechable. Es importante tener en cuenta que en *AquaCrop,* aparte de la partición de la biomasa en rendimiento, no existe ninguna otra división entre los diversos órganos de la planta. Esta selección permite evadir la complejidad e incertidumbres asociadas con los procesos de partición, los cuales continúan siendo los más difíciles de modelizar. Las relaciones entre raíz y tallo (biomasa) o dosel en *AquaCrop* no son directas. En su lugar, el ritmo de profundización de las raíces se desacelera mediante una función empírica, una vez que el estrés se convierte lo suficientemente severo para iniciar un cierre estomático parcial.

Fenología

Las etapas del desarrollo del cultivo y su duración son, con frecuencia, características diferenciadoras de las diferentes variedades de un mismo cultivo, y el usuario debe especificarlas según la variedad en cuestión. *AquaCrop* utiliza los *grados día acumulados* (GDD) como el reloj interno predeterminado para tener en cuenta los efectos de los regímenes de temperatura en la fenología. No obstante, la simulación se ejecuta y se muestra en intervalos diarios (días del año). Los GDD se calculan según los procedimientos descritos por McMaster y Wilhelm (1997), con la excepción de que la temperatura mínima (T_n) no se modifica de modo que sea equivalente a la temperatura base cuando desciende por debajo de la temperatura base en el cálculo. Se considera que esto representa mejor los efectos perjudiciales o inhibitorios del frío en los procesos de las plantas.

AquaCrop se puede aplicar a los principales tipos de cultivos herbáceos: cultivos de fruto o grano; cultivos de tubérculos y raíces o cultivos de tallos reservantes; cultivos hortalizas de hoja o de flor cortada, y cultivos forrajeros que generalmente se someten a varios cortes por campaña. Para todos estos tipos, excepto para los cultivos forrajeros, las etapas clave de desarrollo son: emergencia, inicio de la floración (antesis) o iniciación de raíces/tubérculos/tallos reservantes (etapa en la que se alcanza la profundidad máxima de raíces), inicio de la senescencia del dosel y maduración fisiológica. En el caso de los cultivos forrajeros, es posible que la lista se reduzca a solo la emergencia o inicio del rebrote en primavera, tiempo de cortes e inicio de senescencia.

Las diferencias genéticas entre especies requieren la calibración del modelo para cada una de ellas. Aunque es posible que algunas variedades de cultivo requieran ciertos ajustes de parámetros en el modelo calibrado, además de la fenología, la calibración y validación, usando datos de diferentes estudios en varias partes del mundo ha brindado más confianza en que la mayoría de los parámetros fundamentales que se consideran conservativos (prácticamente constantes) se podrán aplicar incluso a diferentes variedades. Los parámetros calibrados disponibles al menos deberán servir como valores iniciales sólidos, los cuales se pueden ajustar si el set de los datos fiables, utilizados para probar los valores, indican claramente tal necesidad. En este sentido, cabe señalar que las calibraciones se deben realizar con datos obtenidos de cultivos que no hayan presentado ninguna limitación de nutrientes minerales durante su desarrollo, dado que las deficiencias de nutrientes principales (N, P y K) alteran, en cierta medida, varios parámetros conservativos en *AquaCrop*.

Desarrollo del dosel

La cobertura del dosel (CC), más exactamente la cobertura del dosel verde, es una característica crucial de *AquaCrop*. Su expansión, envejecimiento y senescencia, junto con su conductancia que es controlada por los estomas, determinan la cantidad de agua transpirada, lo que a su vez determina la cantidad de biomasa producida. Expresar la cantidad de follaje en términos de cobertura del dosel (en fracción o porcentaje) y no como el índice de área foliar (LAI) es una de las características particulares de *AquaCrop*. Esto da como resultado una simplificación considerable de la simulación y permite al usuario introducir valores reales de CC, incluso si sólo se estiman de manera visual. Además, la CC se puede obtener fácilmente a través de teledetección, ya sea para verificar la CC simulada o como dato de entrada para *AquaCrop*.

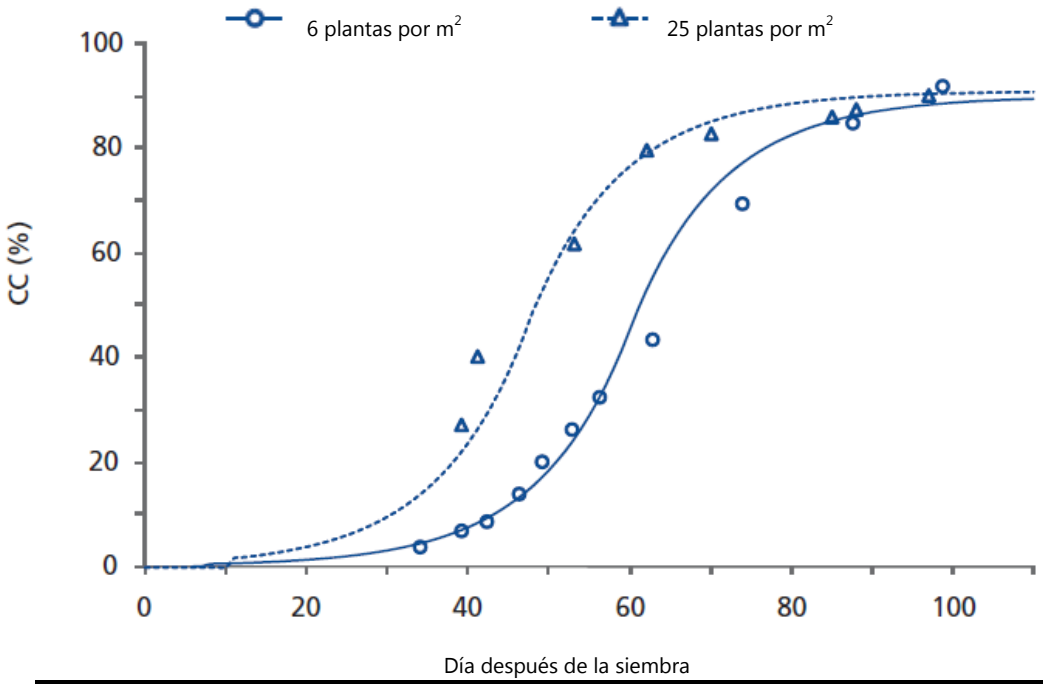
Para la primera mitad del incremento de CC o de la curva de desarrollo, se utiliza una ecuación exponencial para la simulación, análoga a la ecuación del porcentaje de crecimiento relativo. Específicamente,

$$CC = CC_O \cdot e^{CGC \cdot t} \quad (3)$$

donde CC es la fracción de suelo cubierta por el dosel cuando el tiempo es t, CC_o es la CC inicial (cuando t = 0), también en fracción, y CGC es el coeficiente de crecimiento del dosel en fracción o porcentaje de la CC existente cuando el tiempo es igual a t. CC_o es un agregado de doseles de diversas plantas y se calcula multiplicando la densidad de la plantación por la media del tamaño del dosel por planta (cc_o). El modelo utiliza esta función para explicar los efectos de la densidad de la plantación en el tamaño del dosel. Para las simulaciones que inician en la emergencia, cc_o se define como el tamaño del dosel del promedio de las plántulas al 90% de emergencia. Se realizó la evaluación del valor de cc_o en un número de especies de cultivos y se encontró que es conservativo; de modo que es posible que únicamente se requieran ajustes menores para variedades específicas. El CGC también es conservativo, siempre que se exprese como GDD. Esto se demostró para un número de especies de cultivos, cuando el mismo CGC reveló una predicción favorable para el desarrollo del dosel a lo largo del tiempo en un número de variedades en diferentes lugares de todo el mundo (por ej., Hsiao *et al.,* 2009; Heng *et al.,* 2009, para el maíz).

La CC que se calculó con la ecuación (3) durante el período de desarrollo del dosel se compara con valores medidos en la Figura 2. También se muestra la diferencia en el desarrollo del dosel debido a la densidad de la planta. Como se señaló anteriormente, el hecho de que la CC_o sea el producto de la cc_o y la densidad de la plantación nos ofrece un procedimiento, basado en razonamientos simples pero fundamentales, para dar cuenta de las variaciones en la densidad.

FIGURA 2 Ejemplo del desarrollo del dosel simulado con las ecuaciones 3 y 4 (líneas), comparado con los datos medidos del dosel (símbolos) para dos diferentes densidades de plantación de algodón. Las líneas punteadas y continuas representan 25 y 6 plantas/m^2, respectivamente. Las simulaciones se realizaron con el mismo valor de CGC y cc_o. Los datos medidos se obtuvieron de dos variedades de cultivo diferentes, una con densidad baja y otra con densidad alta, cultivadas en años diferentes en dos lugares diferentes en California. Fuente: T.C. Hsiao y R. Radulovich, datos no publicados.



El concepto subyacente a la ecuación (3) (Bradford y Hsiao, 1982) se basa en el argumento de que, cuando la cobertura verde del dosel es escasa, el crecimiento del dosel, el cual depende del tamaño actual del dosel para captar la radiación y realizar la fotosíntesis, debe ser proporcional al tamaño del dosel en ese día. Ello da lugar al uso de una ecuación exponencial de crecimiento con un coeficiente constante para simular el desarrollo del dosel hasta la mitad de la CC máxima. Cuando el dosel sigue creciendo y abarca más de la mitad del suelo, la captación de radiación solar y la fotosíntesis empiezan a aumentar menos en proporción con el incremento de la CC, a causa de la sombra que las plantas se proporcionan mutuamente.

Por tanto, la ecuación (3) pierde su validez y, para la segunda mitad del desarrollo del dosel, CC adopta una ecuación exponencial de descomposición,

$$CC = CC_x - 0.25\,(CC_x^2/CC_0)\,e^{-CGC \cdot t} \qquad (4)$$

donde CC_x es la cobertura máxima del dosel bajo condiciones óprimas. *AquaCrop* permite realizar simulaciones con la Ecuación (3) hasta el punto en que CC = 0.5 CC_x, luego cambia al simular con la Ecuación (4) hasta que se alcanza la CC_x. Con base en varios estudios, se proporcionan los valores predeterminados de CC_x para los cultivos calibrados. Dado que la CC_x también se determina mediante la densidad de la plantación, una opción de manejo agrícola, el usuario deberá ajustar la CC_x predeterminada según la situación real del campo.

A medida que el cultivo se aproxima a la maduración, la CC entra en una fase decreciente como consecuencia de la senescencia foliar. La disminución de la cobertura del dosel verde en *AquaCrop* está caracterizada por un coeficiente empírico de disminución del dosel, con unidades de reducción fraccionaria de la CC por unidad de tiempo, y se puede ajustar de modo que se amplíe o reduzca el interbalo de tiempo requerido para abarcar desde el inicio de la senescencia hasta el momento en que desaparezca por completo la cobertura de dosel (CC = 0).

El punto de inicio de la senescencia del dosel es crucial porque determina la duración de la cobertura en el momento en que es más efectivo en cuanto a la fotosíntesis. A medida que inicia la senescencia, tanto la transpiración como la fotosíntesis disminuyen y la acumulación de biomasa se reducen. Debe considerarse que la senescencia del dosel empieza en el momento en que la senescencia foliar (evidente por el amarilleamiento de las hojas) sea significativa, pero sólo cuando la cobertura del dosel del suelo esté incompleta y el LAI no sea superior de 3 a 4.

La calibración de la senescencia requiere observaciones de campo precisas o la medición del LAI durante la última fase próxima a la maduración, ya que no existe una forma efectiva para determinar la cobertura del dosel verde durante esta etapa, debido a la interferencia de las hojas amarillas o muertas. A partir del LAI se puede determinar la CC utilizando ecuaciones que se pueden encontrar en la bibliografía sobre el tema, las cuales se han obtenido al revertir la CC con respecto al LAI (ver Sección 3.3). La Figura 3 describe la progresión de la CC durante un ciclo de cultivo completo bajo condiciones libres de estrés, según se simularon con las ecuaciones (3) y (4), y el CDC, según las mediciones en un cultivo.

Profundización de las raíces

La absorción de agua por las raíces en *AquaCrop* se simula definiendo la profundidad efectiva de las raíces (Z_e) y el patrón de extracción de agua. La Z_e en el momento de la siembra hasta el punto previo a la emergencia corresponde a la profundidad del suelo en la cual la semilla en germinación o plántula naciente puede extraer agua. Para efectos del cálculo del balance de agua en *AquaCrop,* generalmente se considera adecuada una profundidad efectiva de raíces mínima de 0.2 a 0.3 m (Z_n) al inicio. Algunos estudios revelan que, en condiciones favorables, las raíces mantienen una tasa de profundización relativamente constante, hasta el momento en que el fruto o grano empieza a acumular la mayoría de los asimilados fotosintéticos. Es probable que la profundización de las

raíces disminuya su ritmo en este punto. *AquaCrop* simula esta característica con una función exponencial que hace que la profundización de la zona radicular después de la siembra sea más rápida en una etapa inicial que en un momento posterior del ciclo biológico del cultivo (Figura 4).

Bajo óptimas condiciones, sin restricciones en el suelo, se prevé alcanzar la profundidad máxima efectiva de raíces (Z_x) casi al final del ciclo biológico del cultivo, cerca del inicio de la senescencia del dosel. En caso de que, a una profundidad determinada, una capa del suelo limite el crecimiento de las raíces, éstas continuarán avanzando a un ritmo normal hasta alcanzar la capa restrictiva y luego se detendrán por completo (Figura 4). Asimismo, un nivel freático poco profundo limitará las raíces hasta la profundidad que éste posea.

FIGURA 3 Ejemplo del avance de la cobertura del dosel verde durante el ciclo biológico de un cultivo bajo condiciones libres de estrés, para el maíz.

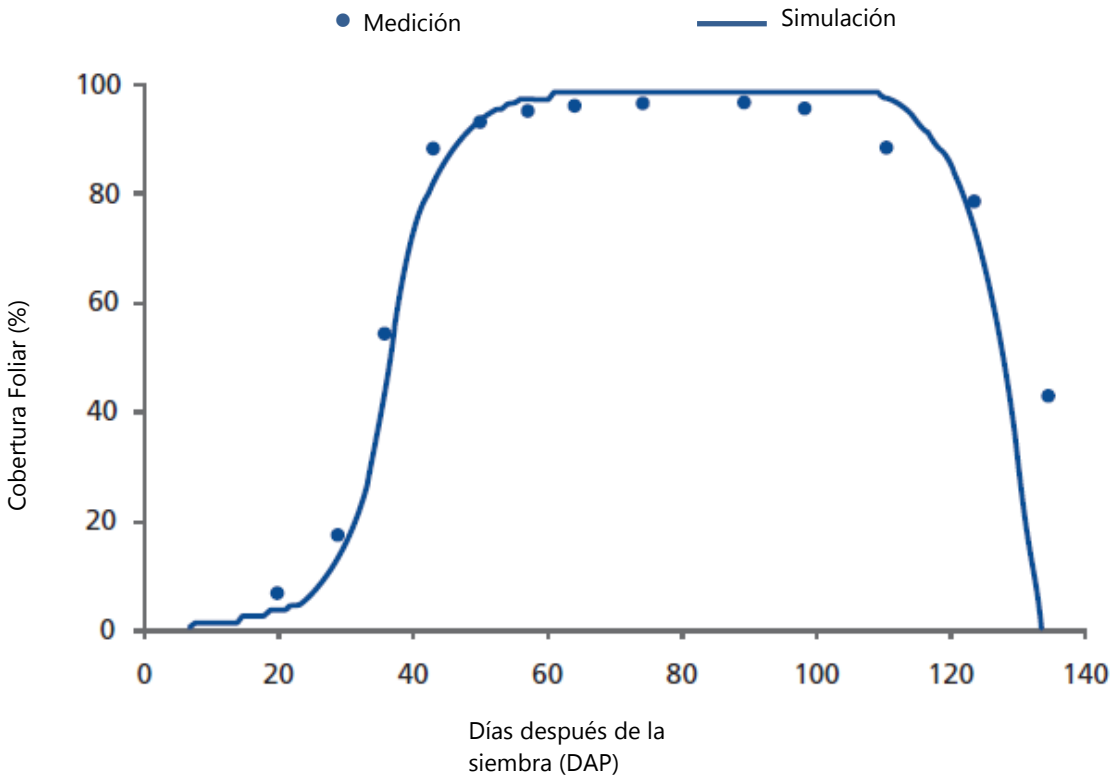
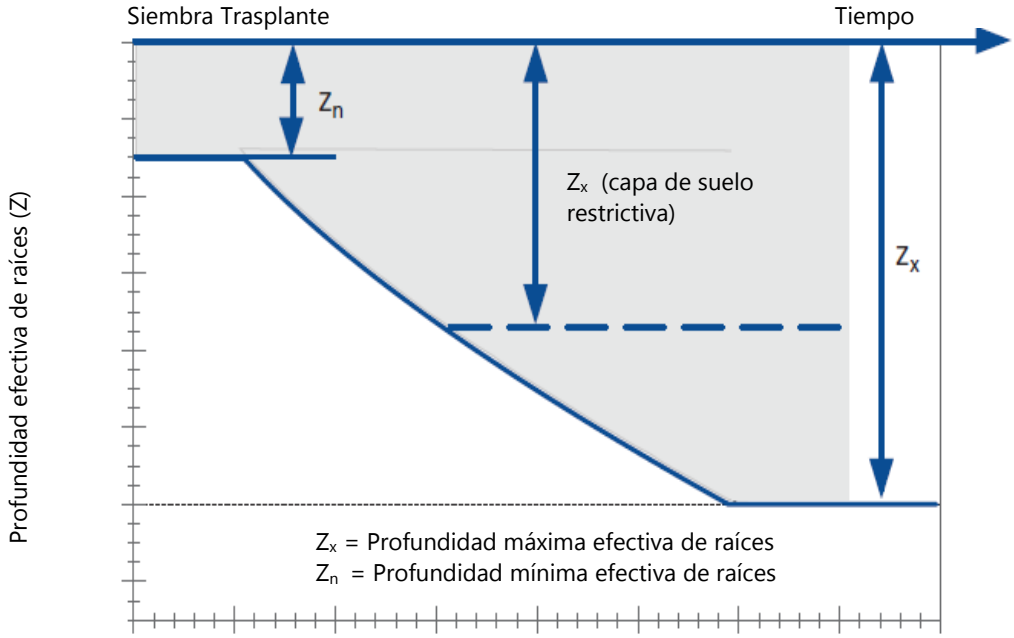


FIGURA 4 Esquema general de la profundidad de las raíces en función del tiempo, en la presencia (línea punteada) y ausencia (línea continua) de una capa de suelo restrictiva que limita el crecimiento de las raíces.



La extracción de agua por parte de las raíces sigue el patrón común utilizado en las simulaciones. Es decir, el 40 por ciento, 30 por ciento, 20 por ciento y 10 por ciento del agua requerida se absorbe desde el cuarto superior al cuarto inferior de Z_e, cuando el contenido de agua es adecuado. El patrón puede ser modificado por el usuario, en casos específicos justificados por las características físicas o químicas del suelo.

Transpiración del cultivo

La transpiración por unidad de superficie del suelo depende de la fracción de la superficie del suelo cubierta por el dosel (CC) cuando no hay estrés suficiente para limitar la apertura estomática. La dependencia no es estrictamente lineal, porque la micro-advección entre hileras suministra energía al dosel además de la suministrada por la radiación, provocando que la Tr sea algo más que proporcional a la CC cuando está considerablemente incompleta. *AquaCrop* se ajusta a esta condición asumiendo una cobertura del dosel ligeramente más grande con una ecuación empírica, desarrollada a partir de los datos en la bibliografía. La Tr se calcula a partir de la ET_o con el coeficiente de transpiración del cultivo, simbolizado como $K_{c,Trx}$, definido como el coeficiente de cultivo (K:) para transpiración cuando del dosel cubre por completo el terreno (CC está cerca y se aproxima a 1.0) y no se presenta ningún tipo de estrés. La CC efectiva se multiplica luego por $K_{c,Trx}$ y ET_o para determinar la Tr. La restricción de la Tr por el estrés hídrico se explica más adelante en esta sección.

Después de que se alcanza la cobertura del dosel máxima (CC_x) y antes del inicio de la senescencia, del dosel envejece lentamente y experimenta una progresiva, aunque ligera, reducción en la transpiración y capacidad fotosintética. Esto se simula mediante la aplicación de un coeficiente de envejecimiento (f_{age}) que disminuye el $K_{c,Trx}$ en un porcentaje constante y leve por día (p.ej., 0.3 %). Después de que se desencadena la senescencia, la transpiración y la capacidad fotosintética del dosel disminuyen de manera más marcada con el paso del tiempo.

Evaporación del suelo

La evaporación se produce principalmente, desde la superficie humedecida del suelo que no está protegida por la sombra del dosel. *AquaCrop* calcula de manera separada la evaporación del suelo (E) y la Tr; y para simplificar, asume que la E tiene lugar sólo desde el suelo que no sombreado y que es ligeramente inferior al valor proporcional a (1-CC), según los resultados del ajuste de la advección entre hileras. El otro factor clave que determina la E es la humedad de la capa superficial del suelo. Cuando la superficie del suelo está completamente humedecida, la E aumenta según la tasa potencial determinada por el suministro de energía, y es aproximadamente un 10 por ciento mayor que la tasa de ET_o. Esta fase se conoce como Etapa I de evaporación y puede durar entre menos de un día a un poco más de un día, y se puede ajustar en el modelo. Como la superficie del suelo comienza a secarse y la presión del vapor de agua en la superficie se reduce, la E disminuye exponencialmente con la reducción de la humedad del suelo en la parte superior del mismo (una capa superficial muy delgada). Esta fase se conoce como Etapa II de la evaporación. *AquaCrop* simula esto multiplicando la tasa de E potencial por un coeficiente que disminuye exponencialmente.

A medida que se produce .la senescencia del dosel, esta continúa brindando sombra al suelo, pero de una manera menos efectiva, porque la estructura del dosel empieza a desintegrarse y es posible que se pierdan hojas muertas. El modelo continúa basando la E del suelo en CC_x, pero aplica un factor sencillo para reducir la capacidad de protección del dosel que está muriendo.

Producción de biomasa

La productividad del agua para biomasa (WP) es fundamental para el funcionamiento de *AquaCrop* (Ecuación 1) y ha mostrado un comportamiento notablemente conservativo (permaneciendo casi constante) cuando se normaliza para diferentes demandas evaporativas. Este supuesto se demostró en los primeros estudios de, entre otros, de Wit (1958), y se avanzó aún más en los estudios de Tanner y Sinclair (1983), Hsiao y Bradford (1983) y Steduto *et al.* (2007).

El parámetro de WP introducido en *AquaCrop* se normaliza por la demanda evaporativa de la atmósfera, simbolizada como ET_o, y para la concentración de CO_2 en la atmósfera. Se comprobó que la productividad del agua normalizada para biomasa (WP*) es casi constante para un cultivo dado cuando los nutrientes minerales no son limitantes, independientemente del estrés hídrico, salvo en casos extremadamente graves. La calibración de la WP y la normalización por las demandas evaporativas se basaron en la ecuación:

(5)
$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \frac{T_r}{ETo}}\right][CO_2]$$

El sumatorio se realiza para los intervalos de tiempo que abarcan el periodo en que se produce B. $[CO_2]$ fuera del paréntesis indica que el valor normalizado corresponde a una concentración específica de CO_2 en el aire. En la mayoría de las especies de cultivos, la WP* aumenta a medida que se incrementa la concentración de CO_2 en el aire, lo que permite realizar simulaciones del impacto en el rendimiento bajo diversos escenarios de cambio climático y de concentración de CO_2. La ecuación se puede aplicar directamente cuando los datos de Tr y ET_o corresponden a intervalos diarios. Se deben tomar precauciones con la normalización cuando se dispone de datos de Tr y ET_o en intervalos de tiempo superiores a los diarios. Si desea conocer información más completa y detallada sobre la normalización, incluida la concentración de CO_2, consulte Steduto *et al.* (2007).

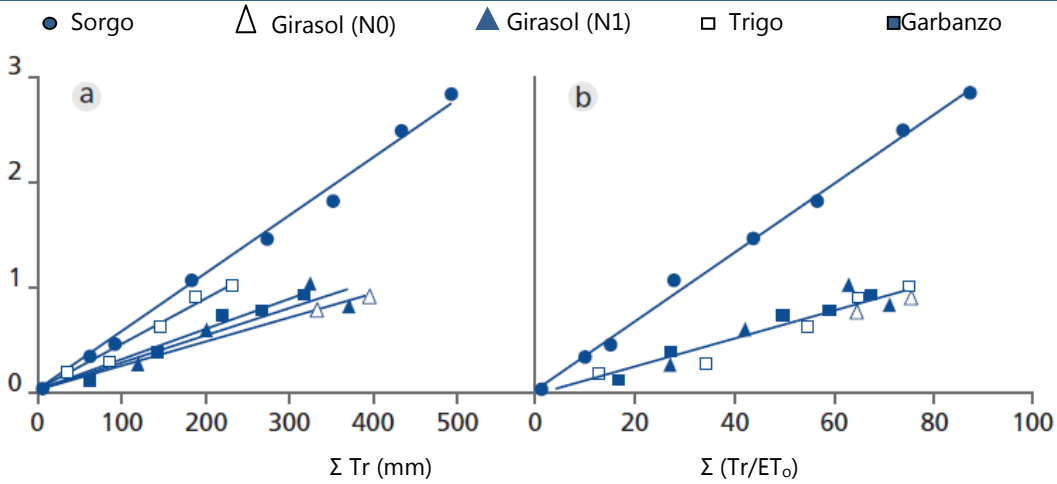
En la bibliografía sobre el tema, la WP comúnmente se normaliza por la demanda evaporativa utilizando el déficit de presión de vapor de agua (VPD), en lugar de la ET_o. Se decidió utilizar ET_o

porque ha demostrado ser superior y tiene en cuenta la transferencia de energía por advección, la cual se desestima utilizando el VPD (Steduto *et al.,* 2007). La WP* es conservativa para un nivel determinado de nutrición mineral, pero es posible que se reduzca a causa de deficiencias nutricionales, particularmente de nitrógeno. La WP* calibrada en el modelo para varios cultivos corresponde a situaciones donde los nutrientes son abundantes. Para escenarios donde los nutrientes son limitados, el modelo proporciona categorías de estrés de fertilidad del suelo, que van desde deficiencias de nutrientes leves a graves, con correspondientes valores predeterminados de WP* más bajos.

La naturaleza conservativa de la WP* se ilustra en la Figura 5, donde la B acumulada frente a la Tr acumulada se representa en (a), y la B acumulada frente a la Tr normalizada acumulada (Tr/ET_o) en (b), durante la estación de sorgo dulce (un cultivo C_4), girasol, trigo y garbanzo (los tres son C_3). La Figura 5a muestra que las regresiones para diferentes cultivos son lineales, aunque con diferentes pendientes. Esto quiere decir que la WP es constante para cada cultivo, pero difiere con respecto a los otros cultivos. La figura 5b muestra que la normalización por ET_o fusionó las líneas de los tres cultivos C_3 en una sola, lo que significa que sus WP* son muy similares. En este estudio, el girasol se cultivó de mayo a agosto, el trigo de febrero a mayo y el garbanzo de abril a junio. De este modo, el crecimiento de estos cultivos tuvo lugar en períodos que difieren en la demanda evaporativa de la atmósfera. La normalización mediante ET_o dio cuenta de la diferencia en la demanda evaporativa y mostró que los tres cultivos tienen niveles muy similares de productividad del agua intrínseca (WP* muy similar).

El valor único de WP*, según se indica en la Figura 5b, es empleado para el ciclo completo en la mayoría de los cultivos. Sin embargo, los cultivos que presentan rendimientos con alto contenido de grasa y proteínas requieren más asimilados fotosintéticos o energía por unidad de materia seca generada, después de la floración y durante la etapa de llenado de grano/fruto. Para tales cultivos, *AquaCrop* utiliza un valor único para la WP* hasta la floración y luego disminuye gradualmente hacia un valor de WP* más bajo en respuesta a la composición del rendimiento.

FIGURA 5 Relación (a) entre la biomasa aérea y la transpiración acumulada (∑Tr) y (b) entre la biomasa aérea y la transpiración normalizada acumulada [∑ (Tr/ET_o)], durante el ciclo de cultivo del girasol (bajo dos niveles N hasta la antesis), sorgo, trigo y garbanzo (reformulada a partir de Steduto y Albrizio, 2005).



Rendimiento cosechable

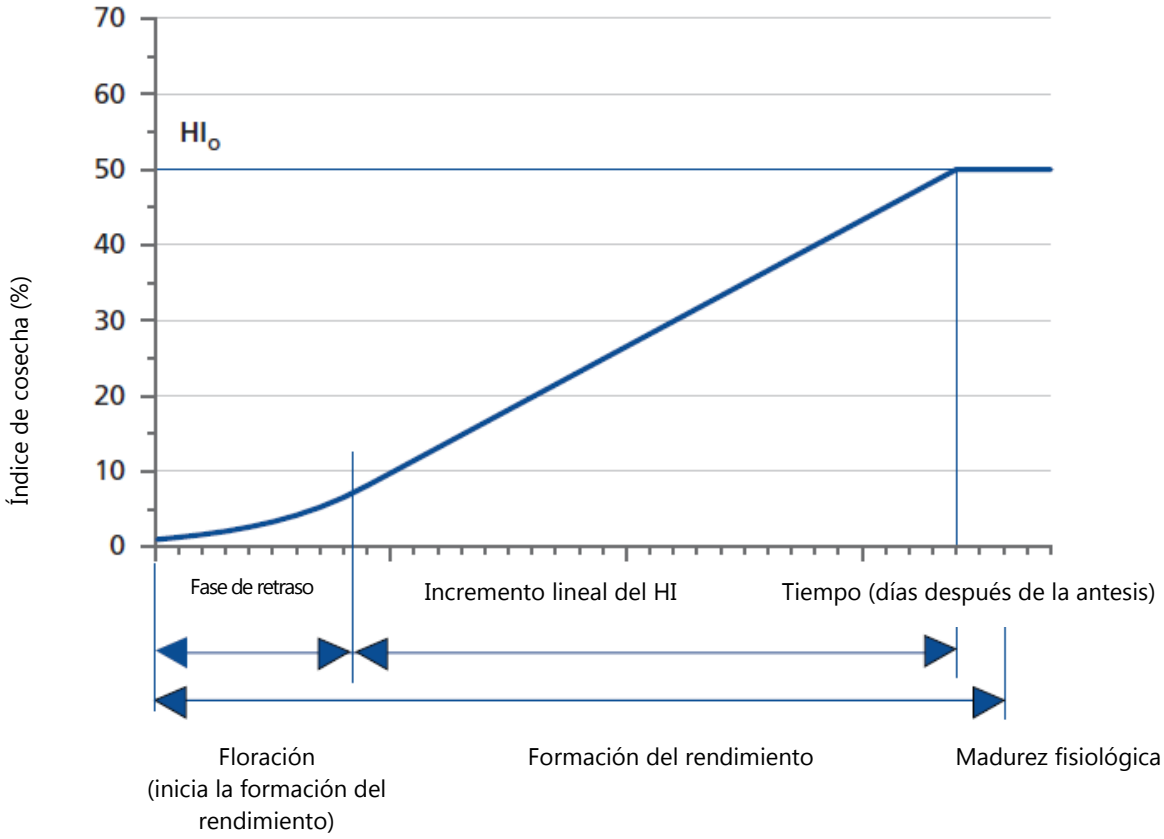
La partición de la biomasa en la porción de rendimiento (Y) se simula mediante el índice de cosecha (HI). Para los cultivos de fruto o grano, los datos publicados sobre diferentes especies indican que existe un incremento lineal, con el paso del tiempo, en la relación entre la biomasa del fruto o grano y la biomasa aérea, desde poco después de la polinización y cuajado de fruto hasta su maduración o cerca a ella. En el uso común, el HI corresponde a esta relación en el momento de maduración o cosecha. En *AquaCrop,* esta relación en las etapas iniciales también se conoce como HI, por simplicidad. Para los cultivos de fruto o grano, el HI se ajusta de modo que aumente desde cero en la floración, primero durante una fase corta de retraso, cuando el incremento empieza despacio pero se acelera con el tiempo, seguida de una fase de estabilización con el incremento más alto, pero a un ritmo constante (Figura 6). Para los cultivos de raíces/tubérculos, el HI es la relación entre la biomasa de los órganos reservantes y la biomasa total (raíz más tallo). Los pocos datos publicados sobre los cultivos de raíces/tubérculos indican que, en lugar de aumentar de forma lineal después de una fase de retraso, el HI se incrementa rápidamente poco después de la formación de los órganos reservantes, y luego decrece gradualmente hasta la maduración. De este modo, el HI se describe mediante una curva logística para estos cultivos.

Es necesario tener un punto de referencia para el rango superior del HI. Este punto, HI (HI_o) de referencia, es el HI representativo de variedades bien desarrolladas adaptadas a sus entornos y cultivadas bajo condiciones óptimas, sin aportes limitantes. El HI_o calibrado se puede modificar en base a datos adecuados de una variedad en particular. La progresión del HI para cultivos de fruto/grano se ilustra en la Figura 6.

El suelo

En *AquaCrop,* el suelo se describe mediante un perfil de suelo y las características de la capa freática (si lo hubiere). En *AquaCrop,* el suelo se puede subdividir en dirección vertical hasta en cinco capas de profundidad variable, en donde cada capa (u horizonte) se ajusta a diferentes características físicas del suelo: el contenido de humedad del suelo en el punto de saturación, el límite superior de contenido de agua por gravedad (comúnmente denominado capacidad de campo, FC, para fácil referencia), el límite inferior de contenido de agua donde un cultivo puede alcanzar el punto de marchitez permanente (PWP), y la conductividad hidráulica en el punto de saturación (K_{sat}). Con base en estas características, *AquaCrop* deriva otros parámetros que rigen la evaporación del suelo,

FIGURA 6 Incremento del índice de cosecha desde la floración hasta la maduración fisiológica de los cultivos que producen frutos y granos, con la indicación del índice de cosecha de referencia (HI_o).



el drenaje interno y la percolación profunda, la escorrentía superficial y el ascenso capilar. Las características de la capa freática que se tienen en cuenta son su profundidad debajo de la superficie del suelo y su salinidad. Éstas pueden permanecer constantes durante la estación o variar a lo largo del período de simulación.

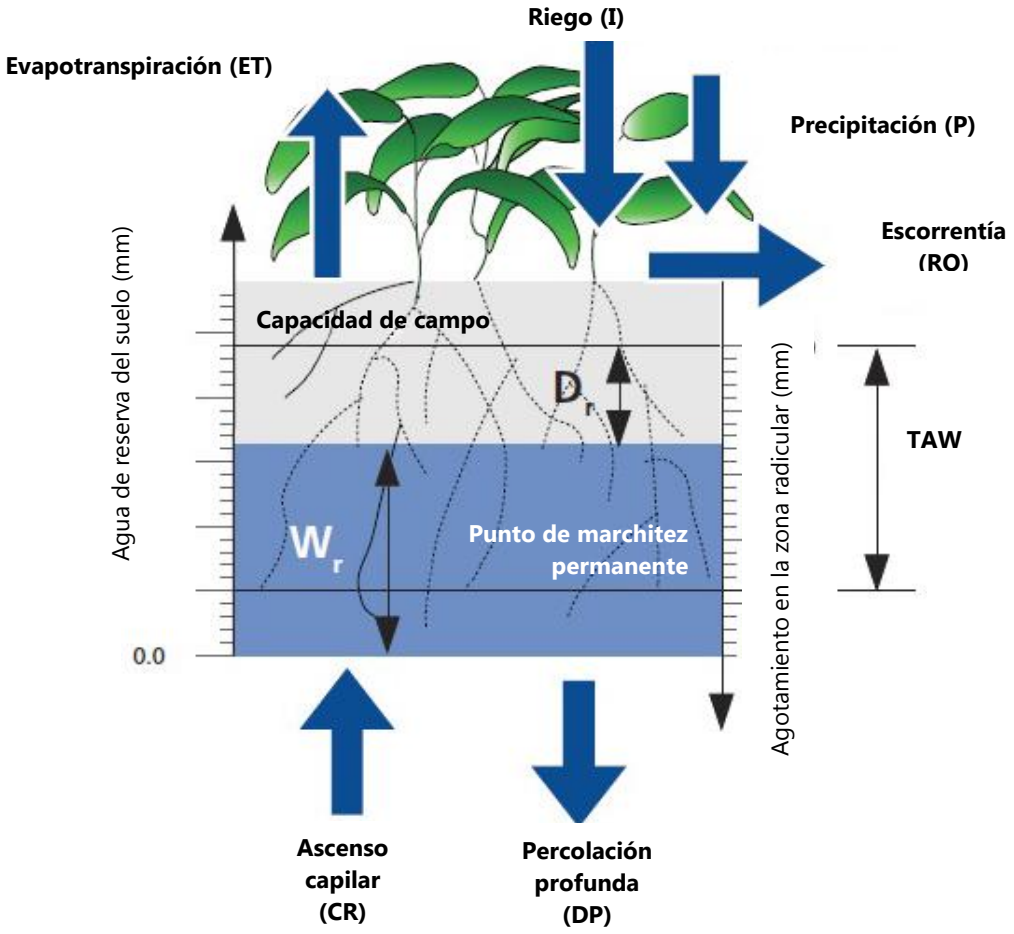
A través del seguimiento del agua y los flujos salinos de entrada (precipitación, riego y ascenso capilar) y salida (escorrentía, evapotranspiración y percolación profunda) en los límites de la zona radicular, se puede calcular en cualquier momento de la estación la cantidad de agua y sal retenida en la zona radicular (Figura 7).

Cuando se calcula el balance de agua en el suelo, la cantidad de agua almacenada en la zona radicular se puede expresar como una lámina de agua equivalente (Wr) o como el agotamiento en la zona radicular (D_r). El agua disponible total en el suelo (TAW) es la cantidad de agua retenida en la zona radicular, entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. En la capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular (D_r) es cero y, en el punto de marchitez permanente, Dr es igual a TAW.

A fin de describir con exactitud la escorrentía superficial, la retención y el desplazamiento de agua y sal en el perfil del suelo, la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo a lo largo del período de simulación, *AquaCrop* divide tanto el perfil del suelo como el tiempo en fracciones pequeñas. *AquaCrop* divide el perfil del suelo en 12 compartimentos de suelo con grosor Δz y ejecuciones con

intervalos Δt de un día. Como tal, el flujo unidimensional y vertical de agua y sal y la absorción de agua mediante las raíces se pueden resolver por medio de una técnica de diferencias finitas. Cada uno de los 12 compartimentos del suelo poseen las características hidráulicas de la capa del suelo a la cual pertenece (Figura 8). El tamaño predeterminado de los compartimentos (0.10 m) se ajusta automáticamente para abarcar toda la zona radicular. En las zonas radiculares profundas, ΔZ no es constante sino que aumenta exponencialmente con la profundidad, de modo que la infiltración, evaporación y transpiración de las capas superiores del suelo se puede describir con suficiente detalle.

FIGURA 7 Zona radicular descrita como un depósito. Se indican la profundidad de agua equivalente (Wr) y el agotamiento en la zona radicular (D_r).

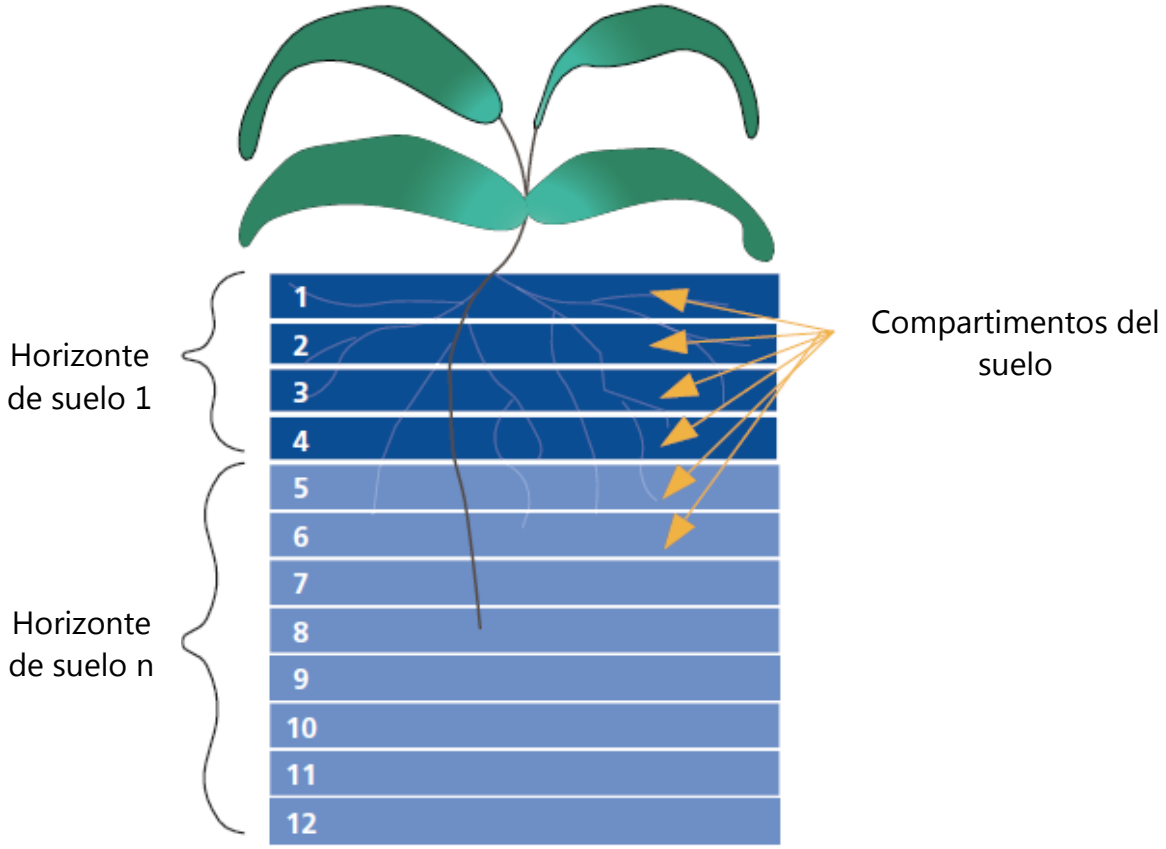


Para simular el movimiento del agua hacia adentro y hacia afuera del perfil del suelo, *AquaCrop* tiene en cuenta la escorrentía superficial, la infiltración, el ascenso capilar, la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo. Para simular la redistribución del agua en una capa del suelo, el drenaje saliente del perfil del suelo y la infiltración de precipitación o riego, *AquaCrop* emplea una función exponencial de drenaje que describe la disminución del movimiento del agua entre la saturación y la capacidad de campo. El movimiento del agua hacia arriba desde una capa freática hacia el perfil del suelo se describe a través de una relación exponencial entre la capacidad de asceno capilar y la altura por encima de la capa freática. La cantidad de agua que se desplaza hacia arriba no solo depende de la profundidad del nivel freático, sino también de la humedad de la capa superior del suelo y de las características hidráulicas de las capas del suelo. Al considerar los flujos de agua en

respuesta a los procesos mencionados anteriormente, el contenido de humedad del suelo se actualiza al final del intervalo diario en cada uno de los 12 compartimentos (para obtener información más detallada, consulte Raes *et al.,* 2011).

Al determinar el balance hídrico, *AquaCrop* también implementa el equilibrio de sales. Las sales ingresan al perfil del suelo por ascenso capilar, desde una capa freática salina o junto con el agua de riego. Las sales son lixiviadas del perfil del suelo por medio de precipitación o riego excesivos. El desplazamiento vertical de las sales en un perfil de suelo se describe asumiendo que éstas se mueven hacia abajo, debido al flujo de agua del suelo, en macroporos, según se simuló mediante la función de drenaje. Dado que el transporte de solutos en los macroporos elude la humedad del suelo en la matriz, se contempla un proceso de difusión para describir la transferencia de solutos desde los macroporos hacia la matriz del suelo. Por consiguiente, los compartimentos del suelo se dividen en un gran número de celdas, donde las sales se pueden almacenar de manera figurativa. Una celda es una representación de un conjunto de poros con un diámetro específico. La fuerza que impulsa la difusión horizontal es el gradiente de concentración de sal que existe entre la solución de agua en las celdas a una profundidad particular del suelo. La difusión vertical de sales también se tiene en cuenta para evitar la acumulación de altas concentraciones de sal a una profundidad particular. La fuerza que impulsa este proceso de redistribución vertical es el gradiente de concentración de sales que se acumula a varios niveles de profundidad del suelo en la matriz del suelo.

FIGURA 8 Perfil de suelo con más de un horizonte de suelo y 12 compartimentos de suelo. El número total de compartimentos siempre es 12, independientemente del número de horizontes (que varía de 1 a 5).



El manejo

AquaCrop comprende dos categorías de prácticas de **manejo**: el **manejo de riego,** bastante completo en sus diversas características, y el **manejo de campo,** limitado a ciertos aspectos y relativamente sencillo en los enfoques.

Manejo del riego

Aquí se proporcionan opciones para evaluar y analizar la producción del cultivo y el manejo y uso del agua bajo dos condiciones: de secano o de riego. Las opciones de manejo incluyen la selección de los métodos de aplicación del agua (por aspersión, superficial o por goteo, ya sea superficial o subterráneo) definiendo el calendario en términos de tiempo, profundidad y calidad del agua de riego para cada aplicación, o permitiendo que el modelo genere automáticamente el calendario basado en un intervalo de tiempo fijo, profundidad fija por aplicación, o porcentaje fijo de agotamiento de agua permisible. Una característica adicional es la estimación de los requerimientos hídricos completos de un cultivo en un clima determinado.

Manejo de campo

Aquí se consideran tres aspectos: (i) fertilidad del suelo para el crecimiento del cultivo, sea natural o por fertilización; (ii) acolchado del suelo para reducir la evaporación; y (iii) uso de caballones (caballones pequeños) para estancar el agua o controlar la escorrentía superficial y mejorar la infiltración.

Los efectos de la fertilidad en el crecimiento y la productividad del cultivo no se simulan directamente. En cambio, *AquaCrop* proporciona ajustes predeterminados de los parámetros esenciales del cultivo para varias categorías limitantes de fertilidad, que van desde casi óptima hasta baja. Los ajustes son multiplicadores, usados para reducir: (1) CGC; (2) CC_x; (3) CC, desde el momento en que se alcanza la CC_x hasta la madurez, pero solo gradualmente; y (4) WP*. Estos ajustes están basados en el patrón de evolución del dosel, fotosíntesis, y la WP a diferentes niveles de fertilidad reportados en varios estudios (p. ej., Wolfe *et al.,* 1988). Para hacer los ajustes más fiables, los datos de producción de biomasa y el desarrollo del dosel observado, obtenidos a diferentes niveles de fertilidad, deberían usarse para hacer una calibración local, como se ha previsto en *AquaCrop*.

El acolchado del suelo es considerado únicamente por su efecto en la reducción de la evaporación del suelo, y debe ser especificado por el usuario en términos de porcentaje de superficie de suelo cubierta y efectividad del material de acolchado.

El último aspecto del manejo tiene que ver con los caballones y la escorrentía. Se puede especificar un caballón y su altura para prevenir la escorrentía y forzar toda el agua lluvia o de riego a infiltrarse en el suelo. Igualmente importante, es que los caballones permiten la simulación de cultivos que usan aguas estancadas, como el arroz con cáscara. En el caso de suelos que son especialmente permeables, también es posible escoger "sin escorrentía" sin construir caballones.

LAS DINÁMICAS DE LAS RESPUESTAS DEL CULTIVO AL ESTRÉS EN *AquaCrop*

Los estreses abióticos ambientales como el hídrico y el estrés por temperatura pueden tener impactos negativos importantes en el desarrollo del dosel, la producción de biomasa y el rendimiento, dependiendo del momento en que ocurran, su severidad y duración. Adicionalmente, el estrés por salinidad o baja fertilidad del suelo puede tener impactos negativos semejantes, pero son menos dinámicos en términos de velocidad de respuesta y recuperación. *AquaCrop* está diseñado para simular las respuestas del cultivo inicialmente al agua, pero prestando la suficiente atención también a la temperatura. *AquaCrop* aborda con un enfoque indirecto las deficiencias de nutrientes minerales o la presencia de sales en la zona radicular, lo cual impide simular los balances

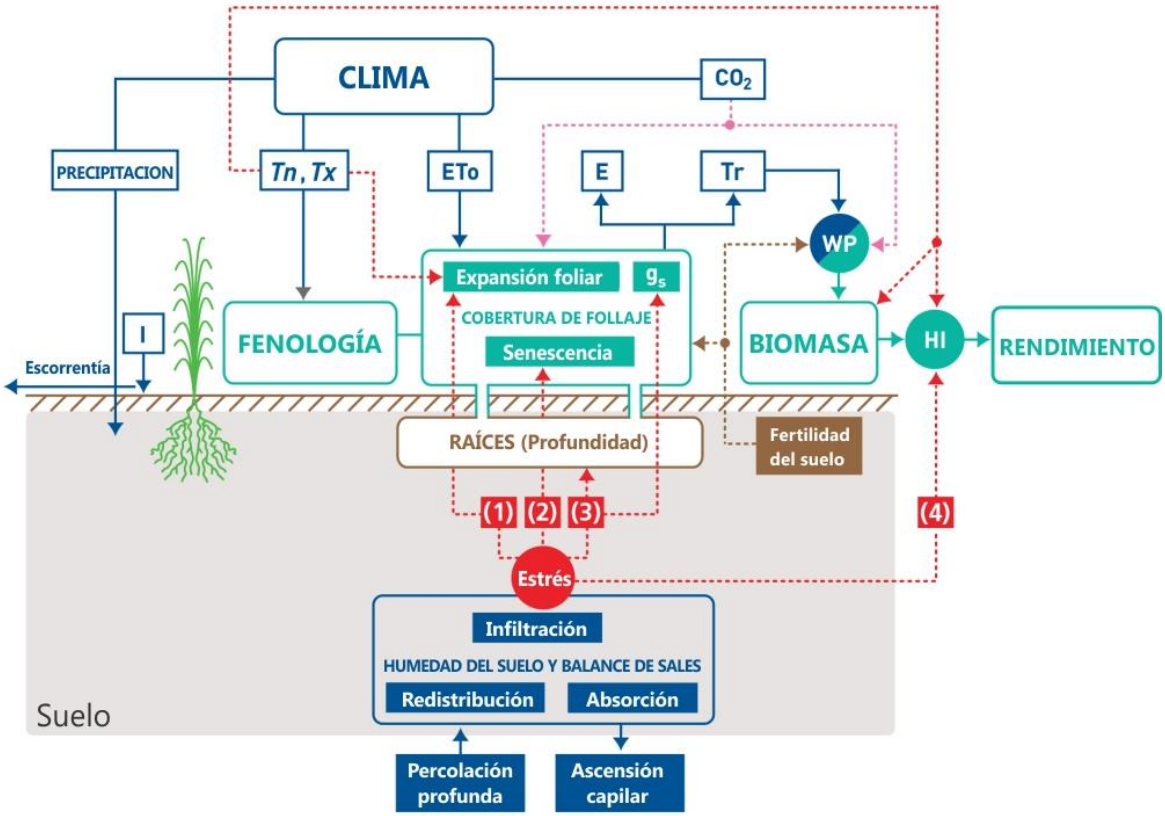
de nutrientes y sus complejos ciclos, porque esto haría que el modelo fuera muy complejo. Este enfoque indirecto se describe más adelante en la sección *Estrés por fertilidad y salinidad*.

Los componentes estructurales de *AquaCrop,* incluidas las respuestas al estrés, y los vínculos funcionales entre ellas, se muestran esquemáticamente en el diagrama de la Figura 9, y sirven para enmarcar la siguiente discusión.

Funciones de respuesta al estrés

Todas las clases de estrés se describen en *AquaCrop* mediante un coeficiente de estrés (Ks), que es un indicador de la intensidad relativa del efecto sobre un proceso y una etapa de crecimiento específicos. En esencia, el Ks es un modificador de su parámetro en el modelo objetivo, y varía de uno (sin estrés) a cero (estrés completo).

FIGURA 9 Gráfico de *AquaCrop* que muestra los componentes principales del continuo suelo-planta-atmósfera y los parámetros que determinan la fenología, la cobertura del dosel, la transpiración, la producción de biomasa y el rendimiento final. Las líneas continuas indican vínculos directos entre variables y procesos. Las líneas punteadas indican retroalimentación. Los símbolos son: I, riego; T_n, temperatura mínima del aire; T_x, temperatura máxima del aire; ET_o, evapotranspiración de referencia; E, evaporación del suelo; Tr, transpiración del dosel; g_s, conductancia estomática; WP, productividad del agua; HI, índice de cosecha; CO_2, concentración de dióxido de carbono en la atmósfera; (1), (2), (3), (4), funciones de respuesta al estrés hídrico para la expansión foliar, senescencia, conductancia estomática e índice de cosecha, respectivamente. Modificado de Steduto *et al.* (2009).



Por encima del umbral superior de un indicador de estrés, el estrés no existe y el Ks es 1. Por debajo del umbral inferior, el efecto es máximo y el Ks es 0 (Figura 10). En el caso de estreses hídricos, los umbrales corresponden a agotamiento de humedad del suelo (D_r) en la zona radicular. El umbral superior se refiere a la humedad del suelo que puede agotarse antes de que el estrés empiece a afectar el proceso, mientras que el umbral inferior es el agotamiento en la zona radicular en el momento en que el estrés inhibe por completo el proceso. Los indicadores de estrés por temperatura del aire son grados grados día acumulados, temperaturas mínimas de aire (estrés por frío) o temperaturas máximas de aire (estrés por calor), mientras que la conductividad eléctrica del agua del suelo en la zona radicular (ECe) determina el estrés por salinidad. Cuando se ejecuta una simulación, el grado de fertilidad del suelo seleccionado como la práctica de manejo de campo es el indicador del estrés por fertilidad del suelo. Varía desde 0 %, cuando la fertilidad del suelo no es limitante (Ks = 1), hasta un 100 % teórico, cuando el estrés por fertilidad del suelo es tan severo que la producción del cultivo ya no es posible (Ks = 0).

El nivel de estrés relativo y la forma de la curva del Ks determinan la magnitud del efecto del estrés sobre el proceso entre los umbrales. El estrés relativo es 0.0 en el umbral superior y 1.0 en el umbral inferior (Figura 10). La mayoría de las curvas del Ks son convexas, y el grado de curvatura se establece durante la calibración del modelo.

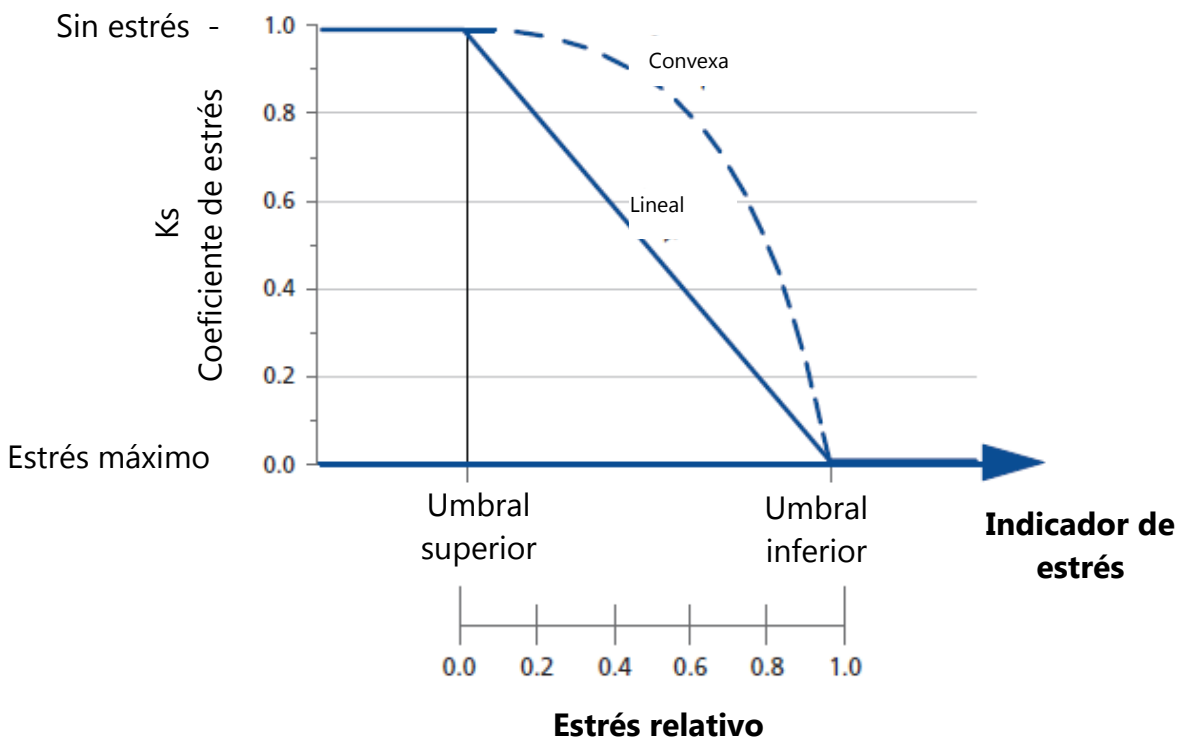
Estrés hídrico

AquaCrop distingue entre los estreses relacionados con el *déficit* y con el *exceso* de agua. En esta publicación, el estrés hídrico rutinariamente se refiere al estrés causado por la falta de agua, y el estrés causado por el exceso de agua se denomina estrés por aireación. Los efectos del estrés hídrico en la productividad y los procesos de uso del agua se simulan impactando en: (1) el crecimiento del dosel; (2) la conductancia estomática; (3) la senescencia del dosel; (4) la profundización de las raíces, y (5) el índice de cosecha. Basándonos en una revisión de la bibliografía existenete, se asume que la productividad del agua normalizada no se ve impactada. El discurso que sigue discute en conjunto los primeros tres procesos impactados, e incluye la profundización de las raíces al final. El índice de cosecha –un tema complejo– se aborda por separado en la última sección del estrés hídrico.

Funciones de respuesta al estrés hídrico

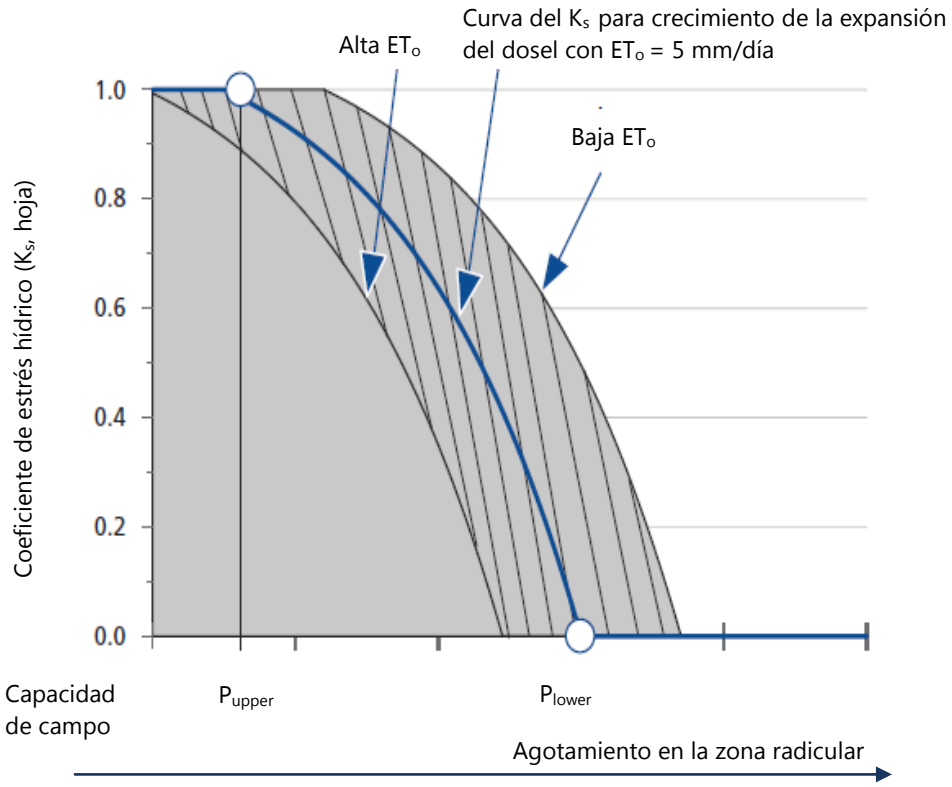
En el caso de los estreses hídricos, el indicador de estrés es el agotamiento en la zona radicular (D_r), y los umbrales son los agotamientos de humedad del suelo en la zona radicular expresados como fracciones (p) del agua disponible total en el suelo (TAW). En el punto en que ya no hay agotamiento, el Ks = 1.0. A medida que avanza el agotamiento, el Ks no disminuye de 1.0 hasta que alcanza el umbral superior para efecto del estrés. Este umbral se denomina p_{upper}. Un incremento adicional del agotamiento en la zona radicular produce valores inferiores del Ks, hasta llegar al umbral inferior (denominado p_{lower}), donde el Ks se vuelve cero y el efecto por estrés es máximo (Figura 11). Un mayor agotamiento por debajo del p_{lower} no tiene efectos adicionales y el Ks sigue siendo cero. En el caso de los estreses hídricos, la forma de la curva puede variar desde muy convexa, pasando por levemente convexa, hasta lineal. Desde el punto de vista conceptual, mientras más convexa sea la curva, mayor es la capacidad del cultivo para ajustarse y aclimatarse al estrés. Una relación lineal indica una aclimatación mínima o nula. Los umbrales de estrés, así como la forma de la curva, se establecen por calibración y deberían estar basados en el conocimiento de la resistencia o la tolerancia del cultivo a la sequía.

FIGURA 10 El coeficiente de estrés (Ks) para varios grados de estrés y para 2 ejemplos de formas de la curva del Ks



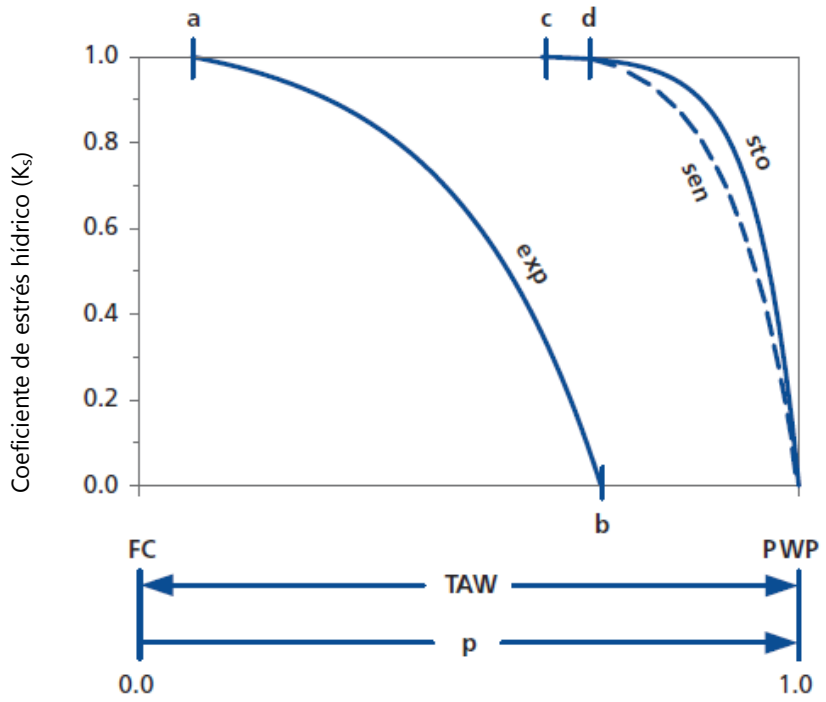
Como eslabón intermedio en el continuo suelo-planta-atmósfera, el estado hídrico de la planta depende no solo del estado de humedad del suelo, sino además de la tasa de transpiración determinada por la demanda evaporativa de la atmosféra. El cultivo es más sensible al agotamiento de humedad del suelo los días de alta ET_o y menos sensible los días de baja ET_o. Por simplicidad, en lugar de modelar el continuo suelo-planta-atmósfera, *AquaCrop* ajusta los umbrales de la curva del Ks según la ET_o, una medida de la demanda de evaporativa. Como el umbral se establece para ambientes con ET_o = 5 mm/día, cuando se ejecuta una simulación, el modelo ajusta automáticamente los umbrales cada día según la ET_o diaria. En la Figura 11 se representa el alcance del ajuste.

FIGURA 11 Ejemplo de curva del Ks para expansión del dosel. La línea azul gruesa representa el Ks para los días en que la ET_o = 5 mm/día. La línea de la izquierda indica que el valor del Ks disminuye (efecto más pronunciado del estrés) cuando se incrementa la ET_o, y la línea de la derecha, que el Ks aumenta cuando la ET_o disminuye. El área sombreada corresponde al rango de ajuste según la ET_o



De los tres primeros procesos afectados por el estrés hídrico, estudios llevados a cabo han mostrado que la expansión foliar (por ende, el dosel) es el más sensible, y la conductancia estomática es sustancialmente menos sensible. Dependiendo de la especie, la senescencia foliar (por ende, el dosel) puede ser igual o ligeramente menos sensible que la conductancia estomática (Bradford y Hsiao, 1982). El ajuste de los tres umbrales superiores para el estrés hídrico de un cultivo debe ser consecuente con estas observaciones. Las diferencias en las curvas del Ks para los tres procesos se pueden ver en el ejemplo del maíz, Figura 12.

FIGURA 12 La curva del coeficiente de estrés (Ks) para la expansión del dosel (exp), conductancia estomática (sto), y senescencia del dosel (sen) del maíz como función del agotamiento en la zona radicular (p). El umbral superior para la expansión está señalado con una **a,** y el umbral inferior, con una **b.** Los umbrales superiores para el cierre estomático y la senescencia del follaje están señalados con **c** y **d,** respectivamente. El umbral inferior tanto para los estomas como para la senescencia se fijan en el PWP en *AquaCrop* (reproducido de Steduto *et al.,* 2009)



Cuantificación de la dinámica del estrés con el Ks

Normalmente, el Ks se usa como multiplicador para modular los procesos en cuestión. En el caso de la expansión del dosel, su CGC (Ecuaciones 3 y 4) se multiplica, de hecho, por su Ks específico. Esto no influye en el valor del CGC, siempre y cuando **p** sea pequeño (poco agotamiento) y Ks permanezca en 1.0. A medida que el agotamiento de humedad del suelo supera el umbral superior (punto **a** de la Figura 12), Ks cae por debajo de 1.0, provocando una reducción del CGC efectivo calculado, y como resultado se relentiza el desarrollo del dosel. A medida que el agotamiento se hace mayor, el dosel crece de forma cada vez más lenta a causa de mayores disminuciones en el Ks, y se detiene por completo cuando el agotamiento llega al umbral inferior (punto **b** de la Figura 12) donde el Ks = 0.

Si no hay reposición de agua en la zona radicular, el tamaño final de la CC sería inferior al de la CC_x especificada. Si el cultivo es indeterminado con el potencial de crecimiento foliar durante la mayor parte de su ciclo biológico, la reposición tardía de agua incrementaría el Ks por encima del umbral inferior y se reiniciaría la expansión del dosel. Sin embargo, si el cultivo es determinado, la reposición tardía de agua no resablecería la expansión del dosel, porque el cultivo no tiene potencial de crecimiento foliar después del pico del período de floración, y el modelo está programado para finalizar la expansión de la CC.

Como ya se mencionó, los estomas son considerablemente menos sensibles al agotamiento de humedad del suelo que el crecimiento del dosel; por tanto su Ks se ajusta de manera que no disminuya hasta que la humedad del suelo se agote mucho más. La Tr también se calcula

multiplicando por su Ks, y no se ve afectada por el estrés hídrico, siempre y cuando el agotamiento en la zona radicular esté por debajo del umbral superior para su Ks. A medida que se agota el agua y se supera el umbral superior (punto **c** de la Figura 12), el Ks cae por debajo de 1.0 y la Tr calculada se vuelve menor que la potencial. Un mayor agotamiento causa una mayor reducción de la Tr, y si se supera el umbral superior para la senescencia (punto **d** de la Figura 12), empieza la senescencia del dosel y la CC –compuesta de follaje verde– disminuye. Si el contenido de agua en la zona radicular se repusiera por encima de los umbrales superiores en este punto, los estomas se abrirían completamente y la Tr se incrementaría, y cesaría la senescencia del dosel. La Tr, sin embargo, será inferior a que si no se hubiera presentado el estrés hídrico, porque la CC ahora es menor. La CC incrementaría gradualmente si el cultivo se encontrara en una etapa en que el potencial de crecimiento foliar aún estuviera presente; de lo contrario, la CC permanecería menor, pero perduraría hasta el tiempo normal de maduración si no hubiera agotamiento adicional por encima del umbral superior para la senescencia.

La senescencia del dosel puede ser desencadenada y acelerada por el estrés hídrico en cualquier momento durante el ciclo biológico del cultivo, siempre que el estrés sea lo suficientemente severo. Esto se simula ajustando el CDC en unidades de reducción fraccionada de la CC por unidad de tiempo, con una ecuación empírica basada en el Ks para la senescencia, dispuesta de tal manera que el valor del CDC sea cero cuando el Ks es 1.0, pero aumente exponencialmente por encima de cero cuando el Ks caiga por debajo de 1.0.

La profundización de las raíces es otro proceso que se ve afectado por el estrés hídrico. Está comprobado que el crecimiento de las raíces es sustancialmente menos sensible al estrés hídrico que las hojas, y que la relación raíz-tallo se mejora con un estrés hídrico leve a moderado (Hsiao y Xu, 2000). En *AquaCrop* no hay vínculo entre raíces y tallo (cobertura y biomasa), excepto indirectamente a través del efecto del agotamiento de agua en la zona radicular sobre los componentes del proceso de producción. Específicamente, la profundización agranda la zona radicular y reduce el Dr (agotamiento de humedad fraccional), si las capas más profundas de suelo tienen alto contenido de agua. Esto aumenta el valor del Ks particular, conduciendo a cambios favorables en los procesos de los tallos. Por otro lado, la profundización hasta capas bastante secas puede de hecho incrementar el Dr, porque el volumen de la zona radicular aumenta pero hay poco incremento en su volumen de agua. Entonces el agotamiento fraccional podría aumentar con un Ks inferior y tener consecuencias negativas en los procesos de los tallos.

Como el crecimiento de las raíces es menos sensible al estrés hídrico que las hojas, la profundización de las raíces se simula en *AquaCrop* para que proceda normalmente a medida que se agota el agua en la zona radicular, hasta que se alcance el p_{upper} para el cierre estomático. En este punto se le aplica una reducción como función de la Tr (por ende el Ks para estomas) a la tasa de profundización. De esta manera sencilla, el modelo imita el incremento de la relación raíz-tallo bajo estrés hídrico de leve a moderado, porque la expansión del dosel empieza a inhibirse a un contenido fraccional de agua de la zona radicular mucho más elevado que la Tr. Por tanto, las raíces crecen mejor que el dosel, por lo menos hasta el umbral superior para los estomas.

Efectos del estrés hídrico en el índice de cosecha

Hasta ahora, hemos tratado los procesos que conducen a la producción de biomasa, de los cuales depende el rendimiento (Ecuación 2). El rendimiento también depende del HI, y el impacto de los estreses hídricos en el HI puede ser pronunciado, dependiendo del momento y la magnitud del estrés durante el ciclo del cultivo. Los efectos del estrés hídrico en el HI pueden ser negativos o positivos.

Dos de los efectos negativos son más directos. Uno es la inhibición del estrés hídrico en la polinización y cuajado del fruto (formación exitosa del embrión). Si el estrés es severo y lo suficientemente prolongado, la cantidad de frutos (o granos) cuajados se reduciría lo suficiente

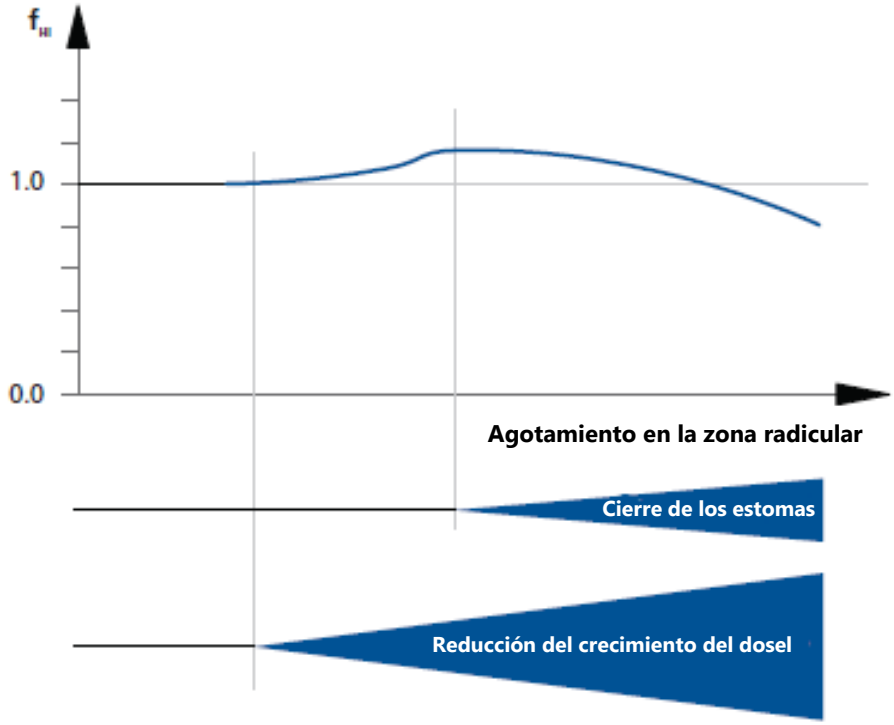
como para reducir el HI y limitar el rendimiento, en algunos casos, drásticamente. En buenas condiciones, la mayoría, si no todas las especies de cultivos, han sido seleccionadas con una tendencia a cuajar más frutos de los que pueden llenarse con los asimilados fotosintéticos disponibles, causando el aborto de una parte de los frutos cuajados durante su desarrollo temprano. Por tanto, la reducción del cuajado del fruto por estrés hídrico puede reducir o no el HI, dependiendo de la magnitud de la reducción y de la magnitud del cuajado de fruto excesivo. *AquaCrop* también simula esto con el enfoque de Ks, para reducir la polinización (por ende, el cuajado del fruto) cada día según la magnitud del agotamiento de agua. El efecto sobre el HI está ajustado para la tendencia a cuajar el fruto en exceso, proporcionando categorías que difieren en el exceso.

Otro impacto negativo sobre el HI es el llenado insuficiente y el aborto de los frutos más jóvenes, debido a la falta de asimilados fotosintéticos. La fotosíntesis está íntimamente correlacionada con la conductancia estomática. El estrés hídrico, al reducir la abertura estomática, disminuye la cantidad de asimilados disponibles para llenar todos los frutos en desarrollo. Por tanto, los frutos más jóvenes son los que tienen más probabilidad de ser abortados y solamente los frutos de más edad maduran, pero probablemente no están suficientemente llenos. Esto ocurre durante el período de llenado y madurez del grano, cuando ya ha pasado la mayor parte del crecimiento vegetativo y la mayoría de asimilados van al grano. *AquaCrop* simula esto de dos maneras; una es sencillamente reduciendo el HI con un coeficiente que es una función del Ks para los estomas. Sin embargo, el cierre estomático a menudo puede ser solamente la causa menor, porque el estrés hídrico en esta etapa de crecimiento comúnmente acelera la senescencia del dosel, provocando una disminución temprana del área de superficie fotosintética y acorta la duración del dosel. Como está programado en *AquaCrop,* el HI se incrementa continuamente hasta la madurez normal (Figura 6), pero solamente si se conserva una parte de la cobertura verde. Cuando la CC disminuye hasta un determinado valor de límite inferior, se considera que el HI ha llegado a su valor final. Cuando la CC llega prematuramente a este límite inferior debido a la senescencia temprana inducida por el estrés, el HI se reduce automáticamente. Este efecto puede ser drástico si la duración del doisel se acorta sustancialmente.

El último impacto negativo en el HI tiene que ver con que el estrés hídrico no sea suficiente. Esto se centra en la competencia entre el crecimiento vegetativo y el reproductivo, que también es responsable del impacto positivo del estrés hídrico en el HI. Como se comprobó para el algodón y algunos otros cultivos, el HI puede ser reducido por un crecimiento vegetativo (foliar) demasiado exuberante durante la fase reproductiva, cuando el agua está completamente disponible; mientras que restringir el crecimiento vegetativo mediante un estrés hídrico (y de nitrógeno) leve mejora el HI. La causa es aparentemente la competencia por los asimilados. El efecto negativo sobre el HI se presenta cuando la gran disponibilidad de agua estimula el crecimiento foliar rápido, con demasiados asimilados desviados a los órganos vegetativos, privando a las potenciales flores más jóvenes o a los frutos nacientes, haciendo que se caigan del cultivo. El resultado final es que maduran muy pocos frutos, y se reduce el HI. Por otro lado, el estrés hídrico leve reduciría sustancialmente el crecimiento foliar porque éste es más sensible al estrés hídrico, mientras que los estomas, por ser sustancialmente menos sensibles, permanecerían abiertos para mantener la fotosíntesis. Por consiguiente, sin la desviación excesiva a los órganos vegetativos, hay una gran cantidad de asimilados disponibles para mejorar la retención y crecimiento del fruto, conduciendo a un HI mayor. *AquaCrop* simula este comportamiento contando con las funciones de Ks para el crecimiento foliar ($Ks_{exp,w}$) y para el cierre de los estomas (Ks_{sto}), con un HI que aumenta a medida que el $Ks_{exp,w}$ disminuye, y que se reduce a medida que el Ks_{sto} disminuye. En el ajuste, el HI al principio aumenta a medida que el estrés se desarrolla y el crecimiento vegetativo se inhibe; después aumenta aún más a medida que el estrés se intensifica, hasta que los estomas empiezan a cerrarse, restringiendo la fotosíntesis, momento en el cual el HI no cambia. En algún punto de severidad del estrés, el HI se reduce al valor normal porque el efecto positivo de la inhibición del crecimiento foliar se contrarresta con el efecto negativo del cierre de los estomas. A medida que el

estrés se intensifica más allá de este punto, los efectos globales se tornarían negativos con los parámetros apropiados de configuración del programa (Figura 13).

FIGURA 13 Multiplicador (f_{HI}) que ajusta el índice de cosecha de referencia (HI_o) para varios agotamientos en la zona radicular con indicación del grado (área sombreada azul) de disminución del crecimiento del dosel y el cierre de los estomas cuando aumenta el agotamiento en la zona radicular (D_r).



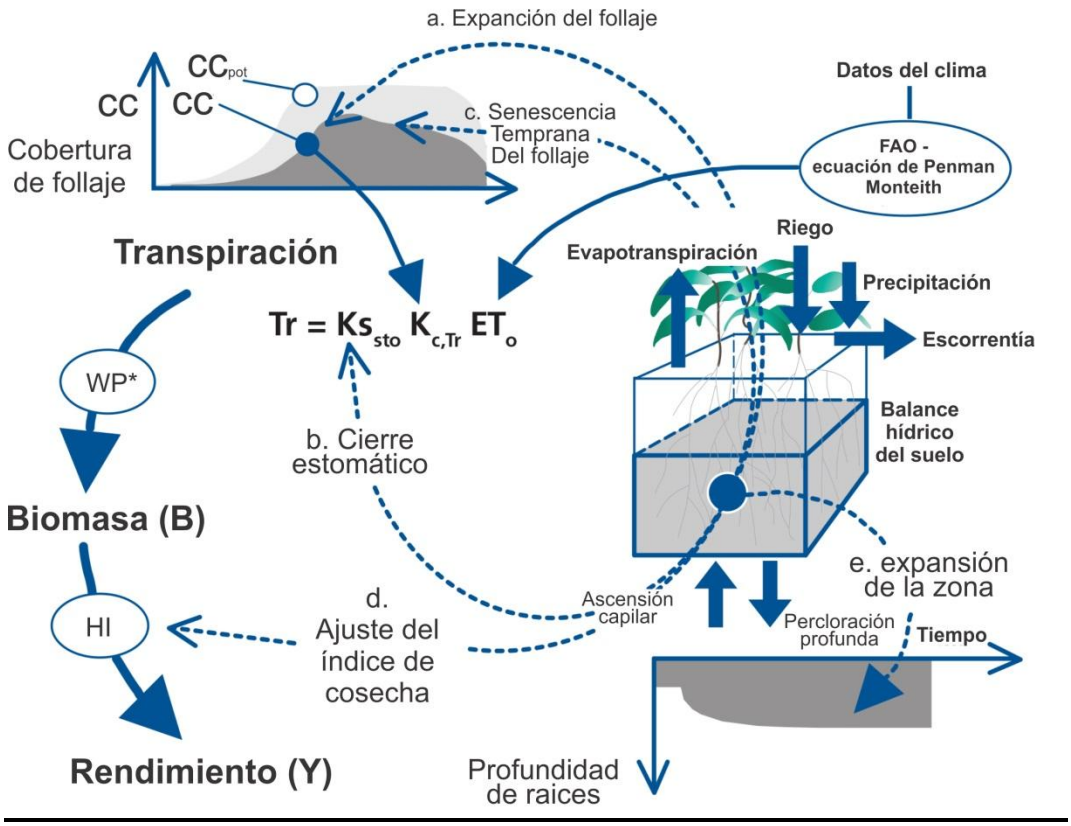
Además de los efectos por estrés hídrico en la competencia por los asimilados durante el cuajo del fruto y el llenado de los granos, estudios han mostrado que el estrés hídrico leve a moderado justo antes de la fase reproductiva (preantesis), puede aumentar el HI en algunos casos. El incremento está correlacionado con la reducción de la acumulación de biomasa. *AquaCrop* incluye un algoritmo que opera en algunos cultivos, para aumentar el HI basándose en el efecto del estrés en la reducción (relativo al potencial) de la biomasa acumulada, hasta el comienzo de la floración. El efecto depende del alcance de la reducción y se limita a un rango con efecto óptimo antes del punto medio del rango.

En general, en *AquaCrop* el HI de referencia se ajusta diariamente para los efectos del estrés hídrico basados en la inhibición del crecimiento foliar, el cierre de los estomas, la reducción de la biomasa en la preantesis, la reducción de la duración del dosel verde debido a la senescencia acelerada y el fallo de la polinización.

Representación esquemática

En la Figura 14 se presenta una representación esquemática de las dinámicas de respuesta del cultivo al estrés hídrico, como la simula *AquaCrop*.

FIGURA 14 Representación esquemática de la respuesta del cultivo al estrés hídrico, como la simula *AquaCrop,* en la que se indican (flechas punteadas) los procesos (de a a e) afectados por el estrés hídrico. CC es la cobertura del dosel simulada, $CC_{pot,}$ la cobertura del dosel potencial; $Ks_{sto,}$ el estrés hídrico para el cierre estomático; $K_{c,Tr,}$ el coeficiente de transpiración del cultivo (determinado por la CC y el $K_{c,Trx}$); $ET_{o,}$ la evapotranspiración de referencia; WP*, la productividad del agua normalizada, y HI, el índice de cosecha (adaptado de Raes *et al.,* 2009).

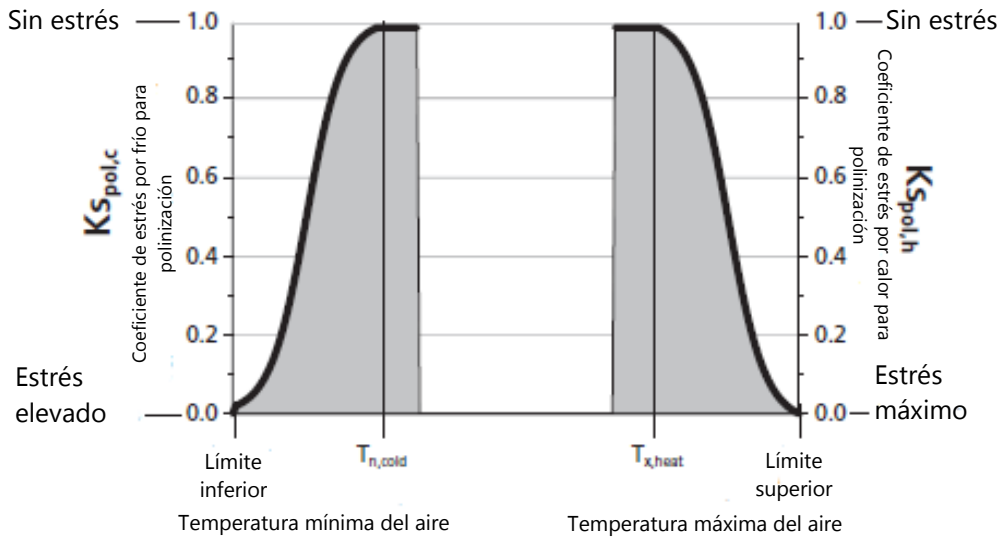


Estrés por temperatura

Al usar GDD como reloj térmico, se tienen en cuenta presuntamente muchos de los efectos de la temperatura sobre los cultivos, como los efectos sobre la fenología y la tasa de expansión del dosel. El efecto de la temperatura en la transpiración se explica por separado, por la ET_o. Sin embargo, los efectos perjudiciales de las temperaturas extremas o cercanas a las extremas caen en la categoría de estrés y requieren consideraciones diferentes.

En general, *AquaCrop* simula los efectos del estrés por temperatura con los coeficientes de estrés por temperatura, que varían de cero a 1.0 y son funciones de la temperatura del aire o de los GDD. El valor de los GDD para un día determinado puede ser considerado como una medida integrada de la temperatura diaria. Los umbrales superior e inferior delimitan la ventana de temperatura dentro de la cual se afecta el proceso. A falta de datos más determinantes actualmente, la forma de la curva del Ks vs. temperatura (Figura 15) se considera como logística, y se puede cambiar en el futuro cuando se dispongan de mejores datos.

FIGURA 15 Variación del coeficiente de estrés por temperatura (Ks) por frío (izquierda) y por calor (derecha) en la polinización



Un efecto importante del estrés por temperatura ocurre en la polinización, que se inhibe a temperaturas demasiado altas o demasiado bajas. El gráfico de la izquierda en la Figura 15 ilustra la curva del $Ks_{pol,c}$ para estrés por frío en la polinización, con la temperatura mínima diaria (T_n) como la variable independiente y el umbral superior establecido en un umbral de temperatura específico ($T_{n,cold}$) y el umbral inferior a 5 °C por debajo de la $T_{n,cold}$. La curva de estrés por calor en la polinización es la imagen especular del estrés por frío (gráfico derecho en la Figura 15), salvo que la variable independiente es la temperatura máxima (T_x) y el rango sería más alto y los umbrales también. Análogo al caso del estrés hídrico, en el caso de estrés por frío la polinización empieza a inhibirse cuando la T_n cae por debajo del umbral superior y $Ks_{pol,c}$ cae por debajo de 1.0. La polinización sigue disminuyendo a medida que la T_n y el $Ks_{pol,c}$ disminuyen, y se detiene ($Ks_{pol,c}$ = 0) en el umbral inferior de la T_n o por debajo. El caso de estrés por calor es todo lo contrario: por debajo del umbral inferior, el $Ks_{pol,h}$ es 1.0 y la polinización no se ve afectada, y por encima del umbral superior, el Ks es cero y la polinización se detiene (Figura 15). El efecto definitivo de los estreses por temperatura en la polinización ocurre en el HI, de manera exactamente igual al efecto por estrés hídrico.

Además de los efectos en la polinización, la baja temperatura puede obstaculizar la producción de biomasa, más allá de la restricción explicada por los GDD e independientemente de la Tr y la ET_o. *AquaCrop* se ajusta a esto, nuevamente con el enfoque del coeficiente de estrés. La biomasa producida cada día se multiplica por el Ks para el estrés por frío ($Ks_{b,c}$) para explicar la restricción sobre la producción. Como la biomasa se deriva de la Tr usando la WP*, una constante, ajustar la biomasa de esta manera es, en esencia, un ajuste de la WP*.

Estrés de aireación

La falta de aireación del suelo es otro estrés abiótico tenido en cuenta por *AquaCrop*. El tratamiento es sencillo: se usa el enfoque del coeficiente de estrés para modular la Tr y por ende, la producción de biomasa y la ET. La variable independiente para la función de Ks (Ks_{aer}) es el porcentaje del volumen de poros en el suelo ocupado por aire en la zona radicular. Se asume que la función es lineal con un umbral superior ajustable y el umbral inferior fijo en cero (suelo completamente

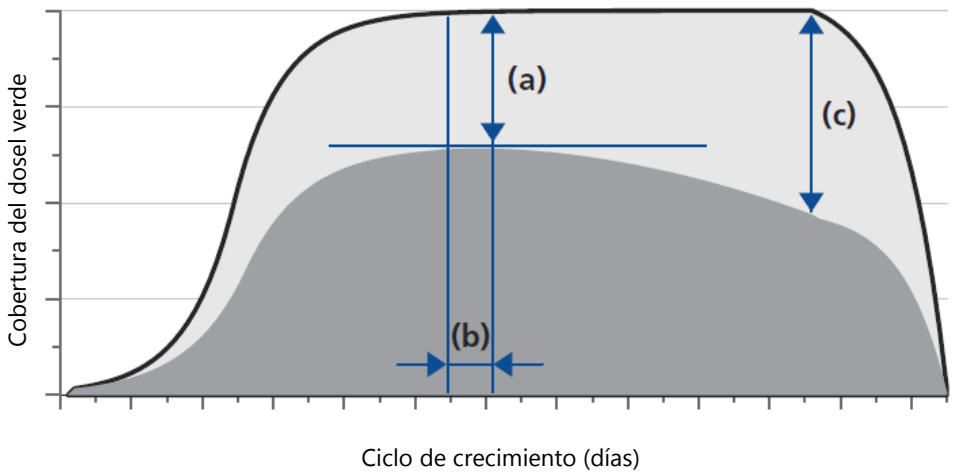
saturado). Cuando el porcentaje del volumen de aire cae por debajo del umbral superior, el Ks_{aer} empieza a disminuir por debajo de 1.0, causando una reducción proporcional en la Tr.

La sensibilidad del cultivo al encharcamiento se especifica configurando el umbral superior, e indicando el número de días que debe permanecer el encharcamiento antes de que el estrés sea completamente efectivo y la Tr se vea afectada. Cabe anotar que hasta ahora los parámetros de estrés de aireación dados para los cultivos ya calibrados son todos valores predeterminados, porque son raros los datos definitivos para el cultivo bajo estrés de aireación.

Baja fertilidad del suelo (o estrés por nutrientes minerales)

Como ya se mencionó en *Manejo de campo, AquaCrop* no simula ciclos de nutrientes y balances, pero proporciona los medios para ajustarse a los efectos de la fertilidad con un conjunto de coeficientes de estrés por fertilidad del suelo, para simular el impacto en la capacidad de crecimiento del cultivo en términos de cuatro componentes esenciales para la productividad: coeficiente de crecimiento del dosel (CGC); cobertura del dosel máxima (CC_x); disminución del dosel, que incluye una disminución lenta pero sustancial hasta alcanzar la CC_x además de la senescencia cerca de la madurez, y WP*. Al tener en cuenta los primeros tres de estos componentes, cuando son afectados por la fertilidad, se produce un patrón de simulación de CC vs. tiempo muy parecido al de los gráficos basados en los datos medidos (Figura 16). El último componente, WP*, también se ajusta hacia abajo para la baja fertilidad. La base para efectuar estos ajustes son las siguientes observaciones –bien establecidas en la bibliografía: las plantas que crecen en suelos deficientes en nutrientes (N, P, y/o K) producen hojas más lentamente, con bastantes hojas inferiores senescentes o muy temprano, pero las hojas de más arriba y las más jóvenes permanecen verdes hasta la madurez o hasta muy cerca de la madurez. La capacidad fotosintética de las hojas deficientes es menor y su proporción entre fotosíntesis y transpiración es menor, consecuente con los cambios observados en la WP en los estudios de campo.

FIGURA 16 Cobertura del dosel verde (CC) para fertilidad del suelo ilimitada (área sombreada clara) y limitada (área sombreada oscura) indicando los procesos resultantes en (a) una cobertura del dosel máxima reducida, (b) un desarrollo del dosel más lento, como lo indica la pendiente reducida de CC vs. tiempo al inicio del ciclo, y (c) una disminución continua y lenta de la CC una vez que se alcanza la cobertura del dosel máxima.



AquaCrop proporciona ajustes predeterminados de los componentes esenciales para varias categorías que difieren en la limitación de la fertilidad, que van desde casi óptima hasta baja. Para hacer los ajustes más confiables, se deberían emplear los datos de producción de biomasa

obtenidos a diferentes niveles de fertilidad en la misma ubicación y tiempo para hacer una calibración local, como se ha previsto en *AquaCrop*.

Estrés por salinidad del suelo

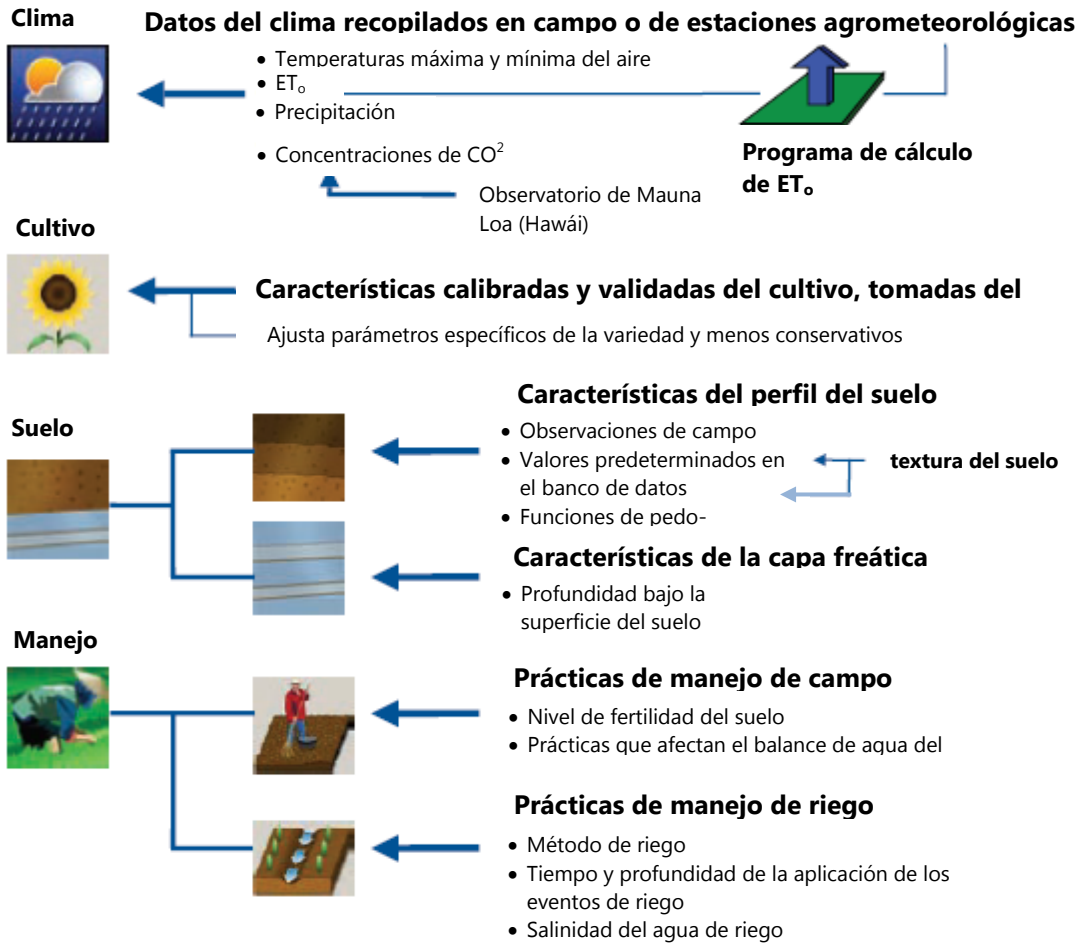
La conductividad eléctrica promedio del extracto de suelo saturado (ECe) de la zona radicular es el indicador del estrés por salinidad del suelo. En el umbral inferior de salinidad del suelo (ECe_n), el Ks es menor de 1 y el estrés comienza a afectar la producción de biomasa. El Ks se vuelve cero en el umbral superior para la salinidad del suelo (ECe_x) y el estrés se vuelve tan severo que se detiene la producción de biomasa. Los valores de ECe_n y ECe_x para muchos cultivos agrícolas son dados por Ayers y Westcot (1985), en el Estudio FAO: *Riego y Drenaje N.º 29*.

El agua del suelo en la zona radicular se vuelve menos disponible para que la extraigan las raíces cuando se acumulan las sales en el perfil del suelo. Esto afecta el desarrollo del cultivo, la transpiración del cultivo y por tanto la producción de biomasa y el rendimiento cosechable. *AquaCrop* no simula cada una de estas respuestas del cultivo, pero simula únicamente su efecto global en la producción de biomasa. Dada una relación calibrada por el usuario entre el estrés por salinidad del suelo y la producción relativa de biomasa, *AquaCrop* traduce la reducción esperada de la producción en un estrés resultante en el cierre de los estomas (Ks_{sto}) y que afecta el desarrollo del dosel (CGC, CC_x y la disminución del dosel cuando alcanza la CC_x). La simulación es similar al enfoque empleado para simular la respuesta del cultivo a la baja fertilidad del suelo.

DATOS DE ENTRADA

AquaCrop usa un número relativamente pequeño de parámetros y variables de entrada bastante intuitivas, ya sean ampliamente usadas o que en su gran mayoría puedan determinarse mediante métodos sencillos. Los datos de entrada son: datos del clima, características del suelo y del cultivo, y prácticas de manejo que definen el ambiente en el que se desarrollará el cultivo, y se resumen esquemáticamente en la Figura 17. Los datos de entrada se almacenan en los archivos de clima, cultivo, suelo y manejo, y se pueden recuperar fácilmente de la base de datos de *AquaCrop* y ajustarse con la interfaz de usuario.

FIGURA 17 Datos de entrada, que definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo.



Datos del clima

Para cada día del período de simulación, *AquaCrop* requiere una temperatura mínima (T_n) y máxima (T_x) del aire, precipitación, y evapotranspiración de referencia (ET_o) como medida de la demanda evaporativa de la atmósfera. Adicionalmente, la concentración atmosférica media anual de CO_2 debe ser conocida.

Por consistencia y como norma, la ET_o se calcula usando la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.,* 1998), a partir de set completos de datos diarios del clima. El set de datos completo comprende: radiación, T_x y T_n, velocidad del viento y humedad, todos diarios. Un programa de cálculo de ET_o, un software libre de dominio público, está disponible en el sitio web de la FAO para el cálculo (FAO, 2009). El programa acepta datos del clima dados en una amplia variedad de unidades. Si no se tiene el conjunto de datos completo, el programa también puede estimar la ET_o a partir de datos promedio mensuales o de 10 días, y hacer aproximaciones cuando faltan una o varias clases de datos requeridos del clima. Esto permite que un usuario pueda ejecutar simulaciones aproximadas incluso cuando los datos del clima son mínimos.

Sin embargo, se debe tener cuidado para evitar usar inapropiadamente la versatilidad del programa de cálculo de ET_o. Para la validación y la parametrización del modelo para un cultivo en particular,

no se debería confiar en dichas aproximaciones. Mientras más elementos del clima falten más difícil es la aproximación de ET_o, menos fiables serán los resultados simulados y los parámetros derivados de *AquaCrop*.

Los datos diarios, de 10 días o mensuales de temperatura del aire, ET_o y precipitación para cada ambiente específico son almacenados en su propia carpeta de clima en la base de datos de *AquaCrop*, desde donde el programa recupera los datos en el momento de la ejecución. En caso de que no se tengan los datos diarios del clima, ya que el programa se ejecuta en pasos diarios, invoca procedimientos incorporados para aproximar los datos diarios del clima a partir de los promedios de 10 días o mensuales. Nuevamente, mientras más datos aproximados se tengan, menos fiable será el resultado. Este es un problema particularmente grave en el caso de los datos de precipitación. Con su distribución extremadamente heterogénea en el tiempo, el uso de los datos de precipitación de 10 días o mensuales enmascara completamente la naturaleza dinámica de la respuesta de cultivo al estrés hídrico.

Adicionalmente, *AquaCrop* proporciona la concentración media anual de CO_2 requerida para la simulación, aplicable para la mayoría de ubicaciones. Estos valores anuales son medidos en el Observatorio de Mauna Loa en Hawái y comprenden el período desde 1902 hasta los datos disponibles más recientes. De la base de datos de *AquaCrop,* o de los datos introducidos por el usuario, se pueden recuperar varios valores proyectados, siguiendo el escenario del cambio climático por investigar.

Parámetros de cultivo

Aunque están sustentados por procesos biofísicos fundamentales y complejos, *AquaCrop* usa un número relativamente pequeño de parámetros de cultivo para caracterizar el cultivo. La FAO ha calibrado los parámetros de cultivo para varios cultivos (Sección 3.4), y los proporciona como valores predeterminados en los archivos de cultivo almacenados en la base de datos de *AquaCrop*. Los parámetros se clasifican en dos categorías: *conservativos* o *varietales* y *dependientes de las condiciones* (véase también la Sección 3.3).

- Los parámetros *conservativos* de cultivo no cambian con el tiempo, las prácticas de manejo, el clima, ni la ubicación geográfica. Con respecto a las características de las variedades, hasta ahora los ensayos muestran que el mismo valor de un parámetro conservativo es aplicable a muchas variedades, aunque se puede esperar alguna desviación para las variedades de características extremas. La decisión de asignar un parámetro particular a la categoría conservativa está basada en análisis teóricos y conceptuales, y en datos empíricos extensos que demuestran que son casi constantes. Dependiendo de la extensión de los set de datos empleados para la calibración, el valor calibrado para un parámetro conservativo puede requerir algunos ajustes menores. Sin embargo, esto se debe hacer solamente si el ajuste está basado en datos experimentales de buena calidad. Generalmente, y en principio, los parámetros conservativos no requieren ajustes a las condiciones locales o para las variedades comunes, y se pueden usar tal cual en las simulaciones. Los parámetros conservativos de cultivo se muestran en la Tabla 1 .

- Los parámetros de cultivo *varietales* y *dependientes de las condiciones*, se sabe que varían normalmente dependiendo de las variedades y de las situaciones. Como ejemplos destacados están la duración del ciclo biológico y la fenología de las variedades. En la Tabla 2 se encuentra una descripción de los parámetros de cultivo que probablemente requieran ajustes, para explicar la variedad local o las condiciones de manejo y ambientales locales. El HI de referencia (HI_o) normalmente es conservativo para las variedades de alto rendimiento bien desarrolladas, y por lo tanto no está incluido en la Tabla 2 como un parámetro específico de variedad. Sin embargo, se sabe que algunas variedades especiales pueden tener, de forma consecuente, HI ligeramente mayor o menor que las variedades comunes. En dichos casos se justificaría ajustar el HI_o

TABLA 1 Parámetros conservativos de cultivo.

Desarrollo y crecimiento del cultivo
• Temperatura base y temperatura superior para grados día en aumento • Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (cc_o) • Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC); Coeficiente de disminución del dosel (CDC) • Grado de determinación del cultivo vinculada/no vinculada con la floración; Exceso de frutos potenciales (%)
Transpiración del cultivo
• Disminución del coeficiente de cultivo como resultado del envejecimiento
Producción de biomasa y formación de fruto
• Productividad del agua normalizada por ET_o y CO_2 (WP*) • Coeficiente de reducción que describe el efecto de los productos sintetizados durante la formación del fruto en la productividad del agua normalizada • Índice de cosecha de referencia (HI_o)
Estreses
Estreses hídricos • Umbrales superior e inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel y forma de la curva de estrés • Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés • Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés • Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para fallo de la polinización y forma de la curva de estrés • Posible incremento del HI a causa del estrés hídrico antes de la floración • Coeficiente que describe el impacto positivo sobre el HI del crecimiento vegetativo restringido durante la formación del fruto • Coeficiente que describe el impacto negativo sobre el HI del cierre estomático durante la formación del fruto • Incremento máximo permisible del HI especificado • Punto anaerobiótico (para los efectos del encharcamiento sobre la Tr)
Estrés por temperatura • Temperaturas mínima y máxima del aire por debajo de las cuales la polinización empieza a fallar • Grados día mínimos requeridos para la producción completa de biomasa

TABLA 2 Lista de parámetros de cultivo que probablemente requieran ajustes para explicar las características de la variedad y el manejo y el ambiente local

Fenología (específica de la variedad)
• Tiempo para la floración o el comienzo de la formación del fruto • Duración de la etapa de floración • Tiempo para empezar la senescencia del dosel • Tiempo para madurez (es decir, duración del ciclo de cultivo)
Dependientes del manejo
• Densidad de plantas • Tiempo para el 90 % de emergencia • Cobertura del dosel máxima (depende de la densidad de plantas y variedad; véase Sección 3.3)
Dependientes del suelo
• Profundidad máxima de raíces • Tiempo para alcanzar la profundidad máxima de raíces
Dependientes del suelo y del manejo
• Respuesta a la fertilidad del suelo • Estrés por salinidad del suelo

Cabe recalcar que, para los procesos dependientes de la temperatura, como la expansión del dosel con su parámetro conservativo CGC, la constancia de sus parámetros está basada por completo en operar el modelo en el modo GDD. Es obvio que, para la simulación de producción y uso de agua bajo diferentes climas anuales o diferentes momentos de la estación, *AquaCrop* debe ejecutarse en modo GDD; de lo contrario, el modelo ignorará por completo los efectos de la temperatura en procesos clave del cultivo.

Otra consideración importante es la rigurosidad de la calibración y la amplitud del conjunto de datos en el cual se basa la calibración. Son necesarios diversos set de datos para cubrir un amplio rango de condiciones de suelo y de clima, y más variedades. Particularmente cruciales son los conjuntos de datos para condiciones hídricas deficientes, de los cuales depende la calibración de los parámetros de estrés hídrico, y a menudo no están fácilmente disponibles.

Del número de cultivos calibrados por la FAO, la rigurosidad varía desde muy buena hasta aceptable y limitada. Los usuarios deben consultar la calificación, disponible en el sitio web de *AquaCrop*, para determinar la solidez de los parámetros conservativos. Con el tiempo, la calibración de los diversos cultivos mejorará en base a los set de datos adicionales, y se calibrarán más especies de cultivos.

Se remite al lector a la Sección 3.3 de este Capítulo y al *Manual de Referencia de AquaCrop* (Raes *et al.,* 2011), para consultar los procedimientos sobre cómo calibrar un cultivo para condiciones locales y cómo modificar los parámetros del cultivo en los archivos de datos.

Datos del suelo

Los parámetros necesarios son: contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP), y saturación, y la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), para cada capa de suelo diferenciada que abarca la zona radicular. A partir de estas características, *AquaCrop* deriva otros parámetros que controlan la evaporación del suelo, el drenaje interno y la percolación profunda, la escorrentía superficial y el ascenso capilar (Raes *et al.,* 2011). Los valores predeterminados para estos parámetros pueden ajustarse si el usuario tiene acceso a información

más precisa. En caso de que falten algunos valores de los primeros cuatro parámetros, el usuario puede emplear los valores indicativos proporcionados por *AquaCrop* para diversas clases texturales de suelo, o importar datos derivados o determinados localmente de la textura del suelo con ayuda de funciones de pedo-transferencia (véase por ejemplo *The Hydraulic Properties Calculator (programa de cálculo de las propiedades hidráulicas)* en la Red: http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm). Estas funciones están basadas en la granulometría primaria de las diferentes texturas de suelo. Como estas funciones dependen de la clase de textura solamente, no explican las diferencias en la agregación del suelo y deben considerarse aproximaciones. Los usuarios deberían ajustar sus estimaciones en base a sus propios datos y experiencia.

Si existe una capa del suelo que detiene la profundización de las raíces, su profundidad también debe especificarse. Además, se debe especificar el contenido de agua de las capas del perfil del suelo al comienzo del período de simulación, si no es a la capacidad de campo.

Datos de manejo

Las prácticas de manejo se dividen en: manejo de riego y manejo de campo. En las prácticas de manejo de campo se encuentran las opciones de niveles de fertilidad del suelo, nivel de infestación de malas hierbas, y prácticas que afectan el balance de agua del suelo como el acolchado del suelo para reducir la evaporación del suelo, los caballones para almacenar agua en el campo, y la eliminación de la escorrentía mediante prácticas de conservación.
Los niveles de fertilidad del suelo van desde no limitante a baja, con efectos en la WP, en la tasa de crecimiento de dosel, en la cobertura del dosel máxima y en la senescencia.

En manejo de riego el usuario elige si el cultivo es de secano o de riego. Si es de riego, el usuario especifica el método de aplicación (por aspersión, por goteo o superficial), la fracción de superficie húmeda, y para cada evento de riego, la calidad del agua de riego, el momento y la cantidad de riego aplicado.

También hay opciones para evaluar los requerimientos netos de riego y para generar calendarios de riego basados en el tiempo especificado y los criterios de profundidad. Como los criterios pueden cambiar durante la estación, el programa proporciona los medios para evaluar las estrategias de riego deficitario aplicando las cantidades elegidas de agua en varias etapas de desarrollo del cultivo.

INTERFAZ DEL USUARIO Y DATOS DE SALIDA

AquaCrop tiene un programa de software controlado a través de menús, con una interfaz de usuario bien desarrollada. Los múltiples gráficos y representaciones visuales esquemáticas en los menús ayudan al usuario a percibir las consecuencias de los cambios en los datos de entrada y a analizar los resultados de la simulación.

Menú principal

El *Main Menu* (Menú Principal) de *AquaCrop* tiene tres paneles (Figura 18): *Environment and Crop* (Ambiente y Cultivo), *Simulation* (Simulación) y *Project* (Proyecto).

En el panel *Environment and Crop* (Ambiente y Cultivo) del Menú Principal, los usuarios tienen acceso a todo un conjunto de menús de los cuatro componentes estructurales de *AquaCrop* (clima, cultivo, manejo, suelo), donde se seleccionan los archivos, se muestran o actualizan los datos de entrada y se especifica la fecha de siembra. Se pueden recuperar datos a partir de los archivos de entrada almacenados en la base de datos. Si no se tienen archivos de entrada se proporciona la configuración predeterminada.

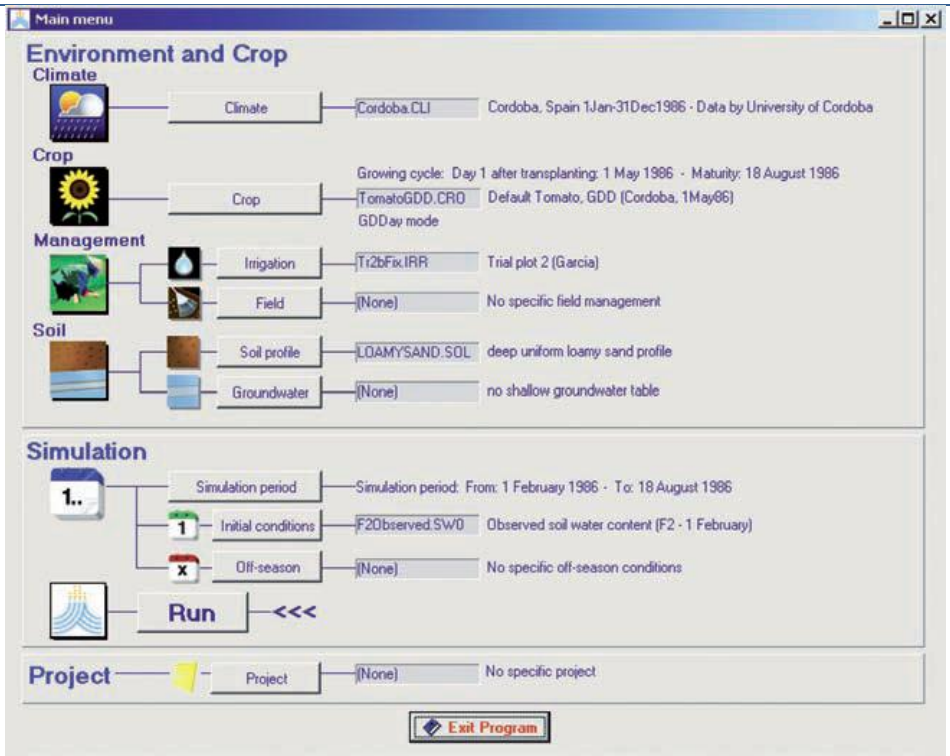
En el panel *Simulation* (Simulación) se puede especificar un período de simulación distinto al ciclo biológico del cultivo, y las condiciones de humedad del suelo y el contenido de sales en el perfil del suelo al comienzo de la simulación. También, se pueden especificar prácticas (acolchado del suelo o riego) fuera de estación (fuera del período de crecimiento). Estas características permiten simular los efectos del riego pre-estación y en barbecho.

En el panel *Project* (Proyecto) los usuarios pueden definir proyectos para simular cultivos plurianuales, ya sea del mismo cultivo o rotaciones de cultivos. Nótese que el archivo de clima debe abarcar todos los años de la simulación. En *Project* (Proyecto), los usuarios también pueden especificar todos los archivos de entrada para cualquier simulación de prueba para un solo año o estación, para evitar tener que elegir nuevamente cada archivo por separado cuando se reanude la prueba después de salir de *AquaCrop*.

Visualización de los resultados de la simulación

Cuando se ejecuta una *simulación,* el usuario puede hacer un seguimiento de los cambios en la humedad del suelo y el contenido de sales, los componentes del balance de agua del suelo, el desarrollo del dosel, la transpiración, la acumulación de biomasa, y el rendimiento y la productividad del agua. Los resultados clave de la simulación se muestran en varios gráficos, actualizados al final de cada intervalo diario. A partir de estos gráficos y visualizaciones asociadas el usuario puede seguir los efectos dinámicos de los estreses hídrico, por temperatura, por fertilidad y por salinidad, sobre el desarrollo del cultivo y la producción y el uso del agua. Al alternar entre diferentes visualizaciones de los resultados en las *pestañas*, para distintos aspectos del cultivo, humedad del suelo y balance de sales, el usuario puede observar y analizar un evento en particular con respecto a un parámetro específico.

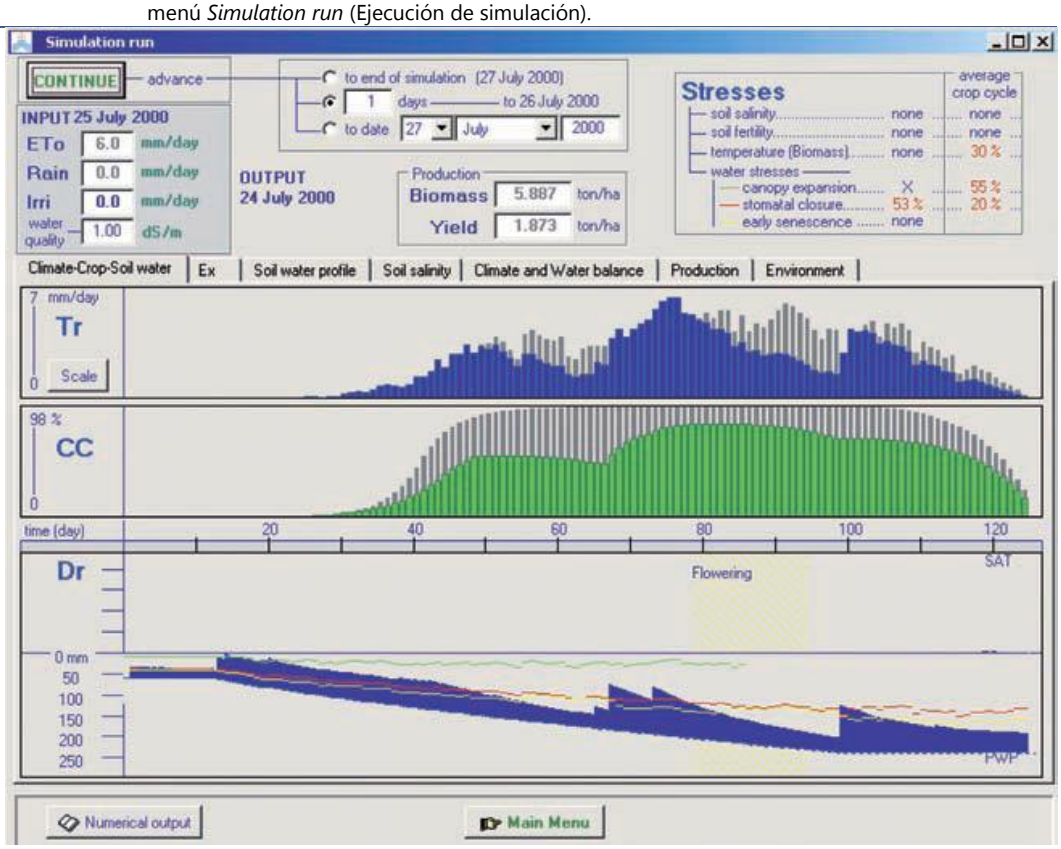
FIGURA 18 Menú principal de *AquaCrop*.



Climate-Crop-Soil water (Clima-Cultivo-Humedad del suelo) es la *pestaña* más útil de todas (Figura 19). Muestra tres gráficos representados en función del tiempo: (i) agotamiento de la humedad del suelo en la zona radicular (D_r), con los tres umbrales de estrés hídrico representados por líneas de distintos colores; (ii) la progresión correspondiente de la cobertura del dosel verde (CC), con la CC potencial (sin estreses) sombreada en gris; y (iii) la transpiración (Tr) del dosel (para la magnitud simulada de la CC), con la Tr potencial sombreada en gris. En la parte superior del menú se muestran la biomasa y el rendimiento, junto con el estado de los estreses hídrico, por temperatura, por fertilidad del suelo y por salinidad. Los gráficos muestran de una manera vistosa cómo se ven afectadas la expansión del dosel y la transpiración cuando la falta de lluvia y riego conducen a disminuciones en el contenido de humedad del suelo en la zona radicular por debajo del umbral (línea verde, gráfica inferior), afectando la expansión del dosel; por debajo del umbral para estomas (línea roja) afectando la transpiración; y por debajo del umbral (línea amarilla) desencadenando la senescencia del dosel. También son evidentes en los gráficos los efectos inversos del suministro de agua o riego.

Una característica del menú *Simulation run* (Ejecución de simulación) es particularmente útil para usuarios que buscan desarrollar un calendario de riego deficitario controlado para optimizar el uso de agua. Al seleccionar intervalos cortos de simulación (1 a 3 días), se puede especificar una cantidad de riego en el panel superior izquierdo en cualquier intervalo de tiempo (y fecha) durante una ejecución de simulación, permitiendo un escrutinio rápido y cercano de los beneficios resultantes en el contexto de tiempo, frecuencia y cantidad de riego. Para información más detallada, véanse la Sección 3.3 y el *Manual de Referencia de AquaCrop* (Raes *et al.,* 2011)

FIGURA 19 Representaciones gráficas de los datos de salida de Clima-Cultivo-Humedad del suelo en el menú *Simulation run* (Ejecución de simulación).



Datos de salida

Al salir del menú *Simulation run* (Ejecución de la simulación), se le pregunta al usuario si desea guardar los datos de salida, y puede elegir una o más de las categorías de salida: diaria (Tabla 3) y/o por estación. A los archivos se les asigna automáticamente la extensión OUT, con el nombre de la categoría de los contenidos del archivo formando la última parte del nombre predeterminado de archivo, como se muestra en la Tabla 3.

TABLA 3 Nombre predeterminado de archivo y contenido de los siete archivos de salida con los resultados de simulación diaria.

Nombre predeterminado de archivo	Naturaleza y número (en paréntesis) de las variables de salida en el archivo
ProjectCrop.OUT	procesos de cultivo, producción y datos relacionados (18)
ProjectWabal.OUT	balance del agua del suelo y datos relacionados (16)
ProjectProf.OUT	contenido de agua en el perfil de la zona radicular (10)
ProjectSalt.OUT	salinidad del suelo en el perfil de la zona radicular (8)
ProjectCompWC.OUT	contenido de humedad del suelo de los compartimentos del modelo (12)
ProjectCompEC.OUT	salinidad del suelo de los compartimentos del modelo (12)
ProjectInet.OUT	requerimientos netos de riego (si son simulados) (5)

Los usuarios deberían cambiar la primera parte (*Project*) del nombre del archivo para identificar la simulación particular; de lo contrario la siguiente simulación tendría automáticamente asignado el mismo nombre de archivo predeterminado y sobreescribiría los archivos resultantes de la simulación anterior. Los resultados de la simulación diaria también se resumen como totales por estación. Los archivos se almacenan por defecto en el directorio OUTP de *AquaCrop*. Los datos en los archivos se pueden recuperar en programas de hojas de cálculo para análisis y procesamientos posteriores.

BIBLIOGRAFÍA

Adams, J.E., Arkin, G.F. y Ritchie, J. T. 1976. Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying. *Soil Science Society American Journal* 40: 436-442.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. y Smith M. 1998. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO: Riego y drenaje* N.º 56.

Ayers, R.S. y Westcot, D. W. 1985. Water quality for agriculture. *Estudio FAO: Riego y drenaje* N.º 29. FAO, Roma.

Bradford, K.J. y Hsiao, T.C. 1982. Physiological responses to moderate water stress. Págs. 264-324. En: Lange, O. R., P. S. Nobel, C.B. Osmond & H. Ziegler, eds. *Encyclopedia Plant Physiol.* New Series, Vol. 12B. *Physiological Plant Ecology II.* Berlín, Springer-Verlag.

de Wit, C. T. 1958. Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk*. Onderz. 64.6 Institute of Biological Chemistry Research On Field Crops and Herbage, Wageningen, Países Bajos.

Doorenbos, J. y Kasssam, A. H. 1979. Respuesta del rendimiento al agua. *Estudio FAO: Riego y drenaje* N.º 33. Roma, FAO.

FAO, 2009. ET_o Calculator, *Land and Water Digital Media Series* N.º 36, Roma.

Heng, L.K., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T. y Steduto, P. 2009. Validating the FAO *Aquacrop* model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal* 101: 488-498.

Hsiao, T.C. y Bradford K.J. 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. En: Taylor H.M., Jordan, W.A., Sinclair, T.R., eds. *Limitations to efficient water use in crop production.* Madison, Wisconsin, EE. UU., ASA, págs. 227-265.

Hsiao, T.C., Lee H., Steduto, B., Basilio, R.L., Raes, D. y Fereres, E. 2009. *AquaCrop* - the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal* 101: 448-459.

Hsiao, T.C. y Xu, L.K. 2000. Sensitivity of growth of roots vs. leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany* 51: 1595-1616.

McMaster, G.S. y Wilhelm, W.W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology,* 87: 291-300.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., y Fereres, E. 2009. *Aquacrop* - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal* 101: 438-447.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2011. *Aquacrop* - Reference Manual. Disponible en: *http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html*

Steduto P. y Albrizio R., 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea - II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Journal of Agricultural And Forest Meteorology,* 130 (3-4), 269-281.

Steduto P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science,* 25:189-207.

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. y Fereres, E. 2009. *Aquacrop* - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal,* 101: 426-437.

Tanner C.B. y Sinclair T.R. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? En: Taylor H. M., Jordan W. A., Sinclair T. R. (eds.) Limitations to efficient water use in crop production. Madison, Wisconsin, EE. UU., ASA, págs. 1-27.

Villalobos, F. J. y Fereres, E. 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agronomy Journal* 82: 1153-1159

AUTOR PRINCIPAL

Elias Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)

AUTORES COLABORADORES

Sue Walker
(Universidad del Estado Libre, Bloemfontein, Sudáfrica),

Lee K. Heng
(Manejo de Suelo y Agua y Sección de Nutrición de Cultivos, Programa Conjunto División FAO / IAEA, Viena, Austria),

Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE.UU.),

Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierra y Agua, Roma, Italia),

Dirk Raes
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica),

Gabriella Izzi
(anteriormente FAO, División de Tierra y Agua, Roma, Italia; en la actualidad Banco Mundial, Washington, EE.UU.),

Senthold Asseng
(anteriormente CSIRO, Wembley, Australia; en la actualidad Universidad de la Florida, Gainesville, EE.UU.),

Steve R. Evett
(USDA-ARS, Laboratorio de Investigación en Conservación y Producción, Bushland, Texas, EE.UU.)

3.2 Aplicaciones de *AquaCrop*

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola se lleva a cabo en un entorno caracterizado por el riesgo y la incertidumbre. Esto ocurre especialmente en zonas áridas y semiáridas, en donde el suministro de agua procedente de las lluvias a los cultivos es variable y errático. Aún en las áreas con riego, la escasez de agua no es poco común, afectando frecuentemente los rendimientos; por lo tanto, se requieren procedimientos y herramientas para predecir la respuesta de los cultivos a un determinado suministro de agua, a fin de reducir la incertidumbre y manejar el riesgo. Durante mucho tiempo, la FAO ha trabajado en proporcionar métodos para ayudar a un diverso rango de usuarios en la determinación de la respuesta del rendimiento al agua. Recientemente, el desarrollo de *AquaCrop* por parte de la FAO proporciona un enfoque mejorado y poderoso para la evaluación del rendimiento alcanzable de los principales cultivos herbáceos, como una función del suministro de agua.

Los principales datos de salida de *AquaCrop* son el rendimiento y el uso del agua (E y Tr) de un cultivo que crece en un lugar específico, con ese clima, suelo, y un determinado suministro de agua (Steduto *et al.,* 2009). Cuando los datos de entrada son exactos, su funcionamiento es preciso, como se muestra en las pruebas de validación realizadas en muchos lugares (p. ej., Mainuddin *et al.,* 2010; Todorovic *et al.,* 2009; Heng *et al.,* 2009; Farahani *et al.,* 2009). La información proporcionada por los modelos de simulación de cultivos, tales como *AquaCrop,* puede ser usada en un sinnúmero de formas y por muchos tipos diferentes de usuarios. Las predicciones del rendimiento pueden ser útiles para los agricultores, especialistas en extensión, consultores de campo, ingenieros, planificadores hídricos, economistas, analistas de políticas y científicos. Los resultados de las simulaciones de *AquaCrop* también pueden ser datos de entrada para otros tipos de herramientas y modelos.

El tipo de aplicación depende del tipo de usuario, del objetivo que el usuario quiere alcanzar y de la escala temporal del análisis. A nivel de agricultores y técnicos agrícolas, la simulación del rendimiento proporciona la información necesaria para explorar los resultados de las decisiones que se pueden tomar en tres niveles temporales

- **Días a semanas:** las decisiones tomadas a **nivel operacional** se refieren a aquellas adoptadas dentro de la campaña del cultivo, en una escala de días a pocas semanas, como la determinación de la fecha y la cantidad del siguiente riego o de una aplicación superficial de fertilizante.

- **Semanas a meses:** las decisiones agrícolas tácticas tienen un marco temporal de semanas a meses y típicamente se toman al inicio o en diferentes momentos durante el período de crecimiento. Un ejemplo sería la determinación del calendario de riego estacional, o una decisión sobre la mejor densidad de siembra.

- **Años:** las decisiones estratégicas son a largo plazo, cuando se considera una serie de años en el análisis. Las decisiones estratégicas se pueden tomar con la ayuda de *AquaCrop,* por ejemplo en la evaluación de la fecha de siembra óptima para aprovechar el agua del suelo almacenada, basándose en la precipitación esperada a largo plazo, mediante la ejecución del modelo con diferentes fechas de siembra en una serie de años.

Hay muchas diferentes decisiones de manejo agrícola en los tres niveles descritos, y el uso de las simulaciones de *AquaCrop* puede ayudar a tomar mejores decisiones informadas.

Los ingenieros involucrados en el manejo del riego en grandes áreas, a escalas superiores a las de una finca o explotación agraria individual, deben evaluar el impacto de una serie de decisiones relacionadas con la asignación del agua de riego que va desde una sola finca a grupo de granjas, uno o varios distritos de riego, hasta el nivel de cuenca hidrográfica. Típicamente, el agua se asigna de acuerdo a las costumbres históricas o a criterios legales, institucionales, políticos o sociales. En situaciones de escasez de agua, las consideraciones económicas tienen una prioridad más alta y el énfasis debe estar puesto en lograr un uso eficiente y equitativo de los recursos limitados. Esto se consigue a menudo gestionando el agua más como un factor económico.

La economía y el manejo de la demanda y del uso del agua para la agricultura requieren información sobre cómo el suministro de agua afecta la productividad del cultivo. Normalmente está información la han obtenido ingenieros, planificadores hídricos y economistas, a partir de funciones empíricas de productividad del agua de cultivos, que usan una ecuación simple para relacionar el rendimiento con la cantidad de agua consumida. Sin embargo *AquaCrop*, al simular de forma dinámica la respuesta del rendimiento a diferentes cantidades de agua aplicada bajo un conjunto específico de condiciones agronómicas, proporciona una alternativa más potente y flexible y un rango de resultados más realista, comparado con las funciones de productividad del agua tradicionales.

Puede haber muchas aplicaciones de AquaCrop a diferentes escalas, desde la parcela hasta la cuenca. Puede ayudar en la evaluación comparativa del funcionamiento del riego o la brecha de rendimiento, y en la toma de decisiones fundamentadas, desde las operativas hasta las decisiones estratégicas de manejo relacionadas con el agua. Se puede utilizar para probar el rol de diferentes sistemas suelo-clima en la producción de cultivos con agua limitada, y también puede ser muy útil para el análisis de diferentes escenarios, incluyendo variaciones en el clima (presente y futuro), suministro de agua, tipo de cultivo, manejo de campo, etc.

Sería casi imposible describir todas las posibles aplicaciones de *AquaCrop*. Por lo tanto, lo que sigue es una serie de ejemplos y estudios de caso que ilustran algunas de las aplicaciones para diferentes propósitos. Los usuarios pueden encontrar el modelo útil para resolver algunas de sus preguntas, relacionadas con diferentes aspectos de la predicción de la producción de cultivos con agua limitada. Las aplicaciones descritas incluyen el rango de escalas aplicables: de campo a finca a distrito de riego, y escalas regionales. Otras aplicaciones ilustran la utilidad para la evaluación comparativa, calendario de riego, variaciones en los suelos, prácticas de manejo agronómico y de cultivos, así como los efectos de la variación del clima.

Para apreciar completamente las aplicaciones reportadas en lo sucesivo, el usuario debe estar ya familiarizado con *AquaCrop* y con los datos generales requeridos para ejecutar el modelo adecuadamente.

APLICACIONES PARA EL MANEJO DE RIEGO EN LAS ESCALAS DE CAMPO Y FINCA

Se describen dos tipos de aplicaciones. El primer tipo describe las aplicaciones cuando el suministro de agua es adecuado, mientras que el segundo tipo se refiere a ejemplos de cómo utilizar *AquaCrop* para ayudar a afrontar el manejo del riego en condiciones de escasez de agua.

CASO 1 - DESARROLLO DE UN CALENDARIO DE RIEGO ESTACIONAL PARA UN CULTIVO Y CAMPO ESPECÍFICOS

Requerimientos de datos específicos:

- datos climáticos a largo plazo (precipitaciones y ET_o) procesados estadísticamente para determinar las condiciones climáticas típicas de años secos, húmedos o promedio. Tenga en cuenta que la ET_o promedio es mucho menos variable que la precipitación promedio, por lo que el usuario puede combinar la información de la ET_o promedio con la precipitación diaria estacional de diferentes años, representando los años secos, húmedos y promedio, si los datos de la ET_o a largo plazo no están disponibles;
- características del perfil de suelo del campo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;* y
- características del cultivo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop*.

Enfoque:

El modelo se ejecuta para la estación del año típico (seco, húmedo, año promedio) usando la función *Generation of Irrigation Schedule* (Generación del calendario de riego), en donde los tiempos y profundidad de riego son determinados por criterios seleccionados. Los criterios de tiempo seleccionados dependen de los objetivos del gerente; por ejemplo, el usuario puede elegir regar cada vez que el contenido de agua en la zona radicular se agota hasta un 50 % por debajo del agua total disponible; o puede elegir regar cada vez que se ha agotado una cierta profundidad de agua, tal como 25 ó 40 mm; o incluso en un intervalo de tiempo fijo, como se utiliza en muchos distritos de riego. Por lo general, el criterio de profundidad seleccionado es *fixed application depth* (profundidad de aplicación fija). La selección de la cantidad fija de agua a aplicar depende de muchos factores, tales como las prácticas de los agricultores, el método de riego, el intervalo de riego, la profundidad de raíces y tipo de suelo.

Resultado:

Se produce un calendario de riego indicativo para la combinación cultivo-clima-suelo, basado en los criterios seleccionados por el gerente. Se puede utilizar este calendario simulado para la evaluación comparativa del funcionamiento real del riego de un agricultor específico contra el ideal para ese año en particular; o distintos calendarios, de acuerdo con distintos criterios de riego, pueden ser presentados a los agricultores para su análisis.

CASO 2 - DETERMINACIÓN DE LA FECHA DEL PRÓXIMO RIEGO CON AQUACROP

Requerimientos de datos específicos:

- se utilizan datos meteorológicos en tiempo real para ejecutar *AquaCrop*. Se utilizan datos meteorológicos diarios de la estación actual para calcular la ET_o real y el balance de agua – del suelo, desde la siembra hasta el último día de disponibilidad de datos meteorológicos, antes de la simulación de la próxima fecha de riego;
- características del perfil del suelo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;* y
- características del cultivo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop*.

Enfoque:
Se ejecuta el modelo para la estación actual, utilizando datos de la ET_o real, desde la siembra hasta el último día de disponibilidad de datos meteorológicos actuales y por lo tanto de ET_o. A partir de entonces se ejecuta el modelo para intervalos de tiempo diarios, utilizando la información de la ET_o promedio a largo plazo o la información del pronóstico meteorológico y se simula día a día el agotamiento de humedad del suelo pronosticado.

Resultados:
El usuario puede seleccionar la fecha del próximo riego, con base en sus objetivos de manejo o la disponibilidad de agua, al considerar el estado actual del balance de agua – del suelo y el agotamiento de la humedad del suelo relacionado con los umbrales de restricción del crecimiento del dosel, transpiración y incremento de la senescencia. Tal proyección se puede ajustar diariamente mediante la introducción de nuevos datos meteorológicos reales, para modificar la ET_o promedio a largo plazo utilizada en la proyección.

CASO 3 - DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS ESTACIONALES Y SUS COMPONENTES PARA DISTINTOS CULTIVOS EN UNA FINCA

Requerimientos de datos específicos
- datos climáticos promedio o históricos;
- características del perfil del suelo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;* y
- características del cultivo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop*, para los distintos cultivos considerados en el estudio de caso.

Enfoque:
Se ejecuta *AquaCrop* para los cultivos seleccionados en los suelos correspondientes según lo seleccionado por el usuario. El modo *Determination of Net Irrigation Water Requirement* (Determinación de los requerimientos netos de agua de riego) se utiliza para determinar las necesidades de riego de cada combinación cultivo-suelo. Entonces, junto con los datos de salida de *Generation of an irrigation Schedule* (Generación de un calendario de riego) se puede planificar el momento y la lámina de agua del calendario de riego en todos los cultivos. El gerente puede variar los criterios seleccionados para los diferentes cultivos, dependiendo de varios factores, tales como su sensibilidad a los déficits hídricos o de acuerdo al agua total disponible. Esto le permitirá aprender cómo responderá el cultivo a los diferentes regímenes hídricos y equilibrar los requerimientos de los diferentes campos o cultivos, de acuerdo con el suministro de agua, por lo tanto proporcionando un plan de manejo a nivel de finca.

Resultados:
Los componentes del balance de agua estacional, y ET_c y sus componentes, E y Tr, se extraerán de las simulaciones de *AquaCrop*, junto con los requerimientos netos de riego para cada cultivo. El usuario puede hacer una comparación de la ET_c de diferentes cultivos y sus necesidades de riego, según son afectadas por la época del año (cultivos de invierno comparados con los de verano) y por la duración de la estación, y otras características del cultivo, en diferentes "ejecuciones" del modelo, y "grabarlas en el disco". Por ejemplo, una finca en un clima mediterráneo y semiárido, con 450 mm/año de precipitación anual, tuvo valores simulados de ET_c para trigo, maíz y papas o patatas de 425, 650 y 500 mm, respectivamente, mientras que los correspondientes requerimientos netos de riego fueron de 105, 540, y 415 mm. Esto se debe a las diferencias en el aporte de las precipitaciones estacionales entre un cultivo de invierno –trigo– donde la precipitación es un contribuyente principal y la ET_o es baja, y un cultivo de verano –maíz– que se cultiva en un verano cálido y sin precipitaciones. Las diferencias entre los dos cultivos de verano se debieron a que la papa o patata tiene un período de crecimiento más corto que el maíz. Esta información puede ayudar al gerente a tomar decisiones apropiadas en relación con la distribución del agua de riego disponible entre cultivos.

CASO 4 - EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS PRÁCTICAS REALES DE RIEGO

Requerimientos de datos específicos

- datos meteorológicos actuales para la estación de riego;
- características del perfil del suelo representativas de las condiciones reales de la finca, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;*
- características específicas de cultivo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;* y
- detalles de la práctica de riego en términos del momento y cantidad de cada aplicación.

Enfoque

Con los datos reales del campo se realiza una simulación con las fechas exactas de siembra y densidad de plantación, y luego se comparan los datos de salida del modelo (rendimiento, riego, drenaje y cantidad de precipitaciones, de las pestañas *Production* (Producción) y *Climate and Soil Water Balance* (Clima y balance de agua del suelo)) con los datos reales del campo. Al evaluar los datos de salida del modelo de esta manera, sería posible decidir si se puede mejorar el calendario actual al reducir las pérdidas por escorrentía o drenaje, y/o evitando los déficits hídricos que pueden ser menos perjudiciales en otros momentos de la estación. Mediante pruebas alternativos en ejecuciones reiterativas del modelo, el usuario puede mejorar el calendario de riego actual y proponer un calendario alternativo, utilizando la misma cantidad de riego estacional pero maximizando el rendimiento; es decir, un calendario óptimo.

Resultados

Los componentes del balance de agua del calendario actual, el rendimiento simulado y la productividad de agua del rendimiento se comparan con la información obtenida del campo. Se deben comparar los rendimientos reales con los simulados, correspondientes a los calendarios actual y óptimo. Grandes diferencias entre el rendimiento real y simulado indicarían que pueden haber factores distintos al agua (fertilidad del suelo, plagas, etc.) que están afectando los rendimientos reales, o que se hicieron supocisiones inadecuadas o se introdujeron datos erróneos al ejecutar el modelo. Si la diferencia en el rendimiento es razonable (es decir, < 15-20 %), las mejoras en el calendario actual, según lo predicho por el calendario óptimo simulado, son probablemente realistas y deben ser recomendadas para pruebas de campo.

CASE 5 - CÓMO HACER EL MEJOR USO DEL AGUA ALMACENADA EN EL SUELO CUANDO EL SUMINISTRO DE RIEGO ES LIMITADO

Requerimientos de datos específicos

- clima promedio o datos meteorológicos en tiempo real;
- características del perfil del suelo, típicas de la finca, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;* y
- características específicas de cultivo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop*.

Enfoque

El objetivo es terminar la estación con el contenido de humedad del suelo en la zona radicular del cultivo completamente agotado. Para tal propósito se ejecuta el modo *Generation of Irrigation Schedule* (Generación del calendario de riego), con dos configuraciones, en los criterios de *Time* (Tiempo) y *Depth* (Profundidad), a fin de modificarlos hacia el final de la campaña. En la primera configuración se genera un calendario de riego, en el que el momento y la aplicación no producen estrés hídrico. Mediante la selección de un segundo criterio de tiempo hacia el final de la campaña (como un intervalo más largo que el tiempo restante para alcanzar la madurez, o un agotamiento permisible que corresponde con el punto de marchitez) no se generan riegos adicionales, y se alcanzará el final de la campaña con la zona radicular completamente agotada.

Resultado
Se genera un calendario de riego que deja el perfil completamente seco al final de la campaña, maximizando así el uso del agua almacenada en el perfil, proveniente de las precipitaciones y riego. La comparación entre este calendario, que no permite déficits significativos de agua en los cultivos, y el calendario estándar que genera utilizando los criterios estándar de *Time* (Tiempo) y *Depth* (Profundidad), debe mostrar los ahorros potenciales del agua de riego al utilizar completamente el agua almacenada en el suelo. Sin embargo, se deben considerar cuidadosamente los detalles prácticos en términos de la cantidad de agua de riego aplicada, número de riegos, y otros parámetros del balance del agua.

CASO 6 - DESARROLLO DE PROGRAMAS DE RIEGO DEFICITARIO Y SUPLEMENTARIO A ESCALA DE CAMPO

a) Programa de riego deficitario bajo una reducción moderada (25-35 %) del suministro normal de agua.

Requerimientos de datos específicos
- clima estándar, suelo, y datos del cultivo necesarios para ejecutar *AquaCrop;* y
- el nivel del suministro de riego para la campaña, relativo a un suministro adecuado (que se obtiene al ejecutar la opción *Net Irrigation Requirement* (Requerimiento neto de riego) en *AquaCrop);* o se debe conocer el suministro usual de agua de riego (IW).

Enfoque
El enfoque a seguir depende de la sensibilidad específica del cultivo a los déficits hídricos (Fereres y Soriano, 2007). Se ha publicado un ejemplo para el algodón utilizando este modelo (García-Vila *et al.,* 2009). Se debe desarrollar primero un calendario estándar con *AquaCrop,* como se muestra en el CASO 2, utilizando el suministro normal del IW para el algodón bajo condiciones locales. Entonces, se reducirá la cantidad de IW en un 30 %, y hay muchas opciones diferentes para generar un programa de riego deficitario (DI); se pueden seguir dos enfoques:

- planificar la última aplicación para terminar la campaña con el perfil del suelo completamente seco. Esta sería la metodología general para la mayoría de los programas de DI (ver Caso 5); y a continuación, se aplica el mismo número de riegos pero reduciendo cada una de sus profundidades en un 30 %, con el fin de aplicar un DI continuo o sostenido; o
- utilizando el conocimiento sobre la sensibilidad diferencial del algodón al estrés hídrico (véase la sección Algodón, en 3.4), se planifican los déficits hídricos del cultivo que tengan el menor impacto en el rendimiento, usando lo se conoce como riego deficitario regulado o controlados (RDI). Por ejemplo: se retrasa el momento del primer riego, luego se concentran las aplicaciones de agua alrededor de la floración y el duajado de fruto temprana, y finalmente se imponen déficits más severos conforme avanza la campaña después del cuajado de cápsulas. Se deben simular dos o tres opciones del RDI con la misma cantidad de IW. Luego, los valores del rendimiento simulado pueden ser comparados y se seleccionará el programa de RDI que produce el mayor rendimiento para el mismo nivel de IW (García-Vila *et al.,* 2009).

*b) Programa de riego deficitario con una reducción severa (50-60 %) del suministro normal***.**

El enfoque debería ser igual al anterior. Sin embargo, en este caso también se debe reducir el número de riegos durante el comienzo de la estación y concentrarlos desde la floración temprana hasta el cuajado temprano, lo que conduce a una senescencia temprana y un período de crecimiento más corto. Esto debería tener alguna penalidad sobre el rendimiento, relativa al suministro de riego completo. Se deben llevar a cabo (y grabar en el disco) varias simulaciones para alcanzar la mejor solución en términos de máximo índice de cosecha, que conllevaría al máximo rendimiento para el agua de riego determinada.

c) Programa de riego suplementario para determinar el mejor momento para una única aplicación de riego

Requerimientos de datos específicos

- Además de los requerimientos de datos estándar del mismo, es conveniente disponer de información sobre la probabilidad de precipitaciones para optimizar el momento de una única aplicación.

Enfoque:

En el mundo real, la disponibilidad de agua determina el momento de la aplicación. En redes colectivas, el calendario de suministro impone el momento. Si los agricultores cuentan con capacidad de almacenamiento en la finca o acceso a aguas subterráneas, hay flexibilidad al momento de las aplicaciones. Las simulaciones de *AquaCrop* serán diferentes en cada uno de estos casos. También es posible utilizar *AquaCrop* para simular programas de DI en tiempo casi real; es decir, para el año en curso, mediante la ejecución del modelo hasta la fecha, y luego utilizando las probabilidades de precipitaciones para las próximas semanas (disponibles en los servicios meteorológicos), y simulando la semana posterior (con ET_o media a largo plazo y precipitaciones esperadas en el archivo de clima). Es entonces posible evaluar el impacto sobre el rendimiento de la aplicación del riego único en la semana siguiente, en comparación a posponerla. También es posible cuantificar los efectos de E vs. Tr del riego único; si la cobertura del dosel está aún en desarrollo, el componente E será más importante que si se aplica el riego cuando se alcanza la cobertura máxima. Por otro lado, el riego temprano mejoraría la cobertura del dosel, lo que conduce a una mayor radiación interceptada (y E relativamente más baja) y por consiguiente más producción de biomasa. Pero el requerimiento de agua de un cultivo bien desarrollado a principios de la estación, en gran parte podría sobrepasar la cantidad limitada de agua disponible en la zona radicular, activando una senescencia temprana del dosel. Se le recomienda al usuario evaluar estos conflictos en cada caso específico y comparar los rendimientos finales.

Resultado:

En una ejecución de ejemplo de *AquaCrop*, el mejor momento para un riego único es alrededor del llenado temprano del grano, en el caso del trigo en un clima semiárido, en un suelo de capacidad media de almacenamiento de agua (110 mm de TAW), con una probabilidad creciente de sequía a medida que avanza la estación. Los rendimientos simulados por *AquaCrop* con un riego único de 60 mm justo después del final de la floración fueron de 4.1 ton/ha, relativos a un rendimiento de 2.4 ton/ha de secano, y 3.5 ton/ha si el riego se retrasa 10 días. En otro ejemplo, cuando se aplicaron solamente dos riegos con 10 días de diferencia sobre un suelo muy profundo, el maíz produjo 6 ton/ha o 9 ton/ha, cuando se inició el riego en 30 días y 80 días después de la siembra, respectivamente. En este ejemplo, las aplicaciones tempranas fueron más perjudiciales para el rendimiento, ya que el cultivo se quedó sin agua demasiado temprano en la estación, antes de su fecha de senescencia normal.

En un ejemplo de los efectos de un riego único sobre E y Tr, el algodón tuvo 7 % más E cuando se aplicó un riego único durante el desarrollo del dosel (al 30-40 % del máximo) que al aplicar el riego único de 60 mm después de alcanzar la cobertura completa. La E inferior (y Tr más alta) en el segundo caso, junto con los efectos beneficiosos del patrón de estrés (mejor estado hídrico durante el desarrollo reproductivo), dio lugar a una mayor productividad del agua, con un aumento de más del 10 % en el rendimiento con la misma cantidad de agua de riego (2.7 frente a 2.4 ton/ha).

En el Cuadro 1 se presenta un estudio de caso específico de simulación de riego deficitario en algodón.

Cuadro 1 Simulación del riego deficitario en la producción de algodón

Antecedentes

El algodón se cultiva en muchas regiones con limitaciones hídricas, en donde se puede practicar el riego deficitario, ya sea como una necesidad impulsada por la falta de agua o por razones económicas (costos del agua y/o energía para el bombeo). La región de la altiplanicie sur de los Estados Unidos es un ejemplo de limitaciones de agua y altos costos de bombeo. Se realizaron simulaciones de *AquaCrop* en un lugar en Texas, en 35°11' N, 102°6' O, y una altitud de 1170 m sobre el nivel del mar. El suelo lentamente permeable es un suelo franco arcillo-limoso Pullman, con un fuerte horizonte argílico que contiene aproximadamente 50 % de arcilla sobre un límite ondulado de un horizonte cálcico a 0.1 hasta 0.14 m de profundidad. La capacidad de retención de humedad del suelo es de unos 200 mm a 1.5 m de profundidad (Tolk y Howell 2001). La precipitación media anual es de 490 mm, 65 % de la cual ocurre durante el período de crecimiento (mayo-agosto). La ET_o es muy superior a la precipitación en todos los meses.

Simulación de AquaCrop

Se realizaron simulaciones para algodón sembrado en filas sobre camas elevadas y con surcos con caballones para almacenar el riego y la precipitación. El riego fue máximo (FI), lo que indica que se repuso la humedad del suelo para reemplazar la que se perdió por la ET, o la mitad de ella (Déficit, DI). Se llevó a cabo el calendario de riego asumiendo un sistema de riego por aspersión movimil con desplazamiento lateral, que aplica aprox. 25 mm por riego. La dosis de siembra fue de 21 semillas/m^2. A finales de la estación, el FI se redujo en comparación con la demanda de agua del cultivo (demanda de ET_c) para mejorar la maduración del cultivo.

Se calculó la evapotranspiración de referencia para su introducción como datos en *AquaCrop*, utilizando el programa informático de cálculo de ET_o de la FAO *(FAO, 2009)*, y datos meteorológicos medidos en una estación meteorológica cercana al campo de algodón. Se configuraron los parámetros de manejo de campo de *AquaCrop*, de manera que no se produjo escorrentía (debido a los caballones) y la fertilidad del suelo no fue limitante. Se consideraron cinco profundidades del suelo, con un contenido inicial de agua de 23, 33, 34, 30, y 27 % en volumen, a profundidades de 0.10, 0.29, 0.45, 0.66, y 1.00 m, respectivamente, según fueron medidas en el campo. El calendario de cultivo fue establecido como 10 días desde la siembra hasta la emergencia, 94 días desde la siembra hasta la profundidad máxima de raíces, 121 días desde la siembra hasta el inicio de la senescencia, 140 días desde la siembra hasta la madurez, 60 días desde la siembra hasta la floración y 71 días de duración de la floración.

Resultados

Los rendimientos simulados estuvieron en el rango de 3.3 a 3.6 ton/ha, (equivalentes a 1.3 a 1.4 ton/ha de fibra) y fueron comparables a los valores reportados en la región. Los rendimientos semilla-fibra con riego deficitario (DI) fueron aprox. 95 % de los rendimientos del riego completo (FI). La productividad de agua del algodón con DI fue aprox. 10 % mayor que la del FI (ambas en el rango de 0.49 a 0.54 kg/m^3 (semilla más fibra), o 0.19 a 0.21 kg fibra/m^3). La ET del cultivo fue cerca de 15 % mayor para el FI que para el DI, ambas en el rango de 625 a 720 mm, lo que coincide con los valores observados en varias regiones. Sin embargo, el DI recibió 240 mm de riego, solamente 43 % de la cantidad de FI.

Conclusiones y recomendaciones

Los agricultores de la región bombean desde un nivel freático alrededor de 90 m por debajo del suelo, y considerando los costos en aumento del combustible, el ahorro de energía del DI fue de más de US$ 250/ha. Con los precios del algodón oscilando entre US$ 0.4 y 0.8/kg , la pérdida en la producción asociada con el DI representa solamente US$ 100 a 200/ha, dándole la ventaja económica al riego deficitario.

APLICACIONES RELACIONADAS CON LA INFLUENCIA DEL MANEJO DE CAMPO Y LAS PROPIEDADES DEL SUELO SOBRE EL RENDIMIENTO Y EL USO DEL AGUA

CASO 7 - INFLUENCIA DEL MANEJO DE CAMPO EN LA AGRICULTURA DE SECANO

Requerimientos de datos específicos

- características típicas climáticas y del suelo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;*
- características específicas de cultivo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;* y
- el manejo de campo actual practicado por los agricultores (por ejemplo, acolchados o caballones, bajo *Management* (Manejo)).

Enfoque

La ejecución de la simulación con datos de entrada generará el balance de agua del suelo estacional y el rendimiento. Se deben probar las prácticas de manejo de campo que pueden ser modificadas en *AquaCrop*, como la aplicación de acolchados o caballones. Además, utilizando datos de años con diferentes cantidades/patrones de precipitación, las simulaciones de *AquaCrop* pueden ayudar a evaluar el rol de un manejo de campo diferente sobre la E del suelo y el suministro de agua para los cultivos, y por consiguiente, sobre el rendimiento bajo diferentes condiciones de lluvia en años diferentes. Se puede evaluar la importancia de la escorrentía desactivando los cálculos de escorrentía (en *Field Management* (Manejo de campo)) o modificando el número de curva (CN) o la cantidad de agua fácilmente evaporable (REW) de la evaporación del suelo (en *Soil Characteristics* (Características del suelo)).

Resultado

Se puede evaluar el rol de las variaciones en el manejo de la superficie del campo, en la producción con agua limitada, con el fin de derivar recomendaciones a partir de las simulaciones. En un ejemplo, ejecutado en un área semiárida, con maíz en riego, con el fin de obtener una estimación del rol de los acolchados en la reducción de la evaporación del suelo, el componente E bajo suelo desnudo fue de 133 mm, y se redujo a 90 mm cuando la superficie del suelo fue cubierta en un 100 % con un acolchado orgánico.

CASO 8 - IMPACTO DE LAS VARIACIONES EN LAS PROPIEDADES DE HUMEDAD DEL SUELO Y NIVELES DE FERTILIDAD DEL SUELO

Requerimientos de datos específicos

- características típicas o promedio del clima o suelo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;*
- características específicas de cultivo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;* y
- varias propiedades de humedad del suelo y niveles de fertilidad del suelo.

Enfoque

Si el usuario tiene dudas acerca de los valores de los parámetros de humedad del suelo y/o sobre el nivel de fertilidad del suelo y las mediciones reales de rendimiento para la evaluación comparativa, se puede ejecutar *AquaCrop* variando las propiedades de humedad del suelo de manera bastante drástica (por ejemplo, al seleccionar varios tipos de suelo con diferentes capacidades de retención de humedad) y luego comparando los resultados de *AquaCrop* sobre el rendimiento entre estas simulaciones. Si el usuario sospecha que el nivel de fertilidad no es óptimo, la opción *Fertility stress* (Estrés por fertilidad), bajo *Field management* (Manejo de campo) proporciona niveles de estrés por fertilidad leves, moderados y severos, que el usuario puede utilizar para simular los posibles efectos de un suministro limitado de nutrientes en la producción de biomasa.

APLICACIONES RELACIONADAS CON LA AGRONOMÍA Y MANEJO DE CULTIVOS A ESCALA DE CAMPO Y DE FINCA.

CASO 9 - Evaluación comparativa de las brechas de rendimiento en la agricultura de secano y de riego y evaluación de productividad a largo plazo

Requerimientos de datos específicos

- características climáticas (conjunto de datos a largo plazo) y del perfil del suelo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;*
- características específicas de cultivo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop;* y
- prácticas corrientes relacionadas con el manejo de riego, fertilización, nivel de protección del cultivo y otras prácticas agronómicas relevantes para los rendimientos reales.

Enfoque

Es importante determinar las diferencias entre los rendimientos potenciales, alcanzables y relaes (Loomis y Connor, 1992) en varias escalas, desde un campo a una región. Si toda la información está disponible, se debe ejecutar el modelo para determinar el rendimiento alcanzable para cada año. Sería deseable tener varios años de datos (el estándar es 30 años) para la comparación de la productividad a largo plazo bajo diferentes sistemas de producción, utilizando las funciones de distribución acumulada para mostrar los niveles relativos de riesgo.

Resultado

Dada la información del rendimiento real y del rendimiento simulado, se puede determinar la capacidad de los ambientes de secano y la brecha de rendimiento (rendimiento simulado menos real). Los resultados de diferentes años darán algunas pistas sobre las posibles razones de la brecha de rendimiento (es decir, baja fertilidad del suelo, plagas, enfermedades, y limitaciones por malas hierbas, restricciones socioeconómicas o variedades de cultivos de bajo rendimiento, etc.). Se puede encontrar una aplicación específica de este enfoque para la evaluación de las limitaciones de rendimiento del trigo en una región en Calviño y Sadras (2002). Simulaciones adicionales con *AquaCrop*, variando los escenarios, con posibles acciones correctivas, ayudarían también a identificar las posibles causas subyacentes de la brecha de rendimiento, y a identificar regiones y cultivos en donde puedan ser posibles mejoras sustanciales en producción y productividad. Si se combinan con sistemas de información geográfica (GIS), se podrían desarrollar mapas de brechas de rendimiento para las regiones.

CASO 10 - DETERMINACIÓN DE LA FECHA DE SIEMBRA ÓPTIMA, CON BASE EN UN ANÁLISIS DE PROBABILIDAD

Requerimientos de datos específicos

- se requieren por lo menos 20 años de datos de ET_o y de precipitación para el área; y
- características del cultivo y de suelo, según se requieran para ejecutar *AquaCrop*, y que sean representativas del área.

Enfoque:

Se utilizan fechas tempranas, intermedias y tardías de siembra para simular 20 o más estaciones con *AquaCrop.* Para esta aplicación, se debe ejecutar *AquaCrop* en el modo de múltiples proyectos, ya que se debe hacer un mínimo de 60 simulaciones. Si se requiere de un número mucho mayor de ejecuciones, se debe utilizar la versión del complemento del modelo (se puede descargar en www.fao.org/nr/water/aquacrop).

Resultado

Una vez que se hayan simulado los rendimientos para cada año y para las diferentes fechas de siembra (manteniendo iguales todos los demás parámetros), los valores se organizan de menor a

mayor para cada fecha de siembra. Si hay 20 años de simulaciones, cada valor representa una probabilidad del 5 %. Entonces, se puede hacer un gráfico del rendimiento frente a la probabilidad acumulada, y es posible elegir la opción más favorable y con menor riesgo de la gráfica o comparar diferentes opciones para años con diferentes condiciones; por ejemplo, la cantidad de precipitación o fases del fenómeno de El Niño.

En el Cuadro 2 se presenta un ejemplo específico de una aplicación de *AquaCrop* para determinar la fecha óptima de siembra del trigo, como una función de las condiciones de humedad inicial del suelo.

Cuadro 2 Determinación de la fecha óptima de siembra del trigo

Antecedentes

Se utilizó el modelo *AquaCrop* para analizar la fecha óptima de siembra en tres diferentes condiciones iniciales de humedad del suelo, bajo condiciones mediterráneas de secano. Varios autores (Photiades y Hadjichristodoulou, 1984;. Anderson y Smith, 1990; y Connor *et al.,* 1992) han destacado la importancia de la siembra temprana, y reportaron una disminución en el rendimiento cuando la siembra se retrasó después de la primera oportunidad de siembra (precipitaciones iniciales en otoño) dentro de un marco óptimo de siembra. Se estima que los rendimientos del trigo se reducirán entre un 4.2 (Stapper y Harris, 1989) y un 10 % (Asseng *et al.,* 2008) por cada semana de retraso en la siembra de otoño, en un ambiente mediterráneo. Por otra parte, las condiciones de humedad del suelo durante la siembra también pueden ser importantes para la producción de trigo, en particular en regiones de baja precipitación (Rinaldi, 2004; Heng *et al.,* 2007; Asseng *et al.,* 2008).

La humedad inicial del suelo causada por las lluvias de verano, o aquella sobrante del año anterior, puede influir en el establecimiento temprano del cultivo y puede contribuir al uso del agua y rendimiento más tarde en la estación, en especial en épocas de baja precipitación. Por consiguiente, se realizaron simulaciones con *AquaCrop* para determinar la fecha óptima de siembra, con relación a la humedad inicial del suelo, para maximizar los rendimientos del grano del trigo.

Ubicación y experimentos de simulación

Se seleccionó el sitio de los experimentos de simulación en la parte norte del cinturón del trigo de Australia Occidental, en Buntine (29,51°S, 116.34°E, altitud 365 m), una de las principales regiones de cultivo de trigo de Australia, en donde el trigo se cultiva bajo condiciones de secano. La ubicación es un ambiente de relativo bajo rendimiento, con un clima típico mediterráneo. Las precipitaciones ocurren principalmente en invierno, pero varían de estación a estación, en términos de distribución estacional y cantidad. Las precipitaciones disminuyen rápidamente en la primavera durante el llenado del grano. La precipitación promedio anual a largo plazo es de 329 mm. La precipitación promedio estacional (el período de crecimiento principal en el hemisferio sur va de mayo a octubre) fue de 243 mm en el período de los últimos 30 años (1979-2008), variando entre 125 y 417 mm. En tal ambiente, un invierno leve es seguido por temperaturas en aumento durante primavera.

En el experimento de simulación se utilizó un suelo común para la región de estudio, un suelo franco arenoso con 101 mm de humedad disponible para la planta, a la profundidad máxima de raíces de 1.7 m.

Se realizaron simulaciones utilizando registros meteorológicos diarios medidos desde 1999 a 2008. Los cultivos se sembraron cuando la precipitación fue de al menos 20 mm en los 10 días anteriores, durante una ventana de siembra de mayo a julio, y de nuevo a 30 días después de la primera oportunidad de siembra como una práctica de siembra tardía (por ejemplo, para controlar las malas hierbas o debido a limitaciones técnicas a la hora de realizar una siembra temprana para todos los cultivos de la finca).

Se simuló cada tratamiento de fecha de siembra con una humedad inicial del suelo de 0, 30 y 60 mm de humedad del suelo disponible para las plantas, almacenada por debajo de 20 cm de profundidad. La fecha de siembra más temprana posible fue el 1 de mayo, fecha en la que cada año se establecieron las condiciones iniciales de humedad del suelo. Se asumió que el nitrógeno no fue una limitación para el crecimiento del cultivo.

Cuadro 2 **(continuación)** Determinación de la fecha óptima de siembra del trigo

Se utilizó en los experimentos una variedad de trigo blando o harinero de primavera, var. Wyalkatchem, una variedad estándar de floración media a temprana para esta región. Se utilizaron como datos de entrada parámetros conservativos, basados en el crecimiento y desarrollo típicos en el entorno considerado (Véase la Sección Trigo, en el capítulo 4).

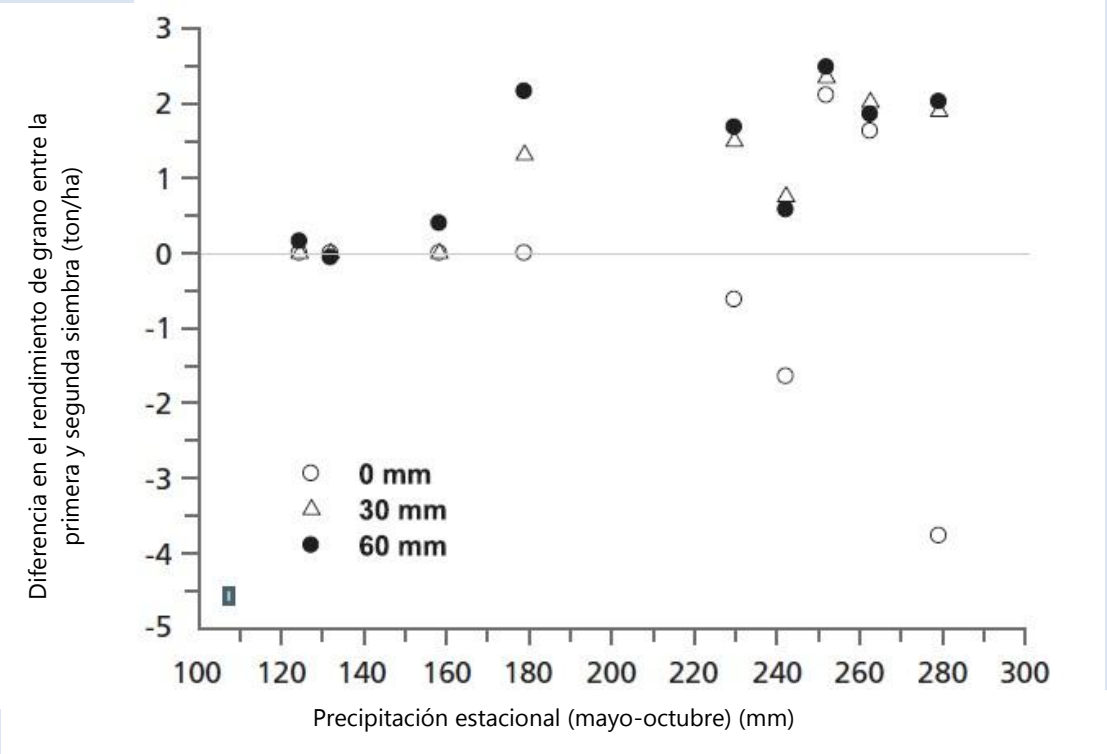
Resultados

En la Figura 1 se muestran las diferencias simuladas en los rendimientos de grano, entre la primera y segunda fecha de siembra, como una función de la precipitación estacional para diferentes contenidos iniciales de humedad del suelo. Las diferencias simuladas en el rendimiento de grano se volvieron negativas a cero mm de humedad inicial del suelo, pero fueron positivas a 30 y 60 mm de humedad inicial del suelo. Cuando el perfil del suelo fue seco, el 70 % de los cultivos sembrados con una oportunidad de siembra temprana fracasó; mientras que este porcentaje se redujo al 40 % con la segunda fecha de siembra. Sin embargo, los cultivos que fueron sembrados tempranamente en subsuelo sueco con la primera precipitación de otoño y que no fracasaron, tuvieron un rendimiento en promedio 30 % mayor que la segunda fecha de siembra. En promedio, la primera siembra tuvo 35 % más de rendimiento que la segunda siembra, con 30 y 60 mm de agua inicial, pero 13 % menos, con cero mm de humedad inicial del suelo.

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados de los experimentos de simulación indican que en un ambiente mediterráneo, la siembra temprana de un cultivo de trigo con las primeras precipitaciones de otoño puede generar mayores rendimientos, lo que es consecuente otros estudios experimentales de campo o de simulación. Sin embargo, la siembra temprana puede incrementar el riesgo de fracaso del cultivo, si el perfil del subsuelo está seco durante la siembra. Por lo tanto, sólo se justifica la siembra temprana si hay algo de humedad inicial en el perfil del suelo, a causa de las lluvias de verano o sobrante del año anterior. El retraso de la siembra, a pesar de cierta pérdida del potencial de rendimiento, reduce el riesgo de fracaso del cultivo en dicho entorno, si el perfil del suelo está seco al comienzo de la estación.

FIGURA 1 Diferencias en los rendimientos simulados de grano, entre la primera y la segunda oportunidad de siembra, como una función de las precipitaciones estacionales a diferente humedad inicial del suelo (0, 30 mm y 60) para el período comprendido entre 1999 y 2008 en Buntine, Australia Occidental.



En regiones similares, pero con recursos hídricos disponibles para el riego, la aplicación de una pequeña cantidad de agua (aproximadamente 30 mm) antes de la siembra reducirá significativamente el riesgo de fracaso del cultivo, con oportunidades de siembra temprana, y permitiría maximizar el potencial de rendimiento en dicho entorno.

CASO 11 - Desarrollo de funciones de productividad del agua con *AquaCrop* y su utilización en sistemas de apoyo a las decisiones

Requerimientos de datos específicos

- promedio o serie histórica, preferiblemente de 20 a 30 años, o al menos 10 años, de los datos de ET_o y precipitación diaria, y
- características del cultivo y suelo necesarias para ejecutar *AquaCrop*.

Enfoque

Se pueden utilizar dos enfoques: (i) con los registros climáticos promedio, el usuario simulará la respuesta del rendimiento a diferentes cantidades de riego aplicado (IW), cambiando el nivel de aplicación en intervalos de 30 a 50 mm por etapa (pestaña *Irrigation Events* (Eventos de riego) en

Irrigation Management (Manejo de riego)); (ii) si el conjunto de datos climáticos está disponible como una serie histórica, se simula la respuesta del rendimiento a diferentes cantidades de IW, utilizando cada año de los registros climáticos disponibles. Esto generará una familia de curvas, a partir de las que se podría derivar una curva media y las probabilidades de exceder un valor de rendimiento determinado (véase Caso 10).

Resultado

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de los resultados de la simulación de la producción de papa o patata con *AquaCrop*, en más de 25 años de clima, con niveles de riego variables (García-Vila y Fereres, 2012). Las curvas resultantes podrían servir como datos de entrada en modelos económicos, para construir sistemas de ayuda a la toma de decisiones que puedan ayudar a los agricultores a determinar el nivel óptimo de riego, para maximizar las ganancias económicas bajo conjuntos específicos de condiciones. En la Figura 3 se muestra otro ejemplo para el cultivo de quinua (Geerts *et al.,* 2009). Este cultivo tiene una respuesta singular en cuanto a la relación rendimiento-ET, la cual no es lineal sino curvilínea (Figura 3a). Los puntos de datos del rendimiento simulado para diferentes niveles de ET varían debido a las diferencias en los momentos de riego. La curva envolvente de los puntos de datos que dan los mayores valores de rendimiento representa regímenes óptimos de DI para los diferentes niveles de ET. En la Figura 3b se indica la región con el mayor rendimiento y productividad del agua, y a partir de la gráfica se puede definir el nivel óptimo de ET (Geerts *et al.,* 2009).

Figura 2 Simulación de rendimientos de papa o patata, como función del agua de riego aplicada con *AquaCrop*, para 25 años de datos en Córdoba, España. Las tres curvas de respuesta del rendimiento representan la respuesta promedio y la respuesta esperada en un buen (húmedo y relativamente cálido) y mal (seco y frío) año climático (García-Vila y Fereres, 2012).

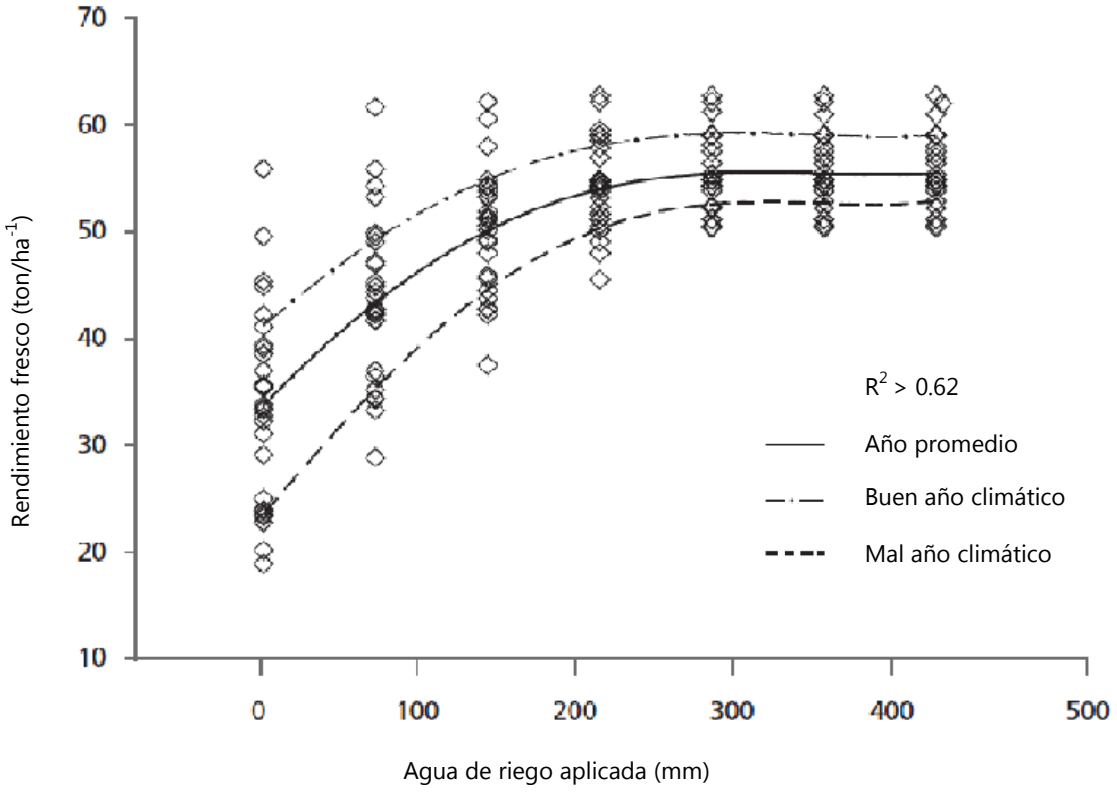
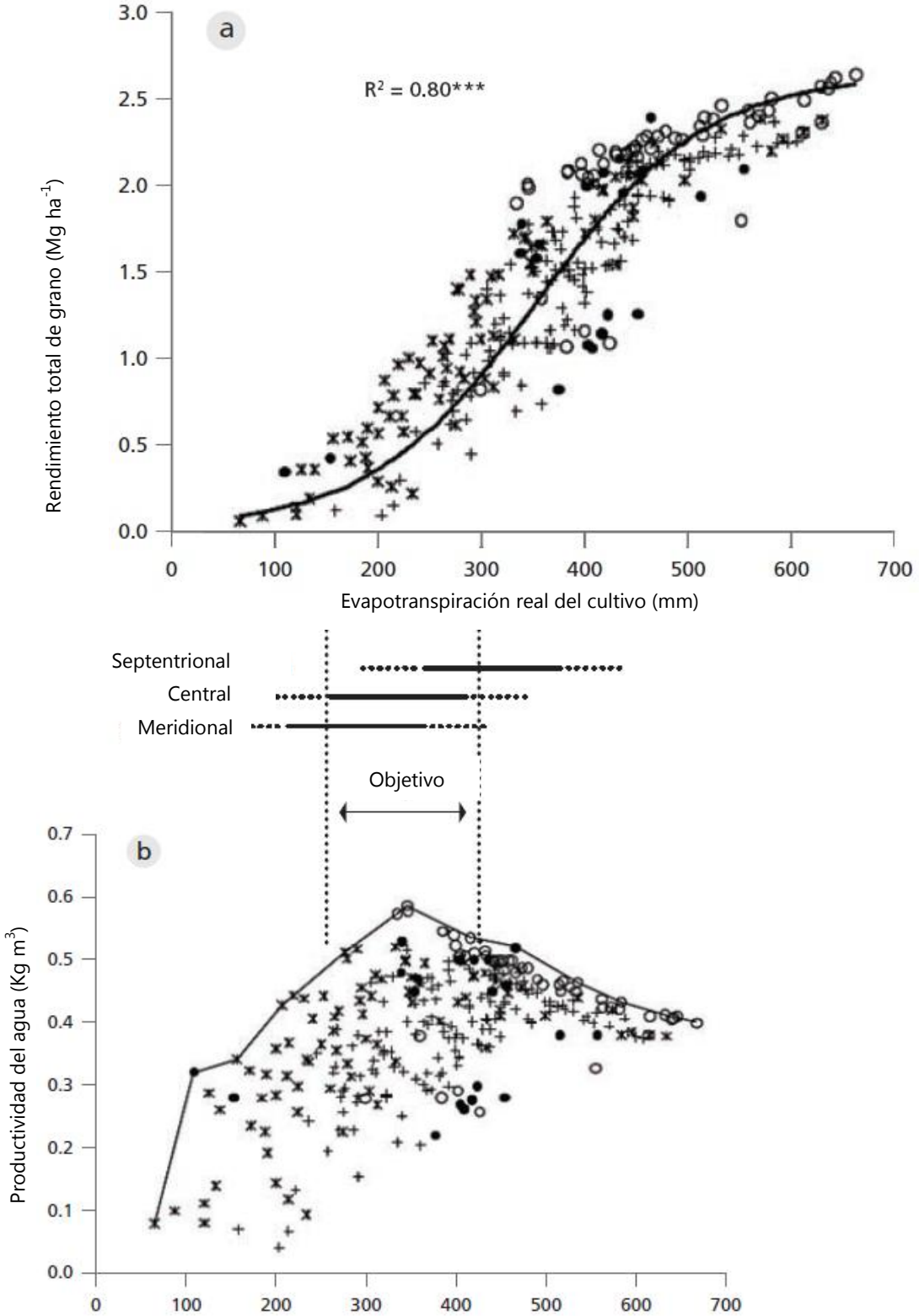


Figura 3 (a) Rendimientos de quinua simulados con *AquaCrop*, como una función de ET, de secano a riego completo, y para diferentes regímenes de riego deficitario; (b) productividad del agua como una función de ET, mostrando los niveles óptimos para niveles intermedios de ET inducidos por regímenes óptimos de DI (Geerts *et al.*, 2009).



CASO 12 - Evaluación de los efectos de la densidad de plantas sobre el rendimiento

Requerimientos de datos específicos

- datos climáticos promedio que representen un año típico; y
- datos del cultivo y el suelo necesarios para ejecutar *AquaCrop*, para las condiciones promedio o más probables de campo.

Enfoque

Se han optimizado las densidades de plantas en plantaciones comerciales de la mayoría de los cultivos; sin embargo, hay situaciones en las que es necesario evaluar el rol de la densidad de plantas en el uso del agua y rendimiento. El usuario debe probar un rango de valores bastante diferentes de densidad de plantas para juzgar el impacto de cambios drásticos en la población de plantas sobre el rendimiento (lo que se puede especificar en la pestaña *Development* (Desarrollo), en *Crop Characteristics* (Características del cultivo)), y modificar en consecuencia la cobertura del dosel máxima que se puede alcanzar (CC_x). Los cambios resultantes en los parámetros CC_o y CC_x permitirían la evaluación del rol de estas dos características en el desarrollo del dosel, y por lo tanto en el rendimiento.

Resultado

En un ejemplo se compararon las densidades (30 000 vs. 75 000 plantas por ha) de maíz de secano, cultivado en California en un suelo fértil, muy profundo, con el perfil casi completamente lleno en el momento de la siembra. El rendimiento fue de 4.7 ton/ha para la densidad baja, y 4.2 ton/ha para la densidad alta. La razón principal de la diferencia en el rendimiento se debe a un HI ligeramente superior para la densidad baja (0.31 frente a 0.28) porque se transpiró menos agua al inicio de la estación, como resultado de un dosel más pequeña, dejando un poco más de agua para permitir que el dosel se mantenga verde por más tiempo, con el desarrollo màs prolongado del HI.

MÁS ALLÁ DEL NIVEL DE CAMPO Y FINCA: APLICACIONES RELACIONADAS CON LOS EFECTOS METEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y USO DEL AGUA

CASO 13. Evaluación del impacto de la variabilidad de las precipitaciones en rendimientos limitados por el agua

Requerimientos de datos específicos

- una serie a largo plazo de precipitaciones diarias y la ET_o, por lo menos de 20 a 30 años;
- cultivo típico de secano del área; y
- condiciones representativas del suelo y de manejo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop*.

Enfoque

AquaCrop se ejecutará con un cultivo seleccionado, preferiblemente uno que crezca en la estación de lluvias, para cada año para el que hayan datos disponibles. El set de datos climáticos incluirá años con un rango de precipitación anual, y también algunos años con la misma precipitación anual pero con diferente distribución durante la estación.

Resultado

Se obtendrán los rendimientos y otros parámetros para todas las simulaciones realizadas. Se pueden generar curvas de probabilidad del rendimiento como una función de las precipitaciones anuales, si las ejecuciones cubren un número suficientemente elevado de años (véase la explicación en el Caso 9, o el ejemplo del resultado en Geerts *et al.*,2009).

CASO 14 - Cartografía del potencial de rendimiento limitado por el agua de una región

Requisitos de datos específicos

- datos climáticos promedio o históricos (precipitaciones y ET_o) procesados en el set de datos cartograficas de los GIS; y
- cultivo típico de secano con condiciones representativas del suelo y de manejo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop*.

Enfoque

Esta aplicación requeriría el uso del modelo *AquaCrop* con un GIS que permitan la simulación espacial del rendimiento, basándose en los mapas de ET_o, precipitaciones, características del perfil del suelo, así como las características del cultivo requeridas para ejecutar el modelo. Un ejemplo es el proyecto FAO-MOSAICC que se está desarrollando en el marco del Programa EC/FAO sobre el *Empalme de información y toma de decisiones para mejorar la seguridad alimentaria,* Tema 3, *Cambio climático y seguridad alimentaria* (http:// www.fao.org/climatechange/mosaicc/en/).

CASO 15 - Efectos del cambio climático en la producción de cultivos y el uso del agua

Requisitos de datos específicos

- datos climáticos procesados para simular condiciones del futuro cambio climático, y
- cultivos típicos con condiciones representativas del suelo y de manejo, según se requieren para ejecutar *AquaCrop*.

Enfoque

a) Efectos del calentamiento global sobre los rendimientos simulados y el uso del agua

Los efectos de las temperaturas en aumento sobre la ET_o y el desarrollo de los cultivos (previstos con el cambio climático) se pueden simular con *AquaCrop*. Si existen predicciones regionales que permitan la generación de datos meteorológicos diarios futuros, éstos serían los datos de entrada de las simulaciones de *AquaCrop*, proporcionando así la predicción de cambios en el rendimiento y requerimientos hídricos. También se puede utilizar el modelo para cuantificar el riesgo climático asociado con varias opciones de manejo (por ejemplo, cambio de variedades, variedades de ciclo corta frente a las de ciclo larga, aplicación de riego y dosis bajas de fertilizante) para ayudar a los agricultores a elegir opciones de manejo de bajo riesgo, para adaptarse a las restricciones de recursos de los hogares. Dimes *et al.,* (2009) han evaluado los efectos del cambio climático en algunas áreas de África meridional, utilizando el modelo de simulación APSIM.

b) *Integración del calentamiento global y del aumento de la concentración de gases de efecto invernadero*

Las simulaciones de *AquaCrop* responden a cambios en la concentración de CO_2, por lo que es posible evaluar los efectos interactivos del aumento de las temperaturas, precipitaciones más dispersas y del aumento del CO_2 en la atmósfera en climas futuros. Se pueden presentar diferentes escenarios, incluyendo una capacidad de absorción variable (Vanuytrecht *et al.,* , 2011) como se ha previsto en *AquaCrop,* siguiendo las predicciones de los modelos de cambio climático regional.

CASO 16 - Utilización de *AquaCrop* para las decisiones de asignación del agua a nivel regional o de cuenca

Requerimientos de datos específicos

- datos climáticos procesados para representar condiciones climáticas promedio, adversas o favorables; y
- cultivos típicos con condiciones representativas del suelo y de manejo de riego, según se requieren para ejecutar *AquaCrop*.

Enfoque

Los resultados de *AquaCrop* pueden ser los datos de entrada de modelos de optimización de asignación del agua, que tengan fuertes componentes económicos e institucionales. Tales modelos son necesarios para ayudar en el manejo del agua a las instituciones encargadas de la gobernanza del agua. Los datos de salida de *AquaCrop* serían especialmente valiosos en caso de una sequía, donde se consideran diferentes escenarios, y las predicciones sobre rendimiento/ingresos para el área son esenciales para tomar decisiones fundamentadas a la hora de asignar los suministros limitados. Un ejemplo de una aplicación a escala de finca se da en García-Vila y Fereres (2012).

Conclusión

Estos estudios de caso son una pequeña muestra de las aplicaciones que se pueden abordar con la ayuda de *AquaCrop*, e ilustran el uso del modelo de simulación. Los ejemplos también han ilustrado las posibilidades que ofrece *AquaCrop* para varios tipos de usuarios concretamente, especialistas en riego, ingenieros agrícolas y agrónomos, personal de extensión agrícola. Entre los usuarios adicionales también se incluyen ingenieros hidráulicos, hidrólogos y economistas que trabajan a escala de cuenca, y climatólogos que quieren investigar el efecto de diferentes escenarios del cambio climático en el uso del agua de los diferentes cultivos. Hay muchas más aplicaciones de *AquaCrop* que se pueden utilizar de formas prácticas y que se revelarán a medida que los usuarios alrededor del mundo incorporen este modelo de simulación en sus evaluaciones de la respuesta del rendimiento del cultivo al agua.

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, W.K. y Smith, W.R. 1990. Yield advantage of two semi-dwarf compared with two tall wheats depends on sowing time. *Australian Journal Agricultural Research,* 41: 811-826.

Asseng, S., Milroy, S. P. y Poole, M. L. 2008. Systems analysis of wheat production on low water-holding soils in a Mediterranean-type environment I. Yield potential and quality. *Field Crops Research,* 105: 97-106.

Calviño, P. y Sadras, V. 2002. On-farm assessment of constraints to wheat yield in the south-eastern Pampas. *Field Crops Research,* 74:1-11.

Connor, D.J., Theiveyanathan, S. y Rimmington, G.M. 1992. Development, growth, water-use and yield of a spring and a winter wheat in response to time of sowing. *Australian Journal Agricultural Research,* 43: 493-516.

Dimes, J., Cooper, P. y Rao, K.P.C. 2009. *Climate change impact on crop productivity in the semi-arid tropics of Zimbabwe in the twenty-first century.* Proceedings of the Workshop on Increasing the Productivity and Sustainability of Rainfed Cropping Systems of Poor, Smallholder Farmers, Tamale, Ghana, 22-25 Septiembre 2008.
págs. 189-198.

FAO. 2009. ET_o *Calculator,* Serie *land and water digital media* N.º 36., Roma.

Farahani, H. J., Izzi, G. y Oweis, T.Y. 2009. Parameterization and Evaluation of the *AquaCrop* Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal* 101: 469-476.

Fereres, E. y Soriano, M.A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58(2): 147-159.

García-Vila, M. y Fereres. E. 2012. Combining the simulation crop model *AquaCrop* with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy,* 36: 21-31.

García-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F. y Steduto, P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with *AquaCrop. Agronomy Journal* 101: 477-487.

Geerts, S., Raes, D., García, M., Taboada, C., Miranda, R., Cusicanqui, J., Mhizha, T. y Vacher, J. 2009. Modelling the potential for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano. *Agricultural Water Management* 96: 1652-1658.

Heng, L.K., Asseng, S., Mejahed, K. y Rusan, M. 2007. Optimizing wheat productivity in two rainfed environments of the West Asia-North Africa region using a simulation model. *European Journal of Agronomy,* 26: 121-129.

Heng, L.K., Hsiao,T.C., Evett, S., Howell, T. y Steduto P. 2009. Validating the FAO *AquaCrop* Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal* 101: 488-498.

Loomis, R.S. y Connor, D.A. 1992. *Crop ecology: productivity and management of agricultural systems.* Reino Unido, Cambridge University Press. 538 págs.

Mainuddin, M., Hoanh, C.T., Jirayoot, K., Halls, A.S., Kirby, M., Lacombe, G. y Srinetr, V. 2010. Adaptation options to reduce the vulnerability of mekong water resources, food security and the environment to impacts of development and climate change. *CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship.* 152 págs.

Photiades, I. y Hadjichristodoulou, A. 1984. Sowing date, sowing depth, seed rate and row spacing of wheat and barley under dryland conditions. *Field Crops Research,* 9: 151-162.

Rinaldi, M. 2004. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *Field Crops Research* 89: 27-37.

Stapper, M. y Harris, H.C. 1989. Assessing the productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop simulation model. *Field Crops Research,* 20: 129-152.

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. y Fereres, E. 2009. *AquaCrop* - the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal.* 101: 426-437.

Todorovic, M., Albrizio,R., Zivotic, L., Abi Saab, M.T., Stockle, C. y Steduto, P. 2009. Assessment of *AquaCrop,* CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agronomy Journal* 101: 509-521.

Tolk, J.A. y Howell, T.A. 2001. Measured and simulated evapo-transpiration of grain sorghum with full and limited irrigation in three High Plains soils. Trad. *ASAE,* 44: 1553-1558.

Vanuytrecht, E., Raes, D. y Willems, P. 2011. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO_2. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1753- 1762.

AUTOR PRINCIPAL
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE.UU.)

AUTORES COLABORADORES
Elias Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España),

Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia),

Dirk Raes
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica)

AGRADECIMIENTOS
Lee K. Heng
(Manejo de Tierras y Agua y Sección de Nutrición de Cultivos, Programa Conjunto División FAO / OIEA, Viena, Austria)

3.3 Guía de parametrización, calibración y validación de *Aquacrop*

Esta guía está dirigida principalmente a usuarios de *AquaCrop* con conocimientos sobre agronomía y cierta experiencia en modelado de cultivos, y para aquellos que necesitan: simular la productividad de un cultivo que ya se ha parametrizado, pero que aún no se ha validado para sus condiciones específicas; calibrar el modelo de un cultivo aún no parametrizado, o mejorar los parámetros ya elaborados por otros y validarlos para el mismo cultivo. Estos usuarios deben estar familiarizados con todo el Capítulo 3 de esta publicación y con el Manual de Referencia, que pueden ser descargados del sitio web de *AquaCrop* de la FAO (www.fao.org/nr/water/aquacrop). Los usuarios con menos experiencia y conocimientos y que necesiten instrucciones más detalladas para ejecutar las simulaciones con *AquaCrop* ya calibradas para un cultivo en particular, deben descargar las instrucciones para *Group 1 Users* (Usuarios del Grupo 1) del mismo sitio web.

DISTINCIONES IMPORTANTES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

Parámetros conservativos frente a parámetros especificados por el usuario

AquaCrop está diseñado para utilizarse ampliamente en diferentes condiciones climáticas y de suelo, sin necesidad de calibración local, una vez que ha sido parametrizado correctamente para una especie de cultivo determinada. A tal efecto, los parámetros del modelo se pueden clasificar en dos grupos. El primer grupo se considera conservativo, en el sentido de que los parámetros deben permanecer prácticamente constantes bajo diferentes condiciones de crecimiento y regímenes hídricos. El segundo grupo abarca los parámetros que dependen de la ubicación, la variedad del cultivo y las prácticas de manejo, los cuales deben ser especificados por el usuario. Una característica crucial de muchos de los parámetros conservativos es que sus valores están basados en datos obtenidos a partir de variedades modernas de alto rendimiento, que se desarrollaron bajo condiciones de óptima fertilidad del suelo, sin deficiencias de nutrientes minerales, particularmente de nitrógeno. Con algunas excepciones notables, también se afirma que los valores se basan en datos obtenidos cuando no hay restricciones de agua. Por consiguiente, si los parámetros conservativos ya calibrados para un cultivo dado no arrojan resultados en la simulación, que se ajusten los datos medidos para un cultivo en un caso particular, lo primero que se debe verificar es que los nutrientes minerales no estén limitando el crecimiento del cultivo. A fin de mantener el modelo relativamente simple, *AquaCrop* no simula directamente los ciclos de los nutrientes ni los efectos nutricionales sobre el cultivo. En su lugar, la *pestaña Biomass* (Biomasa) presenta un método para tener en cuenta los efectos nutricionales después de realizar una calibración basada en la reducción de la biomasa, producida por un tratamiento de deficiencia de nutrientes.

Clases de varietales

En aras de la simplicidad, los parámetros están agrupados en dos categorías, como se describe anteriormente; en realidad, algunos de los parámetros asignados al grupo conservativo pueden variar, en cierto grado, para diferentes variedades de la especie del cultivo. Esto plantea la necesidad de establecer un nuevo término, 'clase de varietal', para designar las variedades de un cultivo con parámetros conservativos muy similares, con el objetivo de diferenciarlos de las variedades de la misma especie, pero que difieren de forma limitada en uno o más parámetros conservativos. Tomemos como ejemplo las variedades del maíz. El HI de referencia para un número de variedades de maíz se parametrizó en 48 % *(Hsiao et al., 2009*) y, en conjunto, conforman una clase de varietal. Si se determina que otras dos o tres variedades tienen un índice de cosecha de referencia más alto (p. ej., HI=51 %), constituirían otra clase de varietal. Se prevé que, a largo plazo, la mejora genética vegetal y la biotecnología alterarán un número de parámetros conservativos, aumentando el número de clases de varietales.

INFORMACIÓN DE DATOS DE ENTRADA Y DATOS PARA LA VALIDACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN

La tabla 1 presenta la información que se requiere a fin de utilizar el modelo para simular la producción y el uso del agua. Los datos mínimos obligatorios se enumeran en la primera columna. Si únicamente se dispone de esta información, los resultados simulados serían aproximaciones básicas, en el mejor de los casos. La segunda columna de la tabla enumera la información adicional necesaria para que la simulación sea más fiable. En este caso, el ajuste entre la producción de biomasa simulada y observada, y el rendimiento no se deberá considerar como validación del modelo, salvo que la correspondencia se observe en varios regímenes hídricos y en más de un clima. En esencia, cuanto más precisa y detallada sea la información, más cercanos a la realidad serán los resultados simulados.

Para validar y parametrizar el modelo se necesitan datos más detallados y precisos, tal como se enumera en la Tabla 2. La primera columna enumera la información mínima necesaria, además de la que se indica en la Tabla 1, para obtener una validación razonable del modelo o una calibración inicial de los parámetros conservativos. La segunda columna enumera la información adicional que se necesita para validar el modelo para uso general y calibrar los parámetros conservativos para un amplio rango de climas, suelos y regímenes hídicos. Durante la validación y el proceso de parametrización, se deberá prestar igual atención a como se concuerdan tanto los resultados simulados (cobertura del dosel, biomasa y uso consuntivo del agua) y los valores medidos a lo largo de la estación, así como la biomasa total, rendimiento y la ET total al momento de la madurez del cultivo.

ITERACIÓN, EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y REFINACIÓN DE PARÁMETROS

La práctica común es ejecutar simulaciones con el modelo empezando con valores estimados o supuestos para los parámetros, y después comparar los resultados con los datos experimentales medidos, para luego ajustar los parámetros y ejecutar la simulación, y comparar de nuevo. Esto se repite hasta que los resultados simulados concuerdan estrechamente con los datos experimentales. Dado que las iteraciones de ensayo y error son la esencia del proceso, ¿cómo se puede optimizar el proceso de modo que se minimicen el tiempo y esfuerzo requeridos? Algunas reglas generales pueden ser útiles.

Regla 1: Cuanto más se comprendan los principios que subyacen al modelo, su diagrama de flujo y la secuencia de pasos para efectuar los cálculos, mayor será la capacidad para identificar los

probables datos de entrada o parámetros que se deben ajustar, y en qué dirección. Para este fin, valdrá la pena el tiempo que se dedique a leer las tres publicaciones iniciales sobre *AquaCrop* (Steduto *et al.;* Raes *et al.;* Hsiao *et al.,* todos 2009).

TABLA 1 Información y datos necesarios para la simulación del crecimiento del cultivo, rendimiento y productividad del agua con *AquaCrop.*

	1. Requerimiento mínimo	2. Datos adicionales para una simulación fiable
Cultivo	Rendimiento de grano e indicación de la proporción del peso del grano seco con respecto a la biomasa aérea; es decir, una idea aproximada del índice de cosecha (HI). Fechas de siembra y cosecha (pueden ser aproximadas) y duración estimada del ciclo biológico del cultivo. Dosis de siembra y porcentaje de germinación.	Biomasa aérea al momento de la cosecha. Fecha de emergencia (sea su inicio o la etapa próxima a la emergencia total) y fecha de madurez del grano. Densidad de plantación; profundidad máxima estimada de raíces. Índice máximo de área foliar verde (LAI) o indicación del alcance de máxima cobertura del dosel o cobertura del dosel en un momento dado.
Clima y ET	Valores medios de 10 días o mensuales de: temperatura mínima y máxima e indicación del porcentaje de días soleados, y regímenes de viento y humedad. Latitud y elevación. Como otra opción, datos de evaporación por el método de tanque con información sobre el tipo de tanque y si está ubicado en un entorno seco o verde, para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo). Datos de precipitación diaria (no se recomienda la media de 10 días o mensual, aunque es mejor que ningún dato).	Valores medios semanales o de 10 días de: radiación solar (global) diaria u horas de luz solar, temperatura mínima y máxima, humedad relativa mínima y máxima, y velocidad del viento. Precipitación diaria. Evapotranspiración (ET) estimada mediante el balance del agua a largo plazo.
Suelo y fertilidad	Clase textural del suelo e indicación de la variación con la profundidad. Indicación de la pendiente del suelo y la capacidad de retención de humedad del suelo. Indicación de la fertilidad natural del suelo Prácticas generales de fertilización.	Textura de las diversas capas (u horizontes) del suelo, y cualquier capa que limite el crecimiento de las raíces y su profundidad. Tipo, tasa y tiempo de fertilización
Riego y agua del suelo	Método de aplicación del agua y calendario aproximado de riego. Idea aproximada del contenido de humedad del suelo al momento de la siembra, basada en el nivel de precipitación en meses anteriores y el cultivo que se sembró antes del actual	Fechas Reales de riego y cantidades aproximadas. Estimación del contenido de humedad del suelo al momento de la siembra, basado en alguna medición u observación cercana

Regla 2: Siempre preste atención a la representación gráfica de la pestaña *Climate-Crop-Soil water* (Clima-Cultivo-Agua del suelo) en la página de ejecución de la simulación, así como a las cifras de los resultados de las pestañas *Production* (Producción) y *Climate and water balance* (Clima y balance de agua). Al cambiar la ejecución de la simulación para que avance en intervalos de tiempo, se puede ver paso a paso cómo cambiarán el cultivo y la humedad del suelo. La representación gráfica es particularmente útil en condiciones de limitación de agua, para ver si la cobertura de dosel del cultivo (CC), la transpiración relativa a la transpiración potencial, y la aceleración de la senescencia del follaje son razonables o requieren ajustes.

TABLA 2 Información adicional y datos necesarios para la parametrización y validación de *AquaCrop*. Los datos requeridos incluyen aquellos que no se mencionan aquí, pero se enumeran en la columna 2 de la Tabla 1.

	1. Requerimientos mínimos además de la columna 2 de la Tabla 1	2. Datos adicionales para una parametrización fiable
Cultivo	Mediciones periódicas del índice de área foliar (LAI) o la cobertura del dosel durante la estación Mediciones periódicas de la biomasa aérea durante la estación Fecha en que el dosel se empieza a volver visiblemente amarilla Medición de la profundidad de raíces Signos de estrés hídrico y fechas	Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, en diferentes tipos de suelo.
Clima y ET	Temperatura y humedad diaria, mínima y máxima. Radiación solar diaria y velocidad del viento. ET por balance de agua del suelo (opcional).	Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, para diferentes tipos de suelo. Medición diaria de la ET.
Suelo y fertilidad	Debe tener un tratamiento con fertilidad óptima del suelo Capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los horizontes del suelo Tasa de infiltración o conductividad hidráulica saturada del suelo	Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, para diferentes tipos de suelo.
Riego y agua del suelo	Debe incluir un tratamiento bien regado (riego completo) y un tratamiento de estrés hídrico. Cantidad de agua que se aplica en cada uno de los riegos. Medición o buena estimación del contenido de humedad del suelo en diferentes profundidades al momento de la siembra. Mediciones periódicas del contenido de humedad del suelo en diversas profundidades de la zona radicular (alternativa opcional al balance de agua del suelo).	Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, para diferentes tipos de suelo. Debe incluir tratamientos con estrés hídrico en diferentes momentos y diferentes niveles de severidad.

Regla 3: Diferenciar la información de los datos de entrada y los datos medidos u observados, según su fiabilidad y exactitud, y realizar primero los ajustes razonables a las estimaciones vagas o aproximadas de los datos de entrada, para ver si los resultados simulados coinciden en mayor grado con los resultados de la medición, antes de cambiar los parámetros del modelo. En secciones posteriores se mencionan y analizan muchas de las incertidumbres de la información de los datos de entrada y las medidas tomadas de los cultivos, para decidir qué datos de entrada se pueden modificar en base a en una evaluación razonable de su probable rango de incertidumbre.

Regla 4: Cuando los resultados simulados y los datos medidos no concuerdan, el problema también podría estar en los datos medidos. Si los resultados simulados coinciden con los datos medidos en varios estudios diferentes, pero no con los datos de otro estudio, los datos de ese otro estudio son más sospechosos, de modo que se deberán buscar conjuntos de datos adicionales para completar la validación o parametrización.

UBICACIÓN Y PARÁMETROS ESPECÍFICOS DEL USUARIO, Y DATOS DE ENTRADA

El clima y el suelo son específicos de la ubicación, y la variedad del cultivo, la programación del ciclo del cultivo, el manejo del agua y las prácticas agronómicas son específicas del usuario.

Datos del clima y evapotranspiración de referencia (ET_o)

AquaCrop realiza las simulaciones en intervalos diarios de tiempo porque las respuestas de la planta al estado hídrico son muy dinámicas, y no se pueden representar fácilmente como valores medios semanales o de 10 días. El modelo se ejecuta con archivos de temperatura media mensual o de 10 días y de ET_o, a través de interpolaciones. Sin embargo, los resultados son obviamente aproximaciones, y no se deben utilizar para calibrar ni validar el modelo, salvo como último recurso. La ET_o es un dato clave de entrada para *AquaCrop* , dado que el modelo calcula la transpiración diaria del cultivo (Tr) y la evaporación del suelo (E) utilizando valores diarios de ET_o.

La ET_o se calculará utilizando la ecuación Penman-Monteith de la FAO, a partir de sets completos de datos meteorológicos diarios, como lo describen Allen *et al.* (1998). En el sitio web de la FAO está disponible un programa para realizar este cálculo, denominado *ET_o Calculator* (FAO, 2009). La herramienta *ET_o Calculator* tiene la ventaja de que permite realizar aproximaciones cuando no se cuenta con uno o varios tipos de los datos meteorológicos requeridos, también siguiendo el procedimiento de aproximación de Allen *et al.* (1998). Esto hace posible que el usuario ejecute simulaciones aproximadas, incluso cuando los datos meteorológicos son mínimos; sin embargo, se puede utilizar fácilmente de manera incorrecta. Tal aproximación no es fiable para realizar la validación y parametrización. Cuanto más inexacta sea la aproximación de la ET_o, menos fiables serán los resultados simulados y los parámetros de *AquaCrop* derivados. Por ejemplo, *ET_o Calculator* puede utilizar valores de temperatura diaria máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y horas de luz solar, en lugar de radiación, para calcular la ET_o. Asimismo, puede calcular la ET_o simplemente a partir de datos diarios de temperatura mínima y máxima, e información general acerca de la ubicación, tal como si es un terreno árido o húmedo y ventoso o calmado. Es evidente que la ET_o calculada a partir de las horas de luz solar será algo menos fiable que la calculada a partir de la radiación diaria, y la ET_o estimada simplemente con la temperatura diaria mínima y máxima del aire, prácticamente no servirá para efectos de la validación y parametrización del modelo. Por tanto, se debe comprender que datos climáticos fiables son cruciales en *AquaCrop*.

Grados día acumulados (GDD)

AquaCrop está diseñado para usarse bajo diferentes condiciones climáticas y por consiguiente, debe parametrizarse en el modo de Grados día acumulados (GDD) para responder a diferentes regímenes de temperatura. No obstante, esto podría resultar difícil porque muchos usuarios quizá solamente cuenten con los datos de sus ubicaciones específicas con su rango limitado de temperatura. En este caso, lo mejor es seleccionar datos obtenidos cuando la temperatura baja no sea un factor limitante y ejecutar el modelo primero en el modo de tiempo calendario para la parametrización. Después de que se hayan alcanzado valores de parámetros razonablemente aceptables, al configurar el modelo en modo de GDD, los parámetros se convierten automáticamente en unidades en términos de GDD. Así, el reto consiste en definir: (1) la temperatura base y la temperatura superior para calcular los GDD, y (2) los umbrales de temperatura para la acumulación de biomasa y para la polinización y el cuajado de fruto del cultivo específico. Estos aspectos se analizarán más adelante.

Características de la humedad del suelo

En *AquaCrop,* el grado de limitación hídrica se expresa como una fracción del agua disponible total (TAW) en la zona radicular, donde el TAW se define como el agua retenida en el suelo, entre su capacidad de campo (FC) y el punto de marchitez permanente (PWP). En caso de que las capas del suelo difieran en FC y PWP, se deben introducir en el modelo los diferentes valores de las capas que abarcan la profundidad máxima de raíces.

Introducir valores exactos de FC y PWP es importante para especificar las condiciones locales, únicamente si el agua es un factor limitante considerable. Si la simulación se realiza para condiciones donde el agua no es limitante o solo mínimamente limitante, los valores aproximados de FC y PWP servirán, pero las funciones de estrés hídrico derivadas (umbral y forma de la curva) no serán fiables para condiciones limitantes en mayor grado por déficits hídricos. Los valores aproximados de FC y PWP se pueden estimar simplemente a partir de la clase texturtal del suelo. *AquaCrop* presenta archivos predeterminados de suelos para un gran número de clases de texturales. En cada archivo, los parámetros de agua pertinentes aparecen en la pestaña *Characteristics of soil horizons* (Características de los horizontes del suelo). Se requiere más exactitud para calibrar el modelo para las diferentes funciones de estrés hídrico, utilizando datos obtenidos cuando el agua es limitante.

La heterogeneidad espacial del suelo puede ser un problema para la simulación precisa en una ubicación dada con un nivel limitante de agua, porque la FC y el PWP, y por ende el TAW, pueden variar lo suficiente de un área a otra en un campo, reduciendo la exactitud de los resultados simulados para el campo. Si hay datos disponibles para diferentes partes de un campo, la simulación se debe ejecutar en cada parte del campo cuyas características de humedad del suelo difieran entre sí.

La conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) de la capa superior del suelo determina el drenaje interno en el perfil del suelo, las pérdidas debido a percolación profunda y la cantidad de agua que se infiltra en la zona radicular y la escorrentía superficial después de riego o precipitación. La escorrentía superficial es importante únicamente si la cantidad de agua que se aplica por riego es excesiva o si la precipitación es intensa y fuerte. En tales situaciones, la K_{sat} medida se debe utilizar para la simulación. Si no se dispone del valor medido, el valor predeterminado proporcionado por *AquaCrop* para la clase textural de suelo dada (con base en la diferencia en el contenido de humedad del suelo (θ) entre el suelo saturado y la FC) se debe ajustar según el conocimiento general de las condiciones locales.

Contenido inicial de humedad del suelo

Otro factor local específico es el contenido inicial de humedad del suelo para la profundidad máxima de raíces al inicio de la simulación. Si los valores no se miden, se pueden hacer estimaciones basadas en el conocimiento del clima local, particularmente la precipitación, y el cultivo precedente o historial de malas hierbas. Por ejemplo, para un clima con precipitación en invierno, suficiente para rellenar completamente el perfil del suelo, y un verano seco, donde el campo se mantiene en barbecho y sin malas hierbas, cabe asumir que las capas más profundas del suelo están en FC pero con una reducción del contenido de humedad del suelo en la capa superior, al estimar el grado de evaporación del suelo que tiene lugar antes del inicio de la simulación. Si los datos meteorológicos están disponibles antes del inicio de la simulación, *AquaCrop* se puede utilizar para hacer esa estimación al establecer el tiempo de inicio como la finalización de la última lluvia significativa. No obstante, si hay malas hierbas, sería preciso hacer algunas estimaciones de la cobertura del dosel (CC) de las malas hierbas, para que *AquaCrop* simule un perfil razonable del contenido inicial de humedad del suelo.

Fenología del cultivo

Muchas de las diferencias entre las variedades de un cultivo se relacionan con el tiempo de duración de las etapas de desarrollo. El usuario debe especificar el tiempo para alcanzar una etapa particular o su duración en la variedad local. Estas etapas son: tiempo para el 90 % de emergencia de las plántulas, para iniciar la floración, para iniciar la senescencia del dosel, para la madurez fisiológica y la duración de la floración.

Tiempo para el 90 % de emergencia

La elección particular del tiempo para el 90 % de emergencia se explica posteriormente, en **Tamaño inicial del dosel por plántula.** En casi todos los casos, es probable que este tiempo sea estimado y no determinado a partir del conteo real de las plántulas. Se debe ajustar para que los valores simulados y medidos de cobertura del dosel (CC) coincidan en la etapa de plántula y al inicio de la estación. No obstante, el ajuste debe implementarse únicamente después de que los parámetros conservativos relevantes (tamaño inicial del dosel por plántula y el coeficiente de crecimiento del dosel) se hayan parametrizado de manera adecuada y de que la densidad de la plantación se haya determinado.

Tiempo para iniciar la floración y su duración

Para cultivos determinados con un período corto de floración (p. ej., 15 días), es importante establecer un tiempo exacto para el inicio de la misma. El tiempo de inicio puede ser más aproximado en el caso de cultivos indeterminados cuyo período de floración es largo. En los casos en que el estrés hídrico no es considerable, el modelo se construye de tal manera que el tiempo de floración no es relevante.

Tiempo para alcanzar la máxima cobertura del dosel

AquaCrop proporciona este parámetro para permitir la realización de simulaciones cuando no se conoce el parámetro conservativo, el coeficiente de crecimiento del dosel (CGC), y se debe utilizar únicamente como último recurso. Véase la posterior sección **Coeficiente de crecimiento del dosel** para una explicación más detallada.

Tiempo para iniciar la senescencia del dosel

En *AquaCrop,* el tiempo para el inicio de la senescencia del dosel se define como el momento en que el área foliar verde es igual o inferior a LAI = 4, como resultado del amarilleamiento de las hojas, bajo condiciones óptimas sin estrés hídrico. Según esta definición, si la densidad de plantación es baja y el LAI máximo es inferior a 4.0, la senescencia del dosel inicia una vez que las hojas inferiores presentan una senescencia considerable. Sin embargo, si el LAI máximo es

considerablemente superior a 4.0, una cantidad suficiente de hojas inferiores debe fenecer para reducir el LAI a 4.0, antes de considerar que del dosel ha iniciado la senescencia.

Tiempo para la madurez fisiológica

Diferentes especies de cultivos pueden tener cada una su propia definición específica de madurez fisiológica (p. ej., formación de la capa negra en los granos de maíz). Sin embargo, en términos generales, *AquaCrop* utiliza como tiempo de madurez predeterminado el momento en que la cobertura del dosel se reduce al 5 % de la cobertura del dosel máxima alcanzada. Los usuarios pueden cambiar el tiempo de madurez de acuerdo con sus propios datos en la pestaña *Canopy development* (Desarrollo del dosel). Es evidente que la madurez está estrechamente ligada al momento de senescencia del dosel, de modo que éste puede ser un método práctico para estimar el tiempo de madurez, si no se realiza un proceso detallado para determinarlo. Por lo general, las empresas productoras de semillas ofrecen información sobre la duración del ciclo biológico de sus variedades. No obstante, estos datos pueden ser muy generales, en términos de ciclo largo, medio o corto. La información también se puede proporcionar en grados día, pero lamentablemente definidos de formas diferentes a las que se usan en *AquaCrop*. En aras de la precisión, se requieren observaciones experimentales o datos para determinar el momento de madurez. Se justificaría establecer como tiempo de madurez el momento en que solamente queda una pequeña área foliar verde en del dosel.

Profundidad de raíces y tasa de profundización

El desarrollo de las raíces es, en gran medida, específico del sitio, debido a las diferencias en las características físicas (temperatura, impedancia mecánica y aireación) y químicas (pH, salinidad y altos niveles de aluminio o manganeso) del suelo, las cuales afectan considerablemente el crecimiento de las raíces. Cuando todas las condiciones del suelo son altamente favorables, es probable que la tasa de profundización de las raíces esté en un rango de 20 a 25 mm por día, para muchos cultivos. Las posibles excepciones son especies de cultivos famosas por sus raíces poco profundas.

En suelos profundos sin capas que limiten el crecimiento de las raíces, *AquaCrop* detiene la profundización de las raíces de manera predeterminada, una vez que llega el momento de la senescencia del dosel (para condiciones sin estrés). Existe una noción en la bibliografía, en la que las raíces no crecen ni profundizan más allá de la etapa de polinización de un cultivo. Sin embargo, datos fiables sobre varios cultivos muestran que las raíces profundizan después de la polinización, aunque a un ritmo más lento. Para suelos de profundidad limitada, pero también sin capas intermedias que restrinjan el crecimiento, la profundización de las raíces se desarrolla a una tasa normal en *AquaCrop,* pero se detiene repentinamente cuando se alcanza el fondo del suelo.

En los casos donde el enraizamiento observado es demasiado superficial, aunque el suelo es profundo, es posible que alguna característica del suelo o una capa del suelo esté impidiendo el crecimiento de las raíces. Existen dos maneras de establecer una aproximación a la situación con *AquaCrop*. Una de ellas consiste simplemente en reducir la tasa promedio de profundización a lo largo del perfil del suelo, al ajustar la profundidad máxima de las raíces al inicio de la senescencia del dosel, en un punto determinado de modo que la profundidad de las raíces observada en un momento dado coincida con la que se muestra en *AquaCrop*. La otra aproximación se puede aplicar únicamente en situaciones donde el crecimiento de las raíces se inhibe más a medida que aumenta la profundidad del suelo. Al aumentar el factor de forma de la curva profundidad de raíces vs. tiempo al rango de 2.5 a 3.0, en la pestaña *Root deepening* (Profundización de las raíces), en *Development* (Desarrollo) del archivo *Crop* (Cultivo), la tasa de profundización al incio sería elevada y se reduciría con el paso del tiempo, a medida que las raíces alcanzan mayor profundidad. *AquaCrop* también permite especificar la profundidad de suelo de una capa restrictiva que esté bloqueando la expansión de la zona radicular, como una característica del suelo en la pestaña *Restrictive soil layer* (Capa restrictiva del suelo).

PARÁMETROS CONSERVATIVOS

Efectos de la temperatura

La mayoría de los efectos de la temperatura en los cultivos se simula utilizando como controlador los GDD, en lugar de los días del año, para lo cual es crucial la configuración de la temperatura base y superior (corte), asimismo, como mediante el uso de la ET_o. Además, tres efectos de la temperatura deben tenerse en cuenta por otros medios. Éstos son efectos inhibitorios, de baja temperatura en la conversión de la transpiración a producción de biomasa y en la polinización, y de alta temperatura en la polinización.

Temperatura base y superior

La temperatura base se puede considerar como el umbral inferior para el crecimiento y desarrollo del cultivo. La temperatura superior es el límite por encima del cual un aumento adicional en la temperatura no tendrá efectos sobre la tasa de desarrollo. El cálculo de los GDD en *AquaCrop* se realiza de acuerdo con el 'Método 2' según lo describen McMaster y Wilhelm (1997), pero con una modificación importante: que no se efectúa ningún ajuste de la temperatura mínima cuando desciende por debajo de la temperatura base. Por lo general, la temperatura base y la temperatura superior se seleccionan en el trabajo de modelado mediante ensayo y error, al ejecutar modelos de simulación para datos recopilados en diferentes regímenes de temperatura. En términos generales, las especies C_4 son generalmente más sensibles al frío que las especies C_3. Los cultivos de invierno son obviamente más tolerantes al frío que los cultivos de primavera y verano, y los cultivos con temperatura base más alta se beneficiarían de temperaturas más cálidas (temperatura superior más alta). La temperatura base para cultivos como la cebada y el trigo, por lo general, se considera 0 ^oC en la mayoría de los modelos de cultivo, mientras que para los cultivos de verano C_4, como el maíz, es de 8 ó 10 ^oC. La temperatura superior se ha ajustado en 30 ^oC para el maíz y en 32 ^oC para el algodón, pero en 26 ^oC para el trigo en *AquaCrop*.

Si los datos experimentales utilizados para evaluar *AquaCrop* se obtuvieron en un clima donde la temperatura, a menudo, no desciende cerca de la temperatura base o por encima de la temperatura superior, el valor exacto de estos dos umbrales, siempre que sean razonables, posiblemente no marcará una diferencia significativa en los resultados simulados. Por otro lado, la diferencia podría ser mayor si la temperatura, con frecuencia, ronda el valor base o aumenta de manera considerable por encima de la temperatura superior. En este caso, es necesario refinar los valores de los umbrales. El mejor método es obtener set de datos del cultivo sembrado en otros regímenes de temperatura, y por ensayo y error, fijar los umbrales de temperatura más razonables.

Incidencia de las bajas temperaturas en la conversión de la transpiración en producción de biomasa

Al simular períodos cercanos a la temperatura base utilizando *AquaCrop,* se encontró que el modelo predijo un valor excesivo de producción, probablemente debido a que la transpiración, en su mayoría un proceso físico, presenta un menor grado de inhibición a causa del frío frente a la fotosíntesis, la cual es un proceso metabólico complejo. Luego se decidió aplicar una función logística para reducir arbitrariamente la cantidad de biomasa producida por unidad de transpiración normalizada, según la magnitud de los GDD cada día, con un umbral superior de GDD donde inicia la reducción, y GDD inferiores fijados en GDD = 0, donde la conversión se reduce a cero. Por lo general, el umbral superior probablemente se deba ajustar en un rango de 6 a 10 GDD.

Efectos de la temperatura alta y baja en la polinización

Estos efectos también se manejan mediante reducciones arbitrarias, utilizando funciones logísticas, con la temperatura como variable independiente. La reducción inicia en el umbral superior de

temperatura para el efecto frío, y en el umbral inferior para el efecto de la temperatura alta. La polinización se inhibe por completo cuando la temperatura desciende 5 °C por debajo del umbral superior para el efecto frío, y cuando la temperatura aumenta 5 °C por encima del umbral inferior para el efecto de la temperatura alta. Usualmente, estas temperaturas inhibitorias caen fuera de los regímenes de temperatura, lo que favorece el crecimiento y la producción de una clase de cultivo determinada.

Cobertura del dosel y parámetros relacionados

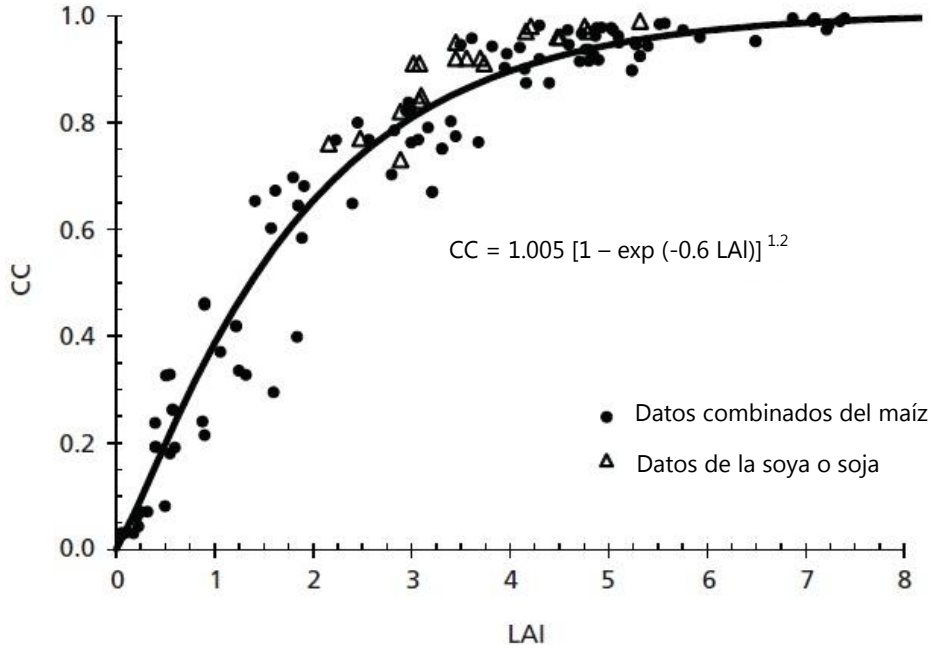
Conversión de los datos del índice de área foliar (LAI) a cobertura del dosel (CC)

AquaCrop simula la transpiración en términos de cobertura del dosel (CC) del cultivo, pero a menudo los estudios experimentales miden el LAI, pero no la cobertura del dosel, especialmente en los primeros estudios. Durante la parametrización de *AquaCrop* para el maíz (Hsiao *et al.,* 2009), se llegó a una ecuación de conversión, $CC = 1.005\ [1 - \exp(-0.6\ LAI)]^{1.2}$, que se utilizó para analizar la bibliografía de datos sobre maíz y soja (Figura 1).

Las relaciones entre CC y LAI de los cultivos que difieren considerablemente en la arquitectura del dosel follaje serían diferentes a las que se muestran en la Figura 1. Se pueden encontrar varios informes recientes sobre tales relaciones en la literatura científica.

Cabe tener en cuenta que, durante la fase de senescencia del dosel, no existe una manera sencilla para medir la CC, la cual se refiere únicamente a la cobertura verde, porque las hojas verdes y amarillas se entremezclan e incluso algunas hojas son mitad verdes y mitad amarillas. Por tanto, convertir el LAI medido a CC es la única manera de obtener valores de CC durante esta fase del cultivo.

FIGURA 1 Cobertura de dosel (CC) en relación con el índice de área foliar (LAI) basada en los datos obtenidos para maíz (datos combinados de varios tratamientos y años) y soja. La curva, descrita mediante la ecuación *(Hsiao et al., 2009),* representa la línea de regresión con una ligera modificación en los extremos más bajos y altos del LAI, según las expectativas teóricas.



Tamaño inicial del dosel por plántula (cco)

La cobertura del dosel inicial por unidad de superficie del suelo (CC_o) se calcula a partir del tamaño medio inicial del dosel por plántula (cc_o) y la densidad plantación; es decir, CC_o = cc_o x densidad plantación. La CC_o se considera como la cobertura de follaje en el día del 90 % de emergencia. En esta etapa, es probable que la plántula promedio se encuentre al inicio de la autotrofía y que su crecimiento empiece a obedecer a la ecuación para la primera mitad de la expansión del dosel (ecuación 3 de la sección 3.1).

Idealmente, la cc_o se debe medir en plántulas de las especies seleccionadas, aproximadamente 3 ó 4 días después de la emergencia, cuando el color de la hoja u hojas se torna completamente verde. En esta etapa, en lugar de medir la CC, el área foliar verde de una plántula se puede medir y utilizar para determinar un valor aproximado de la cc_o con un ligero ajuste a la baja (p. ej., valor de la cc_o 10 % o 15 % menor que el área foliar por plántula). La opción alternativa es derivar la cc_o de manera indirecta, a partir de los datos de la CC tomados en diferentes momentos y la densidad de planación, utilizando las ecuaciones de crecimiento de CC de *AquaCrop.* Este enfoque se describe detalladamente más adelante, cuando se analiza la parametrización del CGC. Con respecto a la cc_o, un principio fundamental es que, para la variedad de especies de cultivo, el tamaño inicial del dosel por plántula (cc_o) usualmente está correlacionado con la masa por semilla. Tome como ejemplo tres cultivos, los tamaños relativos de la cc_o son: maíz > trigo > tomate, la misma clasificación que la masa relativa por semilla para estos cultivos. Otro principio básico es que los cultivos de naturaleza parecida y tamaño semejante de semillas deben tener cc_o similares. Por tanto, el valor de la cc_o del trigo debería ser un buen punto de partida para la cc_o de la cebada, y el valor de la cc_o del repollo debería ser un buen punto de partida para la cc_o de la colza.

Cobertura máxima del dosel (CC_x)

Cuando la siembra es lo suficientemente densa, el límite superior teórico para CC_x es 1.0, pero en la práctica la CC_x pocas veces alcanza 0.99 y a menudo, se mantiene dentro del rango de 0.95 y 0.99, incluso para densidades de plantación inusualmente elevadas. En este documento se hace referencia a este rango como la cobertura completa del dosel, y el momento en que se alcanza se denomina cierre del dosel. No obstante, estos términos se utilizan con bastante laxitud en la bibliografía sobre el tema, y pueden referirse a una CC considerablemente inferior a 0.95, tan baja como 0.9, o incluso inferior en algunos documentos. Como guía general, la CC es 0.95 o mayor cuando el LAI excede un valor cercano a 4.5 ó 5.0 (Figura 1), con algunas excepciones. Una excepción son las especies que dependen en gran medida del seguimiento de la luz solar, como el girasol, que requiere un LAI de 3.5 para lograr la cobertura completa del dosel. Otra excepción es cuando el cultivo está plantado en grupos o muy cerca el uno del otro en filas con suficiente separación. En este caso, un LAI significativamente mayor que 5.0 es necesario para lograr la cobertura completa del dosel.

Cuando la densidad de plantación se reduce por debajo de un nivel particular, la densidad es insuficiente para que el dosel se cierre y la CC desciende considerablemente por debajo de 0.95. Este punto depende de la clase de cultivo, cada uno con su límite particular de área foliar potencial por planta. Idealmente, para cada clase de cultivo, se debe construir una curva de CC_x frente a la densidad de plantación, con base en datos experimentales, para utilizarse en las simulaciones de *AquaCrop*. Desafortunadamente faltan los datos experimentales requeridos para algunas especies. Si el usuario tiene las mediciones de CC_x de su cultivo en la densidad de la planta en cuestión, bajo condiciones óptimas de crecimiento, estos valores de CC_x son obviamente los mejores para usar en la simulación. De lo contrario, se debe estimar la CC_x. Una forma de hacerlo es simplemente mediante observación, al juzgar el grado de CC de manera visual aproximadamente en el momento en que la CC es máxima. Cabe advertir que, si se observa el dosel desde una perspectiva lateral o incluso en un ángulo descendiente (o se toman fotografías desde posiciones similares), se tiende a

sobrestimar la CC, porque es posible que esta vista incluya demasiadas capas de la planta. La mejor manera de hacer esta estimación es observando el dosel directamente desde arriba o viendo la proporción del suelo cubierta por la sombra del dosel cuando el sol está directamente sobre la planta. También se pueden realizar estimaciones con base en el conocimiento general del cultivo o cultivos similares.

Si se conoce la CC_x de un cultivo particular para una densidad de plantación determinada (plantación de referencia), para estimar la CC_x de una siembra del mismo tipo de cultivo pero sembrada a una densidad diferente (d_p), se puede iniciar por estimar el LAI máximo de la siembra para la CC_x (LAI_{ref}) conocida, a partir de la Figura 1 (o una relación similar, si es más precisa), y calcular primero el LAI de la siembra, asumiendo que el área foliar por planta es independiente de la densidad de plantación, y luego realizar un ajuste aproximado del impacto del cambio en la densidad de plantación. Esto se resume en una ecuación:

$$LAI = LAI_{ref}\left(\frac{d_p}{d_{ref}}\right)\left(\frac{1}{F_{adj}}\right) \quad (1)$$

donde d_{ref} es la densidad de plantación de la referencia, y F_{adj} es el factor de ajuste.

El F_{adj} está limitado dentro del rango de d/d_{ref} y 1.0, para casos donde $d_p > d_{ref}$, así como donde $d < d_{ref}$. Para ilustrar, primero tomemos el caso de $d_p > d_{ref}$. Si la $d_p/d_{ref} = 1.3$, el F_{adj} estaría limitado al rango de 1 a 1.3. En un extremo donde el $F_{adj} = 1$, el área foliar por planta sería independiente de la densidad de plantación. En el otro extremo, donde el $F_{adj} = 1.3$, el área foliar por planta se reduce por el incremento en la densidad de plantación, hasta tal punto que el LAI de la siembra permanece igual que el LAI_{ref}. En el caso de $d_p < d_{ref}$, si la $d_p/d_{ref} = 0.7$, el F_{adj} estaría limitado al rango de 1 a 0.7. Obviamente, en la mayoría de los casos, los valores límite del F_{adj} no se deben utilizar para estimar el LAI. El grado en que la planta ajusta su área foliar en respuesta a la aglomeración se relaciona con como de determinado es el cultivo en términos de hábito de crecimiento. Así que cuanto más indeterminado sea el cultivo, el F_{adj} deberá desviarse 1.0, ya sea mayor o menor.

Luego de que se haya estimado el LAI de la plantación, la CC correspondiente se puede leer en la Figura 1 o relaciones similares, y se puede utilizar como CC_x para la simulación. Como es evidente en la Figura 1, para los casos donde la cobertura del dosel es completa o casi completa, y la densidad de la plantación no difiere mucho de la de referencia, la estimación de la CC_x realizada mediante el procedimiento anterior debe ser precisa dentro de unos pocos puntos porcentuales. Las estimaciones se vuelven cada vez menos fiables a medida que aumenta la diferencia en la densidad, o si la CC_x o CC_x de referencia es considerablemente inferior a la cobertura completa. Por otro lado, en casos donde se presente poca competencia entre las plantas por obtener la PAR debido a la escasez de dosel (p. ej., CC < 0.5), la Ecuación 1 se puede utilizar junto con la Figura 1 para obtener una estimación razonable de la CC_x al fijar el F_{adj} cerca de 1.0.

Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC)

CGC es una medida de la habilidad intrínseca del dosel para expandirse. Un CGC de 0.11, por ejemplo, significa que cada día la CC es un 11 % mayor que la CC del día anterior, durante la primera mitad del desarrollo del dosel. El CGC es prácticamente una constante cuando los efectos de la temperatura se tienen en cuenta mediante el uso de los GDD como motores y cuando no hay estrés. Dado que el CGC se basa en cinética de primer orden (Bradford y Hsiao, 1982), una buena forma de derivar el CGC es graficar el registro de la CC vs. tiempo y tomar la pendiente de la curva

ajustada linealmente como el CGC, siempre que solamente se utilicen datos de CC medidos poco después de la emergencia de la plántula hasta aproximadamente el 60 % de la cobertura, los cuales no incluyan períodos de alta carga de frutos en el cultivo. Si los datos de la CC son demasiado limitados para el período que se especifica anteriormente, pero se han recopilado datos adicionales hasta el cierre del dosel o cerca de la cobertura completa, el CGC se puede parametrizar utilizando los componentes de crecimiento de dosel de *AquaCrop*. En lugar de ejecutar el modelo, lo cual tomaría demasiado tiempo, un programa sencillo de Excel, limitado únicamente al crecimiento del dosel, está disponible en el sitio web de *AquaCrop* de la FAO para este propósito.
Comúnmente, la cc_o y el CGC serían desconocidos, de modo que se requerirían iteraciones de ensayo y error para encontrar los mejores valores para los dos parámetros. Como principios rectores generales para la parametrización del CGC, las principales consideraciones deben ser si el cultivo es C_3 o C_4, y si es más eficiente en la captura de PAR. Para el maíz y el sorgo, dos importantes cultivos C_4 ya parametrizados para *AquaCrop,* el CGC es 0.17 por día (simulación de días del año) y 0.013 con base en GDD. Para un número de especies C_3, el CGC se ubica cerca de 0.09 a 0.12 por día (simulación en días del año). Existen excepciones. Una de ellas es el cultivo C_3 de girasol, cuyo CGC está en el orden de 0.22 por día (simulación en días del año), presuntamente debido a su capacidad de seguir los rayos solares para capturar más PAR por unidad del dosel. En las ejecuciones de ensayo y error para parametrizar la cc_o y el CGC, se pueden presentar varios escenarios de resultados cuando la CC simulada por un período de tiempo se compara con los datos medidos. Estos escenarios se enumeran en la primera columna de la Tabla 3. En la segunda columna se indican las posibles causas de las discrepancias y los ajustes que se deben realizar.

Si la comparación de los datos simulados frente a los datos medidos no corresponde a ninguno de los escenarios de la tabla, es posible que los datos experimentales sean cuestionables o que los datos meteorológicos sean deficientes. Los datos meteorológicos son particularmente más sospechosos si se utilizan los valores de temperatura mínima y máxima de 10 días o mensuales, en lugar de valores diarios.

AquaCrop tiene incorporada una alternativa para estimar el CGC, basándose en el tiempo requerido para que la CC alcance CC_x. Esta característica se facilita para los usuarios que desean simular aproximadamente la producción y el uso del agua de un cultivo sin conocer algunos o muchos parámetros del mismo. No se debe confiar en esta simulación para parametrizar el CGC dado que, en tales casos, lo más seguro es que no se conozcan la cc_o y la densidad de la plantación o cobertura del dosel inicial (CC_o), los cuales son igualmente importantes para determinar el momento en que se alcanza la cobertura máxima.

TABLA 3 Comparación de la cobertura del dosel simulada y medida, y posibles ajustes en los parámetros del modelo para mejorar el ajuste

Ajuste entre la CC simulada (CC_{sim}) y la CC medida (CC_{meas})	Posible(s) causa(s) de la discrepancia y medida correctiva sugerida
La CC_{sim} es más baja o más alta que la CC_{meas}, desde el momento de la emergencia hasta la CC_x. Se alcanza la misma CC_x pero en momentos diferentes. Las pendientes de las dos curvas para el período de crecimiento rápido del dosel son similares.	La cc_o es demasiado baja o la densidad de la plantación es demasiado baja, o, respectivamente, la cc_o es demasiado alta o la densidad de la plantación es demasiado alta. Verifique los datos de densidad de la plantación y pruebe con una cc_o mayor (o menor) La CGC y CC_x probablemente están bien.
La CC_{sim} coincide con la CC_{meas} al inicio de la temporada, pero gradualmente se vuelve más baja o más alta. Se alcanza la misma CC_x pero en momentos diferentes.	El CGC es demasiado bajo o demasiado alto, respectivamente. Realice el ajuste adecuado en CGC. La CC_x y cc_o probablemente están bien.
La CC_{sim} es más alta o más baja que la CC_{meas} al inicio de la temporada, pero la tendencia se revierte gradualmente más tarde, y se alcanza la misma CC_x pero en momentos diferentes.	La cc_o es demasiado baja o la densidad de la plantación es demasiado baja, o, respectivamente, la cc_o es demasiado alta o la densidad de plantación es demasiado alta. El CGC es demasiado alto o demasiado bajo, respectivamente. Verifique los datos de densidad de la plantación y pruebe con una cc_o mayor (o menor) y un CGC más bajo (o más alto). La CC_x probablemente está bien.
La CC_{sim} coincide bien con la CC_{meas} durante la temporada.	Los valores de cc_o, CGC y CC_x son adecuados para este set de datos experimentales.

Coeficiente de disminución del dosel (CDC)

Después de que comience la senescencia de la cobertura, la CC se reduce progresivamente al aplicar un coeficiente empírico de disminución del dosel (CDC) (Raes et al., 2011). Si existen datos del LAI que abarquen la fase de senescencia, se deben convertir a CC utilizando la Ecuación 1 y un valor para CDC se debe seleccionar a fin de que la disminución simulada de CC coincida con los valores medidos. Lamentablemente, en muchos estudios, faltan los datos detallados del LAI para este fase. En este caso, el CDC se puede ajustar inicialmente según las observaciones de la velocidad de amarilleamiento del follaje, y luego se pueden refinar mediante simulaciones de ensayo y error para encontrar el CDC que produzcan el mejor ajuste con los datos de biomasa medidos durante la fase de senescencia. En términos de la predicción de biomasa y rendimiento, AquaCrop no es muy sensible al grado de disminución de la CC cerca de la madurez, porque el modelo asume un descenso continuo de la eficiencia para convertir la Tr normalizada en biomasa durante ese período.

Productividad del agua normalizada (WP*)

La productividad del agua (WP) que nos atañe aquí es la relación entre la biomasa producida y la cantidad de agua transpirada ($WP_{B/Tr}$), y la productividad del agua normalizada (WP*) es la relación entre la biomasa producida y el agua transpirada, normalizada por la demanda de evaporativa y la concentración de CO_2 de la atmósfera.

WP normalizada por la demanda evaporativa

La transpiración, el denominador de la WP, es extremadamente difícil de medir y separar de la evaporación del suelo en el campo. Afortunadamente existen numerosos set de datos sobre producción de biomasa vs. uso sonsuntivo del agua, los cuales se pueden utilizar para derivar la $WP_{B/Tr}$, y por ende la WP*, si se cuenta con los datos meteorológicos requeridos. Los gráficos de biomasa vs. ET normalizada, basados en el muestreo secuencial durante la campaña, deben mostrar una porción de pendiente ascendente al inicio, seguida de una porción en línea recta de pendiente casi constante, para luego terminar con la reducción de la pendiente para uno o varios puntos de datos, cuyas muestras se tomaron cerca del final del ciclo biológico del cultivo. Por supuesto, la pendiente en un punto dado es la productividad del agua en ese punto en términos de ET normalizada, no solamente de transpiración normalizada. Las pendientes ascendentes iniciales representan un período de baja productividad del agua, cuando la CC es pequeña y la mayor parte del suelo está al descubierto, y la evaporación del suelo es la gran parte de la ET. Se debe ajustar con una ecuación lineal la porción media del gráfico, que comprende los puntos de datos recopilados desde que el dosel del cultivo cubrió más del 70 % del terreno hasta que, aproximadamente un cuarto del LAI máximo ha fenecido, a medida que se avecina la madurez. La pendiente de esta regresión lineal es la WP normalizada por la demanda evaporariva pero solamente después de que se ha realizado una corrección para la evaporación del suelo. Una vez que la cobertura del dosel está casi completa, incluso cuando la superficie del suelo está húmeda, la evaporación puede representar únicamente del 12 al 18 % de la ET total (Villalobos y Fereres, 1990). Así que dependiendo de la frecuencia con que el suelo se humedezca por precipitación o riego durante el periodo que comprende la porción media del gráfico, su pendiente debe reducirse de un 5 hastaun 15 % para obtener una WP normalizada.

Para graficar biomasa vs. ET normalizada, se utiliza la ET_o para normalizar cada intervalo de tiempo que abarca una muestra de biomasa (Steduto *et al.,* 2007) según la ecuación:

$$\text{ET Normalizada} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Tr}{\overline{ET_o}}\right)_i \qquad (2)$$

donde i es un número correlativo que designa el intervalo de tiempo secuencial entre dos muestras de biomasa adyacentes, Tr es la transpiración acumulada dentro de ese intervalo y $\overline{ET_o}$ es el valor medio de ET_o diaria dentro de ese intervalo, y n es el número de la muestra de biomasa en cuestión. Es posible que el intervalo no tenga una duración fija y que represente el momento que precede el muestreo de biomasa hasta el momento de muestreo previo; p. ej., para i = 5, el intervalo de tiempo relevante es el momento entre la muestra N.º 4 y N.º 5. Para cada muestra de biomasa (n), la suma empieza al inicio (i = 1) y finaliza cuando i = n. Si no hay datos de ET ni meteorológicos para el momento previo a la primera muestra de biomasa (i = 1), se puede asumir que equivalen a cero.

La razón para utilizar la Ecuación 2 la normalización es para explicar cualquier variación en la ET_o entre los diferentes intervalos de tiempo. Si faltan datos meteorológicos diarios y el clima es relativamente estable, se pueden usar los gráficos de biomasa frente a ET, en lugar de la ET normalizada, para obtener la WP de manera análoga al procedimiento anterior. Luego, la WP se puede dividir en una ET_o media, calculada a partir de datos meteorológicos menos detallados a fin de estimar la WP normalizada. Sin embargo, es evidente que esto es una aproximación general.

Normalización por el CO_2 atmosférico

La concentración de CO_2 en la atmósfera aumenta cada año con el tiempo e incide en la WP de los cultivos. *AquaCrop* responde a este efecto al normalizar la WP para CO_2 de manera general, en base a los conocimientos conceptuales y datos empíricos (Steduto *et al.,* 2007). La WP ya normalizada para la demanda de evaporación se multiplica por un factor, f_{co2}, definido mediante la Ecuación 3 a continuación, para obtener WP*.

$$f_{CO_2} = \frac{(C_a/C_{a,o})}{1+0.000138\ (C_a - C_{a,o})} \quad (3)$$

En la ecuación 3, C_a es la concentración media de CO_2 en el aire para el año en que se obtienen los datos experimentales, y C_{ao}, es la concentración media de CO_2 para el año 2000 (equivalente a 369.77 μLL^{-1}), ambas medidas en el observatorio de Mauna Loa, Hawái. La C_a medida para los años desde 1980 hasta el año actual aparece en *AquaCrop* en el archivo de clima, en la pestaña de CO_2 atmosférico. Los valores numéricos de los datos medidos se pueden encontrar en el archivo sobre CO_2 de Mauna Loa, en el subdirectorio SIMUL de *AquaCrop*. La C_a de años futuros varía según el escenario seleccionado de emisiones de gases de efecto invernadero (p. ej., argumentos A2, A1B, B2 y B1). Los usuarios pueden ingresar sus propias proyecciones o seleccionar una de los archivos sobre CO_2 disponibles en el subdirectorio DATA de *AquaCrop*.

Índice de cosecha de referencia (HI_o)

El valor del índice de cosecha de referencia se selecciona como la el extremo medio de los valores de HI reportados para la mayoría de la especie o clase de cultivo determinado. Este valor se debe seleccionar cuidadosamente y no se debe modificar sin una razón justificada, porque un cambio en el HI de referencia exigiría la recalibración de los parámetros que modulan los efectos del estrés hídrico en el HI. En términos generales, el HI de referencia puede ser 0.50 o incluso ligeramente más alto para variedades modernas de cultivos de grano de alto rendimiento, pero considerablemente más bajo para variedades más tempranas y variedades locales. Durante el siglo pasado, los fitogenetistas seleccionaron un HI alto al seleccionar la capacidad de mayor rendimiento (Evans, 1993). Por ejemplo, el HI para el trigo y el arroz se encontraba en el rango de 0.33 al inicio del siglo XX y aumentó hasta 0.53 en la década de 1980 (Evans, 1993). Desde la década de 1980, únicamente se han efectuado mejoras marginales en el HI de los cultivos principales (Evans y Fischer, 1999). La razón podría ser que se han alcanzado los límites de tallos lo suficientemente fuertes para soportar el peso del grano y de la cantidad de hojas necesarias para mantenerr la fotosíntesis (Hsiao *et al., 2007).* Cabe señalar que, en algunas ocasiones, la bibliografía sobre el tema ha mencionado un HI considerablemente mayor de 0.50 para cultivos de grans. Estos valores deben considerarse con precaución, para determinar si hay algún indicio de pérdida considerable de biomasa, como hojas viejas y muertas al viento justo antes de la cosecha.

El HI para cultivos de semillas oleaginosas y cultivos de raíces es diferente al HI para los cultivos de grano. Dado que se requiere aproximadamente 2.5 veces más asimilados para formar un gramo de aceite, en comparación con el azúcar o el almidón, el HI para los cultivos de semillas oleaginosas es considerablemente inferior al de los cultivos de grano, entre 0.25 y 0.4. Por otro lado, el HI de los cultivos de raíces es usualmente mucho más alto, con un rango común de 0.7 a 0.8 para variedades de alto rendimiento de papa o patata, batata y remolacha azucarera, probablemente debido a que no se requieren tallos fuertes para soportar el peso del producto cosechable.

FUNCIONES DE RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO (K_S)

Los efectos del estrés hídrico en el crecimiento foliar, la conductancia de los estomas y la senescencia acelerada del dosel son arbitrados a través de la función de respuesta al estrés (K_s) para estos procesos, con sus umbrales característicos expresados en términos de agotamiento fraccional (p) del agua potencial disponible total en la zona radicular (TAW). Tal como se describe en Steduto *et al.* (2009), de los tres procesos, el crecimiento foliar es el más sensible al estrés hídrico; por consiguiente, su umbral superior (p_{upper}) no debería estar muy por debajo de la capacidad de campo del suelo de la zona radicular (muy poco agotamiento) en prácticamente todos los cultivos. El crecimiento foliar se detiene completamente en el umbral inferior (p_{lower}), punto en que el contenido de agua en la zona radicular aún está considerablemente por encima del PWP; es decir, el agotamiento es significativamente inferior a completo. Para la conductancia estomática y la senescencia acelerada, el p_{upper} debe ser considerablemente mayor al del crecimiento foliar, y el p_{lower} se fija en 1 (agotamiento completo) en *AquaCrop*. Dependiendo de la tendencia a fenecer del tipo de cultivo, el p_{upper} para la conductancia puede ser el mismo, ligera o considerablemente menor que el de la senescencia. La senescencia es presuntamente mucho menos sensible al estrés hídrico en variedades que "permanecen verdes". Un principio fundamental es que los cultivos que poseen una fuerte capacidad de ajuste osmótico deben tener mayor p_{upper} para conductancia y senescencia que aquellos que no la poseen. No obstante, es posible que el p_{upper} para el crecimiento foliar no sea tan diferente, aunque el p_{lower} también podría ser mayor. Al configurar los umbrales, no es necesario basar los valores de manera muy literal según los resultados que se reportan en los estudios fisiológicos de corto plazo, porque *AquaCrop* se ejecuta en intervalos diarios, y los umbrales representan valores integrados durante un ciclo diurno.

También se debe parametrizar la forma de cada función de respuesta al estrés (K_s v.s. a p). La curva debe ser convexa en la mayoría de los casos. La forma convexa se puede interpretar como un reflejo de la aclimatación del cultivo al estrés hídrico, donde las respuestas tempranas bajo estreses hídricos más leves se modulan mediante la aclimatación, y los límites de aclimatación a medida que el estrés se vuelva cada vez más severo.

Durante las ejecuciones de ensayo y error de *AquaCrop* para calibrar las funciones de respuesta al estrés, las opciones son ajustar los umbrales o la forma de la curva, o ambos. Obviamente, si el tiempo de inicio del efecto por estrés se presenta claramente antes o después del efecto mostrado por los datos medidos, el primer ajuste se debe realizar en el p_{upper}, al disminuirlo o aumentarlo, respectivamente. Después de que se igualan los tiempos simulados y medidos de inicio del efecto, el grado de curvatura convexa se puede ajustar, de modo que coincida con la progresión de los efectos simulados y medidos del estrés. Cuanto más convexa sea la curva, más gradualmente se intensifica el efecto del estrés inicialmente, a medida que la humedad del suelo se agota (p aumenta), pero el efecto del estrés se intensifica más fácilmente a medida que p se aproxima al umbral inferior. En el caso de la función de estrés para el crecimiento foliar, es posible que el p_{lower} también se deba ajustar.

Debido a que, bajo el mismo estado de humedad del suelo las plantas experimentan un nivel de estrés más severo en días de alta transpiración y menos estrés en días de baja transpiración, *AquaCrop* ajusta automáticamente los diversos umbrales de estrés según la demanda evaporatoria de la atmósfera, representada por la ET_o diaria. En la mayoría de los casos, bastará la configuración predeterminada para este ajuste. Únicamente en casos excepcionales, en los que datos fiables indiquen una necesidad evidente, se debe modificar esta configuración en la pestaña *Programme Setting* (Configuración del programa).

EFECTOS DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL ÍNDICE DE COSECHA (HI)

AquaCrop permite determinar tres efectos diferentes del estrés hídrico sobre el HI. El primero es el efecto relacionado con la senescencia acelerada del dosel, reduciendo el ciclo biológico del cultivo. En *AquaCrop,* el HI aumenta de manera lineal con el tiempo, poco después del comienzo de la floración hasta el momento de la madurez, cuando se alcanza el valor del HI de referencia (siempre que no haya modulación debida al estrés durante el proceso). Este aumento se detiene automáticamente cuando la CC desciende hasta el valor de un umbral (el valor predeterminado es 5 % de la CC máxima alcanzada). La senescencia temprana del dosel disminuye el HI al acortar el tiempo disponible para que el HI aumente, debido a la vida reducida del cultivo. Si el HI final resultante simulado por el modelo no coincide con el HI medido, es posible que se pueda mejorar la correspondencia al alterar los parámetros que afectan los tiempos y la aceleración de la senescencia del dosel, o al cambiar el umbral del porcentaje de CC restante para detener el aumento del HI. Sin embargo, la segunda opción no se debe implementar salvo que se cuente con datos fiables que sustenten el cambio. Antes de realizar cualquier modificación, es prudente examinar primero el impacto de los otros dos efectos del estrés sobre el HI, los cuales se abordan a continuación, para determinar si los valores de sus parámetros y el impacto simulado sobre el HI son razonables.

El siguiente efecto del estrés sobre el HI que analizaremos es, por lo visto, el resultado de la competencia por la obtención de asimilados entre el crecimiento vegetativo y reproductivo. Parte de este efecto es lo que explica un HI más alto bajo las condiciones adecuadas de estrés hídrico. Este efecto positivo del estrés hídrico es bien conocido para el algodón, y un poco menos conocido para el tomate y otros cultivos de hortalizas de fruto, como el pimiento y la berenjena. El aumento del HI con el tiempo se aceleraría en esta situación, siempre que el estrés no sea tan severo como para inhibir la fotosíntesis. Cuando el estrés es lo suficientemente severo para reducir considerablemente la fotosíntesis, el aumento del HI se reduciría. Existen tres parámetros en *AquaCrop* que determinan la sensibilidad y el alcance de los cambios en el HI causados por la competencia entre el crecimiento vegetativo y reproductivo. El primer parámetro (pestaña *Before flowering* (Antes de la floración) en *Water stresses* (Estreses hídricos)) determina el incremento del HI como resultado de una reducción menor en la biomasa (disminución del crecimiento foliar), ocasionada por el estrés hídrico durante un período corto previo al comienzo de la floración. Esto se basa en datos empíricos, pero posiblemente sea el resultado de la estimulación de la formación y desarrollo de las yemas de las flores mediante la acumulación de asimilados. En muchos casos, esta mejora solamente debería ser solo un par de puntos porcentuales. Los dos siguientes parámetros se encuentran en la pestaña *During yield formation* (Durante la formación del rendimiento). En *View corresponding HI adjustment* (Ver el ajuste del HI correspondiente) se pueden cambiar los valores de los dos parámetros, 'a' y 'b'. Aumente 'a' para reducir el efecto del incremento de la inhibición del crecimiento foliar en el HI, y disminuya 'b' para mejorar la reducción del HI ocasionada por el cierre estomático.

El tercer efecto del estrés en el HI obedece a fallos en la polinización y el cuajado de frutos. Con frecuencia, la bibliografía sobre el tema afirma que la polinización es sensible al estrés hídrico. Sin embargo, en estudios detallados se encontró que la polinización y el cuajado de los frutos son resistentes al estrés hídrico, y requieren niveles de estrés mucho más fuertes que aquellos que inhiben la apertura estomática. En consecuencia, el umbral para la polinización en *AquaCrop* se debe fijar en un valor cercano al PWP (p. ej., agotamiento del 85 % del TAW).

La mayoría de los cultivos tiene exceso de frutos potenciales para ser llenados por los asimilados disponibles, así que una porción de los embriones son abortados después de la polinización. Para que un estrés disminuya el HI inhibiendo la polinización, debe ser lo suficientemente severo para reducir el número de frutos potenciales por debajo del número que puede ser llenado por los asimilados disponibles. Por tanto, el impacto del estrés en el HI depende de la proporción de frutos potenciales en exceso. El modelo presenta una proporción predeterminada de frutos potenciales en exceso para un cultivo dado, pero el usuario puede ajustarla en la pestaña *Water stress/Harvest index/During flowering* (Estrés hídrico/Índice de cosecha/Durante la floración).

BIBLIOGRAFIA

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. 1998. *Evapotranspiración del cultivo*(Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos). Estudio FAO: Riego y drenaje, N.º 56. Roma. 297 págs.

Bradford, K.J. y Hsiao, T.C. 1982. Physiological responses to moderate water stress. En: Lange, O.R., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Ziegler, H., eds. *Encyclopedia plant physiology new series, Physiological plant ecology II,* Vol. 12B. Heidelberg, Springer. Págs. 264-324.

Evans, L.T. 1993. *Crop evolution, adaptation and yield.* UK, Cambridge University Press, 500 págs.

Evans, L.T. y Fischer, R.A. 1999. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Sci* 39:1544-1551.

FAO. 2009. *ET_o calculator, land and water digital media Series, N.º 36,* Roma.

Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. y Fereres, E. 2009. *AquaCrop*—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal* 101:448-459.

Mcmaster, G.S. y Wilhelm, W.W. 1997. Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agricultural and Forestry Meteorology* 87:291-300.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2009. *AquaCrop*—the FAO crop model to simulated yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal* 101:438-447.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2011. *AquaCrop* Reference Manual, Roma, FAO (disponible en http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html).

Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science* 25:189-207.

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. y Fereres, E. 2009. *AquaCrop*—the FAO crop model to simulated yield response to water: Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101:426-437.

Villalobos, F.J. y Fereres, E. 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agronomy Journal.* **82: 1153-1159.**

Xu, L.K. y Hsiao, T.C. 2004. Predicted vs. measured photosynthetic water use efficiency of crops stands under dynamically changing field environments. *Journal of Experimental Botany* 55:2395-2411.

3.4 Cultivos herbáceos

Editor:

Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.)

Ilustraciones botánicas:

Margherita Bongiovanni
(Anteriormente catedrática de Diseño e Historia del Arte y Bellas Artes, Ministerio de Educación, Roma, Italia)

Trigo

AUTOR PRINCIPAL
Senthold Asseng
(anteriormente CSIRO, Wembley, Australia; en la actualidad Universidad de la Florida, Gainesville, EE. UU.)

AUTORES COLABORADORES
Steve Milroy
(CSIRO, Wembley, Australia),

Simona Bassu
(Universidad de Sassari, Sassari, Italia),

Marie-Therese Abi Saab
(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad LARI, Fanar, Líbano)

AGRADECIMIENTOS
Rossella Albrizio
(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad CNR-ISAFOM,

Ercolano, Italia)
John Angus *(CSIRO, Camberra, Australia),*

Francesco Giunta
(Universidad de Sassari, Sassari, Italia),

Gerrit Hoogenboom *(Universidad de Georgia, Athens, EE. UU.),*

Matthew Reynold
e Iván Ortiz-Monasterio *(CIMMYT, El Batán, México),*

Victor O. Sadras
(SARDI Waite Campus, Australia)

Trigo

DESCRIPCIÓN GENERAL

El trigo blando y trigo duro (*Triticum aestivum* y *Triticum turgidum durum*, respectivamente) conforman el tercer cultivo más extenso del mundo. En el año 2009, se sembraron 226 millones de ha de trigo, con una producción de 685 millones de toneladas de grano y un rendimiento promedio de grano de 3 ton/ha (FAO, 2011). Durante los últimos 50 años, el rendimiento promedio por hectárea se ha incrementado drásticamente, especialmente entre las décadas de los cincuenta y los ochenta. Como el área cultivada ha permanecido relativamente constante, la producción mundial ha reflejado el aumento en el rendimiento (Figura 1).

El trigo es un cultivo de estación fría, cuyo origen se sitúa en el Creciente Fértil, pero en la actualidad se ha extendido ampliamente por todo el mundo. Se cultiva tanto en regiones árticas y húmedas como en las tierras altas tropicales, y desde el nivel del mar –como en los pólderes holandeses– hasta los 4 500 m de altitud, en el Tíbet. Las condiciones de crecimiento son muy variadas, no solo por las regiones climáticas y altitudes ampliamente generalizadas, sino por la variabilidad de los tipos de suelo y el manejo de cultivo. Actualmente, los países que tienen la mayor producción de trigo son: China, India, la Federación de Rusia, Estados Unidos, Francia, Canadá, Alemania, Pakistán, Australia y Ucrania, entre otros. Estos países cubren en total más de dos terceras partes de la producción mundial de trigo (Figura 2).

En muchas áreas cultivadas anualmente, el trigo crece en rotación con otros cultivos anuales de invierno, tales como otros cereales, cultivos oleaginosos y legumbres, aunque a menudo sucede que se siembra trigo después de trigo. En otros casos se siembra como segundo cultivo después de los cereales de verano o del algodón. Dos sistemas de especial importancia son el arroz-trigo y el maíz-trigo.

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

El trigo de invierno se siembra en otoño, mientras que el trigo de primavera se siembra en otoño o en primavera. El trigo de invierno requiere un período frío o cantidad mínima de horas frío (vernalización) durante el crecimiento inicial para la espigazón o espigado normal en los días largos. El trigo normalmente se siembra a una profundidad aproximada de 5 cm, aunque se puede sembrar a una profundidad mayor en condiciones secas, para intentar ubicar la semilla en suelo húmedo. Aunque esto puede tener buenos resultados, retrasa la emergencia y el crecimiento, y en situaciones extremas puede reducir la densidad de rodal. La siembra normalmente se hace en suelo húmedo, pero en algunos ambientes secos, se puede practicar la "siembra en seco" poco tiempo antes del comienzo esperado de la estación de lluvias. Las densidades de plantación varían desde 50 hasta más de 500 plantas/m^2, donde las densidades menores se usan en los ambientes más secos. El espaciamiento entre surcos varía de 0.15 a 0.25 m, dependiendo del sistema de producción. La siembra se hace a voleo en algunos casos. En muchos países en vías de desarrollo, el uso de sistemas de laboreo de conservación y retención por rastrojos va en aumento; sin embargo, en los países desarrollados, es más común arar antes de la siembra. El mantenimiento de los rastrojos y el grado de arado o laboreo influyen en las tasas de infiltración, evaporación y

escorrentía. El impacto del manejo y tipo del suelo –especialmente el arado y el riego– en la compactación del suelo tiene efectos profundos en la profundidad de la exploración de las raíces, y por tanto en el acceso al agua del suelo, y en la frecuencia de condiciones anaeróbicas resultantes del encharcamiento.

La duración del período total de crecimiento (ciclo biológico) del trigo de primavera (sembrado en primavera) varía entre 100 y 170 días, mientras que el trigo de invierno necesita de 180 a 300 días para madurar. En algunos casos excepcionales, se han registrado estaciones de más de 300 días. Los requerimientos de temperatura y duración del día son factores clave para seleccionar la variedad. Las variedades se pueden clasificar como de invierno o primavera según los requerimientos de cantidad mínima de horas frío, la resistencia al frío y la sensibilidad a la duración del día. Algunas variedades de trigo de invierno en etapas tempranas de desarrollo exhiben una alta resistencia al frío, sobreviviendo a temperaturas de -20 °C. La resistencia se pierde en el período de crecimiento activo en primavera; y durante el desarrollo de la espiga y el período de floración, las heladas pueden producir que se pierdan las espiguillas e incluso, en circunstancias extremas, que se pierda toda la espiga.

En áreas con inviernos severos, vientos fríos y poca nieve, las variedades de trigo de primavera se siembran después del invierno. El trigo de primavera también se siembra entre otoño e invierno, en regiones con predominio de lluvia durante el invierno y temperaturas invernales leves, como en algunas regiones áridas y del mediterráneo; además de la estación fría en las tierras altas tropicales. El trigo de primavera requiere pocas o ninguna cantidad mínima de horas frío para iniciar el desarrollo de la espiga. El trigo de invierno y algunas variedades de trigo de primavera también son sensibles al fotoperíodo, lo cual retrasa la finalización de la fase de ahijamiento hasta los días largos de sol.

El desarrollo del cultivo, o fenología, depende de la temperatura (Porter y Gawith, 1999). Para el crecimiento del cultivo, la temperatura media diaria mínima para el crecimiento mensurable es aproximadamente de 5°C para los trigos de invierno y primavera. La temperatura media diaria para un crecimiento óptimo está entre 15 y 23 °C. En *AquaCrop,* los grados días acumulados (GDD) para el trigo se calculan con una temperatura base de 0 °C y una temperatura superior de 26 °C. Esto significa que el desarrollo del cultivo se acelera a medida que la temperatura media diaria aumenta de 0 °C a 26 °C, y un aumento por encima de los 26 °C no mejora el crecimiento ni el desarrollo. El dosel máximo a menudo se alcanza antes de la espigazón en la etapa de vaina engrosada (estado de bota), mientras que la floración de espigas individuales puede durar entre uno y diez días. El llenado de los granos usualmente ocurre en la estación cálida del año, cuando las temperaturas promedio máximas están entre 20 y 30 ºC. Los períodos prolongados por debajo de 5 ºC pueden causar latencia en el trigo de invierno. Los requerimientos de vernalización y sensibilidad al fotoperíodo varían sustancialmente entre variedades y alteran la duración de la fase de ahijamiento. La Tabla 1 muestra la duración desde la siembra hasta las diversas fases de desarrollo del trigo en diferentes regiones donde crece. La Figura 3 muestra el desarrollo típico de una planta de trigo.

El trigo puede crecer en un rango muy amplio de suelos, desde arenas profundas y suelos poco profundos hasta suelos francos y arcillas pesadas. La profundidad máxima de raíces puede variar entre 0.30 m –en los suelos de textura variable (dúplex) de Australia Occidental, con horizontes B impermeables u otros suelos con pH alto o bajo, alta salinidad o toxicidades, como boro en el subsuelo– hasta 2.80 m –en arenas profundas con tasas de profundidad de enraizamiento entre 0.7 y 2.0 cm/día.

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP

Marie-Therese Abi Saab *(anteriormente CIHEAM-IAMB Bari, Italia; en la actualidad LARI Fanar, Líbano),*

Rossella Albrizio *(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad CNR-ISAFOM, Ercolano, Italia),*

John Angus *(CSIRO, Canberra, Australia),* Senthold Asseng

(anteriormente CSIRO, Wembley, Australia; en la actualidad Universidad de la Florida, Gainesville, EE. UU.),

Simona Bassu, Francesco Giunta *(Universidad de Sassari, Sassari, Italia),*

Adriana Bruggeman, Theib Oweis *(ICARDA, Alepo, Siria),*

Angelo Caliandro, Pietro Rubino *(Universidad de Bari, Bari, Italia),*

David B. Cobell *(LLNL, Livermore, California, EE. UU.),*

Mariano Cossani *(Universidad de Lleida, Lleida, España),*

Steven R. Evett, Terry A. Howell *(USDA-ARS, Laboratorio de Investigación en Conservación y Producción, Bushland, Texas, EE. UU.),*

Hamid J. Farahani *(anteriormente ICARDA, Alepo, Siria; en la actualidad Universidad de Clemson, Clemson, Carolina del Sur, EE. UU.),*

Bram Govaerts, Iván Ortiz-Monasterio *(CMMYT, El Batán, México),* Gerrit Hoogenboom *(Universidad de Georgia, Athens, EE. UU.),*

Gabriella Izzi *(anteriormente FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia; en la actualidad WB, Washington, EE. UU.),*

Riza Kanber y Mustapha Unlu *(Universidad de Cukurova, Adana, Turquía),*

Victor O. Sadras *(SARDI Waite Campus, Australia),*

Gustavo A. Slafer *(Universidad de Lleida, ICREA, Lleida, España),*

Mladen Todorovic *(CIHEAM-IAMB, Bari, Italia),* Yuming Zhang *(Instituto de Genética y Biología del Desarrollo, Academia China de la Ciencia, Shijiazhuang, China)*

FIGURA 1 Área mundial cosechada de trigo y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

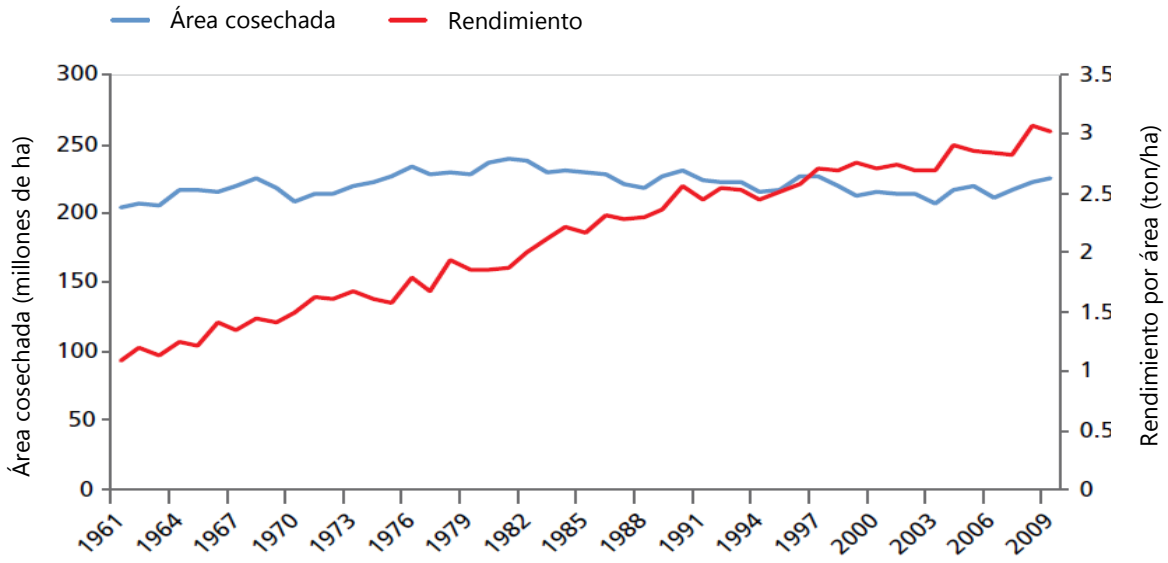
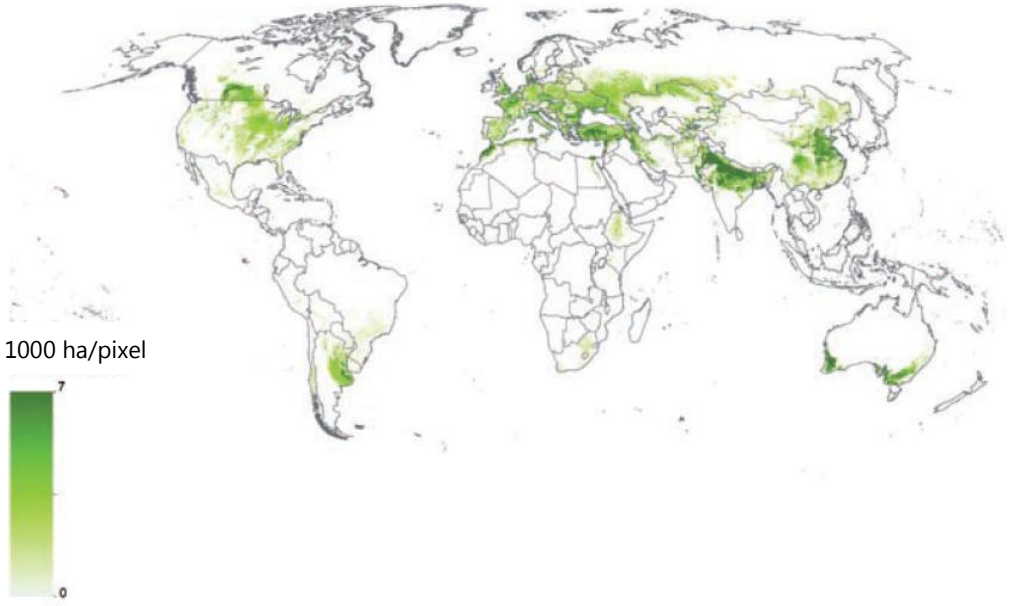


FIGURA 2 Área cosechada de trigo (GAEZ, 2011).

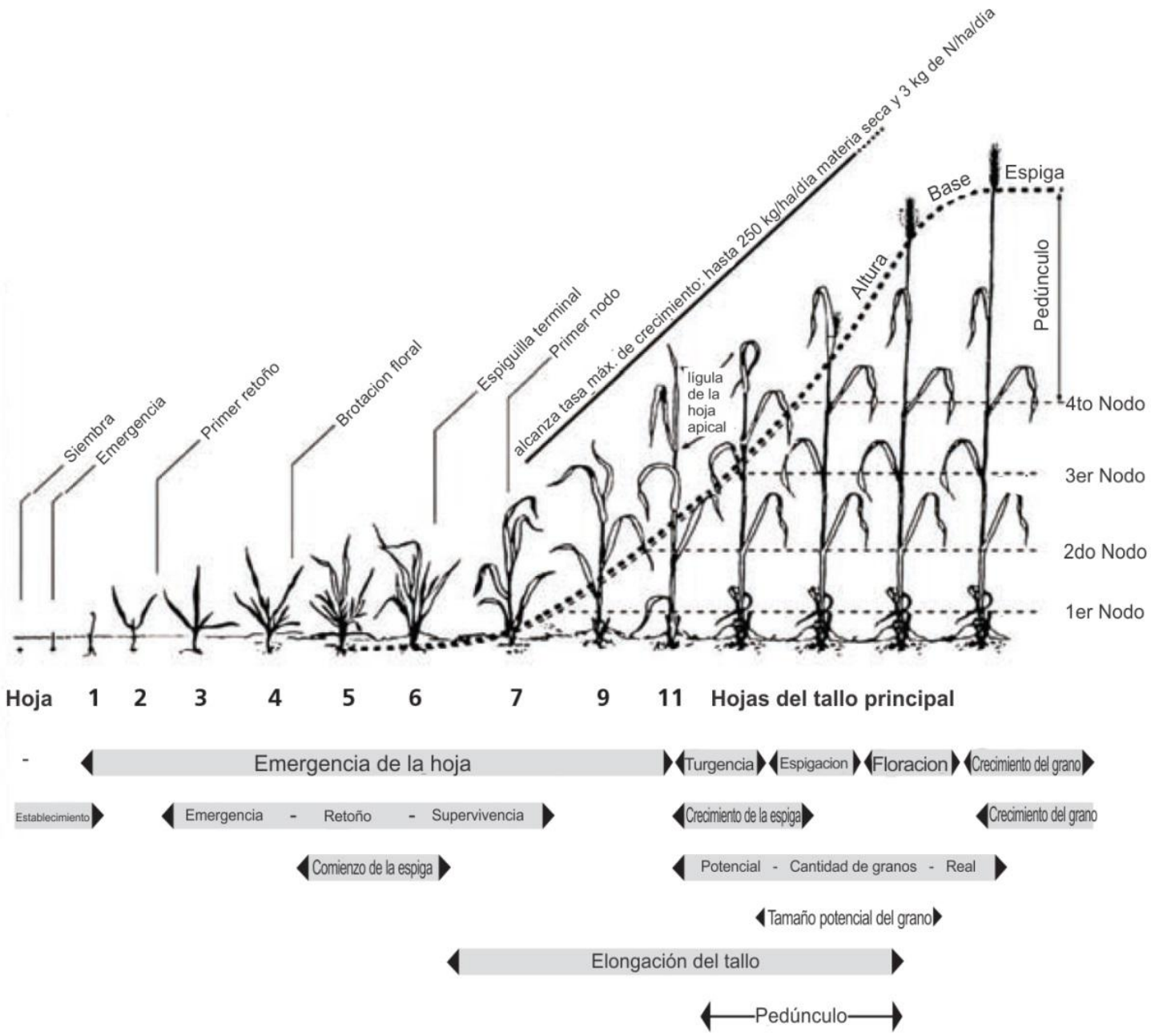


Año de referencia 2000

TABLA 1 Duración de las principales fases fenológicas del trigo en días desde la siembra (S) para varias áreas productoras de trigo.

Áreas de trigo	S-Emergencia	S-Espigazón	S-Antesis	S-Madurez	Tipo de variedad
Europa Central y Septentrional	12-48		54-250	71-280	primavera, invierno
Italia	12-19	62-166	67-170	100-213	primavera
China		67-	-217	83-251	primavera, invierno
India	4-	cerca de 77	70-103	85-145	primavera
Rusia		39-		76-305	primavera, invierno
Norte de África y Asia Occidental	6-16	116-138		158-178	primavera
EE. UU.		55-210		113-310	primavera, invierno
Canadá	5-15	50-250		90-300	primavera, invierno
América del Sur	6-12		70-135	112-186	primavera
Australia	7-17	35-90	60-170	90-215	primavera, invierno

FIGURA 3 Etapas típicas de desarrollo del trigo.



PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

La evapotranspiración total acumulada (ET) de los cultivos de trigo normalmente varía entre 200 y 500 mm, aunque puede ser menor en zonas semiáridas sin riego, y llegar a 600 y 800 mm en condiciones de riego intenso. La pendiente del gráfico de rendimiento de grano vs. ET puede ser tomada como la productividad del agua en términos de rendimiento y consumo de agua ($WP_{Y/ET}$). Si el corte en el eje x de esta relación se toma como medida de la evaporación acumulada del suelo, entonces, la pendiente se puede interpretar como la productividad del agua en términos de transpiración ($WP_{Y/Tr}$). Sobre esta base, normalmente se reporta que la $WP_{Y/Tr}$ se encuentra entre 1.0 y 1.2 kg/m^3 (10 a 12 kg/ha por mm) para producción de grano (French y Schultz, 1984). Un análisis internacional ha indicado que la máxima eficiencia alcanzable (para granos) en sistemas actuales de trigo probablemente sea alrededor de 2.2 kg/m^3 (Sadras y Angus, 2006).

La proporción de agua usada en la transpiración varía ampliamente. Cuando los cultivos crecen en suelos con humedad almacenada y poca lluvia durante la estación, la evaporación del suelo puede caer hasta el 20 % de la ET. Con eventos de precipitación frecuentes y de baja intensidad durante la estación, la evaporación del suelo puede aumentar hasta el 75 %, cuando la cobertura del cultivo es muy rala. El tipo de suelo, la cobertura del rastrojo, el clima y el vigor temprano del cultivo también influyen en la proporción de evaporación del suelo.

Las variedades varían poco en términos de producción de materia seca por unidad ET. La variación entre variedades en el rendimiento normalmente está más relacionada con las diferencias en el uso total del agua, en mayor medida a través de los cambios en la duración del cultivo, o cambios en el índice de cosecha.

Al comienzo del período de crecimiento, el uso diario de agua puede ser muy bajo (< 2 mm/día) por las bajas temperaturas y en condiciones mediterráneas, la alta humedad. La transpiración como una proporción de la ET total también es baja debido a la poca cobertura del dosel. Para el trigo de invierno en ambientes templados, esta situación puede continuar durante algunos meses. A medida que aumenta del dosel durante el ahijamiento y la elongación del tallo, la tasa de uso de agua se incrementa y normalmente alcanza el máximo cerca de la antesis, a tasas entre 5 y 8 mm/día. El cociente entre ET real y de referencia alcanza el máximo entre 1.0 y 1.2 durante el período de elongación del tallo hasta la antesis, y disminuye durante el llenado de granos y la maduración. A medida que el dosel fenece visiblemente hacia la madurez, la relación cae rápidamente.

RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO

Al igual que para todos los cereales, el rendimiento del trigo puede considerarse el producto de tres componentes: la cantidad de panículas por unidad de área, la cantidad de granos por panícula y el tamaño de los granos. Tanto la cantidad de panículas como la cantidad de granos son resultado de la cantidad producida y la proporción sobreviviente. En gran medida, los componentes se desarrollan en secuencia y el momento en que ocurra el estrés hídrico determina cuál de los componentes se verá afectado. La cantidad potencial de hijuelos (brotes axilares o macollos), y por ende, de panículas por unidad de área, es la primera que se determina, seguida de la cantidad de granos por panícula y, por último, el tamaño del grano. Por tanto, en términos generales, el estrés temprano limita la cantidad de hijuelos (macollos) y el estrés después de la antesis reduce el tamaño de los granos individuales y la cantidad de granos hasta el aborto de los granos en desarrollo (Passioura y Angus, 2010).

Los resultados de los estudios para determinar la etapa de desarrollo en la cual el rendimiento es más sensible al estrés hídrico no han sido consistentes. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el

rendimiento se correlaciona con los granos por m^2. Por tanto, la cantidad de granos por unidad de área, y por ende de hijuelos por unidad, generalmente es el determinante más importante del rendimiento. Consecuente con esto, los períodos durante los cuales el rendimiento del trigo normalmente se considera más sensible al estrés por humedad son (a) el período durante el cual los hijuelos se están desarrollando y sus tasas de aborto son las más altas; (b) cuando se forman los flósculos y se cuajan los granos; y (c) desde comienzos hasta mediados del llenado del grano, cuando los granos jóvenes en desarrollo pueden ser abortados debido a la falta de asimilados (Turner, 1997).

En términos generales, aparte de la etapa de plántula, la sensibilidad al estrés hídrico usualmente parece que disminuye con el desarrollo. Sin embargo, es importante mantener un grado de equilibrio durante el crecimiento, particularmente en términos de uso del agua antes y después de la antesis (Fischer, 1979). Si toda el agua es usada antes de la antesis, en casos en los que se espera poca precipitación más adelante en el crecimiento, la sequía terminal severa puede causar un gran impacto en el llenado de los granos con valores bajos de rendimiento, cantidad de granos, tamaño y calidad de los granos; y la consiguiente reducción del índice de cosecha (HI) (Passioura, 1977). Adicionalmente, las plantas pueden aclimatarse al estrés hídrico hasta cierto punto. Entonces, tener niveles bajos de estrés durante la fase de preantesis parece reducir el impacto del estrés cerca de la antesis y poco tiempo después.

El exceso de agua puede causar encharcamiento durante el crecimiento vegetativo y reducir sustancialmente el rendimiento. Los niveles reducidos de oxígeno en el suelo por un período incluso tan corto como tres días pueden dañar las raíces, reducir la absorción de nutrientes y reducir la cantidad de hijuelos. La capacidad de recuperación depende del momento del evento de encharcamiento y las condiciones de crecimiento subsiguientes. Los daños graves a las raíces pueden limitar la profundidad de suelo explorado y por tanto, reducir el acceso a los nutrientes minerales y a la humedad al agua. Esto exacerba el impacto de cualquier limitación hídrica subsiguiente.

FERTILIDAD DEL SUELO

Los niveles de fertilidad del suelo solamente se pueden determinar en relación con el potencial de rendimiento y también dependen del tipo de suelo. Como guía aproximada, por cada tonelada de rendimiento por hectárea, el trigo necesita absorber cerca de 25 a 40 kg/ha de N, de 3 a 5 kg/ha de P y de 15 a 30 kg/ha de K. La absorción de N no solo influye en el rendimiento sino en el porcentaje de proteína del grano, lo cual afecta a la idoneidad del grano para los distintos usos finales. Para satisfacer una demanda específica de absorción para obtener cierto rendimiento, debe estar disponible para el cultivo un 150-200 % de la absorción de N que requiere el cultivo, a partir de la cantidad combinada de minerales de suelo y fertilizante aplicado. Nótese que el contenido de N del suelo es altamente dinámico y que el N se puede perder fácilmente en forma de nitratos lixiviados, particularmente en suelos arenosos con baja capacidad de retención de agua. Por lo tanto, el contenido de N en el suelo cambia varias veces durante un período de crecimiento. El P y K son menos dinámicos, pero la eficiencia de absorción a menudo es menor que para el N. Por lo tanto, se podrían requerir cantidades similares de P y K (150 - 200 % de requerimientos de absorción) disponibles para la planta para alcanzar el rendimiento potencial para unas condiciones específicas de cultivo.

Cuando la nutrición es una limitante, el potencial de rendimiento y la expansión del dosel son restringidos, reduciendo los requerimientos totales de agua del cultivo. Los niveles excesivamente altos de nutrientes, especialmente de N, causan un crecimiento vegetativo exuberante y mayor consumo de agua, pero normalmente sin producirse un incremento proporcional en el rendimiento de grano. Una causa posible es el HI reducido, puesto que se forma un número excesivo de hijuelos

y muchos de ellos no tienen tiempo para formar espigas o mueren lentamente por la sombra de los hijuelos más viejos.

TEMPERATURA

Los requerimientos de temperatura del trigo, especialmente con respecto a la temperatura fría, ya se han analizado en Crecimiento y Desarrollo. Las temperaturas por encima de los 34 ºC son posibles en la mayoría de regiones donde crece el trigo durante el llenado de los granos. Dichas temperaturas aceleran la senescencia y pueden causar una reducción significativa del rendimiento de los granos a través de la disminución del tamaño de los granos y el incremento de las proporciones de granos marchitos y de menor tamaño. Existen variedades que pueden tolerar las altas temperaturas hasta cierto punto, para minimizar el daño causado por estrés por calor.

SALINIDAD

El trigo es considerado moderadamente tolerante a la salinidad del suelo. La reducción del crecimiento de los brotes con concentración cada vez mayor de sodio, en cultivo en arena o en solución, es aproximadamente lineal, con una concentración de 100 mM (aproximadamente 10 dS/m), reduciendo el crecimiento de los brotes en cerca del 45 % en el trigo blando y cerca del 50 % en el duro. En contraste, la reducción en la cebada es de cerca del 40 % y en el arroz es de cerca del 75 %. Ya hay disponibles variedades de trigo con mayor tolerancia a las sales.

PRÁCTICA DE RIEGO

Si bien gran cantidad de trigo crece solamente con la lluvia y del agua almacenada en el suelo, la producción mediante riego parcial o completo es muy importante en algunos países. Existen diversas prácticas de riego para la producción de trigo. En áreas áridas o cuando se cultiva en la estación seca de las regiones monzónicas, el trigo se puede cultivar en condiciones de riego completo. En los mediterráneo y en los sistemas semiáridos, se puede usar riego suplementario para aliviar la sequía intermitente o para reducir el impacto de los déficits hídricos, cada vez más frecuentes a medida que avanza la primavera (Oweis, *et al.,* 1999).

A escala mundial, el método de aplicación más común es el riego por inundación en amelgas. También se usan la aplicación por surcos y a presión mediante diversos métodos de aspersión. El riego se aplica frecuentemente al trigo con pocos conocimientos sobre sus requerimientos hídircos o sobre la humedad del suelo disponible al momento de la aplicación. Como el trigo se siembra en tantos lugares, se ha desarrollado una variedad de sistemas y herramientas de calendarios de riego, incluyendo métodos basados en balances de agua, mediciones de humedad del suelo en campo y temperatura del dosel. Sin embargo, su uso en la producción comercial es bastante limitado, especialmente en países menos desarrollados económicamente. Cuando la precipitación es baja y el suministro de agua de riego es limitado, el cultivo precedente y el intervalo entre cultivos, en conjunto con el patrón de lluvias y las características hidráulicas del suelo, determinan si hay necesidad de riego al momento de o antes de la siembra para establecer el cultivo. Por consiguiente, en términos generales, el riego debería ser manejado para evitar o minimizar los déficits de agua durante los tres períodos mencionados: (a) ahijamiento hasta elongación del tallo (b) floración, y (c) comienzos hasta mediados de llenado de los granos. Después del desarrollo de un dosel razonable, los riegos subsiguientes pueden programarse de manera que hasta el 50 - 60 % de agua total disponible en el suelo (TAW) se agote entre aplicaciones, sin tener un impacto negativo notorio en el rendimiento (Geerts y Raes, 2009).

El riego en exceso es común en el trigo, incluso bajo riego suplementario: a veces se aplican dos o tres riegos en un intervalo corto sin considerar demasiado el estado de humedad del suelo o la demanda del cultivo. El suministro excesivo de agua provoca menor productividad del agua en términos de rendimiento por unidad de agua aplicada. En situaciones extremas, el exceso de agua (proveniente de lluvia o riego) provoca encharcamiento, el cual como ya se mencionó, puede disminuir sustancialmente el crecimiento y el rendimiento. El suministro de agua demasiado abundante durante el período vegetativo, particularmente combinado con una alta fertilidad, produce una vegetación exuberante y puede provocar el encamado después de la formación de la espiga. El encamado también puede ocurrir si una cantidad excesiva de agua se aplica en un solo riego tardío en el desarrollo, particularmente con riego por aspersión.

RENDIMIENTO

Los rendimientos de grano del trigo (al 11 % de humedad) pueden variar, desde la pérdida de la cosecha en estaciones con menos de 100 a 150 mm de agua disponible, hasta 1-3 ton/ha en condiciones de secano con agua limitada (ambientes mediterráneos, áridos, subtropicales en estaciones secas) y 4-10 ton/ha en climas templados (Europa Occidental y Septentrional) en condiciones de secano o sistemas con condiciones de riego (China). Excepcionalmente, los rendimientos de grano pueden alcanzar un máximo de 15 ton/ha en ambientes con estaciones frías prolongadas (ciclo biológico de más de 300 días) y radiación solar alta, como en Nueva Zelanda meridional, Chile meridional, Irlanda, Inglaterra y algunas regiones de China. En 2009, los rendimientos promedio de los países estuvieron entre menos de 0.5 ton/ha en Honduras, Lesoto, Somalia, Venezuela y Eritrea, hasta más de 9 ton/ha en Bélgica.

Un factor importante que contribuyó a mejorar el rendimiento en el último siglo es el aumento en el HI producido por variedades para un porte bajo. En condiciones favorables sin estrés, el HI varía entre 0.45 y 0.55 para las variedades modernas de trigo (Austin, 1999). Sin embargo, cuando hay estrés hídrico después de la floración o cuando la variedad no se elige bien de acuerdo con el ambiente de producción, el HI puede caer hasta 0.20 a 0.30.

El balance del suministro de agua antes y después de la floración puede tener un impacto considerable en la calidad del grano. El estrés hídrico durante el llenado de los granos produce granos marchitos con un porcentaje bajo de molienda (harina producida por grano). Por otro lado, un alto suministro de agua tardío en la estación aumenta el rendimiento, con concentración baja de proteína. Estos cambios alteran la idoneidad del grano para varios usos finales.

BIBLIOGRAFÍA

Austin, R.B. 1999. Yield of wheat in the United Kingdom: Recent advances and prospects. *Crop Science,* 39, 16041610.

Fischer, R.A. 1979. Growth and water limitation to dryland wheat yield in Australia: a physiological framework. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science* 45, 83-94.

French, R.J. y Schultz, J.E. 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Australian Journal Agricultural Research* 35, 743-764.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Geerts, S. y Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96, 1275-1284.

Oweis, T., Pala, M. y Ryan, J. 1999. Management alternatives for improved durum wheat production under supplemental irrigation in Syria. *European Journal of Agronomy* 11, 255-266.

Sadras, V.O. y Angus, J.F. 2006. Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in dry environments. *Australian Journal Agricultural Research* 57, 847-856.

Passioura, J.B. 1977. Grain yield, harvest index, and water use of wheat. *Journal of the* Australian Institute of Agricultural Science 43, 117-120.

Passioura, J.B. y Angus, J.F. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. Advances in Agronomy 106, 37-75.

Turner, N.C. 1997. Further progress in crop water relations. *Advances in Agronomy* 58, 293-338.

Porter, J.R. y Gawith, M. 1999. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy* 10, 23-36.

Arroz

AUTOR PRINCIPAL
Bas A. M. Bouman
(IRRI, Los Baños, Filipinas)

AUTORES COLABORADORES
Stephan M. Haefele
(IRRI, Los Baños, Filipinas)
Gabriella Izzi
(anteriormente FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia; en la actualidad WB, Washington, EE. UU.),
Shaobing Peng
(IRRI, Los Baños, Filipinas),
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.)

AGRADECIMIENTOS
Eline Vanuytrecht
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP

Personal de IRRI,
y en particular:
Anita Boling,
Bas Bouman
(Jefe de la División de Cultivos y Ciencias Ambientales),
Romeo Cabangon,
Amnart Chinchest,
Syed Jabbar,
Shaobing Peng,
Rachid Serraj,
y Joel Siopongco;
Ebrahim Amiri
(Universidad de Teherán, Karaj, Irán)
Eline Vanuytrecht
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica),
Hua Zhong
(Universidad de Wuhán, Wuhán, China)
ZIS
(Hubei, China)

Arroz

DESCRIPCIÓN GENERAL

El arroz cultivado está representado por dos especies principales: (i) *Oryza sativa,* sembrado en todo el mundo, con sus dos variedades ecogeográficas *indica,* adaptada a los trópicos, y *japonica,* adaptada a las regiones templadas y a las tierras altas tropicales; y (ii) *Oryza glaberrima,* que crece en algunas partes de África occidental. A mediados de los noventa, un nuevo tipo de arroz llamado NERICA (arroz nuevo para África) se desarrolló a partir de cruzamientos entre las especies *O. glaberrima* y *O. sativa*, enfocado específicamente a las tierras altas y áreas secas del África Subsahariana (Jones *et al.* 1997). Se distinguen dos ambientes principales de cultivo de arroz: arroz inundado (tierras bajas), en cuyo caso el suelo está saturado con aguas estancadas durante el crecimiento del cultivo; y arroz de tierras altas, en donde los cultivos se siembran en suelos no saturados, bien drenados, sin aguas estancadas. En los trópicos, el arroz crece durante todo el año, y en el verano en los subtrópicos y en las regiones templadas.

El arroz constituye la fuente de alimentación de 3 000 millones de personas en todo el mundo. La producción anual mundial de arroz con cáscara es de 650-700 millones de toneladas aproximadamente, de las cuales, el 90 % es producido y consumido en Asia (Figura 1). Los principales países productores son China, India, Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Birmania, Tailandia y Filipinas (FAO, 2011). En todo el mundo, existen cerca de 158 millones de hectáreas de arroz inundado (incluidos los cultivos dobles), de las cuales 101 millones de hectáreas corresponden a cosechas de arroz de riego y constituyen el 75 % de la producción mundial de arroz, mientras que las 57 millones de hectáreas restantes corresponden a arroz inundado de secano y contribuyen con el 19 % de la producción mundial de arroz. Unos 11 millones de hectáreas de arroz inundado son proclives a inundaciones incontroladas. Entre ellas se encuentran las zonas de aguas profundas, tierras bajas costeras sumergidas diariamente por la marea, y zonas afectadas por crecidas repentinas de una a dos semanas, en las que el problema a menudo es el exceso de agua pero no necesariamente la sumersión prolongada. Cerca de 14 millones de hectáreas de arroz de tierras altas normalmente no están equipadas con instalaciones de riego, y contribuyen con el 6 % de la producción mundial de arroz. (Figura 2).

En la mayoría de las zonas tropicales con riego, el arroz crece como monocultivo, con dos cultivos al año; mientras que en lugares como el delta del Mekong en Vietnam, hay tres cultivos al año. En Pakistán, India, Nepal, Bangladesh, y la región central de China, el arroz a menudo crece con riego durante el verano, rotándolo con variedad de otros cultivos durante el invierno, entre ellos 15-20 millones de hectáreas de sistemas trigo-arroz. En China, unos 19 a 30 millones de hectáreas de arroz están sembradas con variedades modernas de arroz híbrido, que normalmente superan el rendimiento del mejor de sus progenitores. El arroz inundado de secano se cultiva principalmente en la estación monzónica, con áreas vastas en India Oriental, nororiente de Tailandia, Laos y Camboya. El arroz de tierras altas históricamente ha

crecido intercambiando el cultivo con períodos prolongados en barbecho (más de 15 años). A finales del siglo XX, la mayoría de las áreas de arroz de tierras altas en Asia habían hecho la transición a sistemas permanentes, en los que el arroz crece todos los años, aunque el 14 % de estas áreas aún practica el intercambio de cultivo con periodos más cortos en barbecho (3 a 5 años). En el centro y oriente de África, el cinturón de arroz de África, las zonas de montaña representan cerca del 40 % del área cultivada de arroz, pero involucran el 70 % de los productores de arroz de la región.

FIGURA 1 Área mundial cosechada de arroz y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

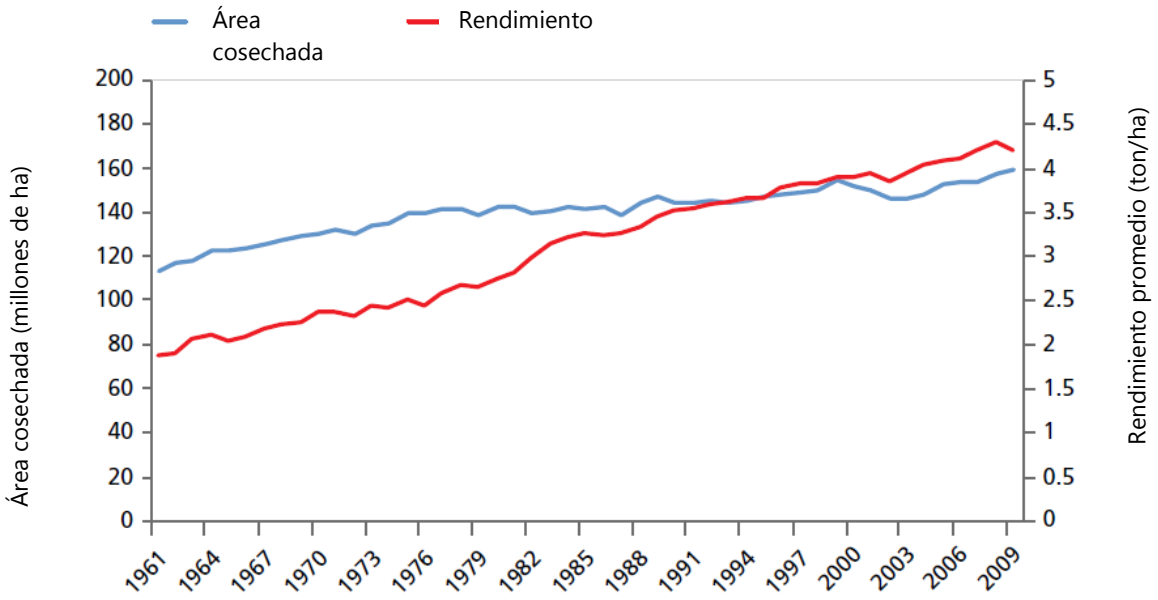
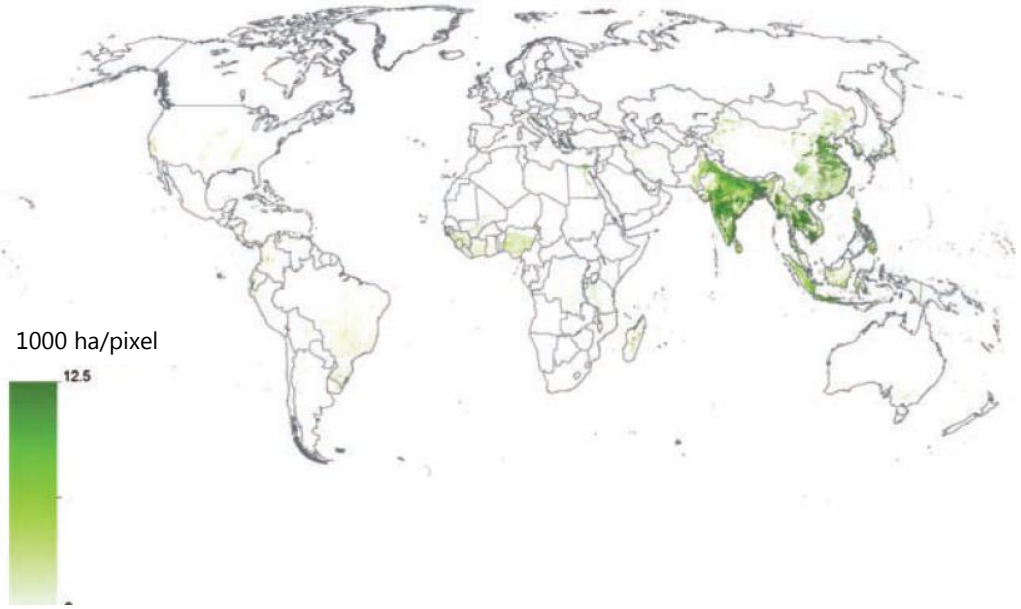


FIGURA 2 Área cosechada de arroz (GAEZ, 2011).



Año de referencia 2000

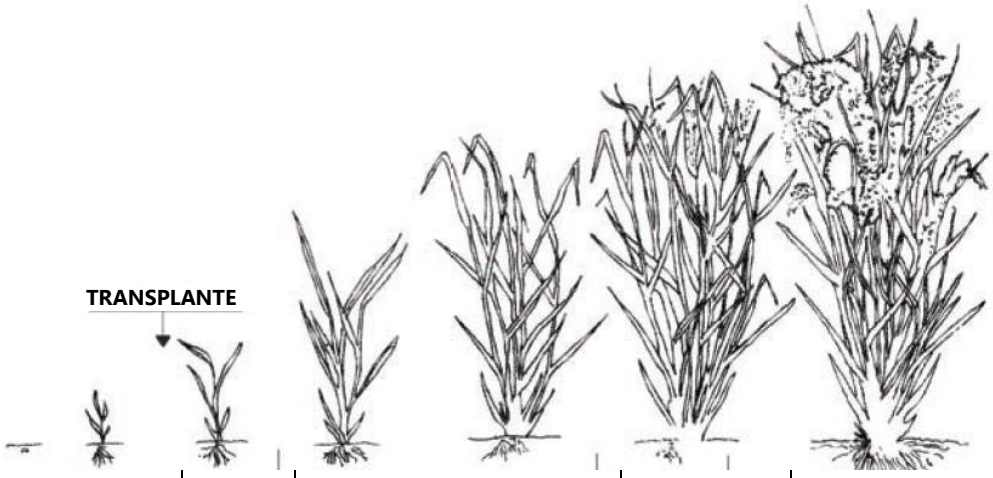
CRECIMIENTO Y DESARROLLO

El arroz inundado normalmente se cultiva en campos "enfangados". El enfangado consiste en rastrillar o rotoculivar en condiciones superficiales de sumersión, y se hace para controlar las malas hierbas, reducir la permeabilidad del suelo y facilitar el trasplante. Después de enfangar, el suelo se nivela en condiciones húmedas. Un corte transversal vertical típico de un campo enfangado muestra una capa de 0-0.10 m de agua estancada, una capa enfangada arable lodosa de 0.10-0.20 m, una capa de labranza formada por décadas o siglos de enfangado, y un subsuelo intacto. Las raíces del arroz normalmente quedan dentro de la capa enfangada y son bastante superficiales.

El método predominante de establecimiento del cultivo en la mayoría de las zonas arroceras es el trasplante. El arroz se cultiva primero en una cama separada de siembra. Las semillas se germinan antes y se siembran a voleo en una superficie de suelo húmedo o inundada en el vivero, a una proporción de 500 a 800 kg/ha. Al momento del trasplante, (12-25 días después del establecimiento para las variedades modernas, o de 40 días o más para las variedades tradicionales), las densidades de plantación son equivalentes a tasas de siembra de 40-50 kg/ha. De dos a tres plántulas normalmente se trasplantan a mano en matas separadas entre 0.15 y 0.30 m. El arroz híbrido normalmente se trasplanta como una plántula por mata, aunque algunas variedades locales se siembran con 5 a 6 plántulas por mata. Cada planta desarrolla de tres a siete hijuelos, dependiendo del estado de los nutrientes, la variedad y la densidad de las plántulas. En un buen cultivo, la cantidad de panículas con granos llegará a 400-600/ m^2 en la estación seca, y 300-400/m^2 en la estación húmeda (para las variedades *indica* comunes en los trópicos).

El arroz también se puede establecer directamente en el campo mediante siembra húmeda o seca (siembra a voleo de semillas germinadas previamente en suelos húmedos o inundados, o siembra de semillas secas en suelos secos o húmedos). Las semillas se siembran a voleo o por surcos de 20 a 30 cm de distancia, a una proporción de 80 a 250 kg/ha (Rice Knowledge Bank, IRRI). En los últimos años, la tendencia en Asia es hacia la siembra más directa. En los campos de producción comercial de Estados Unidos y España, las semillas comúnmente se esparcen desde aviones. La duración del ciclo de crecimiento (desde la germinación hasta la madurez) del arroz depende de la variedad y la ubicación, y varía entre 90 días para las variedades tropicales modernas de corta duración, hasta 180 días para las variedades tradicionales o modernas en regiones subtropicales y ambientes templados. Las diferencias entre variedades en cuanto a la duración del crecimiento están determinadas por cambios en el tiempo desde la germinación hasta el comienzo de la floración (60 a 150 días), mientras que el tiempo entre el comienzo de la floración hasta la madurez es bastante constante y dura aproximadamente 30 días en los trópicos, pero puede incrementarse hasta 65 días en las regiones templadas o frías. El crecimiento y el desarrollo del arroz dependen de la temperatura (Kropff et al., 1994), deteniéndose a una temperatura promedio inferior a la temperatura base que tentativamente se establece en 8 °C para el arroz en *AquaCrop*. La mayoría de las variedades tropicales muere cuando, en la fase temprana de crecimiento vegetativo, la temperatura promedio durante el día baja de 12 °C durante más de tres días consecutivos. Generalmente, el daño al polen ocurre cuando la temperatura durante la floración está fuera del rango de 8 a 35 °C. Aunque muchas variedades tradicionales de arroz son sensibles al fotoperíodo (días más cortos inducen la floración), la mayoría de variedades modernas de alto rendimiento no lo son. (Véase un desarrollo típico en la Figura 3).

FIGURA 3 Etapas del desarrollo típico del arroz.



Siembra previa a la emergencia	Yellows	Ahijamiento	Desarrollo de espiga	Espigazón	Llenado del grano + Maduración	
Establecimiento (0)		Vegetativa (1)		Floración (2)	Formación de fruto (3)	Maduración (4)
Vivero 25-35 días / Transplante	Campo 10 días	40-60 días		10-15 días	25-35 días	10-20 días

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

Por la naturaleza de inundación del arroz inundado, su productividad y uso del agua son diferentes de aquellos del arroz de tierras altas y de otros cereales. El arroz de riego recibe 34-43 % del total del agua de riego en el mundo, o aproximadamente 24-30 % de todas las fuentes desarrolladas de agua dulce del mundo (Bouman *et al.,* 2006). El agua se usa para la preparación del suelo y para compensar las pérdidas del campo por filtración, percolación, evaporación y transpiración. La cantidad de agua usada para la preparación del suelo húmedo puede ser tan poca como 100-150 mm, pero puede aproximarse a 1000 mm en sistemas de riego a gran escala. Las tasas típicas de percolación varían entre 1-5 mm/día en suelos de arcillas pesadas, a 25-30 mm/día en suelos arenosos y franco arenosos (Bouman *et al.,* 2007). A mediados de la estación, cuando se tiene cobertura completa del dosel, el arroz evapotranspira a una tasa ligeramente superior a la evapotranspiración de referencia (ET_o). Las tasas diarias comunes de ET de los campos de arroz son en promedio 4-5 mm/día en estación húmeda tropical, y 6-7 mm/día en estación seca tropical; pero algunos días pueden aumentar hasta 10-11 mm/día en las regiones subtropicales antes de la llegada de los Monzones y en las regiones semiáridas. La ET estacional varía entre 400 y 700 mm en los trópicos y de 800 a 1 100 mm en regiones templadas. La ET total estimada de los campos de arroz en el mundo (inundado y de altas) es de unos 860 km^3/año.

Las variedades modernas de arroz, cuando crecen en condiciones de inundación, tienen una productividad del agua con respecto a la transpiración para rendimiento de grano ($WP_{Y/Tr}$), de unos 2 kg/m^3 (Bouman *et al.,* 2006). La productividad del agua con respecto a la evapotranspiración ($WP_{Y/ET}$) varía entre 0.6 y 1.6 kg/m^3, con una media de 1.1 kg/m^3 (similar a la del trigo). La productividad del agua con respecto al aporte total de agua (riego más precipitación) es de 0.4 kg/m^3 aproximadamente (varía entre 0.2 y 1.2).

RESPUESTA A LOS ESTRESES

Debido a que el arroz evolucionó a partir de un ancestro semiacuático, es extremadamente sensible a la escasez de agua. La razón principal es su sistema radicular superficial; en términos de sensibilidad de los órganos del arroz al bajo potencial de agua, en realidad no es tan diferente de muchos otros cultivos (Hsiao *et al.,* 1984). La expansión foliar y del dosel se reducen poco después de que el suelo se seca por debajo de la saturación en la mayoría de variedades; incluso en las variedades de tierras altas, la expansión comienza a inhibirse cuando solamente una pequeña fracción del agua disponible total (TAW) se ha agotado (Lilley y Fukai, 1994; Wopereis *et al.,* 1996). El arroz es susceptible a grandes pérdidas de rendimiento al momento de la floración, debido a la disponibilidad reducida de agua. Las espiguillas programadas para la polinización en un día en que el potencial hídrico de la panícula es bajo (p. ej. -1.8 MPa) no se abren para diseminar el polen, provocando la esterilidad de la espiguilla y reduciendo el índice de cosecha (HI). Otro estrés es la combinación de alta temperatura y viento fuerte durante la floración. Las espiguillas de las panículas recién emergidas tienen baja resistencia epidérmica al vapor de agua, aparentemente relacionada con la lenta formación de la cera epicuticular. En días de bastante viento y alta temperatura, las espiguillas se deshidratan, mueren y se tornan blancas (O'Toole *et al.,* 1984), síntoma denominado 'cabezas blancas' o 'quemado'. Esto nuevamente reduce el HI. Una gran parte de las tierras inundables de secano con frecuencia se ven afectadas por la sequía; las áreas más grandes y más afectadas en cuanto a intensidad y frecuencia son el oriente de India (cerca de 20 millones de hectáreas) y el norte de Tailandia y Laos (7 millones de hectáreas).

Aunque el arroz se adapta al encharcamiento, la sumersión completa puede ser letal. La mayoría de variedades de arroz puede sobrevivir a la sumersión completa solamente de 3 a 4 días, aunque algunas variedades de secano en tierras inundadas pueden sobrevivir hasta 14 días (dependiendo de la profundidad, temperatura y turbidez de agua). Recientemente, se ha descubierto un gen (sub1) que confiere tolerancia a la sumersión hasta por 14 días al comienzo de la etapa de crecimiento vegetativo y que se ha introducido exitosamente en algunas variedades comunes de arroz inundado, usando técnicas de selección asistida por medio de marcadores moleculares. Las plantas altas tienden a encamarse cuando mengua el nivel de agua, provocando pérdidas adicionales de rendimiento y granos de mala calidad.

El arroz es sensible a las sales (Shannon, 1997). Se estima que unas 9 a 12 millones de hectáreas de arroz inundado en el sur de Asia se ven afectadas por la salinidad y/o la alcalinidad (Bouman *et al.,* 2006), por la intrusión ya sea del agua de mar en las áreas costeras o por la salinidad del agua y/o del suelo en las áreas continentales. El umbral para la reducción de rendimiento es 3 dS/m de conductividad eléctrica del suelo (EC_e), con 90 % de pérdida del rendimiento a 10 dS/m EC_e. El arroz es relativamente tolerante a las sales durante la germinación, el ahijamiento, y hacia la madurez, pero es sensible durante los comienzos de las plántulas, y la floración y el llenado de los granos.

Las necesidades de fertilizante dependen del rendimiento deseado, la fertilidad del suelo, el manejo de residuos y la cantidad de nutrientes que llegan al campo de arroz por el agua de riego y deposición atmosférica. El cultivo de arroz necesita absorber los siguientes nutrientes principales para producir 1 tonelada de grano por hectárea: 15-20 kg N/ha, 2-3 kg P/ha, y 15-20 kg K/ha (Rice Knowledge Bank, IRRI).

PRÁCTICA DE RIEGO

Arroz inundado

El arroz inundado de riego en su mayoría crece con riego suplementario en la estación húmeda (monzones), y depende enteramente del riego en la estación seca. En los campos se construyen pequeños caballones, de 0.20 m de altura y 0.20 a 0.30 de ancho, para mantener el agua empozada

en el campo (amelgas). Los agricultores con acceso a riego buscan mantener 50-100 mm de agua estancada ("inundada") ya que esto garantiza el suministro óptimo de agua al cultivo y ayuda a controlar las malas hierbas y las plagas. El suelo normalmente se mantiene con el agua estancada hasta una semana o dos antes de la cosecha. El aporte total de agua a los campos de arroz (lluvia y riego) durante la estación depende en gran medida de la tasa de percolación del suelo, y es hasta 2-3 veces más que para otros cereales. Varía de 400 mm en suelos de arcillas pesadas con niveles freáticos superficiales, hasta más de 2 000 mm en suelos de grano grueso con niveles freáticos profundos. Un valor típico para el arroz de riego en Asia es alrededor de 1 300 a 1 500 mm (Bouman *et al.,* 2006).

Los agricultores que tienen que lidiar con la escasez de agua no pueden mantener sus cultivos continuamente inundados y adoptan varias tecnologías de ahorro de agua como la alternancia de humectación-secado (AWD) (Bouman *et al.,* 2007). En la AWD, el campo se inunda de manera intermitente; por tanto el campo pasa por períodos de inundación y drenado. La cantidad de días de suelo drenado entre riegos puede variar de uno a más de 10 días. La AWD también es una práctica de manejo de agua usada en el sistema de intensificación del arroz (SRI). El SRI es un sistema de cultivo basado en el uso de plántulas jóvenes, espaciado amplio de los surcos, trasplante cuidadoso de plántulas individuales, trasplante en marco real, alternancia humectación-secado, control manual o mecánico de malas hierbas, uso de gran cantidad de fertilizante orgánico (Stoop *et al.,* 2002). En condiciones de secano, los campos de arroz de tierras húmedas se inundan de manera intermitente e incontrolada.

Arroz de tierras altas

El manejo del arroz de tierras altas normalmente se parece al de otros cereales. La preparación del suelo es bajo condiciones secas, no se enfanga, y el suelo no se satura ni inunda durante el crecimiento del cultivo. Los campos tradicionales típicos de arroz de tierras altas pueden ser en terreno plano o pendiente, sin instalaciones de riego. Después de la preparación en seco del suelo, las semillas se siembran manualmente en hoyos. Normalmente no se aplican fertilizantes, herbicidas ni pesticidas.

El arroz aerobio es un sistema de producción emergente, en el cual las variedades especialmente desarrolladas de alto rendimiento crecen en terreno plano, bien drenado, sin enfangar y en suelos no saturados. Los sistemas de arroz aerobio se utilizan en Brasil (250 000 ha) y en las planicies del norte de China (80 000 ha) (Bouman *et al.,* 2007). El método usual de establecimiento es la siembra seca directa, que puede ser a voleo o sembrada en surcos de 0.20-0.30 m de espaciado. El riego se aplica por inundación o riego por surcos (o camas elevadas) o aspersores. A diferencia del arroz de riego de inundado, el agua aplicada no inunda el suelo, sino que simplemente deja el suelo de la zona radicular a capacidad de campo.

RENDIMIENTO

El rendimiento del arroz normalmente se expresa como arroz con cáscara con 14 % de contenido de humedad. El arroz con cáscara incluye una cascarilla (alrededor del 20 % en peso) y el grano entero. El 'arroz pardo' es la forma menos procesada del arroz, en la cual se ha removido la cascarilla exterior, pero las capas internas del afrecho del grano (11 % en peso del arroz con cáscara) aún se conservan. La molienda remueve todo o parte del afrecho y el germen del arroz con cáscara, y el resultado es el 'arroz blanco' (69 % en peso del arroz con cáscara) que consiste en el germen y el endosperma amiláceo. El promedio de rendimientos de arroz inundado de riego en Asia, por país, es de 3 a 9 ton/ha (arroz con cáscara), con un promedio global de 5 ton/ha aproximadamente. En condiciones de inundación continua de poca duración (100-115 días) las variedades modernas tropicales pueden tener un rendimiento de 8-10 ton/ha en la estación seca, y

6-8 ton/ha en la estación húmeda. Los buenos rendimientos de las variedades de larga duración (120-150 días) en climas subtropicales y templados están alrededor de 12 ton/ha, mientras que se han reportado rendimientos máximos de hasta 17 ton/ha (provincia de Yunnan en China, y en Australia), aunque estos registros reportados con frecuencia son cuestionables. Recientemente se han producido mejoras significativas en el rendimiento provenientes solamente del desarrollo de arroces híbridos, que tienen un potencial de rendimiento incrementado en un 5 a 15 % con respecto a las variedades puras en el mismo ambiente (Peng *et al.,* 1999). El arroz inundadocon inundación incontrolada tiene rendimientos promedio de alrededor de 1.5 ton/ha, lo más probable es que sea resultado del déficit hídrico ocasional, además de la limitación del suministro de oxígeno cuando se inunda en exceso. En buenas condiciones, los rendimientos de arroz inundado se cano en promedio son de 4 a 5 ton/ha. Sin embargo, con estreses abióticos frecuentes (principalmente sequía), los rendimientos son considerablemente más bajos, solamente 2 ton/ha aproximadamente. Los rendimientos promedio del arroz de tierras altas son alrededor de 1 ton/ha, mientras que el arroz aerobio con aplicación de cerca de 90 kg N/ha puede alcanzar de 4 a 6 ton/ha.

El HI varía según la variedad, la ubicación, la estación y las condiciones de crecimiento. El HI de variedades modernas tropicales de corta duración es de 0.45 a 0.5 aproximadamente (45 a 50 %) en la estación seca, y de 0.35 a 0.4 en la estación húmeda. El HI de muchas variedades de larga duración usadas en tierras inundadas en condiciones de secano es de 0.35 aproximadamente. El HI del arroz híbrido moderno en China varía entre 0.4 y 0.5. Con sequía, el HI disminuye y puede acercarse a cero en situaciones extremas.

BIBLIOGRAFÍA

Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P. y Barker, R. 2006. Rice and water. *Advances in Agronomy* 92, 187 - 237.

Bouman, B.A.M., Lampayan, R.M. y Tuong, T.P. 2007. *Water management in rice: coping with water scarcity.* Los Baños, (Filipinas): International Rice Research Institute, 54 págs.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Hsiao, T.C., O'Toole, J.C., Yambao, E.B. y Turner, N.C. 1984. Influence of osmotic adjustment on leaf rolling and tissue death in rice *(Oryza sativa* L.) *Plant Physiology* 75, 338-341.

Jones, M. P., Dingkuhn, M., Aluko, G. K. y Semon, M. 1997. Interspecific *Oryza sativa* L. x *O. glaberrima* Steud. progenies in upland rice improvement. *Euphytica* 92, 237-246.

Kropff, M.J., Van Laar, H.H. y Matthews, R.B. 1994. *ORYZA1, an ecophysiological model for irrigated rice production.* SARP Research Proceedings, AB-DLO, Wageningen, Países Bajos, pág. 110.

Lilley, J.M. y Fukai, S. 1994. Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars. II. Physiological responses to soil water deficit. *Field Crops Research* 37, 215-223.

Peng, S., Cassman, K.G., Virmani, S.S., Sheehy, J. y Khush, G.S. 1999. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. *Crop Science* 39, 1552-1559.

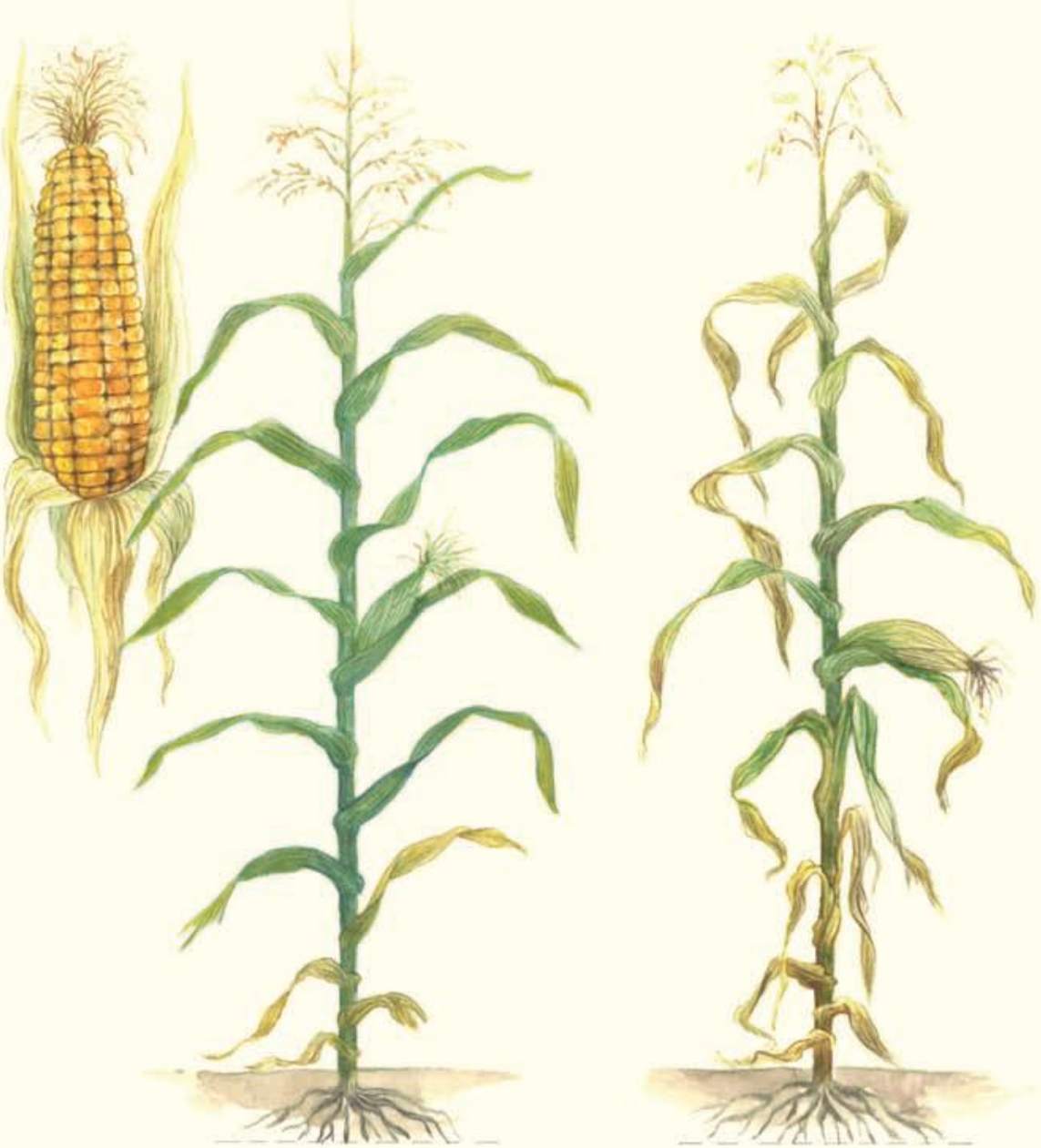
Rice Knowledge Bank, IRRI. Disponible en http://www.knowledgebank.irri.org/Rice/

Stoop, W., Uphoff, N. y Kassam, A. 2002. A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers. *Agricultural Systems* 71, 249-274.

Shannon, M.C. 1997. Adaptation of plants to salinity. *Advances in Agronomy* 60, 75-120.

O'Toole, J.C., Hsiao, T.C. y Namuco, O.S. 1984. Panicle water relations during water stress. *Plant Science Letters* 33, 137-143.

Wopereis, M.C.S., Kropff, M.J., Maligaya, A.R. y Tuong, T.P. 1996. Drought-stress responses of two lowland rice cultivars to soil water status. *Field Crops Research* 46, 21-39.



Maíz

AUTOR PRINCIPAL
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.)

AUTOR COLABORADOR
Elias Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)
AGRADECIMIENTOS
Lee K. Heng
(Manejo de Suelo y Agua y Sección de Nutrición de Cultivos, Programa Conjunto División FAO / IAEA, Viena, Austria)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Edmundo Acevedo
(Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile),

Jerry M. Benner,
Benjamin Zur
L.C. Hammond,
James W. Jones
(Universidad de Florida Gainesville, Florida, EE. UU.),

José Cavero
(EEAD-CSIC, Zaragoza, España),

Philippe Debaecke
(INRA, Tolosa, Francia),
Steve R. Evett,
Terry A. Howell
(USDA-ARS, Laboratorio de Investigación en Conservación y Producción , Bushland, Texas, EE. UU.),
José Faci
(SIA, Zaragoza, España),
Lee K. Heng
(Manejo de Suelo y Agua y Sección de Nutrición de Cultivos, Programa Conjunto División FAO / IAEA, Viena, Austria),
Gerrit Hoogenboom
(Universidad de Georgia, Athens, EE. UU.),
Immaculada Farre
(Departamento de Agricultura y Alimentación, Perth, Australia Occidental),
Fadi Karam
(anteriormente LARI, Tal Amara, Líbano; actualmente ICARDA, Alepo, Siria),
Basilio Rojas-Lara
(anteriormente Universidad de California, Davis, EE. UU.; fallecido),
Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia),
Patrick Wall
(CMMYT, El Batán, México)

Maíz

DESCRIPCIÓN GENERAL

El maíz (Zea *mays* L.) ocupa el primer puesto como el cultivo de mayor importancia a nivel mundial en términos de producción de granos; aunque el trigo y el arroz son los más importantes para consumo humano directo. Los humanos consumen las semillas del maíz directamente o después de ser procesadas, y a menudo son el principal componente del pienso. El aceite vegetal, el el jarabe de azucar, el alcohol como biocombustible y la materia prima para la fabricación del plástico generalmente se derivan de las semillas de maíz. El área destinada al cultivo del maíz y el rendimiento por hectárea han aumentado con el paso del tiempo (Figura 1). La producción total fue de 819 millones de toneladas en 2009 (FAO, 2011), el último año del que se tienen estadísticas. La producción de granos de trigo y arroz con cáscara en ese año fue, en cada caso, aproximadamente un 16 % inferior a la del maíz, con los cultivos de arroz sembrados en un área casi igual a la del maíz, mientras que los cultivos de trigo fueron sembrados en 30 % más área que el maíz. Casi todas las variedades de maíz de alto rendimiento son híbridas. El aumento del uso de híbridos en la década de 1930 condujo a una aceleración evidente en el incremento del rendimiento con el tiempo. El maíz es una especie C_4 que se originó en lugares con veranos calurosos. Sin embargo, se siembra mucho en regiones de clima templado para grano (Figura 2), así como para ensilado. En este último caso, el cultivo se cosecha antes de que alcance la madurez completa, cuando los granos se encuentran en la última fase de llenado y el material vegetativo aún se conserva verde en su mayor parte, se pica en trozos gruesos y se fermenta parcialmente para alimentación animal. Incluso en áreas donde el período de crecimiento es demasiado corto para que los granos alcancen la madurez, el maíz es popular como cultivo para ensilado y forraje. El productor dominante de granos de maíz es Estados Unidos, con aproximadamente 41 % del total a nivel global, seguido de otros países principales productores: China (20 %), Brasil (6 %), México, Indonesia e India (2 %).

El cultivo se originó en América Central, donde se siembra tradicionalmente en colinas. No obstante, la mayor parte del maíz en el mundo se siembra como cultivo en hileras y como monocultivo. En México y algunos países subtropicales en África y América, el maíz frecuentemente crece de manera intercalada con los cultivos de fríjoles o judías. En la zona de cultivo del maíz en Estados Unidos, a menudo crece en rotación con la soya o soja. En las planicies del norte de China, crece normalmente en rotación con el trigo de invierno. Otros cultivos que crecen en rotación con el maíz incluyen otros cereales de invierno y varias leguminosas forrajeras y de grano.

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

El germoplasma del maíz es muy diverso (Duncan, 1975), con una amplia gama de tamaños de las semillas, alturas de la planta, hábitos de ahijamiento, cantidad de hojas por tallo, cantidad de panículas por planta y tamaño de las panículas. No obstante, la mejora genética de las plantas y la selección para alto rendimiento han reducido

drásticamente la diversidad, haciendo el cultivo altamente determinado. La descripción que se presenta aquí se limita a variedades modernas bien desarrolladas, donde prácticamente todas son híbridas. Es posible que algunas variedades locales y material de polinización abierta no figuren dentro del alcance de esta descripción.

FIGURA 1 Área mundial cosechada de maíz y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

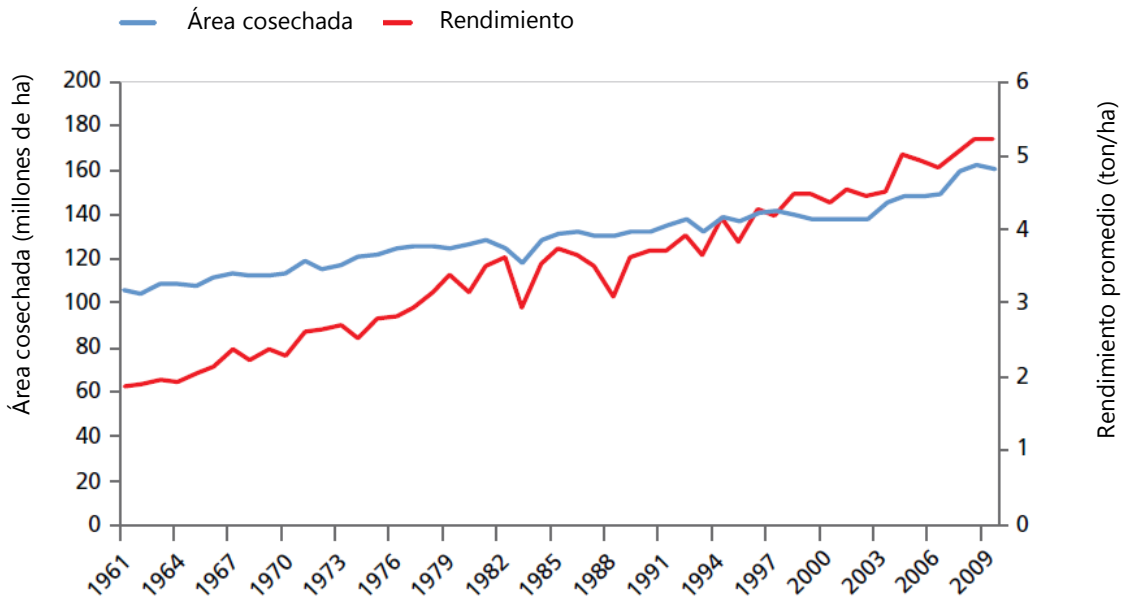
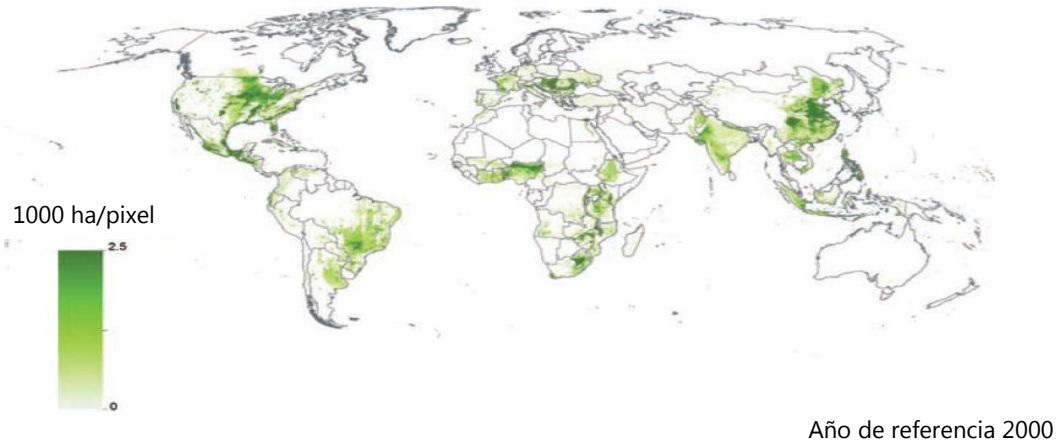


FIGURA 2 Área cosechada de maíz (GAEZ, 2011).



La semilla del maíz es grande (0.2 a 0.3 g por semilla) y con esta gran reserva, las plántulas son capaces de desarrollar, unos pocos días después de la emergencia, un área foliar relativamente amplia. Esto explica el gran tamaño del dosel inicial por plántula (cc_o amplia). Las variedades modernas de maíz no retoñan cuando se siembran a suficiente densidad para alcanzar alta producción, aunque muchas sí retoñan o ahijan a una densidad mucho más reducida. Únicamente se produce una panícula por planta cuando se siembra a alta densidad. Las excepciones son las plantas ubicadas en los extremos del campo, las cuales usualmente producen dos panículas porque reciben más radiación para el proceso de fotosíntesis, y las variedades prolíficos, que producen más de una panícula (pero de menor tamaño) por planta.

Las hojas del maíz se desarrollan y expanden según su posición secuencial en los nudos del tallo. Las variedades varían considerablemente en la cantidad total de hojas (cantidad de nudos en el tallo), dependiendo en gran medida de la duración de su ciclo biológico. Las variedades de ciclos más largos tienen más nudos y hojas. La cantidad más común de hojas en variedades de alto rendimiento varía de 18 a 22 (Rhoads y Bennett, 1990). Debido a que menos hojas generalmente redundan en un área foliar total más reducida por planta, las variedades de ciclos más cortos deben sembrarse a una mayor densidad para alcanzar la misma cobertura del dosel máxima (CC_x) que las variedades de ciclo largo. La densidad de las siembras comerciales varía de 40 000 a 110 000 plantas/ha, y los altos rendimientos se logran a densidades no inferiores a 70 000 plantas/ha. En áreas sin riego y donde la precipitación es limitada, o cuando los nutrientes del suelo son un factor limitante, la densidad de plantas se debe reducir para ajustarse a los recursos disponibles. Dada su naturaleza de cultivo C_4, la tasa de crecimiento relativo de las hojas es alta, lo que conduce a un alto coeficiente de crecimiento del dosel (CGC). Durante la etapa temprana de desarrollo del dosel, la tasa normal de crecimiento del dosel es aproximadamente de 16 % (de la cobertura del dosel existente) por día bajo condiciones óptimas. Como es el caso para la mayoría de los demás cultivos, el crecimiento expansivo de las hojas y por ende, el crecimiento del dosel, son altamente sensibles al estrés hídrico.

En buenos suelos, la tasa de profundización de las raíces puede alcanzar un promedio de 2.5 cm por día, donde el enraizamiento efectivo logra una profundidad de 2.8 m o más alrededor del tiempo de madurez (Hsiao *et al.,* 1976). No obstante, la profundidad de raíces que se observa con más frecuencia, especialmente en regiones con temperaturas frías en invierno, es inferior, por el orden de 1.5 a 2 m. La tasa de profundización puede estar notablemente limitada por capas restrictivas (ya sea por factores físicos o químicos) en el suelo, aireación deficiente y temperatura fría del suelo. La tasa de profundización es importante en situaciones donde existe una cantidad considerable de agua almacenada en las capas más profundas, durante períodos de precipitación y riego escasos o nulos.

El maíz es monoico; es decir, que la inflorescencia masculina (anteras portadoras de la panojao panícula) está separada de la inflorescencia femenina (panículas con estigmas llamados sedas) en lo alto de la planta (1.6 a 3.4 m). La panoja o panícula se ubica en el extremo terminal del tallo y emerge de la hoja apical (última hoja en el tallo), encerrándola; cuando el área foliar de la planta está a punto de alcanzar su punto máximo, únicamente con la hoja apical y posiblemente la siguiente hoja debajo todavía en expansión. La panícula se forma en la axila foliar, muchos nudos por debajo (p. ej., nodo número 11) y adelante de la panoja o panícula. Sin embargo, las sedas emergen de las hojas que rodean la mazorca en la panícula, después de la emergencia de la panoja o panícula, y después de que ésta empieza a liberar polen. Dado que la emergencia de la panoja únicamente ocurre después de que han crecido todas las hojas, las variedades que tienen una mayor cantidad de hojas florecerían y polinizarían después de aquellas con menor cantidad de hojas, siendo iguales en los demás aspectos. En el caso de variedades actuales con un ciclo biológico de 120 a 135 días bajo condiciones favorables, el intervalo de tiempo desde la emergencia hasta la floración es aproximadamente de 65 a 70 días; el comienzo de la senescencia del dosel es alrededor de los 105 días. Las variedades de ciclo corto en latitudes más

septentrionales florecen 10 a 15 días antes. La cobertura máxima del dosel (CC_x) se alcanza en la floración si la densidad de plantas es de 70 000 plantas/ha o menos; y bajo condiciones favorables, la cobertura completa de follaje se alcanza más pronto si la densidad es considerablemente más alta, porque el área foliar por unidad de superficie del suelo (índice de área foliar, LAI) necesaria para cerrar el dosel se alcanza con mayor anticipación, antes de la floración.

La emergencia de las sedas en una panícula y su polinización pueden tardar de 7 a 8 días cuando los regímenes hídricos y de temperatura son favorables. Debido a la heterogeneidad de la población de plantas en un campo, es posible que el tiempo total de polinización para un campo sea al menos el doble que para una sola panícula.

El peso del grano aumenta después de la polinización (Duncan, 1975) y sigue la curva clásica de evolución temporal de los granos de cereales. El proceso de maduración del grano está asociado con la disminución del contenido de agua del grano, y generalmente se considera que la madurez completa ocurre en el momento en que se forma una 'capa negra' en la base del germen del grano (Daynard, 1972). En el punto de madurez completa y bajo condiciones favorables, el grano de variedades modernas comprende aproximadamente el 50 % de la biomasa aérea que el cultivo produce; es decir, que el índice de cosecha es cercano a 0.50 (ó 50 %). Para variedades no mejoradas o variedaes locales el índice de cosecha puede llegar incluso a 0.3. La simulación de *AquaCrop* recomienda que el HI se ajuste de modo que aumente hasta el momento de madurez completa, y que este último se considere como el punto en que la cobertura del dosel verde disminuye al 10 % de la cobertura del dosel máxima alcanzada. Al igual que para muchos otros cultivos (Evans, 1993), el rendimiento de grano de maíz a menudo está relacionado con la duración del área foliar verde (Wolfe *et al.,* 1988a). Una menor duración del área foliar verde puede obedecer a la disminución de la tasa de crecimiento de las hojas o a la senescencia foliar prematura, ocasionada por estrés hídrico o deficiencias de nitrógeno u otros nutrientes, como se analizará más adelante.

RIEGO, USO DEL AGUA Y PRODUCTIVIDAD

En la zona de cultivo del maíz en Estados Unidos, donde la cantidad y distribución de la precipitación es generalmente favorable y el suelo es profundo con una alta capacidad de retención de agua, el maíz se cultiva sin necesidad de riego o únicamente con riego suplementario. En las zonas más áridas de Estados Unidos, los cultivos de maíz se riegan. En el norte de China, donde la precipitación coincide con el período de crecimiento del maíz, se puede implementar la agricultura de secano o el riego suplementario. Dentro de los métodos comunes de aplicación se incluyen el riego por surcos y el riego con pivote central. El uso estacional del agua del maíz varía dependiendo de la demanda evaporativa de la atmósfera y, por consiguiente, según el clima, el momento de la estación en la que se siembre el cultivo, la duración del ciclo biológico del cultivo y la disponibilidad de agua. En situaciones de buena distribución de agua, la ET estacional varía de menos de 500 a más de 800 mm, donde la ET estacional típica de una variedad de ciclo medio estación que se siembra en un clima templado a una latitud de 35° a 40° está cerca de 650 mm.

A mediados de la estación, cuando se tiene cobertura del dosel completa y el agua y los nutrientes minerales no son limitados, el maíz transpira a una tasa ligeramente superior a la ET de referencia (ET_o). Datos detallados (Steduto y Hsiao, 1998) muestran que el coeficiente de cultivo (K_c) es ligeramente inferior a los valores indicados anteriormente, únicamente dentro del rango de 1.07 a 1.12. Esto posiblemente es el resultado de una conductancia estomática más baja de las hojas del maíz en relación con la mayoría de las especies de cultivos de hojas anchas. Dado que se trata de un cultivo C_4 , la eficiencia en el uso del agua del maíz es alta (de Wit, 1958; Steduto *et al.,* 2007), principalmente debido a la alta tasa de fotosíntesis, con solamente un aporte mínimo de la tasa de transpiración ligeramente más restringida. En contraposición a opiniones anteriores, el maíz bajo

condiciones favorables responde de manera positiva al incremento del CO_2 atmosférico, como lo indica el aumento del área foliar (Hsiao and Jackson, 1999) y de la biomasa, al menos hasta 520 ppm de CO_2. Por tanto, los ajustes de *AquaCrop* normalizan la productividad del agua (WP*) según la concentración de CO_2 atmosférico, año tras año. Por ejemplo, la WP* del maíz se ajustó de 32.4 g/m^2 en 1990 a 33.7 g/m^2 en el año 2000.

RESPUESTAS A LOS ESTRESES

El estrés hídrico se desarrolla ante la ausencia de lluvia y riego, y cuando el agua almacenada en la zona radicular se agota hasta el punto en que los procesos de la planta se ven afectados. En *AquaCrop,* el nivel del umbral que activa las respuestas al estrés se configura para diferentes procesos clave. Al igual que en prácticamente todos los cultivos, el crecimiento de expansión de las hojas del maíz es la más sensible de todas las respuestas al estrés (Bradford y Hsiao, 1982; Hsiao y Xu, 2000) y su umbral de respuesta al estrés en *AquaCrop* se establece en un nivel no muy por debajo de la capacidad de campo del suelo. Un estrés hídrico muy leve, que se prolongue por muchos días, puede redundar en una cobertura del dosel mucho menor durante la etapa vegetativa. Si el estrés es lo suficientemente severo, la conductancia estomática también se reduce y a un nivel similar de estrés, la senescencia de las hojas más viejas se empieza a acelerar. La transpiración y fotosíntesis del cultivo se reducirían como resultado de la menor cobertura del dosel verde (debido a la reducción del crecimiento o al aumento de la senescencia) y de una menor conductancia estomática. Por supuesto, esta situación provoca directamente la reducción de la tasa de producción de biomasa y, por ende, la disminución del rendimiento de grano. Un efecto negativo adicional es que la aceleración de la senescencia del dosel disminuiría la duración del mismo y acortaría el período de llenado del grano. No habría tiempo suficiente para que aumentara el índice de cosecha y alcanzara su nivel máximo normal. El resultado final es que la reducción porcentual del rendimiento del grano sería incluso mayor a la reducción porcentual de biomasa.

Como resultado de la naturaleza monoica del maíz, el estrés hídrico de medianamente severo a severo puede provocar un problema peculiar de reproducción. Además del crecimiento de expansión de las hojas, el crecimiento de expansión de los tallos, así como de las sedas y la panoja, también resultan inhibidos por el estrés. Cuando el crecimiento o la elongación de las sedas es más lenta, se retrasa la emergencia de las sedas desde las hojas que cubren la mazorca. La emergencia de la panoja también se retrasa a causa del estrés hídrico, pero en menor medida que en el caso de las sedas (T.C. Hsiao, observación personal). Esta diferencia en el retraso puede impedir la polinización porque, cuando las sedas emerjan, es posible que no quede suficiente polen para polinizar el cultivo por completo. Por otro lado, la polinización fallida de las sedas tardías en una panícula y las panículas muy tardías de una población de plantas deben ser considerables para incidir de manera negativa en el rendimiento, porque en siembras densas la cantidad de granos que una planta puede madurar es únicamente del 65 al 75 % de su cantidad de filamentos, y las sedas que emerjan de manera tardía no forman granos maduros, incluso si el polen es abundante (Duncan, 1975; T.C. Hsiao, sin publicar). Asimismo, las panículas tardías son formadas por las plantas más pequeñas de la población y su aporte al rendimiento es mínimo, incluso cuando se polinizan. El intervalo de tiempo entre la emergencia de la panoja y la emergencia de las sedas parece variar entre diferentes líneas genéticas (Bolaños y Edmeades, 1996), pero es mínimo en líneas que están bien adaptadas al ambiente local. No obstante, a medida que la severidad del estrés hídrico aumenta, este intervalo se alarga cada vez más y el rendimiento de grano se reduce drásticamente como resultado de la polinización fallida (Bolaños y Edmeades, 1996). Como se mencionó, el maíz moderno es altamente determinado con un intervalo de tiempo estrecho para la polinización. Esto significa que no hay oportunidad para compensar la reducción de la polinización con flores tardías cuando llegue la precipitación o el riego.

En general, y con respecto a otros cultivos, se considera que el maíz es sensible al estrés hídrico. El

ajuste osmótico del maíz ante la carencia de agua no es tan bueno como el del algodón, el sorgo o el trigo. Adicionalmente y como ya se mencionó, su naturaleza altamente determinada dificulta compensar la pérdida en productividad después de que el período de estrés hídrico se supera mediante riego o precipitación.

Con respecto a la salinidad, se considera que el maíz presenta un nivel medio de sensibilidad (Ayers y Westcot, 1985). Sus respuestas ante el estrés por salinidad son similares a sus respuestas al estrés hídrico; es decir, disminución del ritmo de crecimiento de expansión de las hojas, reducción de la conductancia estomática y la fotosíntesis, y aceleración de la senescencia foliar (y por ende, del dosel), con el mismo ranking de sensibilidad de estos parámetros que el del estrés hídrico.

La deficiencia de nutrientes minerales puede tener un impacto notable en la productividad del maíz. La deficiencia más común es la de nitrógeno, aunque la importancia de la deficiencia de potasio o fósforo puede ser igual o mayor en algunos suelos. El contenido de nitrógeno del grano de maíz es de aproximadamente 1.3 a 1.8 %. Con un rendimiento relativo del grano de 10 ton/ha, 130 a 180 kg de nitrógeno serían absorbidos del suelo únicamente por el grano. A fin de que el maíz produzca rendimientos de razonablemente buenos a altos, la absorción de nitrógeno del cultivo entero durante la estación está dentro del rango de 180 a 340 kg/ha (Wolfe *et al.,* 1988a; Rhoads y Bennett, 1990). Como para todos los cultivos, la tasa de fotosíntesis de las hojas del maíz en ambientes favorables se relaciona linealmente con el contenido de nitrógeno de las hojas (Evans, 1993). La tasa de fotosíntesis se reduce casi en dos tercios a medida que el contenido de nitrógeno de las hojas disminuye a menos del 1.5 %, y se aproxima a cero cuando el contenido disminuye por debajo del 1 % (Wolfe *et al.,* 1988b). La tasa común de fertilización en países como Estados Unidos (Rhoads y Bennett, 1990) y China está por el orden de 200 kg de nitrógeno por hectárea, o un poco más alta. En el caso de muchos países en vías de desarrollo, la dosis de fertilización usualmente es inferior a la mitad de esa cantidad. Casi con total seguridad, esta es una de las causas principales del bajo rendimiento promedio a nivel mundial. En el campo, los efectos del estrés hídrico comúnmente se confunden con la deficiencia de nitrógeno. La razón es que el nitrógeno del fertilizante se aplica en la capa superior del suelo, que es la primera en secarse cuando se presenta estrés hídrico, y el nitrógeno esencialmente se pierde (Wolfe *et al.,* 1988a).

Por ser un cultivo C_4 que se siembra en estaciones calurosas, el maíz es sensible al frío. Para realizar el cálculo de grados día acumulados (GDD) en *AquaCrop,* la temperatura base (T_{base}) para el maíz está ajustada en 8 °C, y el umbral superior de temperatura (T_{upper}), la temperatura por encima de la cual el desarrollo del cultivo no aumenta al incrementar la temperatura, está ajustado en 30 °C. Los GDD mínimos para la producción completa de biomasa por unidad de transpiración están ajustados tentativamente en 10.

RENDIMIENTO

En las últimas décadas, el rendimiento de grano del maíz ha seguido aumentando. Gran parte de este incremento obedece a una mayor densidad de siembra, el mejoramiento de la fertilización, la estructura óptima del dosel y variedades de madurez tardía con ciclos biológicos más prolongados. Estudios experimentales y pruebas en granjas han reportado rendimientos de aproximadamente 17 ton/ha en variedades de maíz de madurez tardía, sembrados con un óptimo suministro de agua y nutrientes minerales, bajo condiciones ideales y excelente control de plagas y malas hierbas. Normalmente se alcanzan rendimientos en finca de entre 11 y 14 ton/ha bajo condiciones de riego completo y alta fertilidad. Los rendimientos promedio por países son generalmente mucho más bajos, excepto para unos pocos países; por ejemplo, en 2009, estuvo ligeramente por encima de 10 ton/ha en Estados Unidos, y por encima de 9 ton/ha en Francia. Los rendimientos promedio en Argentina, China y Sudáfrica fueron únicamente cerca de la mitad, y en Brasil, ligeramente por encima de un tercio; pero todos muestran una evidente tendencia al alza con el tiempo. Por otro

lado, los rendimientos promedio en algunos países menos industrializados se ubican únicamente en el rango de 1-2 ton/ha, y aún no muestran una clara tendencia a la mejora.

BIBLIOGRAFÍA

Ayers, R.S. y Westcot, D.W. 1985. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO: *Riego y drenaje* N.º 29 (Rev. 1). Roma, FAO. ISBN 92-5-102263-1.

Bolaños, J. y Edmeades, G.O. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research* 48:65-80.

Bradford, K.J. y Hsiao, T.C. 1982. Physiological responses to moderate water stress. En: Lange, O. R., Nobel, P. S., Osmond, C. B. y Ziegler, H. eds. *Encyclopedia Plant Physiology New Series, Vol. 12B.* Physiological Plant Ecology II. Berlin, Springer-Verlag, págs. 264-324.

Daynard, T.B. 1972. Relationships among black layer formation, grain moisture percentage, and heat unit accumulation in corn. *Agronomy Journal* 64:716-719.

de Wit, C.T. 1958. Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk. Onderz.* N.º 64.6. Inst. de Biol. y Quím. Res. On Field Crops and Herbage, Países Bajos, Wageningen, 88 páginas.

Duncan, W.G. 1975. Maize. En: Evans, L.T. (ed.), *Crop physiology: some case histories.* Reino Unido, Cambridge University Press.

Evans, L.T. 1993. *Crop evolution, adaptation, and yield.* 500 págs. Reino Unido, Cambridge University Press.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org Consultada en diciembre de 2011.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Hsiao, T.C., Fereres, E., Acevedo, E. y Henderson, D. W. 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. En: Lange, O. L., Kappen, L. y Schulze, E. D. (eds.), *Ecological studies. Analysis and synthesis,* Volumen 19, Water and Plant Life. Berlin, Springer-Verlag, págs. 281-305.

Hsiao, T.C. y Jackson, R.B. 1999. Interactive effects of water stress and elevated CO2 on growth, photosynthesis, and water use efficiency. En: Luo, Y. y Mooney, H.A. (eds.) *Carbon dioxide and environmental stress.* Nueva York, Academic Press, págs. 3-31

Hsiao, T.C. y Xu, L.K. 2000. Sensitivity of growth of roots vs. leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany* 51: 1595-1616.

Rhoads, F.M. y Bennett, J.M. 1990. Corn. En: Stewart, B.A. y Nielsen, D.R., eds. *Irrigation of Agricultural Crops.* Madison, Wisconsin, *American Society of Agronomists, Crop Science Society of America* y *Soil Science Society of America.*

Steduto, P. y T.C. Hsiao. 1998. Maize canopies under two soil water regimes. II. Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index. *Agricultural and Forestry Meteorology* 89:185-200.

Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2007. On the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrigation Science* 25:189-207.

Wolfe, D. W., Henderson, D. W., Hsiao, T. C. y Alvino, A. 1988a. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. I. Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. *Agronomy Journal* 80:859-864.

Wolfe, D. W., Henderson, D. W., Hsiao, T. C. y Alvino, A. 1988b. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves. *Agronomy Journal* 80:865-870.

Soya

AUTORES PRINCIPALES
Suhas P. Wani
(ICRISAT, Andhra Pradesh, India),

Lee K. Heng
(Manejo de Suelo y Agua y Sección de Nutrición de Cultivos, Programa Conjunto División FAO / IAEA, Viena, Austria)

AUTOR COLABORADOR
Nageswara Rao Vajja
(ICRISAT, Andhra Pradesh, India)

AGRADECIMIENTOS
Gerrit Hoogenboom *(Universidad de Georgia, Athens, EE. UU.),*

Piara Singh
(ICRISAT, Andhra Pradesh, India)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Arianna Facchi
(Universidad de Milán, Milán, Italia),

Gerrit Hoogenboom *(Universidad de Georgia, Athens, EE. UU.),*

Fadi Karam
(anteriormente LARI, Tal Amara, Líbano; actualmente ICARDA, Alepo, Siria),

Suhas P. Wani y Piara Singh
(ICRISAT, Andhra Pradesh, India)

Soya o soja

DESCRIPCIÓN GENERAL

La soya o soja cultivada *(Glycine max* (L.) Merr.) es un importante cultivo oleaginoso y una legumionosa anual rica en proteína, sembrado en aproximadamente 99 millones de ha y que produce 223 millones de toneladas de grano a nivel mundial *(FAO, 2011*). El cultivo se originó en China y está estrechamente relacionado con la *Glycine soja,* su ancestro silvestre. La soya o soja representa casi el 50 % del área total cultivada con semillas, proporcionando aproximadamente el 56 % del total de oleaginosas comestibles y el 30 % de la producción de aceite vegetal a nivel global. En los últimos 50 años, la producción mundial ha aumentado ocho veces como resultado del incremento considerable de los rendimientos promedio y la expansión del área cultivada (Figura 1).

La soya o soja se siembra desde la línea ecuatorial hasta latitudes de 55° al N o S y en altitudes hasta de 2000 m. No obstante, la principal producción de soya o soja se concentra en las regiones entre los 25° y 45° al N, y generalmente se cultiva por debajo de los 1000 m de altitud (Singh *et al.,* 2009) (Figura 2). Los cinco principales productores de soya o soja (Estados Unidos, Brasil, Argentina, China e India; en ese orden) representan más del 93 % de la producción mundial. El cultivo de soya o soja también ha aumentado en Paraguay, Canadá, Bolivia, Ucrania, Uruguay, Indonesia, Federación de Rusia y Nigeria.

En la actualidad, la mayor parte de la soya o soja que se cultiva con fines comerciales son las variedades de campo de semilla amarilla utilizadas para pienso, producción de aceite (para alimentación y usos industriales) y como un alimento rico en proteína. Otras variedades están disponibles para usos especiales: forraje y heno (con abundancia de tallos y hojas), y como verdura (de semilla grande, variedades de colores diversos).

La soya o soja se ajusta perfectamente a la rotación de cultivos y a los sistemas de cultivos intercalados. Las secuencias de cultivos más destacadas son soya-maíz y soya-trigo en Estados Unidos, Brasil y Argentina. Las secuencias de soya-garbanzo, soya-mostaza, soya-trigo y la intercalación de soya con gandul o algodón son comunes en India y China. En Indonesia, se practica el cultivo doble o incluso triple con arroz (-arroz)-soya, donde la soya se siembra sobre la humedad residual de los campos de arroz en la estación seca. En Vietnam, la soya se siembra como un cultivo de finales del verano para forraje después de la cosecha de arroz. El trabajo realizado por el Instituto Internacional de Investigación de Cultivos para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT) en India reveló que el incremento del rendimiento con los sistemas secuenciales e intercalados de soya-garbanzo y soya/gandul se debió posiblemente a la mayor disponibilidad de nitrógeno cuando un cultivo leguminoso sigue a otro. Si no se ha cultivado soya en un lugar particular por tres años o más, lo mejor es inocular la semilla con la cepa efectiva de una bacteria fijadora de nitrógeno *(Rhizobium).*

FIGURA 1 Área mundial cosechada de soya y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

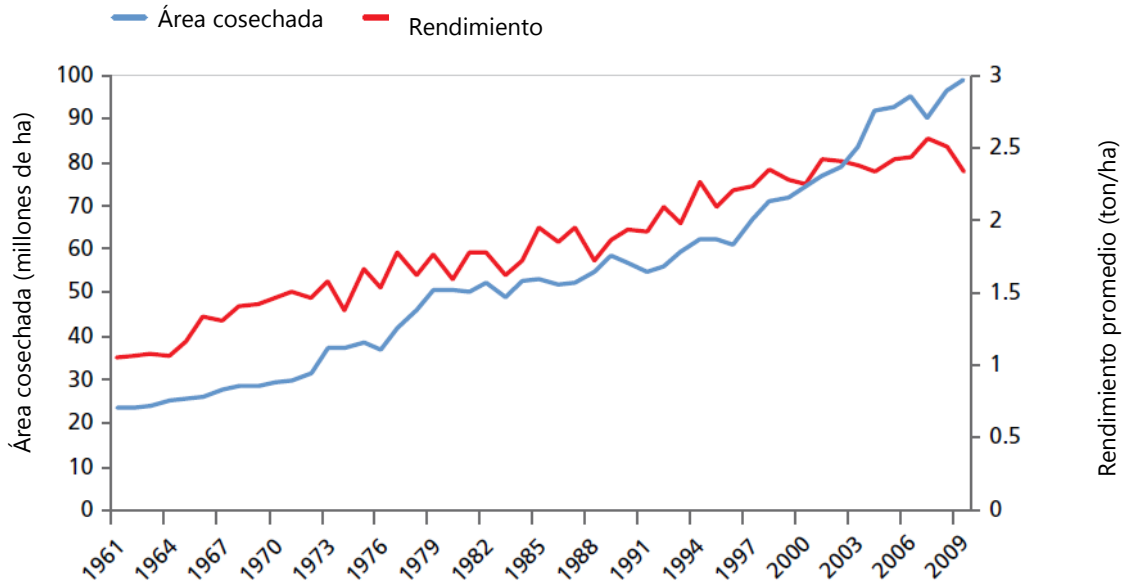
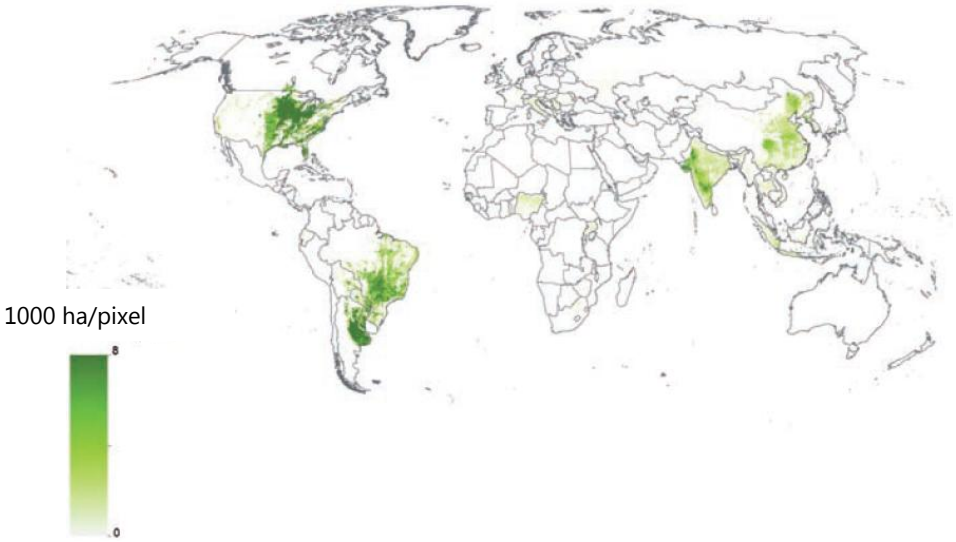


FIGURA 2 Área cosechada de soya (GAEZ, 2011).



Año de referencia 2000

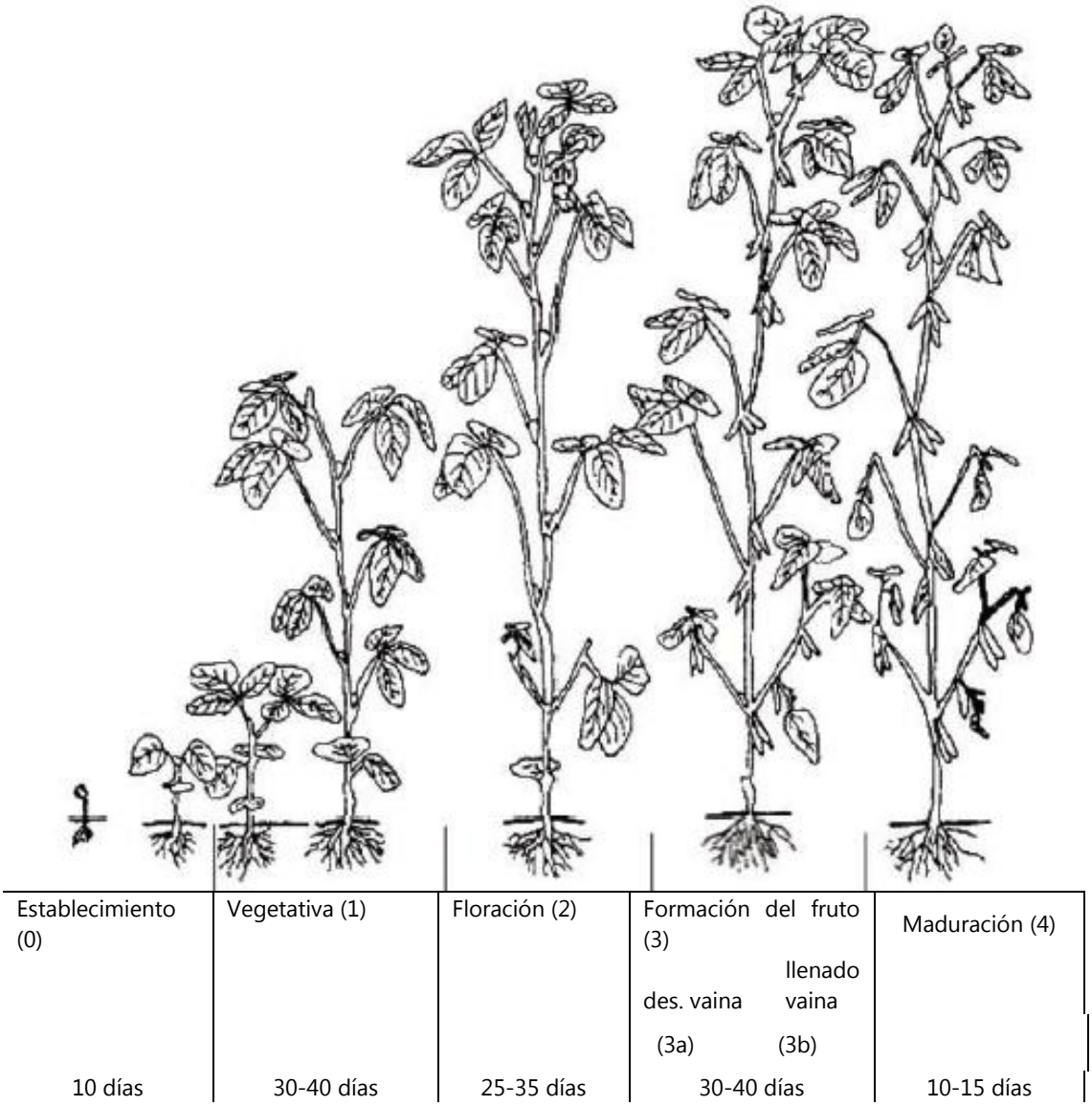
CRECIMIENTO Y DESARROLLO

Las variedades de soya o soja varían desde altamente determinadas a indeterminadas. Las plantas indeterminadas son aquellas que continúan produciendo hojas, nuevas flores y vainas por varias semanas después del inicio de la floración. Generalmente alcanzan una mayor altura, hasta de 1 m, y son más comunes en latitudes altas con ciclos cortos de crecimiento. El crecimiento se detiene con las bajas temperaturas cerca del final de la estación. Las plantas determinadas finalizan su crecimiento en altura y luego producen las flores casi al mismo tiempo. Usualmente alcanzan la mitad o dos tercios (0.45 a 0.6 m) de la altura de las variedades indeterminadas. Sin embargo, no existe una correlación entre la altura de la planta y el rendimiento de semillas (Figura 3).

La soya o soja se cultiva principalmente bajo condiciones de secano a finales de la primavera o el verano, cuando hay lluvia. En India y China, la soya se siembra principalmente en mayo/junio hasta principios de julio, aunque también se puede cultivar en primavera, y entre febrero y marzo en las regiones meridionales. En Estados Unidos, Brasil y Argentina, la estación de siembra comienza en mayo y finaliza hacia mediados de julio como cultivo de verano o se siembra después del trigo de invierno. Las siembras tardías usualmente tienen doseles más pequeñas y su producción es inferior a la de las siembras tempranas. En áreas con gran cantidad de precipitación, las camas elevadas de siembra en forma de base amplia y surcos o caballones y suelo en forma de surcos, son apropiadas para drenar el exceso de agua de los vertisoles y permitir la buena aireación de la zona radicular. La densidad de siembra varía entre 150 000 y 500 000 plantas/ha, dependiendo del costo de las semillas y los factores ambientales. En India, se recomienda una población óptima de plantas de 330 000 plantas/ha, la cual se puede alcanzar con una dosis de semillas de 80-100 kg/ha según el tamaño de la semilla. En Estados Unidos, el espaciamiento común entre surcos es de 0.50 m, mientras que en Brasil, Argentina, China e India, la distancia entre surcos es a menudo más estrecha (0.33 m). La profundidad de siembra de 2.5 a 4.0 cm es óptima para una buena germinación. La temperatura óptima promedio del aire para una rápida germinación es aproximadamente de 30 °C.

La soya o soja se adapta muy bien a diferentes sistemas de cultivo, dada la amplia variación en la duración del ciclo biológico, de 70 a 140 días, dependiendo de la variedad y la estación. Debido a la variación en la duración de la estación según la latitud y a la necesidad de determinar un intervalo de tiempo particular en las rotaciones de cultivos, la duración del ciclo biológico cobró tanta importancia que impulsó la clasificación de las variedades de soya por grupos de maduración en Norteamérica. La denominación utiliza números romanos hasta X, donde la duración de la maduración se incrementa a medida que aumenta el numeral. La siembra de líneas con ciclos biológicos incluso más cortos ocasionó posteriormente la ampliación del extremo inferior de los grupos de maduración, de I a 0, 00 y 000. La floración de la soya está determinada por el fotoperíodo y el régimen térmico. Las variedades clasificadas en los grupos de madurez tardía, sembradas en latitudes bajas, inician la floración a una duración del día más corta (p. ej., 10 horas), mientras que las variedades clasificadas en los grupos de madurez temprana, sembradas en latitudes altas, inician la floración a una duración del día más larga (p. ej., 13 horas). Es importante sembrar variedades adaptadas localmente a una latitud determinada. Por ejemplo, si una variedad apta para latitudes altas se siembra en latitudes bajas, florecería y maduraría demasiado pronto y rendiría menos.

FIGURA 3 Área cosechada de soya (GAEZ, 2011).



Las variedades de ciclo corto, entre 95 y 115 días, son populares en India, EE. UU y China (provincia de Heilongjiang y el valle del río Huai), mientras que en Corea se utilizan ciclos biológicos aún más cortos. Variedades de ciclo medio, entre 120 y 140 días, se siembran en China (Noreste y Meseta de Loess). Brasil y Argentina prefieren las variedades de ciclo largo, que producen un rendimiento hasta 20 % más alto en comparación con las de maduración temprana. La mayoría de variedades aptas para la estación de lluvia son de maduración intermedia, entre 95 y 115 días. Para variedades dentro de este rango de maduración, la duración indicativa de las diferentes fases de crecimiento es la siguiente:

- de la siembra a la emergencia: 6 días;
- de la siembra al dosel máximo: 50 a 55 días (dependiendo de la densidad de plantas);
- de la siembra al comienzo de la senescencia del dosel: 80 días, y el tiempo desde el comienzo hasta la finalización de la senescencia del dosel: 25 días;
- de la siembra a la madurez fisiológica: 105 días; y
- de la siembra a la floración: 36 a 45 días, y duración de la floración: 14 a 20 días.

Las variedades determinadas alcanzan la máxima cobertura del dosel y altura en las etapas reproductivas tempranas (entre R1 y R3 de las etapas de crecimiento de la soya), mientras que el dosel de tipo indeterminado puede continuar creciendo después de este punto. La cobertura del dosel máxima varía entre 65 y 95 %, dependiendo en mayor parte del espaciamiento entre los surcos y la densidad de plantas. Las flores de la soya son muy pequeñas, de color blanco o púrpura, y se dan en grupos pequeños. Únicamente cerca del 25 al 60 % de las flores produce vainas, las cuales se vuelven prominentes una o dos semanas después de la aparición de las flores. La formación de las vainas tarda de dos a varias semanas y el proceso es más largo en las variedades indeterminadas. Cuando las condiciones no son limitantes, una vaina produce de tres a cuatro semillas, las cuales se llenan en aproximadamente un mes.

Al igual que todos los cultivos, la soya o soja preferencialmente echa raíces en relación con el tallo, en el periodo desde la germinación hasta poco después de la emergencia. La profundidad máxima de raíces para la soya es aproximadamente de 1.3 a 1.8 m y puede alcanzar hasta 2.40 m, dependiendo de la cantidad de agua disponible, el tipo de suelo y la temperatura, y la duración del ciclo biológico de la variedad (Kanemasu, 1981). La mayoría de las raíces se encuentra en los 0.3 m superiores del suelo, pero los períodos prolongados de sequía ocasionan que las raíces proliferen en mayor grado hacia capas del suelo más profundas. Como es el caso de otros cultivos, el estrés hídrico aumenta la relación entre raíces y tallos, y tiende a incrementar la longitud total de las raíces. Los genotipos de la soya varían en su crecimiento y desarrollo de los sistemas radiculares.

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

Dependiendo del clima, los suelos, la variedad de cultivo y las prácticas de manejo, la evapotranspiración (ET) de la soya o soja varía entre 300 mm y 800 mm. En India, se reportó una ET de soya cercana a los 450 mm. Un uso estacional del agua de 330 mm a 760 mm ha sido reportado en Estados Unidos, y valores similares en Australia. *El Estudio FAO: Riego y Drenaje* N.º 56 presentó valores entre 450 y 825 mm. El uso máximo diario del agua en el caso de la soya es de aproximadamente 8-9 mm/día, el cual normalmente ocurre mientras se alcanza la cobertura del dosel máxima (cerca de la plena floración hasta el inicio del llenado de las vainas).

En estudios realizados en diferentes partes del mundo, se encontró que la productividad hídrica de la biomasa ($WP_{B/ET}$) de la soya, es decir, la pendiente de la relación lineal entre biomasa y ET acumulada, varía de 1.2 a 1.6 kg/m^3. En los estudios en Estados Unidos y Canadá se observaron valores de $WP_{B/ET}$ más altos, mientras que en los estudios en India se encontraron valores más bajos. La diferencia podría deberse a la limitación de nitrógeno y otros nutrientes minerales en este

último caso. En el caso de los cultivos oleaginosos, como el girasol y la soya o soja, la $WP_{B/ET}$ disminuye después de la antesis porque la proteína y el aceite en la semilla requieren más energía y asimilados fotosintéticos para formarse que las paredes celulares o el almidón. La soya mostró un aumento significativo de hasta un 35% en el rendimiento de semillas con CO_2 atmosférico elevado.

RESPUESTA A LOS ESTRESES

Los estreses por agua, temperatura o nutrientes afectan el crecimiento y desarrollo de la soya o soja. El crecimiento vegetativo (hoja y tallo) es muy sensible a los déficits hídricos. El estrés hídrico que ocurre al inicio de la formación de las vainas hasta el llenado completo de las semillas tiene un mayor impacto negativo sobre el rendimiento que en otras etapas. El período de llenado de las semillas es crucial para el rendimiento. Si las condiciones ambientales son adversas (sequía, granizo o enfermedad), el llenado de las semillas se limitará y los rendimientos menguarán drásticamente (Doorenboos y Kassam, 1986).

La soya es muy sensible a las heladas en la emergencia de la semilla y llenado de las vainas, pero las pérdidas ocasionadas por las heladas en los rendimientos de grano en variedades indeterminadas son menores comparadas con otras variedades, debido a que el período de floración es más prolongado.

Varios estudios indican que los rendimientos de la soya no se ven afectados considerablemente hasta que el agua del suelo de la zona radicular se haya agotado por debajo del 60 % del agua disponible total (TAW), siempre que el desarrollo del dosel no haya sido obstaculizado por déficits leves y prolongados de agua durante la fase vegetativa. El estrés hídrico durante el llenado del grano reduce significativamente el tamaño de las semillas, y el estrés hídrico después de la floración y durante el llenado de las vainas es más crítico (Doss y Thurlow, 1974). Además de los efectos inhibitorios usuales en la expansión foliar, transpiración y fotosíntesis, los déficits hídricos también inhiben la fijación de nitrógeno en la soya.

El exceso de humedad afecta gravemente la germinación y el crecimiento temprano de la soya. No obstante, la soya resiste la inundación o encharcamiento hasta por 7 días, pero el rendimiento se puede reducir en más del 40 % si una inundación prolongada ocurre al iniciar la floración o al comienzo de la etapa de llenado de las semillas. Además de ser perjudicial para las actividades radiculares, la inundación reduce la nodulación. La soya expuesta a inundación por más de 8 días produce raíces adventicias en el tallo, con presencia de tejido aerenquimático, el cual facilita la difusión de oxígeno hasta la porción apical sumergida de la raíz (Mayaki *et al.,* 1976).

La soya se puede cultivar en una amplia variedad de suelos, salvo en aquellos demasiado arenosos, y exhibe un crecimiento óptimo en suelos aluviales, ricos en materia orgánica. Por lo general, los requerimientos de fósforo y potasio en la fertilización son de 35 a 70 kg/ha de P_2O_5, y de 36 a 84 kg/ha de K_2O. Con frecuencia se asume que la soya es capaz de fijar el nitrógeno atmosférico que necesita para suplir su requerimiento para lograr un alto rendimiento, aunque se han reconocido los beneficios de aplicar una dosis inicial de 10 a 20 kg/ha de N. Sin embargo, este supuesto puede perder su validez bajo condiciones de potenciales de rendimiento alto, pero con un suelo bajo en nitrógeno orgánico y mineral. Un cultivo de soya en la etapa de madurez contiene un promedio de 70 kg de N, 30 kg de P_2O_5 y 60 kg de K_2O por tonelada de grano producido. Por tanto, para lograr un rendimiento de 3 ton/ha se requerirían al menos 210 kg/ha de N por fijación simbiótica y absorción desde el suelo. Varios estudios han mostrado que, incluso bajo condiciones favorables, la fijación simbiótica usualmente proporciona no más de la mitad del N, y el resto proviene del suelo. La fijación de nitrógeno se reduce bajo el estrés hídrico; la distribución del riego y precipitación afectan enormemente la acumulación de N y los suministros de N de aquellos que se han fijado.

El cultivo de soya es exitoso en climas con veranos cálidos y condiciones óptimas de crecimiento a temperaturas medias de 20 °C a 30 °C. Los días hasta la floración de la soya fueron más cortos a 30 °C, y se observó un incremento en los días hasta la floración a 25 °C, 35 °C y 20 °C. Se ha reportado la autopolinización sin apertura de flores a 20 °C en varias variedades, al igual que aborto floral y nuevo cuajado a 35 °C. La temperatura alta del follaje (cerca a los 40 °C) reduce la tasa de asimilación de CO_2, y la baja temperatura del tallo disminuye la translocación, la cual se detiene en la soya a 2 °C hasta 3 °C.
En general, la soya es sensible a la salinidad, pero las variedades difieren considerablemente en su tolerancia a las sales. Algunas variedades moderadamente tolerantes excluyen el cloruro de sus hojas. Un alto suministro de fosfato en el medio del crecimiento aumenta la absorción de sodio y reduce la tolerancia a las sales de algunas variedades.

PRÁCTICA DE RIEGO

La soya o soja comúnmente se cultiva bajo condiciones de secano; por ejemplo, solamente se aplica riego al 8 % del área total en Estados Unidos. La eficiencia del agua aplicada es mayor cuando el riego se realiza durante la etapa reproductiva (alrededor de la etapa R3), en comparación con las aplicaciones antes de la floración. El riego durante el llenado de las vainas también previene o detiene la senescencia acelerada del dosel ocasionada por el estrés hídrico, garantizando que se mantenga una buena cobertura del dosel verde para continuar con la fotosíntesis y maximizar la translocación de asimilados y minerales de las hojas a las semillas. Al igual que con otros cultivos, los requerimientos de riego de la soya varían, dependiendo de la precipitación, el clima, la capacidad del suelo para almacenar agua y la profundidad de raíces. La cantidad de aplicaciones varía de un mínimo de 2 a un máximo de 8 riegos durante la estación, para garantizar que el cultivo no esté expuesto a un estrés considerable una vez que haya iniciado la formación de las vainas. El calendario de riego, con base en un agotamiento de TAW del 60 %, consume menos agua sin afectar gravemente los rendimientos del cultivo, si el contenido de humedad del suelo es adecuado en el momento de la siembra. En muchos casos, una sola aplicación de riego en la floración tardía es más beneficiosa que en cualquier otra etapa de crecimiento.

Los métodos de aplicación más comunes son riego de la superficie por inundación, riego por surcos y caballones y riego a manta. En algunos países también se practica el riego por aspersión mediante pivote central, móvil con desplazamiento lateral, cañón móvil, línea de remolcado y sistema fijo. Cuando la humedad del suelo es deficiente, el riego aumenta la altura de la planta, el área foliar, la cantidad de hojas y la longitud de la raíz principal, así como el peso en seco de los tallos, las hojas, los órganos reproductores y las raíces (Rhine *et al.,* 2009).

RENDIMIENTO

El rendimiento de la soya o soja es en promedio de 2.0 a 2.5 toneladas de semillas/ha (al 13-14 % de contenido de humedad de las semillas) para los principales países productores; sin embargo, en los países en vías de desarrollo, existe una gran brecha entre los rendimientos de los agricultores y el rendimiento alcanzable de la soya. Los rendimientos promedio de la soya en Estados Unidos se acercan a 3 ton/ha, y en Brasil, 2.7 ton/ha (Bhatia *et al.,* 2008; Singh *et al.,* 2009). En Europa, Italia registra el rendimiento promedio más alto, con 3.5 ton/ha. El rendimiento en China es de 1.6 ton/ha, mientras que en India es solamente de 1 ton/ha. El potencial de rendimiento de las variedades de duración variable (65 a 130 días) en India varía entre 1.2 a más de 4 ton/ha, con manejo de cultivo de bajo a altos inputs (Singh *et al.* 2009). En Estados Unidos, los rendimientos superiores a 5 toneladas no son inusuales en algunas áreas. Esta diferencia en el rendimiento probablemente está relacionada con diferencias en prácticas de manejo y grado de nutrientes del suelo, incluido el nitrógeno, con una tendencia del cultivo a estar expuesto a estrés por nutrientes

en sistemas agrícolas de bajo rendimiento. La soya se utiliza principalmente como fuente de proteína y aceite. Las semillas contienen 40 a 42 % de proteína y 17.5 a 20 % de aceite, donde dominan los ácidos grasos polinsaturados, como ácido oleico y linoleico. La soya cultivada en diferentes lugares puede variar considerablemente en su concentración de proteínas, aminoácidos y lípidos, como lo indica un estudio en el que se comparan las composiciones químicas de los fríjoles o judías cultivadas en China con aquellas cultivadas en Estados Unidos y Brasil (Grieshop y Fahey, 2001). Al parecer, las condiciones ambientales bajo las cuales se cultiva la soya pueden tener una incidencia significativa en la composición química y la calidad de los nutrientes.

BIBLIOGRAFÍA

Bhatia, V.S., Piara Singh, Wani, S.P, Chauhan, G.S., Kesava Rao, A.V.R., Mishra, A.V.R. y Srinivas, K. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology.* 148 1252-1265.

Doorenbos, J. y Kasssam, A. H. 1979. Respuesta del rendimiento al agua. *Estudio FAO: Riego y drenaje* N.º 33. Roma, FAO.

Doss, B.D., y Thurlow, D.L. 1974. Irrigation, row width and plant population in relation to growth characteristics of two soybean varieties. *Agronomy Journal* 65: 620-623.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Grieshop, C. y G. G. Fahey, Jr. 2001. Comparison of quality characteristics of soybeans from Brazil, China, and United States. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 49: 2669-2673.

Kanemasu, E. T. 1981. *Irrigation water requirements and water stress.* En: Proceedings irrigated soybean production in arid and semi-arid regions. Ed. W.H. Judy y J.A. Jackobs., 31 de agosto - 6 de septiembre de 1979. International Soybean Programme Series, N.º 20.

Mayaki, W.C., Teare, L. D. y Stone, L. R. 1976. Top and root growth of irrigated and non-irrigated soybeans. *Crop Science* 16:92-94. Madison, WI, USA, Crop Science Society of America.

Rhine, M. D., Stevens, G., Shannon, G., Wrather, A. y Sleper, D. (2009). Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. *Irrigation science* (en línea, julio de 2009). Berlín, Springer-Verlag.

Singh P., Aggarwal, P.K., Bhatia, V.S., Murty, M.V.R., Pala, M., Oweis, T., Benli, B., Rao, K.P.C., y Wani, S.P. 2009. Yield gap analysis: modelling of achievable yields at farm level. En: *Rainfed agriculture: Unlocking the potential.* Wani, S.P., Rockstrom, J. y Oweis, T., eds. Comprehensive assessment of water management in agriculture series, Wallingford, Reino Unido, CAB International. págs. 81-123.

Cebada

AUTOR PRINCIPAL
Roxana Savin
(Universidad de Lleida, Lleida, España)

AUTORES COLABORADORES
Gustavo A. Slafer
(Universidad de Lleida, ICREA, Lleida, España)
Rossella Albrizio
(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad CNR-ISAFOM, Ercolano, Italia),

AGRADECIMIENTO
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Marie Therese Abi Saab
(Anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad LARI Fanar, Líbano),
Rossella Albrizio
(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad CNR-ISAFOM, Ercolano, Italia),
Mladen Todorovic
(CIHEAM-IAMB, Bari, Italia)

Cebada

DESCRIPCIÓN GENERAL

La cebada *(Hordeum vulgare L.)* ocupa el cuarto puesto entre los cereales en términos de la producción mundial total. En el año 2009, se cosecharon cerca de 54 millones de hectáreas de cebada, con una producción de 152 millones de toneladas del grano y un rendimiento promedio de 2.8 ton/ha (FAO, 2011). En los últimos 50 años, el rendimiento promedio por hectárea ha aumentado de manera notoria. Sin embargo, a raíz de cambios en el área cultivada, la producción total aumentó solamente hasta los años ochenta, seguida de una disminución en los noventa, y una posible estabilización a partir de ese momento (Figura 1). La cebada es la materia prima principal para la elaboración de la cerveza y además una materia prima importante para la elaboración del whisky. La fluctuación del área cosechada puede deberse en parte a la variación de la demanda del mercado.

La cebada fue uno de los primeros cereales cultivados, y su origen se sitúa en el Creciente Fértil del Cercano Oriente, hace 10 000 años aproximadamente. Es un cultivo que se ha adaptado a y se produce en una gran diversidad de condiciones ambientales. También es un cultivo de estación fría, que se cultiva en primavera y en verano en latitudes altas, y en los trópicos a gran altura; y en invierno y en primavera en latitudes más bajas hasta subtropicales. Los principales países productores de cebada son la Federación de Rusia, Ucrania, Francia, Alemania, España y Australia (Figura 2).

Se distinguen dos tipos botánicos, que son la cebada de dos y seis carreras, dependiendo del número de espiguillas fértiles y desarrolladas en cada nodo del raquis. Las espiguillas se alternan en nudos a lo largo del raquis. En las variedades silvestres, las dos espiguillas laterales son infértiles y solamente la espiguilla central es fértil, dando la apariencia de tener espiguillas de dos carreras, una a cada lado. Las variedades que conservan esta característica silvestre son las cebadas de dos carreras. En las cebadas de seis carreras, debido a las mutaciones las espiguillas laterales se volvieron fértiles. Tienen tres espiguillas (una central y dos laterales) en cada nodo del raquis.

Los dos usos principales de los granos de cebada son: como pienso y como malta para la elaboración de la cerveza y el whisky. En general, la cebada de seis carreras suele tener una concentración más alta de proteína que la cebada de dos carreras; por lo tanto, es más apropiada como pienso. La cebada de dos carreras tradicionalmente se ha sembrado en Europa, Australia, América del Sur y algunas otras regiones del mundo, mientras que la cebada cervecera de seis carreras es más común en América del Norte. Actualmente, las cebadas de dos y de seis carreras se pueden encontrar en todas las áreas que cultivan cebada en el mundo.

La cebada es similar al trigo; por tanto, varios aspectos del manejo del cultivo son análogos. Aunque las comparaciones directas entre los dos cereales son escasas, una de las diferencias principales que por lo general se acepta es que la cebada se adapta mejor que el trigo a las situaciones estresantes, y por esta razón normalmente se siembra en ambientes más agresivos que el trigo (véase Cossani *et al.,* 2009). En muchas áreas donde se produce una cosecha por año, la cebada se rota con diversos cultivos anuales de invierno como otros cereales, oleaginosas y legumbres; pero en ambientes secos (como en la cuenca del Mediterráneo en

áreas donde la precipitación anual es inferior a 350 mm), es común el monocultivo de cebada. El ciclo de la cebada suele ser más corto que el del trigo, por lo cual es más apropiada para doble cultivo. Por ejemplo, después de la cebada podría sembrarse inmediatamente maíz o soya/soja.

FIGURA 1 Área mundial cosechada de cebada y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

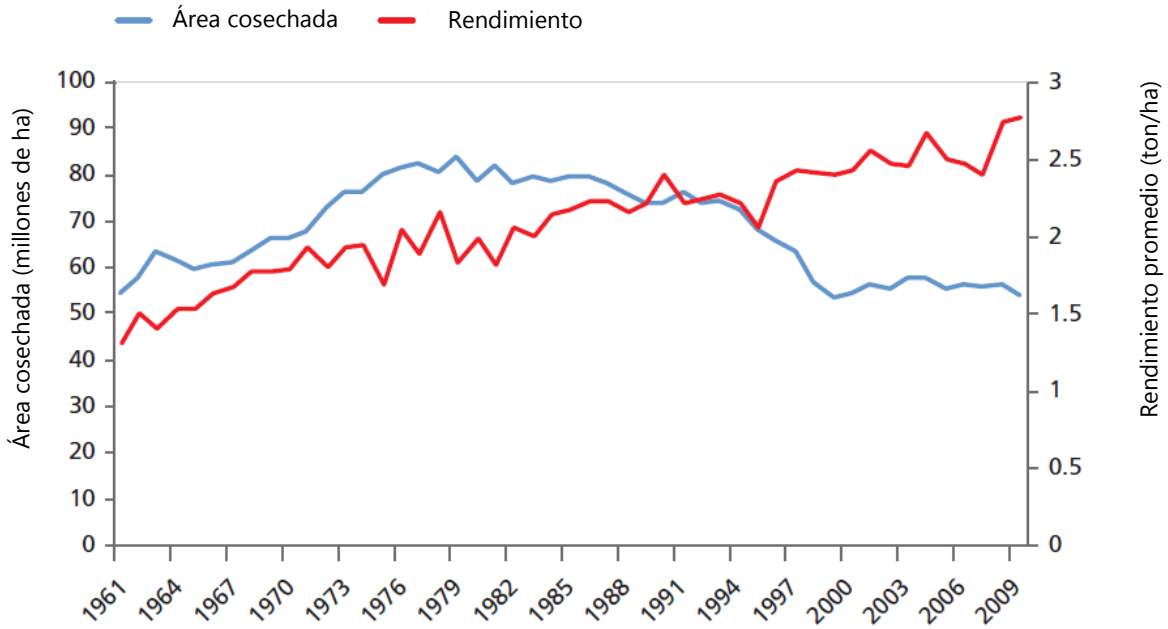
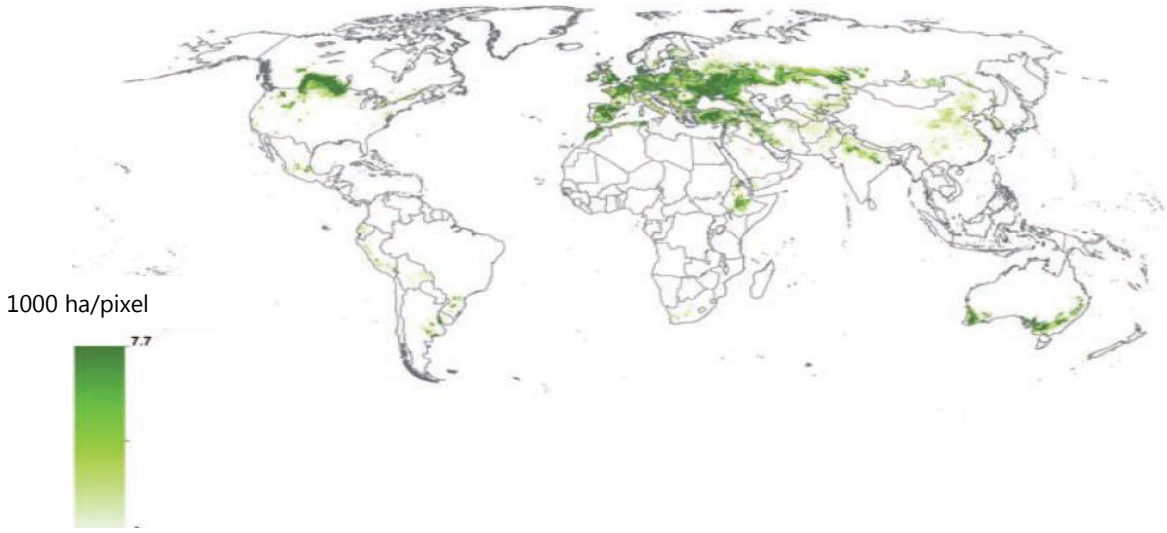


FIGURA 2 Área cosechada de cebada (GAEZ, 2011).



Año de referencia 2000

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

Los genotipos de la cebada normalmente se clasifican en dos categorías según el tiempo de siembra: variedades de invierno y primavera. La cebada de invierno se siembra en otoño y requiere un período frío (vernalización) al comienzo del crecimiento para la floración en los días largos, y madura a finales de primavera o principios de verano. Esto garantiza la floración cuando el riesgo de una helada tardía es bajo, seguida de un período prolongado de formación de fruto que maximiza el rendimiento potencial. En zonas donde el invierno es severo –lo suficiente como para matar un número significativo de plántulas– en lugar de cebada de invierno, en primavera, cuando las temperaturas del suelo son apropiadas para la germinación y emergencia de la plántula, se siembra cebada de primavera, que no requiere vernalización y es sensible al fotoperíodo. Como dura mucho menos tiempo en campo, la cebada de primavera tiene un rendimiento potencial más bajo que el de las variedades de invierno. En ambientes con inviernos más leves, la variedad de invierno se puede sembrar a mediados de invierno y aún florece (a mediados de primavera) y madura (a principios de verano) en condiciones favorables, con rendimientos similares a los obtenidos cuando las variedades de invierno se siembran en otoño. Esta práctica de sembrar tardíamente las variedades de invierno es tradicional en gran parte de la cuenca mediterránea en los lugares donde se siembra cebada, particularmente en el norte de África. A estas variedades se les puede llamar genotipos mediterráneos. Por lo general, son sensibles a la vernalización de manera facultativa (cebadas facultativas). Se sabe que durante el período normal de crecimiento, un retraso en la fecha de siembra produce efectos negativos en el rendimiento de grano. El ciclo de las variedades de primavera dura entre 90 y 130 días, mientras que la variedad de invierno necesita entre 180 y 250 días para madurar, y las variedades mediterráneas tienen un ciclo intermedio. En la Tabla 1 hay ejemplos de duración de varias fases de crecimiento.

TABLA 1 Ejemplos de duración (días del año) de las diferentes etapas de la cebada mediterránea, de primavera y de invierno, a partir de la bibliografía. Los datos son promedios de diferentes variedades.

Tipo de cebada	Siembra - emergencia	Siembra - espigazón*	Siembra - madurez	Referencia
Mediterráneo	10-12	107-118	137-150	Abeledo *et al.*, 2003; Abeledo, 2009, sin publicar
Primavera	10-14	45-52	91-96	Muurinen *et al.*, 2007; Peltonen-Sainio, P., com. personales.
Invierno, Europa meridional	14-16	144-169	172-212	Ibrizio *et al.*, 2010; Cossani *et al.*, 2009
Invierno, Europa septentrional	-	225	280	HGCA, 2006

* *la polinización en la cebada, a diferencia de la del trigo, se realiza en la espigazón*

Se puede considerar que el desarrollo de la cebada ocurre en tres fases: vegetativa, reproductiva y llenado del grano. Durante la fase vegetativa, brotan todas las hojas y luego emergen continuamente hasta que emerge la última hoja. Los hijuelos brotan después de que emergen las hojas 3-4 de los nudos en el brote principal, y continúan hasta la elongación del tallo. Durante la fase reproductiva, comienza la diferenciación de las espiguillas en el ápice y continúa con el desarrollo de los primordios florales (flósculos) dentro de las espiguillas diferenciadas previamente, y termina con la determinación de los flósculos fértiles. En la segunda mitad de la fase reproductiva,

los tallos –y más adelante las espigas– crecen rápidamente mientras que algunos hijuelos mueren y algunas de las espiguillas brotadas no avanzan en su desarrollo hasta convertirse en espiguillas fértiles en la espigazón. Durante este período se acumula la materia seca de las espigas jóvenes, y este crecimiento de la espiga está ligado a la supervivencia de los primordios florales y de las espiguillas. Por esto es que existe una estrecha relación entre la cantidad de granos por unidad de área y el peso seco de las espigas en la antesis (Prystupa *et al.,* 2004), siempre y cuando no haya un estrés posterior a la antesis. Los flósculos de cebada se autopolinizan y la antesis comienza a medida que la espiga emerge de la vaina de la hoja apical.

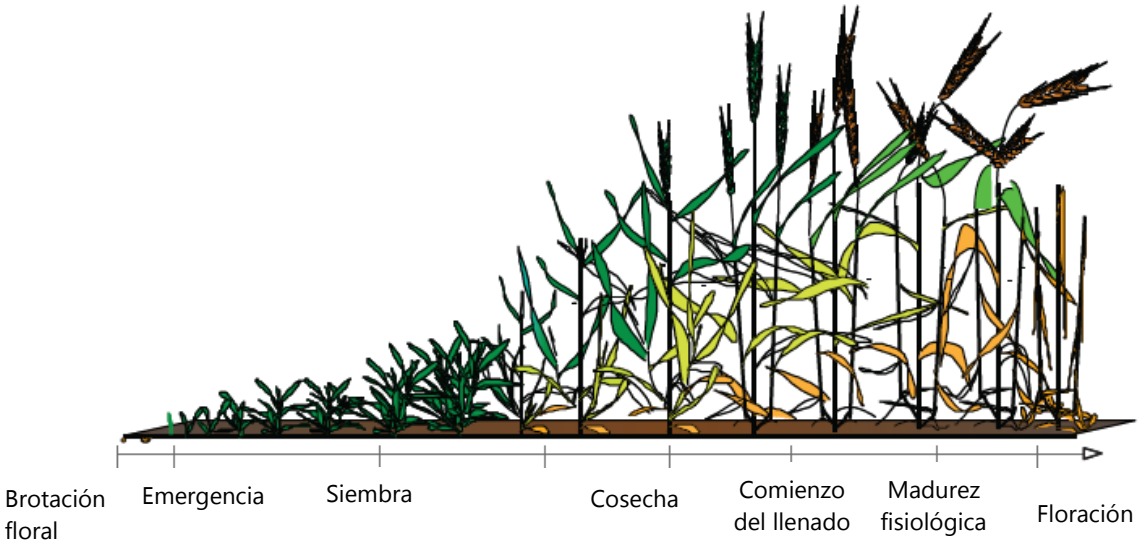
En la fase de llenado del grano, los granos acumulan materia seca hasta alcanzar el peso final del grano. De nuevo, si los asimilados son limitados, algunos de los granos potenciales pueden ser abortados prematuramente o no desarrollarse totalmente.

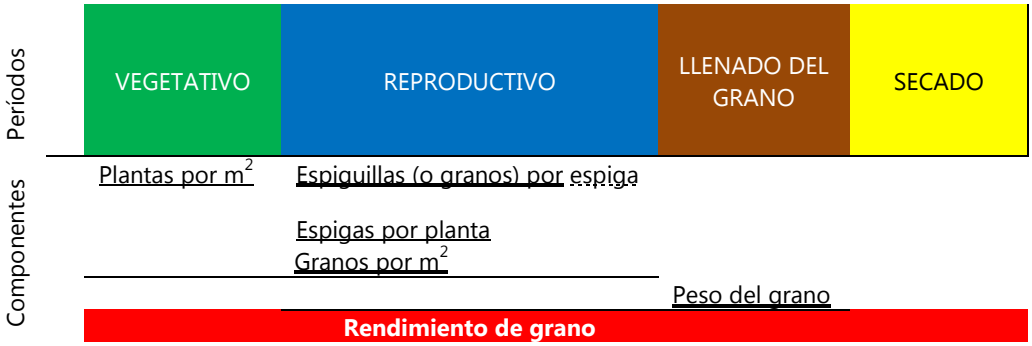
Los principales factores ambientales que afectan la fenología de la cebada son la temperatura y el fotoperíodo. Al igual que para todos los cultivos, la temperatura afecta a la tasa de progresión por las diversas fases, y se tiene en cuenta cuando *AquaCrop* se ejecuta en el modo de grados día acumulados (GDD). Las temperaturas base y superior para la cebada deberían ser similares a las del trigo; 0°C y alrededor de 25°C, respectivamente. Otro efecto clave de la temperatura tiene que ver con la vernalización, pues ésta requiere temperaturas frías. La vernalización, junto con el fotoperíodo, prácticamente determinan el momento del espigado y de la floración de las variedades de invierno. La Figura 3 muestra el desarrollo típico de una planta de cebada, e ilustra las fases particulares del desarrollo.

La densidad de plantación es una práctica de manejo mediante la cual se modifica la cobertura del dosel y el desarrollo del cultivo; por ende, la capacidad del cultivo para captar la radiación fotosistémicamente activa. En cuanto a otros cereales templados con hábitos de ahijamiento, las densidades de plantación pueden variar ampliamente; en ellos la baja densidad de plantas se compensa con la mayor formación de hijuelos. Por esta razón, las densidades de plantación normalmente son mayores para el tipo de primavera, que para el tipo de invierno o mediterráneo. Con las dosis reales de siembra se busca establecer cultivos de 50 a 300 plántulas/m^2, cuyas densidades más comunes están entre 150 y 250 plantas/m^2 para zonas templadas con precipitación adecuada. Para áreas áridas y semiáridas de secano, las dosis de siembra estarán entre las más bajas del rango. El espaciamiento de los surcos normalmente está entre 0.15 y 0.25 m. Cuando la cebada se siembra como cultivo de forraje, la densidad de platación óptima es mayor que cuando se siembra para producción de grano.

Se puede decir que el patrón de crecimiento de las raíces es exponencial entre la siembra y el comienzo de la elongación del tallo (cuando se usan más asimilados para el crecimiento del tallo y las espigas), y luego continúa hasta un poco después de la antesis. La profundidad máxima de raíces puede variar entre 0.30 m en suelos poco profundos, hasta más de 2 m en suelos francos y arenosos profundos. Los patrones de crecimiento de las raíces cambian sustancialmente según la ubicación del fertilizante en el suelo y las condiciones de humedad del mismo. La cebada, al igual que el trigo, puede crecer en suelos muy diversos, desde arenas profundas y suelos poco profundos hasta suelos francos y arcillas pesadas.

FIGURA 3 Etapas típicas de desarrollo de la cebada: siembra, emergencia de las plántulas, brotación floral o etapa de 'collar', brotación de las aristas (o barbas), floración, comienzo del período de llenado de los granos, madurez fisiológica y cosecha. Los cuadros indican las distintas fases y formación de los componentes del fruto (adaptado de García del Moral *et al.* 2002).





PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

El agua a menudo es el recurso que limita de forma más significativa el rendimiento de la cebada, dependiendo de la severidad del déficit. La evapotranspiración (ET) estacional de la cebada varía entre 100 y 500 mm. La relación entre el rendimiento de grano y la ET normalmente es lineal y el punto de intersección con la abscisa se considera una estimación de la evaporación del suelo. Por tanto, la pendiente de la relación lineal se puede interpretar como la eficiencia de la relación rendimiento-transpiración del cultivo ($WP_{Y/Tr}$), que ha reportado valores de 1.2-1.4 kg/m^3.

Al igual que para todos los cultivos, la respuesta de la cebada al estrés hídrico depende del momento, la duración y la severidad del estrés. Por lo tanto, los efectos del estrés sobre el rendimiento pueden variar desde un ligero aumento, prácticamente no tener ningún efecto, hasta distintos rangos de reducción del rendimiento, e incluso pérdida de la cosecha. En términos de los

componentes del rendimiento, está comprobado, tanto para el trigo como para la cebada, que el rendimiento está bastante determinado por la cantidad de granos por unidad de área del suelo, y, en menor medida, por el peso por grano. Por supuesto, la cantidad de granos por unidad de área del suelo es producto de la densidad de plantas, los brotes fértiles por planta, y los granos por brote fértil (espiga). La cantidad de granos por espiga es particularmente sensible al estrés que se presenta durante el período que va del comienzo de la elongación del tallo hasta el final de la antesis, cuando el estrés puede limitar la cantidad de flósculos fértiles producidos de los flósculos brotados, y la proporción de flósculos fértiles polinizados y cuajados. Durante el período de llenado de los granos, el rendimiento también se reduce cuando el estrés hídrico es lo suficientemente intenso como para inhibir la asimilación, provocando una disminución del peso por grano. En casos de sequías terminales, comunes en el clima mediterráneo, es más probable que la pérdida de rendimiento sea el resultado combinado de: menos granos a raíz del aborto de los embriones jóvenes en desarrollo, y peso reducido por grano. Además de reducir la abertura estomática y la fotosíntesis, la sequía terminal también acelera la senescencia foliar, y por ende del dosel, provocando el cese prematuro de producción de asimilados. Por consiguiente, el índice de cosecha se reduce porque la biomasa vegetativa se forma en su mayoría en la primera parte de la estación, cuando el agua no es una limitante, mientras que la biomasa del grano se deriva en gran medida de la asimilada durante la parte final de la estación de sequía.

El rendimiento también se ve afectado significativamente por estreses durante la primera parte del período de llenado del grano, cuando se determina el tamaño potencial del grano y la cantidad de granos puede disminuir por el aborto de los embriones en desarrollo. Antes del comienzo de la elongación del tallo, los efectos perjudiciales del estrés se deben al mal establecimiento del cultivo y/o al lento desarrollo de los hijuelos y el dosel. Tanto el mal establecimiento del cultivo como el lento desarrollo del dosel reducen la radiación captada por fotosíntesis, y por ende, la tasa de acumulación de biomasa. El lento desarrollo de los hijuelos también reduce la cantidad de espigas por unidad de área de suelo. Es por esto que, por dar un ejemplo, el control temprano de las malas hierbas es esencial para evitar pérdidas de rendimiento.

En Crecimiento y Desarrollo se han tratado diversos aspectos de los efectos de la temperatura. Un efecto adicional se da en el llenado del grano. En la mayoría de las condiciones templadas, el llenado de los granos ocurre cuando el clima se hace más cálido. Las altas temperaturas (por encima de 30 a 32 °C) aceleran el desarrollo de la semilla hacia la madurez, acortando el periodo de llenado de los granos, y por tanto reduciendo el peso por grano al momento de la cosecha. El efecto es notorio incluso cuando los períodos de alta temperatura son cortos (solamente 3 días). Otro posible efecto negativo de las altas temperaturas al final de la estación es la aceleración de la senescencia del dosel, aunque en parte puede ser el efecto indirecto del estrés hídrico inducido por la alta transpiración a altas temperaturas. Además de rendimientos inferiores, los estreses sobre el llenado de los granos pueden reducir la calidad del grano para malta, aumentando la proporción de granos inferiores a 2.5 mm, aumentando el porcentaje de proteína y reduciendo el extracto de malta.

El estrés por salinidad predomina en la producción de cebada en algunas áreas con riego. Sin embargo, se considera que la cebada es el cereal más tolerante a las sales. Con respecto a los nutrientes minerales, los requerimientos de fertilización del suelo solamente se pueden determinar en función del rendimiento alcanzable, al tipo de suelo y a la fertilidad natural del suelo. Como guía aproximada, por cada tonelada de rendimiento por hectárea, la cebada necesita absorber 30 kg de N, 5 kg de P y 20 kg de K aproximadamente. La absorción real depende de la disponibilidad de nutrientes naturales o fertilizantes y de la eficiencia de absorción del cultivo. En términos generales, la eficiencia de absorción rara vez pasa de 0.6. El estado de N del cultivo no solamente influye en el rendimiento, sino en el porcentaje de proteína del grano. El bajo porcentaje de proteína es más apropiado para malta, mientras que el porcentaje alto es más apropiado para pienso.

PRÁCTICA DE RIEGO

La cebada normalmente crece en condiciones de secano. Sin embargo, en algunos casos, se puede aplicar riego parcial o máximo, especialmente cuando se cultiva para malta o donde se practica el doble cultivo, con una cebada de maduración temprana seguida de una de maíz (o soya/soja) de siembra tardía.

Los requerimientos hídricos estacionales de la cebada dependen de la variedad, el rendimiento objetivo y el manejo del cultivo. La cebada cervecera requiere mejor manejo del agua que la cebada para pienso, con el fin de satisfacer los estándares de la industria. Durante las primeras etapas de crecimiento, el uso de agua del cultivo varía entre 1 y 3 mm/día, llegando a 5 - 8 mm/día después de que el dosel se acerque a la cobertura completa (normalmente cuando aparecen las hojas apicales), y permanece alto hasta el comienzo de la senescencia del dosel. Aunque la lluvia en invierno es suficiente en muchos climas para suplir los requerimientos hídricos totales de la cebada en la etapa vegetativa temprana, la humedad efectiva del suelo en la zona radicular no debería agotarse más allá del 50 % del agua disponible total desde la emergencia hasta la hoja apical, después de lo cual los agotamientos probablemente no deberían exceder el 60 % de la humedad disponible total del suelo hasta la etapa de grano lechoso. Normalmente, con la precipitación apropiada en invierno, el riego por inundación o por eras de la cebada cervecera requerirá de 2 a 3 riegos en suelos más pesados durante las etapas críticas de crecimiento. Los suelos arenosos, ligeros, requieren riegos más frecuentes.

El exceso de humedad del suelo durante la etapa de vaina engrosada (estado de bota) y ramificación/formación de nudos, junto con una fertilidad por alto contenido de nitrógeno, pueden estimular el crecimiento vegetativo lo cual podría provocar el encamado a medida que se desarrolla el cultivo. El riego excesivo después de que el cultivo está bastante desarrollado también estimula el encamado.

RENDIMIENTO

El rendimiento de la cebada puede variar entre menos de 1 ton/ha hasta cerca de 3 ton/ha en condiciones de secano y agua limitada, hasta 4 a 10 ton/ha en climas templados y condiciones de secano (como en Europa occidental y septentrional). Se han observado rendimientos potenciales de hasta 12 ton/ha. Como se discutió anteriormente, el rendimiento de la cebada es más sensible a cambios en las condiciones de crecimiento durante el período en que se cuajan los granos, desde la elongación del tallo hasta justo antes del comienzo de llenado de los granos. El crecimiento acumulado durante esta fase es lo suficientemente importante como para justificar asumir el riesgo de una helada durante la floración; mientras más pronto ocurra la floración mayor es el crecimiento del cultivo durante la fase entre la elongación del tallo hasta comienzos de llenado del grano.

El índice de cosecha para la cebada es similar o ligeramente inferior al del trigo, y varía entre 0.45 y 0.5 para las variedades modernas en condiciones favorables. Al igual que para los demás cereales, el aumento del rendimiento con el tiempo se debe en gran medida al aumento del HI como resultado de la mejora genética de la planta. Curiosamente, el incremento del HI de la cebada con respecto al tiempo, de alguna manera, ha sido más lento que para el trigo y el arroz (Evans, 1993), posiblemente por las restricciones a la calidad del grano impuestas por los fabricantes de cerveza. Para la cebada cervecera, no existe un estándar sencillo, claro y aceptado por unanimidad basado en un conjunto de variables. Los requerimientos de calidad representan un conjunto de especificaciones acordadas que los fabricantes comerciales de cerveza desarrollaron para garantizar una producción eficiente y congruente con las propiedades deseadas del producto o las metodologías tradicionales (Savin y Molina-Cano, 2002), que varían dependiendo de la región geográfica. A pesar de esto, el contenido de proteína se considera uno de los principales atributos de calidad. En general, existe una relación inversamente proporcional entre el contenido de proteína y la calidad de la malta; el objetivo es mantener el contenido máximo de proteína de la

malta cervecera alrededor de 10 a 12 %.

BIBLIOGRAFÍA

Abeledo, L.G., Calderini, D.F. y Slafer, G.A. 2003. Genetic improvement of barley yield potential and its physiological determinants in Argentina (1944-1998). *Euphytica* 130: 325-334.

Albrizio, R., Todorovic, M., Matic, T. y Stellacci, A.M. 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 115:179-190.

Cossani, CM., Savin, R. y Slafer, G.A. 2007. Contrasting performance of barley and wheat in a wide range of conditions in Mediterranean Catalonia (Spain). *Annals of Applied Biology* 151, 167-173.

Cossani, M.C, Slafer, G.A. y Savin, R. 2009. Yield and biomass in wheat, and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Research* 112: 205-213.

Evans, L.T. 1993. *Crop evolution, adaptation, and yield.* Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press. 500 págs.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

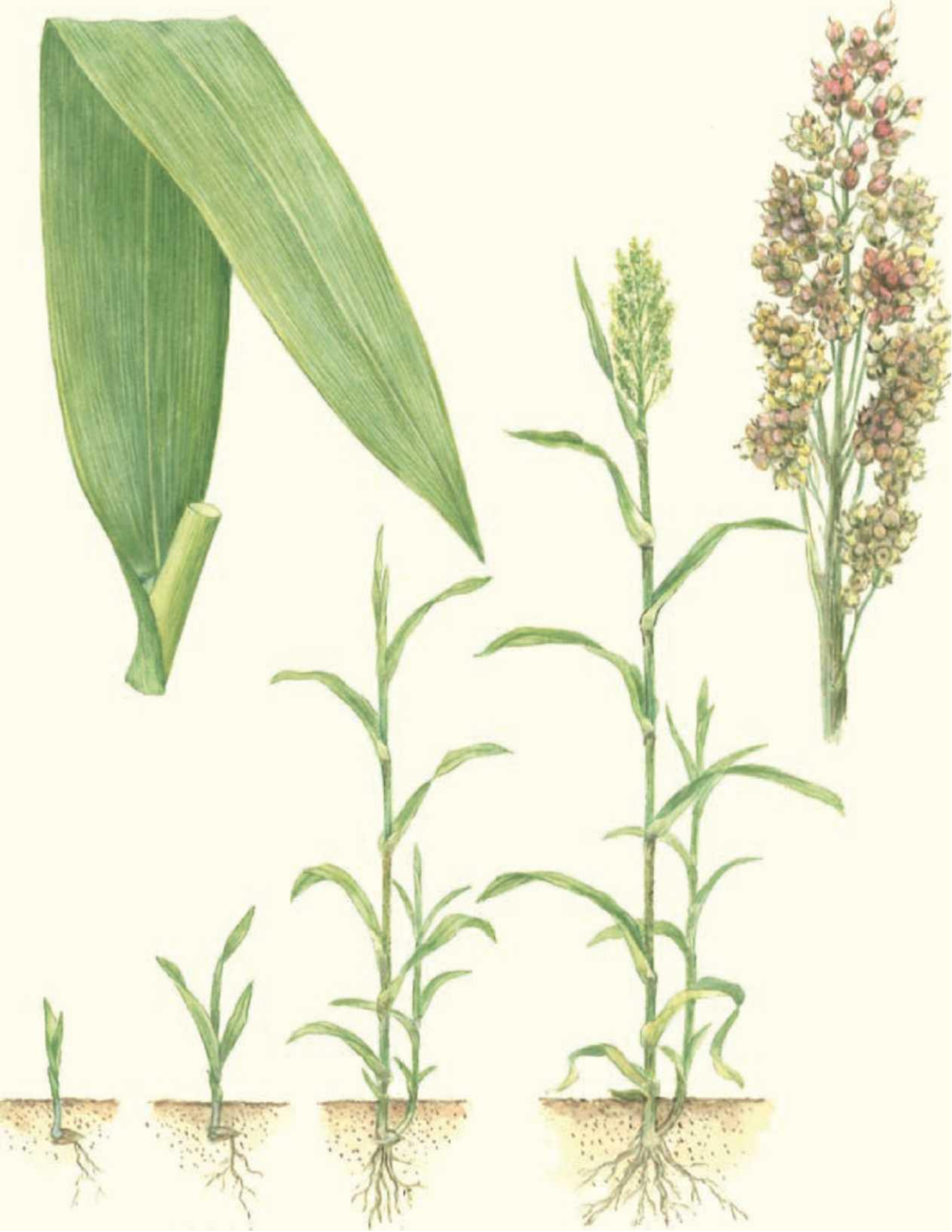
García del Moral, L., Miralles, D.J. y Slafer, G.A. 2002. Initiation and appearance of vegetative and reproductive structures throughout barley development. En: *Barley Science. Recent advances from molecular biology to agronomy of yield and quality.* Slafer, G.A., Molina-Cano, J.L., Savin, R., Araus, J.L. y Romagosa, I., eds. Nueva York, EE. UU., Food Product Press, págs. 243-268.

HGCA, 2006. The barley growth guide, HGCA, Londres, Caledonia House, pág. 28.

Muurinen, S., Kleemola, J. y Peltonen-Sainio, P. 2007. Accumulation and translocation of nitrogen in spring cereal cultivars differing in nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal* 99:441-449.

Prystupa, P., Savin, R. y Slafer, G.A. 2004 Grain number and its relationship with dry matter, N and P in the spikes at heading in response to NxP fertilization in barley. *Field Crops Research* 90: 245-254.

Savin, R. y Molina-Cano, J.L. 2002. Changes in malting quality and its determinants in response to abiotic stresses. En: *Barley Science. Recent advances from molecular biology to agronomy of yield and quality.* Slafer, G.A., Molina-Cano, J.L., Savin, R., Araus, J.L. y Romagosa, I., eds. Nueva York, Food Product Press, págs. 523-550.



Sorgo

AUTOR PRINCIPAL
Suhas P. Wani
(ICRISAT, Andhra Pradesh, India)

AUTORES COLABORADORES
Rossella Albrizio
(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad CNR-ISAFOM, Ercolano, Italia),
Nageswara Rao Vajja
(ICRISAT, Andhra Pradesh, India)

AGRADECIMIENTOS
Elias Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España),

Lee K. Heng
(Manejo de Suelo y Agua y Sección de Nutrición de Cultivos, Programa Conjunto División FAO / IAEA, Viena, Austria),

Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.),

Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP

Peter Cooper
(ICRISAT, Andhra Pradesh, India),

Lee K. Heng
(Manejo de Suelo y Agua y Sección de Nutrición de Cultivos, Programa Conjunto División FAO / IAEA, Viena, Austria),

Gerrit Hoogenboom
(Universidad de Georgia, Athens, EE. UU.),

Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.),

Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia)

Sorgo

DESCRIPCIÓN GENERAL

El sorgo *(Sorghum bicolor* [L.] Moench) es un cultivo autóctono de África, donde parece que se empezó a cultivar hace 5 000 años, en Etiopía. Actualmente se cultiva ampliamente en zonas áridas de África, Asia, América, Europa y Australia, entre las latitudes 50 °N en América del Norte y Rusia y 40 °S en Argentina. El sorgo dulce es una variante estrechamente relacionada con el sorgo de grano; la diferencia radica principalmente en que sus tallos son más largos y jugosos, y con mayor contenido de azúcar, que el sorgo de grano. El sorgo es el quinto cereal más importante en el mundo, después del trigo, el arroz, el maíz y la cebada. En África, es el segundo, después del maíz, en términos de producción. El sorgo se ha adaptado bien a los climas tropicales, con varios rasgos que lo hacen un cultivo tolerante a la sequía, que sobrevive en condiciones climáticas adversas; por esto con frecuencia queda relegado a suelos pobres y manejo con bajos insumos. Se siembra de manera extensiva en condiciones de secano para producción de grano y de forraje. Se puede alcanzar una alta producción cuando se aplican suficientes nutrientes y agua, especialmente en las etapas críticas de crecimiento del cultivo.

La producción mundial de sorgo durante 2009 fue de 59 millones de toneladas de grano aproximadamente, en 40 millones de hectáreas con una productividad promedio de 1.4 ton/ha (FAO, 2011). Los mayores productores son Estados Unidos, India, México, Nigeria, Sudán, Etiopía, Australia y Brasil, en ese orden (FAO, 2011) (Figura 1).

El sorgo se cultiva principalmente en áreas áridas, a menudo en suelos pocos o medianamente profundos, de ligeros a textura media, y también en suelos medios a profundos con una alta capacidad de retención de agua, como un cultivo posterior a la estación de lluvias (Figura 2).

En India, el sorgo de estación de lluvias *(kharif)* se siembra entre la segunda semana de junio y la primera semana de julio, con las lluvias de los monzones del suroeste. Sin embargo, el sorgo es proclive al ataque de hongos, los cuales producen *moho* en los granos, si las últimas lluvias de la estación ocurren durante la madurez del grano. El sorgo posterior a la estación de lluvias *(rabi),* generalmente se siembra desde la última semana de septiembre hasta la última semana de octubre, y generalmente está expuesto a bajas temperaturas invernales al momento de la siembra, lo que genera baja germinación y mal establecimiento del cultivo. Los cultivos estacionales de *rabi* de siembra tardía están expuestos a sequía terminal cuando se siembran en suelos negros (vertisoles) con humedad almacenada en el suelo y son proclives a enfermedades como la podredumbre carbonosa. El período de siembra del sorgo en Estados Unidos comienza la segunda semana de mayo hasta la primera semana de agosto en Kansas y Dakota del Sur, y desde la última semana de marzo hasta la primera semana de agosto en las Grandes Llanuras. En las regiones subtropicales y templadas de Argentina, la siembra normalmente comienza a finales de septiembre y continúa hasta octubre; aunque la siembra tardía puede empezar a finales de noviembre hasta principios de enero. En Sudán y Burkina Faso, la siembra de sorgo comienza a finales de mayo y continúa hasta principios de julio, pero las siembras tardías comienzan a

finales de julio hasta principios de agosto en zonas de lluvias erráticas en el occidente de África. En África meridional, el sorgo normalmente se siembra desde mediados de octubre hasta mediados de diciembre. La duración del ciclo de las variedades de sorgo de maduración temprana, entre las que se encuentran la mayoría de los híbridos, es de 110 días o incluso menos, mientras que las del sorgo de estación larga pueden durar hasta 5 a 7 meses.

FIGURA 1 Etapas de desarrollo típico del sorgo (FAO 2011)

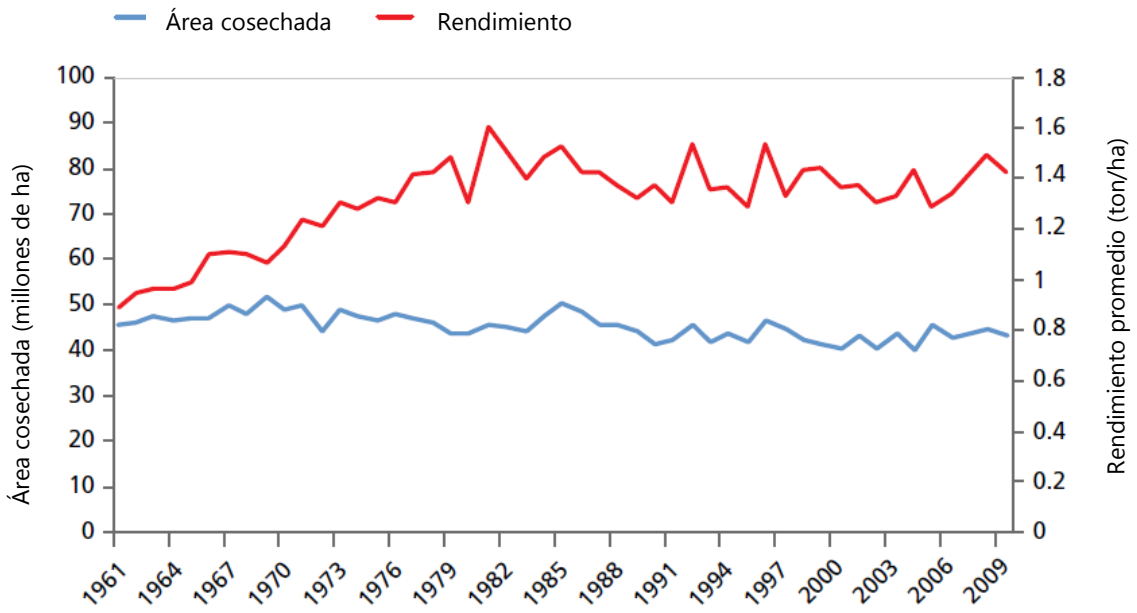
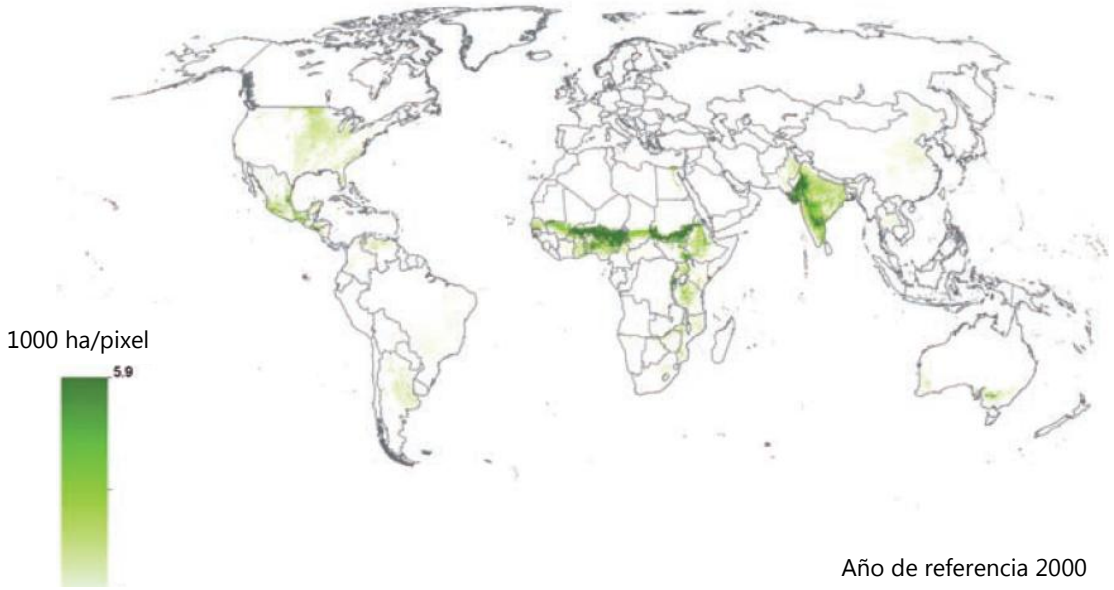


FIGURA 2 Área cosechada de sorgo (GAEZ, 2011).



En situaciones de secano, las poblaciones de plantas pueden variar entre 50 000 y 150 000 plantas/ha, con bajas densidades en zonas de baja precipitación. Bajo riego o humedad no limitante, generalmente se recomienda una densidad de 120 000 a 200 000 plantas/ha. Las poblaciones excesivas de plantas aumentan la competencia entre las plantas, la posibilidad de una podredumbre carbonosa, y puede aumentar el uso del agua. La ventaja de tener más espigas por unidad de área de suelo se contrarresta con el tamaño reducido de la espiga, causando un incremento muy pequeño del rendimiento de grano. En los suelos de baja fertilidad con poco manejo en algunos países africanos, se ha comprobado que la densidad óptima es de 50 000 plantas/ha. Con respecto al sorgo dulce, se ha comprobado que 110 000 a 120 000 plantas/ha es la densidad óptima en la estación de lluvias en la India.

El crecimiento del sorgo mezclado con cultivos de legumbres variadas para consumo doméstico es una práctica tradicional de los agricultores de zonas áridas en India y África. El sorgo intercalado con guandul a razón de 2:1 es un sistema de cultivo predominante en vertisoles en la India. Dos surcos de sorgo intercalados con dos surcos de maní o cacahuete a razón de 4:2 en la India, y sorgo intercalado con fríjol caupí a razón de 2:2 surcos en África, también son populares entre los agricultores, en alfisoles con ciclos cortos de crecimiento. El sorgo posterior a la estación de lluvias, de barbecho después de las lluvias, es más común en vertisoles en la India y en Etiopía. En China y Estados Unidos el sorgo con frecuencia se siembra con riego después de la primera estación de soya/soja, o después del trigo de invierno como doble cultivo.

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

Como cultivo C_4, el sorgo no tolera los regímenes de baja temperatura. Para la germinación de la semilla, la temperatura mínima es aproximadamente 8 ^{o}C, y la temperatura óptima está entre 21 y 35 ^{o}C *(Peacock, 1982)*. En condiciones de campo, se requiere una temperatura mínima del suelo entre 15 y 18 ^{o}C para obtener un 80 % de emergencia en 10 a 12 días. Normalmente, en campo la emergencia tarda de 5 a 10 días. La brotación de las panículas sucede después de aproximadamente un tercio del ciclo de crecimiento, después de que ha brotado la última hoja y se ha desarrollado una tercera parte del área foliar total. El desarrollo foliar rápido y de elongación del tallo siguen a la brotación de las panículas. El crecimiento rápido de las panículas comienza después de que emergen todas las hojas, excepto las dos o tres últimas. Cuando la hoja apical es visible, todas las hojas excepto las 3 a 4 últimas se han abierto y la intercepción de luz está llegando al máximo, unas pocas hojas bajas pueden empezar la senescencia si el nitrógeno no es abundante o el cultivo se ha plantado con una densidad muy alta.

La tasa de aparición de las hojas en el sorgo está estrechamente relacionada con el tiempo térmico. Cuando la temperatura no es limitante, cada hoja nueva tarda cerca de 2 días para emerger. Para una variedad con 18 hojas, en India, una fenología y etapas de crecimiento típicas de 0 a 9 (según Vanderlip y Reeves, 1972) son las siguientes: emergencia (0); etapa de 3 hojas (6 días después de emergencia, 6 DAE/6); etapa de 5 hojas (16 DAE/10); brotación de las panículas (32 DAE/16, aproximadamente etapa de las 9 hojas); aparición de la hoja apical (50 DAE/18, punta de la última hoja visible en el verticilo); etapa de vaina engrosada (la espiga crece en la vaina de la hoja apical, 60 DAE/10); 50 % de la floración (68 DAE/8, la mitad de las plantas completa la polinización, de la punta hacia abajo); etapa de grano lechoso (80 DAE/12 apretar el grano entre los dedos no produce leche o produce poca); etapa de grano pastoso (96 DAE/16, cuando no se puede comprimir la semilla con los dedos); y madurez fisiológica (106 DAE/10, aspecto de capa negra (mancha) sobre el hilo en la base de la semilla).

Las hojas de sorgo son verticales cuando son jóvenes pero las láminas tienden a doblarse hacia abajo en la madurez. Las hojas de sorgo se desarrollan a cada lado del tallo, una exactamente al

frente de la otra. Al igual que para los otros cultivos, la tasa de producción de materia seca está afectada en gran medida por la radiación interceptada, la cual depende del área foliar, especialmente entre la emergencia y la brotación de la panícula. La cantidad de hojas por planta varía ampliamente, desde 7 hasta 24, dependiendo de la variedad y de las condiciones climáticas. El sorgo es una planta de días cortos y la brotación de las panículas se acelera con los días cortos y las noches largas. Como la panícula brota solamente después de que han brotado todas las hojas, si la brotación de las panículas y la floración ocurrieran antes, la planta tendría menos hojas. La brotación de las panículas puede verse muy afectada por los regímenes de temperatura, además del fotoperíodo. Hay interacciones bastante complicadas entre el fotoperíodo y los regímenes de temperatura, además de una dependencia del grupo de maduración de la variedad (Morgan *et al.,* 1987). Generalmente, dentro del rango de temperatura favorable para el crecimiento, la cantidad de hojas tiende a disminuir a medida que disminuye la temperatura en la Etapa I de crecimiento, especialmente cuando la disminución es en la temperatura nocturna (Quinby *et al.,* 1973).

Al igual que para todos los cultivos, el índice de área foliar (LAI) depende de la densidad de plantas, la cantidad de hojas por planta, y la etapa de crecimiento. La intercepción de luz máxima, y por ende la cobertura del dosel máxima, se alcanza a un LAI de 4 a 5. El objetivo del sorgo de grano es alcanzar cobertura completa del dosel, pero evitar el LAI excesivo, puesto que el crecimiento excesivo de vegetación tiende a reducir el índice de cosecha. El sorgo de forraje tiene un LAI superior a 7 con poblaciones de más de 150 000 plantas/ha y alto manejo de insumos en los trópicos. En los sorgos de corta duración, con un número reducido de hojas, el área foliar máxima (y la cobertura del dosel) se alcanza a los 50 días o antes, después de la emergencia bajo temperaturas favorables. Sin embargo, la densidad de siembra debe ser considerablemente más alta que la de las variedades de ciclo largo para alcanzar la cobertura del dosel completa, debido a la menor cantidad de hojas por planta. Las semillas de sorgo son considerablemente más pequeñas que las del maíz, y por tanto el área foliar inicial (tamaño inicial del dosel por plántula, cc_o) de las semillas de sorgo es menor comparada con la del maíz. El sorgo desarrolla menos área foliar que el maíz con insumos, condiciones ambientales y densidad de plantas similares, debido al tamaño más pequeño de sus hojas.

La espiga de sorgo es una panícula, con espiguillas en pares. La infloresencia (panícula) puede ser compacta o abierta, se desarrolla en el tallo principal (pedúnculo) con ramas primarias o secundarias en las cuales nacen los flósculos. La longitud del pedúnculo varía entre 75 y 500 mm en distintas variedades. La estructura floral es apropiada para autopolinización; sin embargo, aproximadamente el 6 % corresponde a polinización cruzada naturalmente por efecto del viento. La semilla de sorgo híbrido es producida usando la línea de esterilidad masculina citoplasmática como planta progenitora femenina. Las flores de sorgo comienzan a abrirse y a polinizarse poco después de que la panícula ha emergido de la gluma. La diseminación del polen comienza en la parte superior de la panícula y avanza hacia abajo durante 6 a 9 días. La polinización ocurre poco después del amanecer durante las horas más frías del día. En la madurez, de 600 a 3000 semillas se han desarrollado en la panícula, todas encerradas en cascarillas que varían de color, desde negro, rojo, café, hasta café claro. La cantidad de semillas por panícula –un factor importante para el rendimiento– se determina en su mayor parte durante los períodos de brotación de las panículas y floración.

A temperaturas promedio diarias estacionales superiores a 20 °C, las variedades de grano temprano tardan de 90 a 110 días, y las variedades de duración media tardan de 110 a 140 días para madurar. Cuando la temperatura media diaria está por debajo de 20 °C, se extiende entre 10 y 20 días el período de crecimiento por cada 0.5 °C de disminución de la temperatura, dependiendo de la variedad. A una temperatura promedio de 15 °C, los granos de sorgo tardan de 250 a 300 días en madurar. De esto se desprende que, en climas fríos, el sorgo se cultive principalmente para forraje.

Al igual que para todos los cereales, el sistema radicular tiene dos componentes, el sistema

radicular seminal y un sistema radicular secundario que se desarrolla en los nudos que quedan por debajo y justo encima de la superficie del suelo. Las raíces nodales empiezan a aparecer en la etapa de la tercera y cuarta hojas, y se ramifican hacia los lados y hacia abajo. Las raíces que salen de los nudos cercanos y por encima del suelo (llamadas raíces fúlcreas) se desarrollan y penetran en el suelo únicamente cuando la superficie está húmeda. El sistema radicular completamente desarrollado tiene 1 m de longitud hacia los lados y 2 m de profundidad aproximadamente, y puede alcanzar 3 m en subsuelos muy abiertos. La profundidad máxima generalmente se alcanza al momento de la floración, pero las raíces continúan extendiéndose durante la fase reproductiva, al menos en condiciones áridas. Cuando el perfil de suelo está húmedo, la mayor parte del agua se toma del quinto superior de la zona radicular. A medida que la humedad del suelo se agota, y la parte superior del perfil de suelo se seca, la zona de absorción se desplaza progresivamente hacia abajo. Este patrón de absorción se repite después de cada riego o precipitación intensa. Normalmente, cuando el sorgo ha terminado su crecimiento, casi toda el agua ha sido extraída de 1 a 2 m de la superficie del suelo.

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

Una precipitación de 500 a 800 mm bien distribuida durante la estación de cultivo normalmente es apropiada para las variedades que maduran entre 3 y 4 meses. El sorgo tolera el encharcamiento y también puede crecer en zonas de alta precipitación. El uso de consumo (ET) de cultivos de sorgo de 110 a 130 días varía entre 450 y 750 mm, dependiendo de la demanda evaporatica. El uso del agua por estación es superior para los genotipos de madurez tardía porque los períodos de crecimiento son más prolongados. Para el sorgo de estación de lluvias en la India, la productividad del agua consumida para la biomasa ($WP_{B/ET}$) varía entre 2.3 y 6.0 kg/m^3, y la productividad del agua consumida para rendimiento de grano ($WP_{Y/ET}$) varía entre 1.0 y 1.5 kg/m^3, en distintos ambientes. Para el sorgo posterior a la estación de lluvias en la India, la $WP_{Y/ET}$ varía entre 0.23 y 2.2 kg/m^3, con una media de 1.2 kg/m^3, obtenida de varios estudios en muchos tipos de suelo y variedades. Un análisis de datos de muchos años en Texas, Estados Unidos, arrojó una media de la $WP_{Y/ET}$ de 1.5 kg/ m^3 (Krieg y Lascano, 1990). Un estudio en la misma ubicación que variaba la densidad de siembra y la geometría encontró que la $WP_{B/ET}$ del sorgo de secano estaba en el rango de 3.0 a 3.6 kg/m^3, pero la $WP_{Y/ET}$ variaba más, en el rango de 0.8 a 1.3 (Steiner, 1986). El índice de cosecha fue diferente para densidades diferentes, lo que explica el amplio rango de las $WP_{Y/ET}$. En Nebraska, Estados Unidos, otro estudio encontró que la $WP_{Y/ET}$ fue de 1.2, 1.8, y 1.9 kg/m^3 para tres variedades diferentes (Garrity *et al.,* 1982).

RESPUESTAS A LOS ESTRESES

El sorgo se considera un cultivo resistente a la sequía, especialmente si se lo compara con el maíz. Una parte de la resistencia percibida puede ser porque las variedades de sorgo que crecen en zonas donde el agua es limitada son del ciclo corto; entonces sus requerimientos de agua son inferiores a los del maíz, cultivo que generalmente tiene un ciclo biológico más largo. Dicho esto, hay verdaderas diferencias en los rasgos de resistencia a la sequía. El sorgo, con su hábito de ahijamiento, es mucho menos determinado que el maíz; por lo tanto, es más "flexible" en el desarrollo reproductivo. Si el estrés hídrico corto durante la etapa de brotación de panículas reduce la cantidad potencial de granos de la panícula del tallo principal, las panículas de los hijuelos que brotan después, cuando ya no hay estrés, pueden producir más granos y compensar gran parte de lo perdido. Si el estrés hídrico es lo suficientemente severo en la floración como para quemar la espiga (muerte de una parte o toda la espiga) los hijuelos pueden emerger de los nudos altos del tallo para formar espigas, producir granos y compensar al menos en parte lo perdido, siempre y cuando se pueda retrasar la cosecha (Hsiao *et al.,* 1976). Estas compensaciones no son posibles en las variedades modernas del maíz, las cuales tienen una capacidad de ahijamiento muy limitada. La

otra cara de la moneda es que, si el agua es abundante durante el período vegetativo, muchas variedades de sorgo producirían hijuelos en exceso, con una alta porción de ellos estériles, produciendo una cantidad alta de biomasa, pero con un índice de cosecha bajo.

El sorgo acumula solutos y por ósmosis se adapta para responder al estrés hídrico que surja, aparentemente más que el maíz (Fereres *et al.,* 1978). Esto permitiría que el sorgo mantuviera la apertura estomática y llevara a cabo la fotosíntesis por más tiempo a medida que se agota la humedad en el suelo, y posiblemente también contribuiría a retrasar la senescencia del dosel inducida por el estrés hídrico. Además del cierre estomático, las hojas de sorgo se enrollan notoriamente en condiciones de estrés hídrico, reduciendo la superficie efectiva de transpiración. Este enrollamiento se atribuye a cambios de turgencia en las filas de las células motoras a lo largo de la nervadura central y las venas de la cara superior de la hoja. Las células motoras también están presentes en las hojas del maíz, pero las hojas del maíz se enrollan el mínimo en condiciones de estrés hídrico. El crecimiento foliar por expansión es altamente sensible al estrés hídrico tanto en el sorgo como en el maíz.

En las zonas proclives a sequías terminales, como la región del mediterráneo y Australia, el encamado del sorgo de terrenos áridos a medida que el cultivo madura puede ser a menudo un problema. Los mejoradores han desarrollado variedades que mantienen verde el dosel por más tiempo en la madurez, el rasgo que se conoce como "permanecer verde". Dichas variedades, aparentemente, tienen mejor resistencia al encamado, presumiblemente porque menos cantidad del material de los tallos se removiliza y traslada al grano en la madurez. En cuanto a los parámetros de *AquaCrop*, el coeficiente de disminución del dosel (CDC) tendría que estar ajustado a un valor inferior, y probablemente también el coeficiente de estrés (K_s) para la senescencia, para que sea menos sensible al estrés hídrico, para las variedades que tienen el rasgo de "permanecer verde".

El sorgo tiene una tolerancia moderada a la salinidad. A medida que la EC aumentó de 11 a 18 dS/m, el rendimiento de grano se redujo de 50 % a 100 %. La mayoría de los efectos de la temperatura sobre el sorgo ya fueron analizados en Crecimiento y Desarrollo. Las hojas crecen a medida que aumenta la temperatura del aire y se detienen cuando la temperatura llega a 34 °C aproximadamente. La polinización y el cuajado del grano pueden fallar cuando la temperatura de noche cae por debajo de 12 a 15 ^{o}C durante la floración, y lo más probable es que el polen producido por debajo de 10 °C y por encima de 40 °C no sea viable. Los granos de sorgo contienen cerca de un 1.5 % de nitrógeno y 0.25 % de fósforo. Para obtener un rendimiento alto de 8 ton, el grano por sí solo extrae 120 kg de N y 20 kg de P. Para alcanzar este rendimiento, la fertilización también debe tener en cuenta el N y el P que queda en los residuos del sorgo, la eficiencia de los nutrientes aplicados y el suministro del suelo natural. Cuando el agua es limitada, las tasas de fertilización se ajustarán hacia abajo. En áreas proclives a la sequía terminal, se debe tener cuidado y evitar demasiado suministro de N al principio de la estación, porque el crecimiento rápido prematuro resultante agotaría el agua almacenada en el suelo y acentuaría el daño provocado por la sequía terminal.

PRÁCTICA DE RIEGO

En zonas secas, con poca precipitación o precipitaciones erráticas, el cultivo responde bien al riego suplementario. Sin embargo, existen diferencias marcadas entre variedades en cuanto a su respuesta al riego. El momento del riego debería tratar de evitar los déficits de agua durante las etapas críticas de crecimiento del cultivo, el período que empieza al momento de la brotación de las panículas y termina al principio del llenado de granos. El estrés hídrico durante la brotación de las panículas reduciría el tamaño de las panículas y la cantidad potencial de granos; el estrés severo durante la floración inhibiría la polinización; y el estrés al principio del llenado de granos causaría el

aborto de los granos más jóvenes en desarrollo y reduciría el peso por grano. El tamaño de los granos también se reduciría si el estrés ocurriera al final de la etapa de llenado de los granos y causaría la senescencia prematura del dosel, con la consecuencia de la terminación prematura de la asimilación de CO_2. En términos de agua disponible total (TAW) en la zona radicular, cerca de dos terceras partes pueden agotarse antes del riego sin efectos significativos en la transpiración. Hasta el 75 % puede agotarse durante la fase de maduración. Cuando el suministro de agua es limitado, el riego durante la vaina engrosada/floración, después de un estrés moderado durante la fase vegetativa y aumento del estrés durante el período de maduración, es una estrategia de riego deficitario que minimiza las pérdidas de rendimiento. En cuanto al sorgo de forraje, un riego ligero tardío mantiene la calidad del tallo al momento de la cosecha. La cantidad de riegos normalmente varía entre uno y cuatro, dependiendo de las condiciones climáticas y de la textura del suelo. Los métodos de riego incluyen riego por surcos, a menudo en surcos alternados, y otros métodos superficiales (por eras, por bancales o por surcos poco profundos).

RENDIMIENTO

El rendimiento promedio del sorgo varía ampliamente desde promedios altos de producción por país de 4.7 ton/ha en Estados Unidos y Argentina, y 4.3 ton/ha en China, a niveles de producción de 0.6 ton/ha en Sudán y 1.0 a 1.5 ton/ha en India, Burkina Faso o Etiopía. Las variedades modernas de alto rendimiento se cultivan con espigas que sobresalen bastante del dosel para cosecharlas con maquinaria. En fincas pequeñas en países en desarrollo, la cosecha se hace en su mayor parte a mano cortando las panículas y poniéndolas en sacos y llevándolos al espacio de trilla para dejarlas secar hasta que el contenido de humedad sea de 12-13 %. El grano de sorgo solamente se puede trillar cuando la humedad de la semilla esté entre el 20 y 25 % (o menos), independientemente de que la semilla fisiológicamente esté madura pero tenga una humedad mayor (alrededor del 30 a 35 %). Algunos híbridos tienen una panícula de tipo abierto y suelto, que acelera el secado en campo. En la India y para producción de forraje, el sorgo dulce se cosecha generalmente en la etapa de grano lechoso y cuando el contenido de sacarosa se encuentra entre 17 y 18 %. El sorgo dulce tiene un rendimiento entre 35 y 45 toneladas por hectárea de biomasa fresca, y el rendimiento de grano está en el rango de 1 a 1.5 ton/ha (Rao *et al.,* 2008). La productividad del sorgo dulce sembrado después de la estación de lluvias (octubre-noviembre) es inferior a la del sorgo de estación de lluvias de la India (en un 30-35 %) porque el día es más corto y la temperatura es más baja por la noche.

El rendimiento promedio en condiciones de riego es de 5 a 7 ton/ha, mientras que el rendimiento potencial supera las 12 ton/ha; considerablemente menor que un cultivo equiparable como el maíz. Los rendimientos promedio de los granos de sorgo en los campos de agricultores en África son muy bajos, de 0.5-0.9 ton/ha, porque el sorgo a menudo se siembra en áreas marginales con pocas prácticas de manejo y con variedades no mejoradas. Los campos para forraje de variedades híbridas y polinización abierta pueden alcanzar las 25 ton/ha de materia seca.

El índice de cosecha del sorgo varía más que el del maíz, principalmente por el ahijamiento variable del sorgo. Generalmente, los valores de HI reportados para el sorgo son con más frecuencia bajos, entre 0.3 y 0.4 (p. ej., Muchow, 1989; Steiner, 1986). Sin embargo, se han observado HI superiores (>0.5), y aparentemente son el resultado de inhibición del crecimiento vegetativo (retoños) por déficit de agua, lo cual difiere entre variedades (Hsiao *et al.,* 1976). Un HI alto también se puede deducir de los datos de Garrity *et al.* 1982, Prihar y Stewart, 1991.

BIBLIOGRAFÍA

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Fereres, E., Acevedo, E., Henderson, D. W. y Hsiao, T. C. 1978. Seasonal changes in water potential and turgor maintenance in sorghum and maize under water stress. Physiol. *Plantarum* 44:261-267.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Garrity, D.P., Watts, D.G., Sullivan, C.Y. y Gilley, J.R. 1982. Moisture deficits and grain sorghum performance: evapotranspiration-yield relationships. Agronomy Journal Vol. 74, n.º 5, págs. 815-820.

Hsiao, T. C., E. Fereres, E. Acevedo y D. W. Henderson. 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. págs. 281-305. En: Lange, O.L., Kappen, L. y Schulze, E.D., eds. Ecological studies. *Analysis and synthesis,* Volumen 19, *Water and plant life.* Berlín, Springer-Verlag.

Krieg, D. y Lascano, R. 1990. Sorghum. En: Steward, B.A. y Nielsen, D.R., eds. Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy Monograph n.º. 30. Madison, Wisconsin, EE. UU. *Sociedad Americana de Agronomía.* (Monografía)

Morgan, P. W., Williams Guy, L. y Pao, C-I. 1987. Genetic regulation of development in sorghum bicolor. III. Asynchrony of thermoperiods with photoperiods promotes floral initiation. *Plant Physiology* 83:448-450.

Muchow, R. C. 1989. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment. I. Yield potential. *Field Crops Research* 20:191-205.

Peacock, J. M. 1982. *Response and tolerance of sorghum to temperature stress.* Págs. 143-160. En: *Sorghum in the eighties.* Proceedings of the International symposium on sorghum. ICRISAT, 2-7 de noviembre de 1981. Patancheru, A.P., India.

Prihar, S.S. y Stewart, B.A. 1991. Sorghum harvest index in relation to plant size, environment and cultivar. *Agronomy Journal* 83: 603-608.

Quinby, J. R., Hesketh, J. D. y Voigt, R. L. 1973. Influence of temperature and photoperiod on floral initiation and leaf number in sorghum. *Crop Science* 13: 243-246.

Rao, S. S., Seetharama, N., Dayakar Rao, B., Ratnavathi, C. V., y Reddy, Ch. S. 2008. Sweet sorghum - A potential energy crop for bio-fuel production in India. En: Reddy, B.V.S., Ramesh, S., Ashok Kumar, A. y Gowda, C.L.L. eds. *Sorghum improvement in the new millennium,* págs. 281-288.

Steiner, J. L. 1986. Dryland grain sorghum water use, light interception, and growth responses to planting geometry. *Agronomy Journal* 78:720-726.

Vanderlip, R. L. y Reeves, H. E. 1972. Growth stages of sorghum [Sorghum bicolor, (L.) Moench.]. *Agronomy Journal* 64:13-17.

Algodón

AUTOR PRINCIPAL
Steven R. Evett
(USDA-ARS, Laboratorio de Investigación en Conservación y Producción, Bushland, Texas, EE. UU.)

AUTORES COLABORADORES
R. Louis Baumhardt,
Terry A. Howell
(USDA-ARS, Laboratorio de Investigación en Conservación y Producción, Bushland, Texas, EE. UU.)
Nazar M. Ibragimov
(CRI, Tashkent, Uzbekistán)
Douglas J. Hunsaker
(USDA-ARS, Laboratorio de Investigación en Conservación y Producción, Maricopa, Arizona EE. UU.)

AGRADECIMIENTOS
Agradecemos el valioso apoyo del Contrato de Investigación N.º 11186/FAO de la IAEA y al Programa del USDA-ARS en el Acuífero Ogallala, un consorcio entre USDA-ARS, la Universidad del Estado de Kansas, Texas AgriLife Research, Texas AgriLife Extension Service, la Universidad Tecnológica de Texas, y la Universidad A&M del Oeste de Texas. Theodore C. Hsiao *(Universidad de California, Davis, EE. UU.)* brindó una valiosa ayuda.

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Marie-Therese Abi Saab *(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad, LARI, Fanar, Líbano),*

Steven R. Evett y Terry A. Howell
(USDA-ARS, Laboratorio de Investigación en Conservación y Producción , Bushland, Texas, EE. UU.),

Hamid J. Farahani
(anteriormente ICARDA, Alepo, Siria; en la actualidad Universidad de Clemson, Clemson, Carolina del Sur, EE. UU.),

Margarita García-Vila
(Universidad de Córdoba, España),

Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.)

Riza Kanber y Mustapha Unlu
(Universidad de Cukurova, Adana, Turquía),

Fadi Karam
(anteriormente, LARI, Tal Amara, Líbano; en la actualidad, ICARDA, Alepo, Siria),

Francisco Orgaz
(IAS-CSIC, Córdoba, España),
Theib Y. Oweis
(ICARDA, Alepo, Siria),
Eline Vanuytrecht
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica)

Algodón

DESCRIPCIÓN GENERAL

El algodón es una planta leñosa, perenne e indeterminada que sigue el proceso de fotosíntesis de las plantas C_3. Se cultiva en climas cálidos y en algunos climas templados por su fibra, al igual que por sus semillas, las cuales tienen un alto contenido de aceite y proteína. De las cuatro especies de algodón cultivadas, la predominante en términos de producción es la *Gossypium hirsutum,* también conocida como algodón de tierras altas, la cual se maneja anualmente. También se produce el algodón (Pima) de fibras extra largas *(Gossypium barbadense)*, pero representa <10 % de los cultivos. Desde 1980, la producción total de algodón ha aumentado en un 60 %, mientras que el área cosechada a nivel global ha permanecido estable (Figura 1). En 2007, la producción mundial fue de 24.2 millones de toneladas de semillas y fibra. El algodón se cultiva en todo el mundo, desde los trópicos hasta latitudes de 42° (Uzbekistán). Los principales productores son China (31 %), India (20 %), Pakistán y Estados Unidos (cada uno con 10 %), Uzbekistán (6 %), Brasil (5 %) y Turquía (3 %) (FAO, 2011). Véase en la Figura 2 un mapa de las áreas productoras.

El cultivo exitoso del algodón requiere un largo período sin heladas, mucha radiación solar, temperaturas cálidas y precipitación o riego moderado, usualmente de 600 a 1200 mm. Debido a su tolerancia a la salinidad y la sequía, el algodón se adapta bien en regiones áridas y semiáridas. Aunque la producción de secano es perfectamente posible, los rendimientos óptimos y consistentes generalmente se obtienen con el riego.

El algodón se siembra con frecuencia como cultivo comercial principal; es decir, como monocultivo que se modifica únicamente cuando las condiciones meteorológicas inclementes –como el granizo tardío– obligan el establecimiento de un cultivo alternativo. El cultivo que se selecciona para esta rotación imprevista usualmente es de rápida maduración y presenta tolerancias compatibles a los herbicidas, como es el caso de la soya/soja y el girasol de ciclos cortos. Al igual que la mayoría de los monocultivos, el manejo de enfermedades, insectos y malas hierbas usualmente resulta problemático para el algodón (como se indicó para los sistemas de cultivo en secano, Baumhardt y Salinas-García, 2006). Los inóculos de verticiliosis y la pudrición negra de la raíz, así como los nematodos, aumentan en el suelo cuando la planta húesped del algodón se cultiva en repetidas ocasiones. Asimismo, se pueden desarrollar poblaciones de malas hierbas resistentes o adaptadas a los herbicidas comerciales comunes. El problema se puede mitigar mediante la rotación de cultivos no húesped para el patógeno o de cultivos que sean resistentes a los herbicidas necesarios para controlar la especie de mala hierba. Dentro de los cultivos que sirven para este propósito se incluyen el maíz, el sorgo, la alfalfa y el trigo. En China, más de 1.4 millones de hectáreas de algodón son de cultivo asociado con el trigo de invierno, donde el algodón se siembra en abril durante la fase reproductiva del trigo, en franjas estrechas que se dejan vacías entre los surcos del trigo. El retraso en el desarrollo de la planta y la formación del fruto bajo este sistema ha estado relacionado con las bajas temperaturas que experimentan las plántulas que reciben sombra del trigo (Zhang *et al.,* 2008).

FIGURA 1 Área mundial cosechada de algodón y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011)

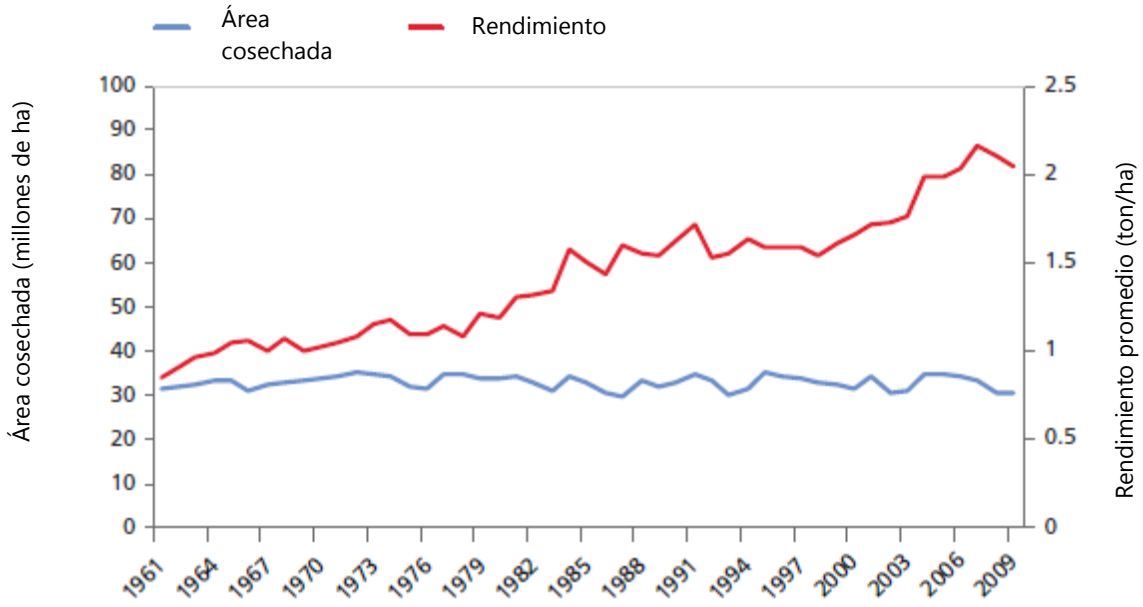
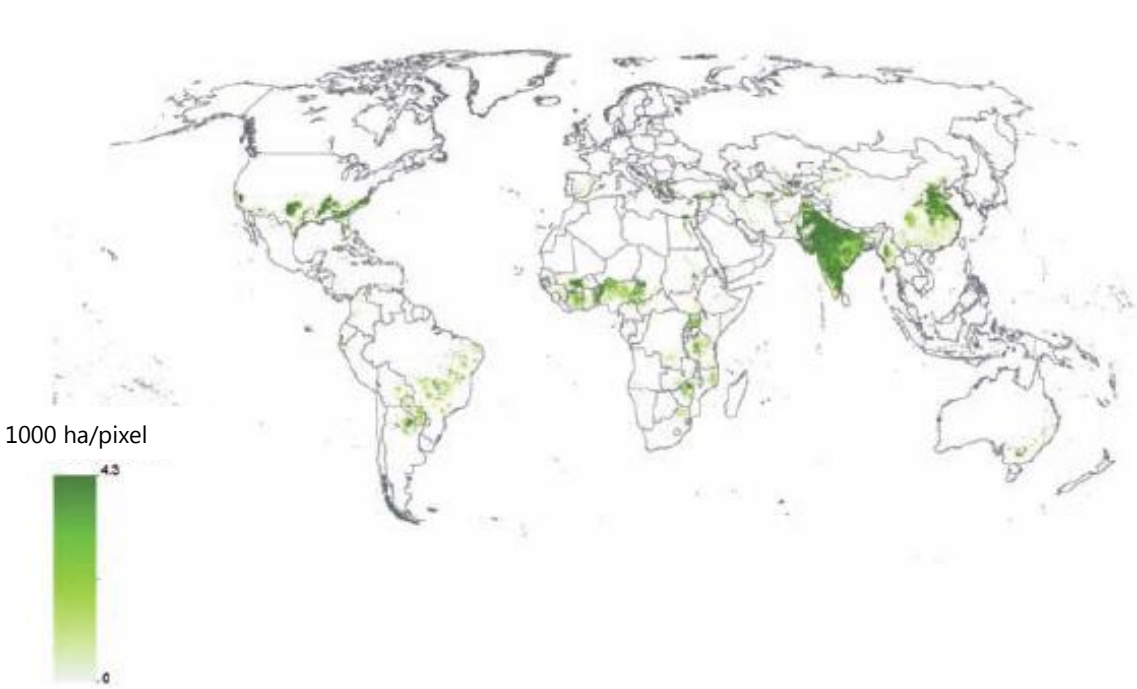


FIGURA 2 Área cosechada de algodón (GAEZ, 2011)



Año de referencia 2000

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

La siembra generalmente comienza cuando la temperatura del suelo alcanza los 16 °C a 0.10 m de profundidad en zonas de clima más templado, o 18 °C a 0.20 m de profundidad en regiones más cálidas. Aunque las semillas germinan incluso a 12-14 °C, la temperatura óptima del aire varía entre 31 a 33 °C, pero la temperatura máxima que limita la germinación es de 40 a 42 °C. La emergencia es óptima a 32-34 °C. Las enfermedades micóticas ocurren con frecuencia cuando se retrasa la germinación. La distancia entre los surcos es frecuentemente de 1.00 m; sin embargo, espaciamientos hasta de 0.50 m se han usado con éxito. Espaciamiento de 0.76 m es común en algunas áreas. En varios estudios, un espaciamiento menor entre los surcos produjo un rendimiento ligeramente mayor debido a que la cobertura del dosel y la interceptación de radiación se completaron tempranamente. Tradicionalmente, la anchura de los surcos está determinada por la labranza y los equipos de cosecha, en la mayoría de los casos. Las densidades de plantación varían de 6 a 20 plantas/m^2. El algodón a menudo se siembra en camas porque promueven el drenaje y el calentamiento del suelo. En algunas regiones semiáridas, el algodón se siembra en un patrón de calles alternas (se siembran dos surcos, uno al lado del otro, y luego uno o dos surcos se omiten o dejan sin sembrar de manera intencional).

Bajo óptimas condiciones, la cantidad de días para emerger, desarrollar yemas florales, empezar la floración, abrir las cápsulas y alcanzar el período de cosecha pueden variar considerablemente (Tabla 1). Sin embargo, se presenta mayor consistencia en climas cálidos. El período completo de crecimiento varía entre 150 a 180 días cuando la temperatura del suelo es >16 °C. Debido a que el algodón es indeterminado, las etapas de crecimiento del cultivo se superponen, lo que dificulta su diferenciación. El crecimiento vegetativo temprano depende de la temperatura, cuyo máximo diario debe ser al menos de 20 °C, aunque 30 °C es mejor. El primer cuadro, o formación de yemas florales, puede ocurrir entre 35 y 50 días después de la siembra, dependiendo de la variedad y la temperatura. El crecimiento vegetativo continúa durante la floración, la cual comienza entre los 55 y 70 días después de la siembra en las variedades comunes, y la floración continúa durante el crecimiento de las cápsulas. Las cápsulas empiezan a madurar y se abren entre 100 y 120 días después de la siembra, o cerca de 50 a 60 días después de la aparición de la primera flor. Para genotipos que van desde muy tempranos a muy tardíos, el intervalo de tiempo hasta que se alcanza el 60 % de apertura de las cápsulas puede variar de 141 a 186 días en siembra temprana, y de 130 a 170 días en siembra tardía (Bange y Milroy, 2004). A medida que la temperatura aumenta, se reducen los tiempos de las etapas de crecimiento, pero casi no se presentan cambios en temperaturas medias >24 °C y poca diferencia en las variedades (Roussopoulos *et al.,* 1998), aunque el desarrollo de variedades tempranas ha complicado esta situación. En días en que las temperaturas medias son similares, pero las amplitudes son diferentes, se presentan tasas de crecimiento diferentes[1].

Las plantas de algodón forman una raíz primaria fuerte, que alcanza casi 3 m de profundidad en suelos fértiles. Los suelos adecuados para el cultivo varían ampliamente, pero los más aptos son suelos francos y arcillosos, profundos, con drenaje adecuado y con buena capacidad de retención de agua. En suelos con capas endurecidas, el subsolado es común para facilitar el drenaje y la profundización de las raíces.

[1]. Significa que los modelos de crecimiento de plantas basados en unidades de calor deben tener en cuenta intervalos de tiempo de <1 día (Roussopoulos *et al.,* 1998; Ng y Loomis, 1984).

TABLA 1 Días de cada etapa de desarrollo según la región de siembra del cultivo.

Emergencia	1.er cuadro	1.era flor	1.era cápsula abierta	Cosecha	Región de siembra del cultivo
5	38	59	116	140	Tifton, Georgia, EE. UU. (31.5°N)
7	45	65	110	152	Sur de Texas, EE. UU. (Ko *et al.* 2009)
10	-	70	115	170	Khorezm, Uzbekistán (41°N), (Sommer *et al.,* 2008)
5-15	35-50	55-70	100-120	150-180	Sur de Texas Altas Llanuras, EE. UU. (Gowda *et al.,* 2007)
9-12				155-181	Texas, EE. UU. (39°N) (Howell *et al.,* 2002)
			138-151		Henan, China (32-36°N) (Zhang *et al.,* 2008)
-	-	60	115	-	Egipto, Pakistán, California EE. UU.
-	-	60	115	-	Yemen

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

Los requerimientos hídricos varían ampliamente dependiendo de la duración del período de crecimiento, clima, variedad, método de riego y metas de producción; pero pueden estar dentro del rango de 700 a 1200 mm. En regiones con precipitación limitada, los rendimientos aumentan de forma lineal con la aplicación de riego de 600 a 900 mm, según la variedad, y siempre que el período de crecimiento dure lo suficiente para permitir el desarrollo completo de las cápsulas y la fibra.

El uso del agua y la productividad del agua (WP) del algodón pueden verse afectados por el método y la cantidad de riego. Varios estudios experimentales en diferentes lugares (Texas, California y Uzbekistán) demostraron que la $WP_{lint/et}$, así como el rendimiento de la fibra, mejoran considerablemente al utilizar riego por goteo en lugar de riego por surcos (p. ej., en un 50 % para la $WP_{lint/ET}$). Los valores de $WP_{lint/ET}$ fueron de 0.15 kg/m^3 a 0.33 kg/m^3. Lo más probable es que la mejora de la $WP_{lint/ET}$ se atribuya al incremento del rendimiento y a la reducción de la evaporación del suelo y la transpiración. La forma en que se lograron estas mejoras se analiza en las siguientes secciones.

El uso del agua (ET) varía de 410 a 780 mm por temporada dependiendo del método de riego (menor para arrastre de suelos para riego por goteo y aplicación de agua con precisión y baja energía (LEPA) en comparación con el riego por surcos) y de cuánto riego deficitario se aplique; pero el rango es similar en varios climas diferentes: 410 a 720 mm y 560 a 780 mm en las altiplanicies del sur de Estados Unidos; de 590 a 780 mm en el Valle Central de California, y de 430 a 740 mm en Uzbekistán (Ayars *et al.,* 1999 ; Colaizzi *et al.,* 2005; Grismer, 2002 ; Howell *et al.,* 2004; Howell *et al.,* 1987; Ibragimov *et al.,* 2007).

RESPUESTA A ESTRESES

El algodón destaca entre los demás cultivos por la extraordinaria dependencia de la relación entre el crecimiento vegetativo/reproductivo del estado hídrico de la planta. Un estado hídrico alto promueve el crecimiento vegetativo y suprime el crecimiento reproductivo. La disponibilidad adecuada de agua es esencial para el crecimiento de la vegetación antes y durante la formación de las yemas florales. Por el contrario, el suministro excesivo de agua durante la floración, el crecimiento de las cápsulas y el desarrollo de la fibra redundará en un crecimiento vegetativo rápido y continuo, y la caída de flores tempranas y cápsulas jóvenes. De manera alterna, si el estrés hídrico en la etapa reproductiva es lo suficientemente severo, también ocasionará la abscisión de flores y cápsulas. La precipitación o riego abundantes hacia el final de la estación pueden promover un crecimiento de vegetación no deseado a expensas de la maduración de las cápsulas y el desarrollo de la fibra. Si el agua es tan limitada que restringe notablemente el crecimiento foliar, pero no lo suficiente para ocasionar la abscisión de las cápsulas, el algodón pasará a una fase de recorte. Durante esta fase, las cápsulas existentes maduran, pero casi ninguna flor o cápsula se desarrolla. Después de que las cápsulas existentes maduran, la planta reanudará la producción de flores y cápsulas, especialmente si el agua vuelve a ser abundante. Por tanto, el manejo de riego de los cultivos de algodón debe lograr un cuidadoso equilibrio en diferentes momentos.

Los requerimientos de fertilizante variarán según el rendimiento del cultivo y los objetivos de biomasa aérea, las cuales usualmente son mayores bajo riego, y se encuentran dentro del rango de 100 a 180 kg N/ha, 20 a 60 kg P/ha y 50 a 80 kg K/ha. Por lo general, los fertilizantes se aplican al inicio del período de crecimiento y hasta la floración. El exceso de nitrógeno promueve un crecimiento vegetativo exagerado, lo cual posiblemente exija la aplicación de reguladores de crecimiento (p. ej., cloruro de mepiquat). La aplicación de nitrógeno generalmente se da acorde a las metas de rendimiento de fibra y se ve influenciada por la capacidad de riego y la duración del período de crecimiento. La tasa de aplicación de N varía de 0.1 a 0.3 kg N/ ha por kg/ha de fibra de algodón, donde la menor tasa se aplica a las metas de rendimiento mayores de 500 kg/ha. Las tasas de fósforo son generalmente de 33 % de N; y cuando sea necesario, K es usualmente 75 % de N para los primeros 500 kg/ha de rendimiento de fibra y 33 % en lo sucesivo. El potasio es importante para producir fibra de buena calidad. Las exigencias de calcio son altas y la aplicación de boro es necesaria en algunos suelos.

La mayoría de los efectos de la temperatura sobre el algodón ya se analizaron en la sección Crecimiento y Desarrollo. El algodón es sensible a las temperaturas extremas, particularmente la temperatura del suelo. Las bajas temperaturas impiden la formación de fruto y las temperaturas frías del suelo inhiben la emergencia y el crecimiento de las raíces. Aplicar agua en exceso al inicio de la estación puede enfriar el suelo e impedir el crecimiento, así como en el suelo saturado. El algodón también es muy sensible a las heladas. Las variaciones en la tolerancia de temperatura de diferentes procesos en la planta de algodón y con diferentes variedades, sumadas a los efectos adversos de las oscilaciones y las condiciones extremas de la temperatura diurna, han llevado a que muchos estudios cuestionen si el modelado del crecimiento del algodón se debe basar en grados día acumulados (Bange y Milroy, *2004;* Bradow y Davidonis, 2000; Constable, 1976; Sommer *et al.,* 2008). Por ejemplo, la asimilación de CO_2 varía según la actividad enzimática y puede disminuir a medida que las temperaturas del aire en las hojas o del dosel exceden los 35 °C.

Por el contrario, cuando las temperaturas nocturnas exceden los 21 °C, las tasas de respiración aumentan notablemente, y durante las noches cálidas, una cantidad considerable de las sustancias fotosintetizadas se pierde con la respiración. Las condiciones de altas temperaturas durante el día y la noche limitan la efectividad de los GDD para cuantificar el desarrollo de la planta y las cápsulas. Las temperaturas diurnas menos extremas y las noches más frías durante la floración y la formación de cápsulas (las cuales corresponden al mes de agosto en la parte norte de las altiplanicies de Texas y en Kansas) pueden explicar la mayor rapidez de maduración de los cultivos, en términos de GDD

observados durante la parte final del período de crecimiento, en comparación con regiones meridionales de cultivo más cálidas (Alam *et al.,* 2008). No obstante, la mayoría de las pruebas con *AquaCrop* basadas en los GDD mostraron que el modelo realizó una simulación bastante acertada del crecimiento del algodón y su productividad. El efecto de la duración del día en la etapa de floración depende de la temperatura. La floración se limita en temperaturas diurnas de <20 °C y temperaturas nocturnas de <12 °C o en temperaturas diurnas de >40 °C con temperaturas nocturnas de >27 °C. El pH del suelo de 7 a 8 se considera óptimo, y la tolerancia a la salinidad es alta, donde el rendimiento disminuye cuando se alcanzan valores de EC_e >9 dS/m, y el rendimiento se acerca a cero a 27 dS/m.

PRÁCTICA DE RIEGO

El riego temprano en regiones templadas debe lograr un equilibrio entre asegurar la humedad adecuada del suelo y minimizar el enfriamiento del suelo que impide el crecimiento de la planta. Por este motivo, se puede practicar el riego antes de la siembra a fin de llenar el perfil lo suficiente para permitir el enraizamiento profundo entre la emergencia y la floración, seguido de un retraso en el riego antes y después de la siembra hasta que el suelo se caliente lo suficiente para la germinación, profundización de las raíces y crecimiento inicial.

Debido a que la relación entre el crecimiento vegetativo y reproductivo del algodón es sensible al estado hídrico de la planta, el riego debe satisfacer la demanda del cultivo durante la fase vegetativa (cuando el crecimiento no está limitado por las bajas temperaturas) para acelerar el desarrollo del dosel, pero se debe controlar a un nivel deficitario leve cuando del dosel se acerca al cierre. A medida que se aproxima la cosecha, es posible que se necesite un mayor déficit para promover el corte, especialmente cuando el ciclo biológico de la variedad es considerablemente más largo que la estación de temperatura favorable. El estado hídrico de la planta afecta la interacción entre el crecimiento vegetativo y reproductivo en esta especie indeterminada, hasta el punto de que el período de crecimiento se prolonga o acorta dependiendo del manejo del riego y la precipitación.

El algodón se cultiva utilizando prácticamente todos los métodos de riego. El riego por surcos se utiliza ampliamente en todo el mundo, pero en algunas regiones se está sustituyendo por el riego con pivote central (75 % del área con riego en el Texas Panhandle) y el riego por goteo. Los sistemas que evitan humedecer toda la superficie del suelo pueden redundar en lechos de siembra más cálidos al inicio de la estación y mejor desarrollo temprano de las raíces y crecimiento de la planta (Colaizzi *et al.,* 2006; Alam *et al.,* 2008). Tales sistemas incluyen riego subterráneo por goteo y sistemas de aplicación de agua con precisión y baja energía (LEPA) en sistemas móviles de riego cuando el agua se aplica de manera intercalada. El calendario para riego completo puede seguir las guías generales, pero el riego deficitario requerirá ajustes para las condiciones locales (Howell *et al.,* 2004; Hunsaker, 1999; Hunsaker *et al.,* 2005).

RENDIMIENTO

El rendimiento del algodón se compone de fibra y semillas, donde la fibra generalmente constituye del 37 al 39 %. El contenido de aceite de la semilla de algodón es aproximadamente del 18 % del peso, pero quizá únicamente el 16 % es recuperable. El aceite de la semilla de algodón se utiliza ampliamente para cocinar después de refinarlo para retirar el gosipol. La harina de la semilla de algodón, el producto final después del prensado del aceite, contiene aproximadamente 40 % de proteína, lo cual la convierte en un fertilizante orgánico o pienso valiosos.

Generalmente, la cosecha tiene lugar incluso si aún hay cápsulas inmaduras en la planta. Es usual

que la cosecha por medio de cosechadoras mecanizadas de algodón se realice una vez y, en ocasiones, dos veces. Cuando la cosecha es manual, es posible que ocurran de dos a cuatro cosechas o más durante un período de seis semanas. El rendimiento de la fibra varía de 0.65 a 1.3 ton/ha para riego por superficie y por aspersión, y de 0.9 a 1.6 ton/ha para riego por goteo en las altiplanicies meridionales de Estados Unidos, dependiendo del nivel de riego, en comparación con un promedio de 1.3 ton/ha para la variedad de tierras altas y 1.1 ton/ha para Pima en el Valle Central de California. Estos valores contrastan con los rendimientos de fibra entre 1 a 1.7 ton/ha en las regiones subhúmedas de Alabama, donde el riego es suplementario (Balkcom *et al.,* 2006). El exceso de riego (> 700 mm o riego total + precipitación > 900 mm) ocasiona disminuciones en el rendimiento. Cultivar el algodón en surcos estrechos (< 0.76 m) puede aumentar los rendimientos entre un 10 a 30 % en muchos ambientes. Los niveles de rendimiento en otras regiones del mundo donde se produce algodón varían de 0.5 a 1.9 ton/ha. El impacto del riego y los regímenes hídricos puede obedecer, al menos en parte, a los cambios en el índice de cosecha, el cual aumenta (hasta 0.46 para el rendimiento de la fibra más la semilla; García-Vila *et al.,* 2009) por un déficit hídrico suficiente para inhibir el crecimiento vegetativo, pero insuficiente para suprimir considerablemente la fotosíntesis por área del dosel. El rendimiento también se puede reducir por un alto estado hídrico de la planta, el cual estimula el exceso de crecimiento y producción de biomasa (hasta HI = 0.35 con biomasa >12 ton/ha). Si el déficit hídrico restringe el crecimiento vegetativo y el desarrollo del dosel desde las primeras etapas, el dosel resultará demasiado escasa y capturará un nivel de radiación solar incidene inferior al necesario para el crecimiento y producción. En ese caso, la producción de biomasa se podría reducir lo suficiente como para redundar en un menor rendimiento, a pesar de presentar un HI alto. *AquaCrop* se diseñó para dar cuenta de los efectos matizados del estado hídrico sobre el HI y el rendimiento.

Los casos de $WP_{lint/ET}$ más alta bajo riego por goteo que se mencionaron anteriormente obedecen quizá a los efectos combinados de la reducción de la evaporación del suelo y un déficit más controlado. El riego por superficie, generalmente con un mínimo de 30 a 40 mm aplicados periódicamente, proporciona suficiente agua para permitir un crecimiento vegetativo favorable al menos por un par de días, mientras que el riego por goteo se puede manejar para mantener la planta dentro de un rango más controlado de déficit hídrico leve.

BIBLIOGRAFÍA

Alam, M., Colaizzi, P.D., Rogers, D.H. y Shaw, L. K. 2008. *Irrigating cotton in a thermally-limited area.* Proceedings 2008 Irrigation Show and Conference, 2-4 de nov., 2008, Anaheim, California.

Ayars, J.E., Phene, C.J., Hutmacher, R.B., Davis, K.R., Schoneman, R.A., Vail, S.S. y Mead, R.M. 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory.

Agricultural Water Management, Vol. 42, págs. 1-27.

Balkcom, K.S., Reeves, D.W., Shaw, J.N., Burmester, C.H. y Curtisl, L.M. 2006. Cotton yield and fibre quality from irrigated tillage systems in the Tennessee valley. *Agronomy Journal* 98:596-602.

Bange, M.P. y Milroy, S.P. 2004. Impact of short term exposure to cold night temperatures on early development of cotton *(Gossypium hirsutum* L.). *Australian Journal of* Agricultural *Research* 55(6): 655-664.

Baumhardt, R. Louis y Jaime Salinas-García. 2006. Mexico and the US Southern Great Plains. págs. 341-364. En: Peterson, G.A., Unger, P.W. y Payne, W.A., eds. Dryland Agriculture. Segunda edición. Madison, Wisc., Monografía de Agronomía n.º 23. ASA, CSSA y SSSA.

Bradow, J.M. y Davidonis, G.H. 2000. Quantitation of fibre quality and the cotton production-processing interface: A physiologists perspective. *Journal of Cotton Science* 4:34-64.

Colaizzi, P.D., Evett, S.R. y Howell, T.A. 2005. *Cotton production with SDI, LEPA, and spray irrigation in a thermally limited climate.* En: *Conference Proceedings Emerging Irrigation Technology.* Phoenix, Arizona, 6-8 de noviembre de 2005, (CD ROM), The Irrigation Association, págs. 15-30.

Colaizzi, P.D., Evett, S.R. y Howell, T. A. 2006. *Near-surface soil water and temperature for SDI, LEPA, and spray irrigation.* En: Proceedings Technical Conference, 27th Annual International Irrigation Show, San Antonio, Texas, 5-7 de noviembre de 2006. Irrigation Association.

Constable, G.A. 1976. Temperature effects on the early field development of cotton. *Australian Journal of Experimental Agriculture Animal Husbandry* 16:905-910.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.
GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

García-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F. y Steduto, P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with *AquaCrop. Agronomy Journal* 101: 477-487.

Gowda, P.H., Baumhardt, R.L., Esparza, A.M., Marek, T.H. y Howell, T.A. 2007. Suitability of cotton as an alternative crop in the Ogallala Aquifer Region. *Agronomy Journal* 99: 1397-1403.

Grismer, M.E. 2002. Regional cotton line yield, ET_c , and water value in Arizona and California. *Agric. Water Manage.*

54, 227-242.

Howell, T.A., Meron, M., Davis, K.R., Phene, C.J. y Yamada, H. 1987. Water management of trickle and furrow irrigated narrow row cotton in the San Joaquin Valley. *Appl. Eng. Agric.* 3, 222-227.

Howell, T.A., Evett, S.R., Tolk, J.A. y Schneider, A.D. 2002. *Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated and dryland cotton on the northern Texas High Plains.* En: C.M Burt y S.S. Anderson (eds.) Proceedings 2002 USCID/EWRI Conference. Energy, Climate, Environment and Water - Issues and Opportunities for Irrigation and Drainage. US Committee on Irrigation and Drainage. págs. 321-339.

Howell, T.A., Evett, S.R., Tolk, J.A. y Schneider, A.D. 2004. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas High Plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (ASCE) 130(4):277-285.

Hunsaker, D.J. 1999. Basal crop coefficients and water use for early maturity cotton. Trad. *ASAE* 42(4): 927-936.

Hunsaker, D.J., Barnes, E.M., Clarke, T.R., Fitzgerald, G.J. y G.J. Pinter, G.J., Jr. 2005. Cotton irrigation scheduling using remotely sensed and FAO-56 basal crop coefficients. Trad. *ASAE* 48(4):1395 1407.

Ibragimov, Nazirbay, Evett, S. R., Esanbekov, Y., Kamilov, B.S., Mirzaev, L. y Lamers, John P.A. 2007. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation. *Agricultural Water Management* 90(2007):112-120.

Ko, J., Piccinni, G., Marek, T. y Howell, T. 2009. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (K_c) of cotton and wheat. *Agricultural Water Management.* 96:1691-1697.

Martin, E.C., Stephens, W., Wiedenfeld, R., Bittenbender, H.C., Beasly Jr., J.P., Moore, J.M., Neibling, H. y Gallian,

J.J. 2007. Chapter 9, Sugar, oil, and fibre. págs. 279-335. En: Lascano, R.J. y Sojka, R.E., eds. *Irrigation of Agricultural Crops,* Segunda edición, Madison, Wisconsin, EE. UU., ASA-CSSA-SSSA.

Ng, N., y Loomis, R.S. 1984. Simulation of growth and yield of the potato crop. Wageningen, Países Bajos,

PUDOC.

Roussopoulos, D., Liakatas, A. y Whittington, W.J. 1998. Controlled-temperature effects on cotton growth and development. *Journal Agricultural Science* 130:451-462.

Sommer, R., Kienzler, K., Conrad, C., Ibragimov, N., Lamers, J., Martius, C. y Vlek, P. 2008. Evaluation of the CropSyst model for simulating the potential yield of cotton. *Agronomy and Sustainable Development* 28:345-354. DOI:

10.1051/agro:2008008.

Zhang, L., van der Werf, W., Zhang, S., Li, B. y Spiertz, J.H.J. 2008. Temperature-mediated developmental delay may limit yield of cotton in relay intercrops with wheat. *Field Crops Research* 106:258-268.

Girasol

AUTORES PRINCIPALES
Margarita García-Vila *(Universidad de Córdoba, España)*
Elias Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)

AUTORES COLABORADORES
M. Henar Prieto
(SIA, Junta de Extremadura, Badajoz, España),
Carmen Ruz
(IAS-CSIC, Córdoba, España),
Rossella Albrizio
(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad CNR-ISAFOM, Ercolano, Italia),
Mladen Todorovic *(CIHEAM-IAMB, Bari, Italia)*
M. Auxiliadora Soriano *(Universidad de Córdoba, España).*

AGRADECIMIENTOS
Theodore C. Hsiao *(Universidad de California, Davis, EE. UU.)*

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Marie-Therese Abi Saab
(Anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad LARI Fanar, Líbano),
Rossella Albrizio
(anteriormente CIHEAM-IAMB, Bari, Italia; en la actualidad CNR-ISAFOM, Ercolano, Italia),
Carmen Giménez *(Universidad de Córdoba, Córdoba, España),*
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.),
M. Henar Prieto *(SIA, Junta de Extremadura, Badajoz, España),*
Claudio Stockle
(Universidad del Estado de Washington, Washington, EE. UU.),
Mladen Todorovic
(CIHEAM-IAMB, Bari, Italia),
Ljubomir Zivotic
(CIHEAM-IAMB, Bari, Italia)

Girasol

DESCRIPCIÓN GENERAL

El girasol *(Helianthus annuus L.)* es una planta anual que se originó en América Central y Norteamérica, y ahora se cultiva ampliamente en todo el mundo. Dentro de los cultivos oleaginosos, el girasol es el quinto cultivo anual más cultivado con 23.7 millones de ha en 2009, después de la soya/soja, la colza, el algodón y el maní *(FAO, 2011*). El área del girasol aumentó considerablemente después de la introducción de los híbridos a inicios de la década de 1970; y desde entonces, el rendimiento promedio ha aumentado de forma moderada (Figura 1). La producción mundial de aceite de girasol (13 millones de toneladas) representa cerca del 9 % de la producción total de aceite a nivel global, ocupando el cuarto puesto después del aceite de palma (30 %), soya/soja (26 %) y colza (15 %).

El girasol se cultiva en regiones áridas y semiáridas bajo condiciones de riego o secano; y en zonas templadas, bajo condiciones de secano. Los principales países productores son la Federación de Rusia, Ucrania, Argentina, China, Francia, Estados Unidos y Hungría, en ese orden (véanse en la Figura 2 las áreas cosechadas). Sembrar el girasol en rotación con otros cultivos es muy importante para la sostenibilidad del sistema de cultivo. De hecho, el girasol se puede utilizar como cultivo "carroñero" posterior a cultivos de raíces poco profundas, dado que su sistema de raíces profundas puede recuperar parte del nitrógeno que se aplicó al cultivo anterior y que fue lixiviado por debajo de su zona radicular. El girasol también puede aprovechar el agua residual que los cultivos previos dejaron en el subsuelo (Fereres *et al.,* 1993). Además, debido a que su ciclo de crecimiento es más corto, en comparación con muchos otros cultivos de verano, el girasol es una opción atractiva para doble cultivo. Dada su alta capacidad de extracción de agua, la rotación del girasol puede ser importante en lugares con altas probabilidades de reposición anual de humedad del suelo a profundidad. El girasol generalmente se cultiva en rotaciones de 3 a 4 años (lo que reduce la probabilidad de que se presenten enfermedades) con cereales (p. ej., trigo, maíz, sorgo), soya/soja y fríjoles o judías.

FIGURA 1 Área mundial cosechada de girasol y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

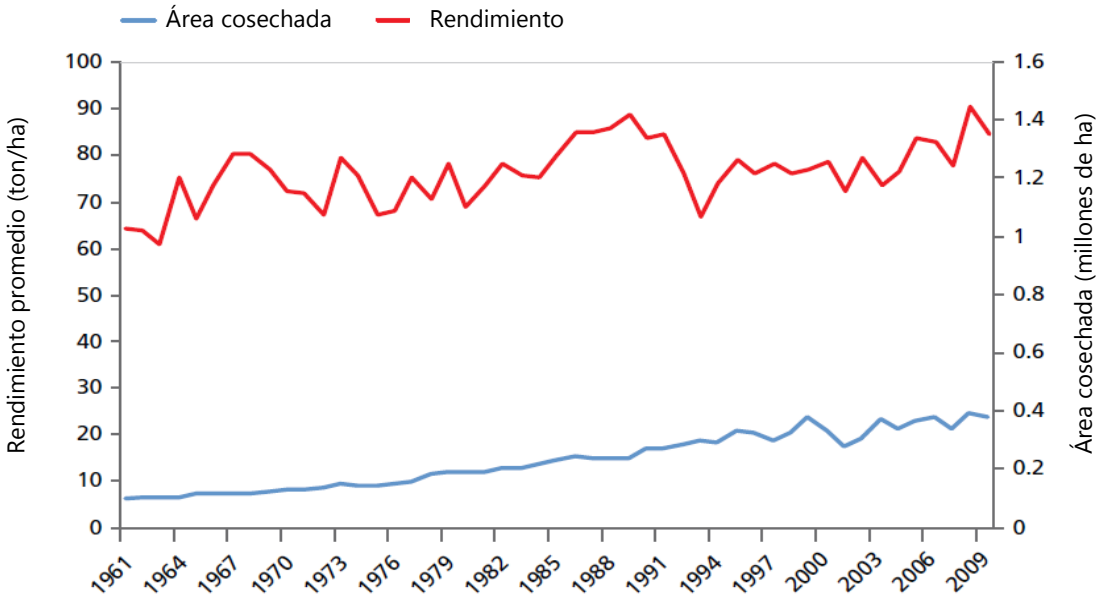
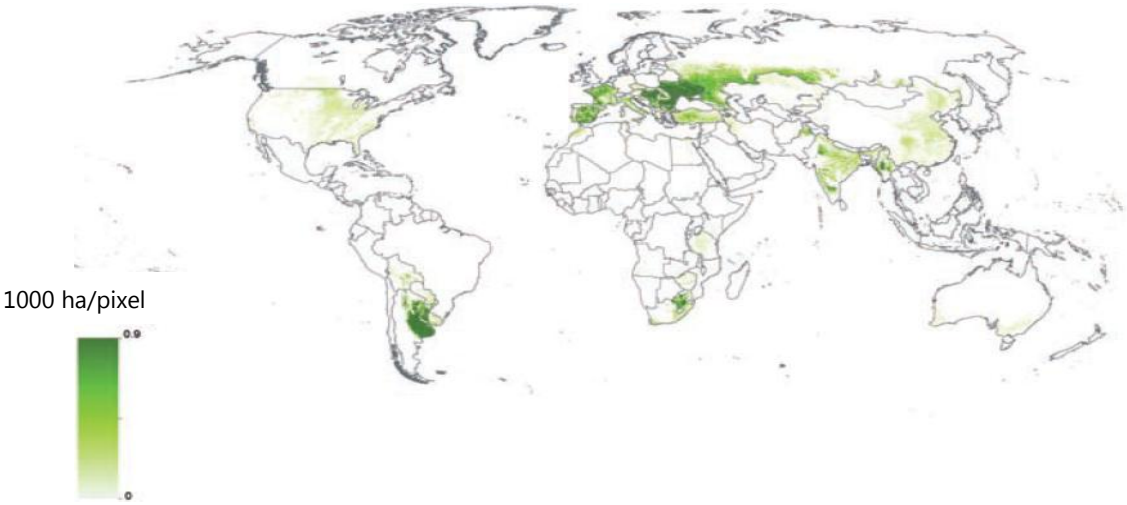


FIGURA 2 Área cosechada del girasol (GAEZ, 2011).



Año de referencia 2000

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

Aunque el girasol era originalmente un cultivo de verano, se puede sembrar en períodos diversos (una vez que los suelos alcanzan una temperatura de 7-9 °C), debido a su rápido crecimiento a temperaturas relativamente bajas; la eficiente captación de radiación fotosintética debido a su habilidad de seguir los rayos solares; y la maduración temprana de la mayoría de las variedades. En regiones de clima templado con inviernos suaves se pueden obtener altos rendimientos y porcentajes de aceite si se cultiva temprano, antes de que llegue la primavera (Gimeno *et al.,* 1989). Las fechas habituales de siembra en ambientes fríos varían entre inicios hasta finales de la primavera. En cultivo doble, siempre es aconsejable sembrar lo más pronto que sea posible después de cosechar el primer cultivo para minimizar los riesgos (frío, lluvias) al final de la estación. Con las siembras tempranas, una mayor parte del crecimiento se realiza con una demanda evaporativa baja, de modo que la productividad del agua es mayor y se evitan las altas temperaturas de verano durante el llenado de los granos. Sin embargo, el riesgo de perder el cultivo aumenta a medida que la fecha de siembra se dilata, debido a los daños que el frío y las heladas ocasionan a las plántulas, las cuales son muy sensibles hasta la etapa de seis hojas (Villalobos y Ritchie, 1992). Las temperaturas cardinales para el desarrollo del cultivo son: temperatura basal = 4 °C; temperatura óptima = 28 °C y temperatura máxima = 40 °C. El ajuste tentativo de la T_{upper} para el cálculo de los grados día acumulados (GDD) en *AquaCrop* para el girasol es 30 °C; es decir, que los GDD dejan de incrementarse cuando la temperatura aumenta por encima de 30 °C.

La siembra directa normalmente se practica con una profundidad de siembra recomendada de cerca de 5 cm. La densidad de plantas depende de la precipitación, las variedades, la disponibilidad de agua y el manejo de la fertilidad. El girasol es un cultivo de alta plasticidad que presenta rendimientos similares en una amplia gama de poblaciones de plantas. El espaciamiento entre surcos en siembras con disponibilidad limitada de agua es comúnmente mayor que en condiciones de abundancia de agua (75 -100 cm frente a 50-75 cm). Densidades de entre 45 000 y 60 000 plantas/ha son comunes bajo condiciones de secano, mientras que hasta 80 000-100 000 plantas/ha se pueden sembrar con riego. En áreas propensas a enfermedades, las densidades de siembra están dentro de un rango bajo (50 000 a 70 000 plantas/ha) incluso con abundante disponibilidad de agua y nitrógeno para reducir la incidencia de enfermedades y riesgos de encamado. Debido a la gran capacidad de la planta para interceptar la radiación solar, los rendimientos son relativamente insensibles a las variaciones en la densidad de plantas, siempre que en el punto máximo de cobertura del dosel se alcance casi la cobertura completa; y se obtienen rendimientos similares de grano en diversas variaciones de espaciamiento de las plantas por encima de 50 000 plantas/ha.

El intervalo desde la siembra hasta la emergencia varía entre 7 y 30 días. El girasol requiere aproximadamente de 4 a 5 días para emerger cuando se siembra a poca profundidad en suelo cálido, y se demorará varios días más en suelos más fríos o cuando se siembra a mayor profundidad. La temperatura mínima para la germinación puede ser hasta de 3 °C, aunque puede subir hasta 5 o 10 °C dependiendo de las diversas condiciones del campo. El porcentaje máximo de germinación se mantiene de 6 a 23 °C, pero disminuye rápidamente por encima de los 25 °C (Connor y Sadras, 1992). Las plántulas en etapa de cotiledón pueden sobrevivir bajo temperaturas de hasta de -5 °C. Si no se produce la emergencia, es posible que esto conduzca a poblaciones de plantas por debajo de las condiciones óptimas.

El girasol crece rápidamente y produce hojas grandes y ásperas. La tasa de aparición de hojas se ve afectada por la temperatura y el fotoperíodo (Rawson *et al.,* 1984). La temperatura afecta al patrón de crecimiento y el área final de las hojas individuales, en las temperaturas cardinales descritas anteriormente. El tiempo térmico por hoja está entre 20 y 25 °C día, calculado con una temperatura base de 4 °C (Villalobos y Ritchie, 1992). La cobertura del dosel máxima bajo densidades estándar

es alta, entre 90 y 98 %, y se alcanza con bastante rapidez. Esto se debe a que el coeficiente de extinción de luz del dosel del girasol es bastante alto y un índice de área foliar (LAI) de 2 es suficiente para interceptar más del 90 % de la radiación entrante, mientras que un dosel de maíz con un LAI de 2 únicamente intercepta cerca del 70 % de la radiación. Posiblemente, el coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) del girasol, una especie C_3, es considerablemente mayor que el de la mayoría de los otros cultivos C_3, casi el mismo que para el maíz, una especie C_4. Bajo temperaturas casi óptimas, la cobertura del dosel máxima del girasol se alcanza entre 40 y 50 días después de la siembra. En el caso de siembras tempranas en climas fríos, deben pasar de 60 a 70 días antes de que se alcance la cobertura del dosel máxima.

La iniciación de la floración ocurre en las etapas iniciales del ciclo de crecimiento, de 25 a 25 días después de la siembra, y su ocurrencia está controlada predominantemente por el tiempo térmico y el fotoperíodo. La respuesta de los genotipos de girasol al fotoperíodo es variable; la mayoría de ellos muestra una respuesta de día largo para la iniciación floral. Los suministros de agua y N son factores secundarios para determinar el momento de la iniciación floral. Las diferencias en la fecha de madurez de las variedades usualmente están asociadas a cambios en la duración del período vegetativo antes de que el capìtulo sea visible, y períodos más largos generalmente se asocian a una mayor cantidad de hojas por planta. Por consiguiente, la duración del período vegetativo depende de la variedad, la temperatura y el fotoperíodo (Rawson *et al.,* 1984). Cuando el capítulo se ensancha y las dos o tres hojas que subyacen a el capítulo se aproximan a su tamaño final, la antesis se inicia y dura de 8 a 12 días. La cantidad de semillas por capítulo se determina en un período que dura de 30 a 40 días, centrado en la antesis. El efecto posterior a la antesis sobre la cantidad de granos es, en mayor parte, el resultado del aborto de los granos más jóvenes en desarrollo, aparentemente determinado por la cantidad de asimilados disponibles para llenarlos. La senescencia del dosel empieza con las hojas más antiguas justo después de la antesis, pero la parte superior del dosel permanece verde hasta un par de semanas después de la madurez fisiológica.

El girasol tiene un sistema radicular profundo y agresivo que, como se mencionó antes, puede agotar completamente el agua presente en las capas del subsuelo (Bremner *et al.,* 1986; Sadras *et al.,* 1989). La profundidad de las raíces es una de las más altas dentro de los cultivos anuales. Algunos estudios reportan una profundidad de raíces superior a 3 m en suelos de fácil penetración. La profundidad de las raíces depende de la duración del ciclo biológico de la variedad; las variedades de ciclo largo pueden alcanzar 3 m, mientras que el sistema radicular de las variedades de ciclo corto en el mismo suelo no se extenderá más allá de 2.3 m (Giménez y Fereres, 1986). La tasa de profundización de las raíces del girasol también es muy alta, con un promedio de 3.5 cm/día en el estudio mencionado anteriormente. En los suelos muy abiertos de la finca experimental en la Universidad de California, Davis, se observaron tasas evidentes de profundización del girasol aproximadamente de 4.5 cm/día, en un campo donde los sistemas radiculares del maíz y el sorgo alcanzaron una profundidad de cerca de 3 cm/día (Berengena, 1976, sin publicar).

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

La combinación de la duración del ciclo y las diferencias climáticas genera una gran variedad de usos del agua de consumo (ET) por parte del girasol. La ET para variedades de ciclo corto puede ser inferior a 450 mm, mientras que para variedades de ciclo largo, puede superar los 800 mm en algunas situaciones (Giménez y Fereres, 1986). Normalmente se encuentran valores típicos entre 500 y 650 mm. Para tratarse de una especie C_3, el girasol tiene una alta tasa fotosintética, y su eficiencia en el uso del agua transpirada para la producción de biomasa ($WP_{B/ET}$) está entre 2.5 y 3.5 kg/m^3 (25 a 35 kg/ha por mm). La $WP_{B/ET}$ disminuye después de la antesis debido a los altos requerimientos de energía para la biosíntesis de las semillas de girasol con alto contenido de aceite (Villalobos *et al.,* 1996; Steduto *et al.,* 2007).

RESPUESTAS A LOS ESTRESES

Con frecuencia, el girasol se presenta como un cultivo tolerante a la sequía dada su gran capacidad para extraer agua del subsuelo. Los déficits hídricos tienen efectos diferenciales en la expansión de las hojas y la conductancia estomática y, por consiguiente, en la transpiración de los genotipos del girasol (Connor y Jones, 1985; Connor *et al.,* 1985). No se ha observado ningún impacto en la expansión de las hojas hasta que la fracción de agua disponible total (TAW) en la zona radicular disminuye por debajo de 0.85, pero tiene que disminuir por debajo de 0.4 para inducir el cierre estomático. El umbral de la tasa de expansión de las hojas depende de la demanda evaporativa (Sadras *et al.,* 1993). Antes de la antesis, la transpiración depende en gran medida del tamaño del dosel según se ve afectado por el déficit de humedad del suelo; el control estomático desempeña un papel menor. Después de la antesis, las hojas están completamente desarrolladas, y en consecuencia, el control de la transpiración depende más del cierre estomático y el grado de senescencia del dosel. Los períodos de déficit hídrico en cualquier etapa de crecimiento pueden ocasionar senescencia del dosel y posterior reducción del rendimiento de las semillas. Existe variabilidad genética en la respuesta de los genotipos de girasol a los déficits hídricos. Los genotipos de ciclo largo tienen mayor cobertura del dosel y producen más biomasa bajo condiciones de sequía, debido a su habilidad para extraer más agua del subsuelo (Giménez y Fereres, 1986). Además se ha observado que las variedades de girasol adaptadas a climas áridos son menos sensibles al estrés hídrico que las variedades desarrolladas para climas húmedos.

Bajo condiciones de estrés hídrico, el tiempo entre la siembra y la floración permanece relativamente constante, y la iniciación de la inflorescencia también es relativamente insensible al estrés hídrico. No obstante, el desarrollo posterior de la inflorescencia se ve afectado por los déficits hídricos, y el estrés hídrico reduce la cantidad de flores. Por tanto, el período de floración plena es el más sensible a los déficits hídricos, dado que es posible que la cantidad de semillas se vea afectada de manera negativa. El llenado de semillas después de la floración es el segundo período más sensible a los déficits hídricos que reduce el peso de la semilla, la cantidad de semillas (debido al aborto) y el contenido de aceite. En consecuencia, las etapas reproductivas (floración y maduración) son más sensibles al estrés hídrico que las etapas vegetativas. El mantenimiento del área foliar verde y la fotosíntesis después de la antesis es clave, dado que el peso de las semillas y el contenido de aceite se ven fuertemente afectados por la radiación interceptada y la asimilación de carbono durante el llenado de semillas. Durante esta fase, el cierre estomático y la senescencia foliar inciden en el control del estado hídrico de la planta. Por otro lado, se presenta el efecto asociado de la reducción en la asimilación de CO_2. El aporte que el carbono fijado antes de la antesis hace al llenado de granos del girasol puede ser importante bajo condiciones de estrés hídrico después de la antesis. No obstante, el índice de cosecha del girasol a menudo se ve afectado negativamente por los déficits hídricos durante la fase reproductiva.

Es posible que los genotipos que presentan una respuesta gradual al estrés hídrico sean los más aptos para ambientes con déficits hídricos severos. En ambientes con déficits cortos, frecuentes y moderados de humedad del suelo que se alternan con períodos de buena disponibilidad de agua, mantener la expansión del órgano y la producción de biomasa redundará en un mejor comportamiento agronómico. Varios estudios sobre girasoles han demostrado que existe una relación estrecha entre el tamaño del dosel en la etapa de floración y el rendimiento de semillas del cultivo. La plasticidad del cultivo es ampliamente reconocida, en términos de la adaptación del desarrollo del área foliar a la disponibilidad de agua.

El girasol es moderadamente tolerante a la salinidad, ya que no resulta afectado por la salinidad del suelo hasta 4.8 dS/m. Actualmente se cultiva en áreas secas donde la salinidad puede representar una amenaza. Por tanto, se podría adaptar a suelos afectados por salinización, siempre que el manejo del riego sea adecuado y se practique la lixiviación de sales. En todos los casos, la lixiviación es importante para limitar la acumulación de sales en la zona radicular, evitando la reducción del

rendimiento de semillas y aceite bajo estrés salino. Sería viable utilizar agua moderadamente salina para regar el girasol. No obstante, es necesario mantener siempre un alto contenido de humedad del suelo en la zona radicular, y minimizar la acumulación de sales por medio de la lixiviación.

El contenido de nutrientes extraído por un cultivo de girasol que produce alrededor de 1 tonelada de rendimiento de semillas por hectárea incluye aproximadamente: 50 kg/ha de N, 15 kg/ha de P_2O_5 y 35 kg/ha de K_2O. La aplicación de fertilizante depende de los rendimientos esperados y los nutrientes residuales, que varían de 20 a 140 kg/ha de N, 15 a 70 kg/ha de P_2O_5 y 15 a 150 kg/ha de K_2O.

PRÁCTICA DE RIEGO

El girasol se cultiva sin riego en muchas partes del mundo. Sin embargo, se practica el riego en regiones subhúmedas y semiáridas con niveles limitados de precipitación. El calendario ideal bajo riego completo debe garantizar el rápido desarrollo del dosel, evitar los déficits hídricos en la antesis, y mantener un dosel verde desde el período de llenado de semillas hasta la maduración, para así explotar al máximo el potencial genético de la variedad. Esto se lograría al rellenar la zona radicular antes de que déficits hídricos dañinos se produzcan en cualquier etapa. Sin embargo, el calendario de riego debe tener en cuenta la capacidad de este cultivo para extraer agua del subsuelo al conservar agua de riego cerca del final de la estación. El riego por surcos y por aspersión son los métodos de aplicación de agua más comunes para el girasol.

El riego deficitario se practica con frecuencia. En áreas donde se presenta precipitación en invierno, la mejor estrategia es desarrollar el dosel en base al agua almacenada en el suelo al momento de la siembra y concentrar las aplicaciones de riego durante la floración y el llenado de semillas. Durante estos dos períodos, el calendario ideal debe evitar el cierre estomático y la aceleración de la senescencia del dosel, mientras que el agua del suelo se debe agotar por completo en la zona radicular en la etapa de madurez. En situaciones donde los recursos hídricos son muy limitados, la mejor opción para el riego deficitario es concentrar el agua de riego alrededor de las etapas de floración y llenado de semillas temprano. Se ha demostrado que cuando el crecimiento vegetativo se manipula mediante el retraso en el riego, el cual conserva el agua para la floración y el período de llenado de semillas, el índice de cosecha se puede aumentar en comparación con los regímenes máximos de riego.

RENDIMIENTO

Los rendimientos del girasol varían desde menos de 0.5 ton/ha en producción de secano en suelos poco profundos o en áreas de baja precipitación, hasta por encima de 5 ton/ha en condiciones de suministro abundante de agua y nitrógeno. Normalmente, se alcanza una producción de secano de 1.5 a 2.0 ton/ha en áreas semiáridas, y de 3-3.5 ton/ha en áreas subhúmedas de suelos fértiles. Cuando se siembran variedades de ciclo corto como doble cultivo bajo riego, se obtienen rendimientos de cerca de 3 ton/ha. Los rendimientos máximos de un solo cultivo bajo riego son aproximadamente de 5-5.5 ton/ha. Las semillas de girasol contienen un porcentaje muy alto de aceite (alrededor del 50 %) y entre 15 y 17 % de proteína. En consecuencia, el índice de cosecha del girasol (calculado en base a la materia seca) es relativamente bajo, desde menos de 0.3 en variedades de ciclo largo hasta 0.4 en híbridos de ciclo corto. El aceite de girasol se acepta como aceite de alta calidad y tiene alta demanda, no solamente para el consumo humano, sino también para industrias químicas y de cosméticos. El aceite contiene dos ácidos grasos insaturados principales (ácido oleico y ácido linoleico) y ácidos grasos saturados (palmítico y esteárico). La alta calidad del aceite de girasol se asocia con un contenido más alto de ácido oleico. La concentración

de aceite aumenta cuando se proporciona el riego adecuado, especialmente en la etapa de llenado de granos. Sin embargo, el riego no aumenta significativamente la cantidad de ácidos oleico y linoleico. Los efectos directos de los déficits hídricos en el contenido de aceite de la semilla son menores que los efectos en el rendimiento de semillas.

BIBLIOGRAFÍA

Bremner, P. M., Preston, G.K. y Fazekas de St Groth, C. 1986. A field comparison of sunflower *(Helianthus annuus)* and sorghum *(Sorghum bicolor)* in a long drying cycle. 1. Water extraction. *Australian Journal of Agricultural*

Research, 37, 483-493.

Connor, D.J. y Jones, T.R. 1985. Response of sunflower to strategies of irrigation. II. Morphological and physiological responses to water stress. *Field Crops Research,* 12, 91-103.

Connor, D.J., Jones, T.R. y Palta, J.A. 1985. Response of sunflower to strategies of irrigation. I. Growth, yield and the efficiency of water-use. *Field Crops Research,* 10, 15-36.

Connor, D.J. y Sadras, V.O. 1992. Physiology of yield expression in sunflower. *Field Crops Research,* 30, 333-389.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Fereres, E., Orgaz, F. y Villalobos, F. J. 1993. Water use efficiency of sustainable agricultural systems. En: *International Crop Science I.* Madison, Wisconsin, EE. UU., Crop Science Society of America, págs. 83-89.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Giménez, C. y Fereres, E. 1986. Genetic variability in sunflower cultivars under drought. II Growth and Water Relations. *Australian Journal of Agricultural Research,* 37, 573-82.

Gimeno, V., Fernández-Martínez, J.M. y Fereres, E. 1989. Winter planting as a means of drought escape in sunflower. *Field Crops Research,* 22, 307-316.

Rawson, H.M., Dunstone, R.L., Long, M.J. y Begg J.E.,1984. Canopy Development, Light Interception and Seed Production in Sunflower as Influenced by Temperature and Radiation. *Australian Journal of Plant Physiology,* 11,

255-265.

Sadras, V.O., Hall, A.J., Trapani, N. y Vilella, F. 1989. Dynamics of rooting and root-length: leaf-area relationships as affected by plant population in sunflower crops. *Field Crops Research* 22, 45-57.

Sadras V.O., Villalobos, F. J., y Fereres, E. 1993. Leaf expansion of field-grown sunflower in response to water status. *Agronomy Journal,* 85, 560-570.

Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science.* 25, 189-207.

Villalobos, F.J. y Ritchie, J.T. 1992. The effect of temperature on leaf emergence rates of sunflower genotypes. *Field Crops Research,* 29, 37-46.

Villalobos, F. J., Hall, A. J., Ritchie, J. T. y Orgaz, F. 1996. Oilcrop-Sun: A development, growth and yield model of the sunflower crop. *Agronomy Journal,* 88: 403-415.

Caña de
azúcar

AUTOR PRINCIPAL
Abraham Singels
(SASRI, monte Edgecombe, Sudáfrica)

AUTORES COLABORADORES
Michael van der Laan (SASRI, monte Edgecombe, Sudáfrica)

AGRADECIMIENTOS
Matthew Jones
(SASRI, monte Edgecombe, Sudáfrica)
por extraer y organizar datos experimentales,
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.),
Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
S. J. Attard
(CSIRO, Ecosistemas Sostenibles, Townsville, Australia)
N. Geoff Inman-Bamber
(anteriormente SASRI, monte Edgecombe, Sudáfrica; actualmente CSIRO, Ecosistemas Sostenibles, Townsville, Australia),
Stephen Mwatha Muturi (KESREF, Kibos, Kisumu, Kenia),
Harry Rostron
(anteriormente SASRI, monte Edgecombe, Sudáfrica; jubilado actualmente)

Caña de azúcar

DESCRIPCIÓN GENERAL

La caña de azúcar es una planta perenne que usa la vía C_4 de fijación del carbono, y las variedades comerciales son híbridos complejos (spp.) derivados de las especies *Saccharum* nativas del sudeste asiático. Se cultiva en 100 países (17 de los cuales produjeron más de 10 millones de toneladas de caña fresca en 2008) en regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo. La producción total de caña fresca en 2009 fue de 1661 millones de toneladas de 24 millones de hectáreas (Figura 1), con un rendimiento promedio mundial de 69.8 ton de caña/ha por año (FAO, 2011). Brasil fue el mayor productor (671 millones de toneladas), seguido de India (285 millones de toneladas), China (116 millones de toneladas), Tailandia (66 millones de toneladas) y Pakistán (50 millones de toneladas). En la Figura 2 se muestran las áreas cosechadas en el mundo. Los rendimientos varían de región a región, dependiendo del potencial climático, el nivel de manejo, el ciclo de cultivo y de si la producción de caña es con riego o de secano. Egipto tiene el rendimiento promedio nacional más alto entre los países que producen más de 10 millones de toneladas de caña, con 121 ton/ha (FAO, 2011). Hay una tendencia a largo plazo en que el rendimiento promedio mundial de caña aumenta cerca de 4 ton/ha por año.

La caña de azúcar, en su mayor parte, se siembra como monocultivo y se propaga vegetativamente. Un cultivo establecido plantado esquejes de tallos vivos de caña recibe el nombre de trozo. Después de la primera cosecha de los tallos maduros, otro cultivo –un cultivo de soca– se regenera del rastrojo de las plantas. Dependiendo del suelo y de la salud del cultivo, se pueden obtener de tres a siete ciclos de una plantación. El espaciamiento entre los surcos varía entre 1.0 y 2.0 m, dependiendo del clima, las prácticas de riego y los requerimientos de mecanización. Los surcos se pueden configurar como individuales, espaciados en paralelo, o como una trama (doble surcos espaciados 60 cm con líneas centrales espaciadas entre 1.8 y 2.0 m. La caña verde o quemada se cosecha a mano o con maquinaria. Los cultivos barbecho a veces se plantan antes de que la caña sea replantada para un nuevo ciclo. El tiempo entre el inicio del cultivo y la cosecha varía entre 9 meses –en áreas con períodos de crecimiento limitados por las temperaturas gélidas (p. ej., Estados Unidos)– hasta 12 meses (climas cálidos), y 24 meses (climas fríos con pocas heladas o ninguna). En producción con riego, el ciclo normal de cultivo es de 12 meses.

Un tallo de caña de azúcar, después de descogollado (quitar el cogollo verde inmaduro del tallo y las hojas verdes) y de habérsele quitado las hojas muertas, normalmente está compuesto en un 70 % de agua, 15 % de fibra, 13 % de sacarosa y 2 % de hexosas y otras impurezas. La sacarosa es el principal producto extraído del jugo de la caña de azúcar y se usa para fabricar azúcar. La caña de azúcar también se usa para producir energía (electricidad generada al quemar la fibra del tallo y etanol de los azúcares fermentados) a gran escala en varios países y está cobrando impulso por ser un recurso renovable. En Brasil, cerca del 40 % de la caña se emplea para producir alcohol como biocombustible.

FIGURA 1 Área mundial cosechada de caña de azúcar y rendimiento promedio de tallos frescos durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

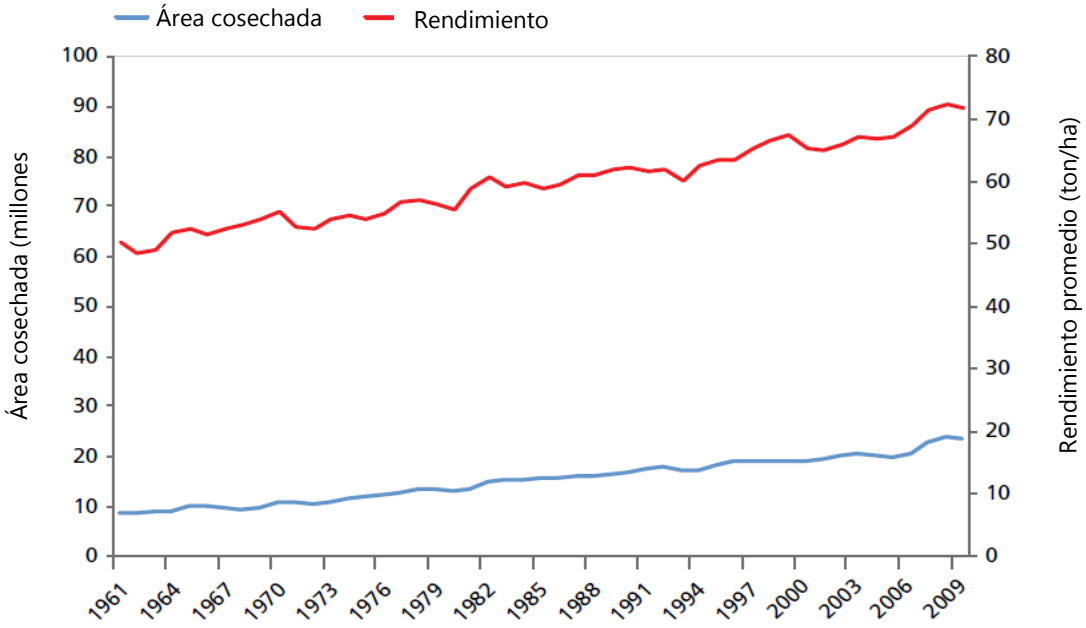
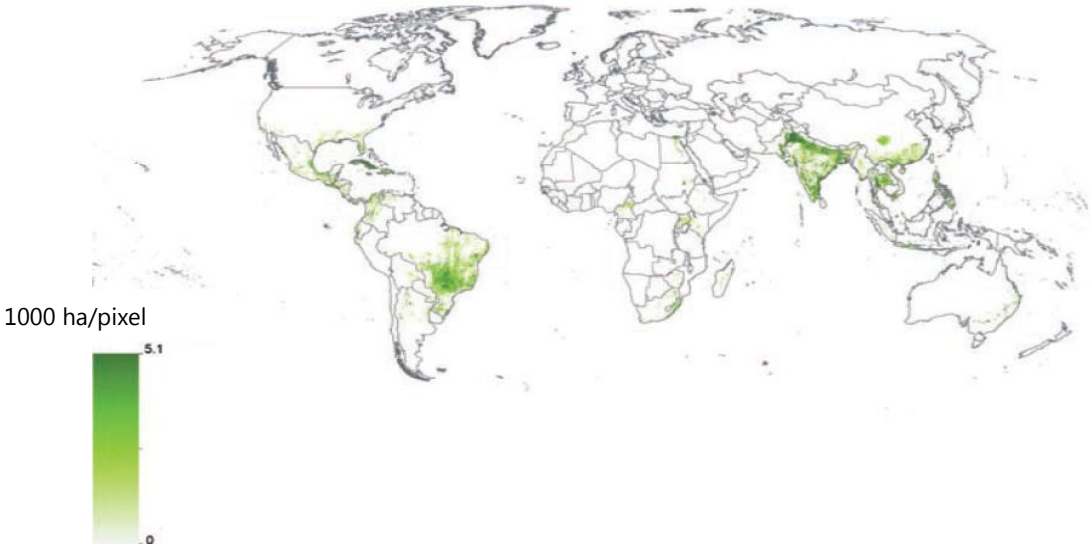


FIGURA 2 Área cosechada de caña de azúcar (GAEZ, 2011).



Año de referencia 2000

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

Los esquejes de caña para establecer una plantación se denominan vástagos y tienen varios entrenudos a lo largo. De cada nudo viable del vástago se producen un brote primario y muchas raíces de los vástagos. A estas les siguen las demás raíces que crecen más adelante, rápidamente (hasta 22 mm/día) de los nudos de los brotes y permiten la exploración profunda (hasta 4.7 m) de los perfiles de suelo (Carr y Knox, 2011). La tasa de hijuelos de las yemas y la emergencia de los brotes primarios depende de la profundidad de la siembra, la temperatura y el estado de humedad del suelo (van Dillewijn, 1952). El número de brotes que emergen y la subsiguiente tasa de ahijamiento dependen de la cantidad de yemas viables que se sembraron (normalmente entre 10 y 30 yemas/m^2) y de la configuración de los surcos. La caña de azúcar brota profusamente poco después de la emergencia del brote primario hasta el cierre del dosel. Al cierre del dosel, se alcanza la población pico de hijuelos (hasta 40/m^2) y los hijuelos más jóvenes empiezan a envejecer, dejando de 4 a 18 hijuelos/m^2, que se convertirán en tallos que se elongan, engrosan y acumulan sacarosa (Singels *et al.,* 2005; Bell y Garside, 2005). A menos que se inicie la floración, los tallos continuarán creciendo y agregando nudos y entrenudos mientras tengan agua y nutrientes disponibles y las temperaturas no sean limitantes. En cada nudo aparecerán hojas, se expandirán y envejecerán a determinados intervalos de GDD (Inman-Bamber 1994b).

TABLA 1 Duración de las distintas etapas de desarrollo (en días del año).

Etapa de desarrollo	Planta		Cultivo de soca	
	Tropical[1]	Subtropical[1]	Tropical	Subtropical
Desde la siembra/soca hasta la emergencia	21-40	28-70	5-10	7 - 21
Siembra/soca hasta comienzo de la formación del rendimiento (coincide casi con el momento en que se alcanza la máxima del dosel)	110-130	135-175	85-105	105-145
Siembra/soca hasta el comienzo de la maduración [2]	335-395	335-700	335-395	335-700
Siembra/soca hasta la cosecha [3]	365-425	365-730	365-425	365-730
Construcción de índice de cosecha	225-275	200-544	250-300	230-585

[1]Rango supuesto de temperatura media anual: tropical - 20-28 °C; subtropical 17 -26 °C.
[2]Supuesto 30 días antes de la cosecha.
[3]Cosecha a los 12 a 14 meses en áreas tropicales, 12 a 24 meses en áreas subtropicales.

El tallo está compuesto por una sección inmadura de rápido crecimiento en la parte superior, con un bajo contenido de sacarosa (8 internudos superiores) y una sección madura de crecimiento más lento, con alto contenido de sacarosa en la parte inferior. A medida que se alargan los tallos (hasta 3 m) y se envejecen (8 meses y más) la sección madura forma una porción considerable del tallo, de manera que esté listo para cosechar. El proceso de maduración se puede mejorar evitando el riego para inducir un estrés hídrico leve (Smith y Inman-Bamber, 2005) o aplicando maduradores químicos.

La floración se inicia cuando la temperatura mínima supera los 18 ºC y el estado hídrico es favorable durante un período de 3 semanas de disminución del fotoperíodo, en 12.5 horas aproximadamente (Bull y Glasziou, 1976). Cuando de un tallo ha brotado una flor, hojas e intranudos dejan de brotar y madura y, si se deja el tiempo suficiente, producirá brotes laterales disminuyendo la calidad. Las variedades difieren enormemente en cuanto a su predisposición a florecer.

En la Tabla 1 se muestra la duración de las distintas etapas de desarrollo. Por su origen tropical, la caña de azúcar no tolera las temperaturas bajas. Estudios de varios procesos de crecimiento y relacionados han fijado la temperatura base de la caña de azúcar entre 8 y 18 ^{o}C, y la temperatura óptima entre 30 y 35 ^{o}C (Ebrahim *et al.*, 1998; van Dillewijn, 1952; Inman-Bamber, 1994). Al momento de esta publicación, la T_{base} y la T_{upper} se establecieron en 9 ^{o}C y 32 ^{o}C en la calibración preliminar de *AquaCrop* para la caña de azúcar, y se pueden ajustar ligeramente a medida que se tengan más datos disponibles para calibración y prueba.

USO DE AGUA Y PRÁCTICAS DE RIEGO

Aunque la caña de azúcar desarrolla un dosel relativamente despacio (especialmente las especies C_4), la evapotranspiración de un cultivo completamente cubierto es un poco más alta que la de las gramíneas de poca altura (Inman-Bamber y McGlinchey, 2003). Dependiendo del clima, las tasas pico de evapotranspiración se encuentran entre 6 y 15 mm/día (Thompson, 1976), y la ET anual se encuentra entre 800 y 2000 mm de agua. Se requieren por lo menos 850 mm de agua por año para una producción de secano sostenible. Para producción comercial, el riego completo se practica cuando la precipitación anual es inferior a 800 mm y el riego suplementario se aplica cuando la precipitación anual es inferior a 1000 mm. El riego se aplica usando sistemas por surcos, aspersión (móvil y pivote central) y por goteo, y se programa de acuerdo con el estado de humedad del suelo, determinado (1) por medición directa del potencial hídrico del suelo (umbral -40 a -80 kPa) o del contenido de humedad del suelo (umbral 50 % de la capacidad disponible) o (2) mediante métodos de pérdidas y ganancias usando los datos meteorológicos (Carr y Knox, 2011). Este último utiliza los estimaciones de la evapotranspiración de referencia determinados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) Clase A: evaporación de tanque, evaporación de minitanque o datos meteorológicos y cobertura de dosel del cultivo (factor de cultivo). Los métodos de pérdidas y ganancias incluyen cálculos simples o métodos complejos usando modelos de simulación.

El riego apropiado es importante durante el establecimiento del cultivo y durante la fase de crecimiento de los tallos. Se pueden reducir los riegos durante las fases de ahijamiento y maduración, sin que esto implique pérdidas significativas de rendimiento (Carr y Knox, 2011). De hecho, el déficit hídrico controlado durante el período de secado cerca de la cosecha aumenta el contenido de azúcar por unidad de biomasa seca del tallo y puede aumentar el rendimiento de azúcar.

RESPUESTA AL ESTRÉS

Baja temperatura

La caña de azúcar es sensible a las bajas temperaturas. Se ha realizado un trabajo considerable para evaluar la temperatura mínima requerida en el campo para varios procesos de desarrollo y crecimiento. Dependiendo del proceso y el estudio particular, se encontró que la temperatura

mínima requerida estaba entre 9 ºC y 19 ºC (Inman-Bamber 1994; Lingle, 1999). No obstante, como se mencionó anteriormente, la temperatura base para *AquaCrop* tentativamente se fijó en 9 ^{o}C al momento de esta publicación. El daño por heladas ocurre en las partes que crecen activamente cuando se exponen a temperaturas muy bajas, lo que genera la muerte de los puntos de crecimiento y la consiguiente disminución de la calidad de la caña debido a los brotes laterales. En casos severos, puede morir todo el tallo.

Agua

La caña de azúcar puede tolerar algo de sequía. La elongación de las hojas y los tallos son mucho más sensible que la fotosíntesis al estrés hídrico. La altura del tallo y su aumento se han usado en el manejo como indicador de las necesidades de riego. Aunque el crecimiento y el rendimiento de la caña generalmente disminuyen cuando el contenido de humedad del suelo (TAW) cae por debajo del 50 %, durante la fase de maduración, los períodos de déficit hídrico leve (TAW entre 80 y 50 %), de hecho, aumentan la acumulación y el rendimiento de la sacarosa (Inman-Bamber *et al.,* 2002; Smith y Inman-Bamber, 2005), al restringir el crecimiento de la fibra del tallo y las hojas y almacenar los asimilados como sacarosa en el tallo. La caña de azúcar, sembrada ampliamente en climas tropicales y subtropicales con bastante precipitación, parece ser excepcionalmente resistente al encharcamiento, soportando períodos de hasta 14 días de agua estancada poco profunda o suelo saturado, según un estudio realizado en Florida (Glaz y Morris, 2010).

Fertilidad

La caña de azúcar, por su alta producción de biomasa, requiere cantidades considerables de fertilizante. Al igual que para otros cultivos, las tasas de absorción de nutrientes son más rápidas durante las fases tempranas (ahijamiento y elongación del tallo), cuando las tasas de acumulación de biomasa son altas (Golden y Ricaud, 1963). La caña de azúcar puede crecer en una gran variedad de suelos, pero prefiere los suelos profundos bien drenados, con un pH óptimo entre 6 y 7.5. Un cultivo de caña de azúcar que produce 100 toneladas de tallos frescos puede extraer de 120-200 kg de nitrógeno/ha, 20-40 kg de fósforo/ha y 150-300 kg de potasio/ha. No son deseables los altos niveles de nitrógeno durante la fase de maduración, porque el nitrógeno promueve el crecimiento vegetativo a costa de la acumulación de sacarosa.

Salinidad

La caña de azúcar es moderadamente sensible a la salinidad y a la sodicidad (Nelson y Ham, 2000). Una salinidad alta puede inducir estrés hídrico y los síntomas incluyen marchitez, quemadura de las hojas y crecimiento restringido. Una salinidad del suelo –medida como la conductividad eléctrica de la pasta de suelo saturado– de menos de 20 dS/m tiene poco efecto (o ninguno) en el crecimiento del cultivo; los rendimientos de la caña disminuyen entre 30-40 dS/m, siendo 40 dS/m el umbral económico de producción (Rozeff, 1995).

RENDIMIENTO E ÍNDICE DE COSECHA

Los rendimientos comerciales varían ampliamente. En condiciones climáticas favorables (7300 MJ/m^2 de radiación durante el ciclo biológico, 4000 GDD con una temperatura base de 10 ^{o}C) y suministro de agua adecuado (1800 mm netos), se puede alcanzar el rendimiento experimental de 200 ton/ha de caña fresca (24 ton sacarosa/ha) por año (tomado de Inman-Bamber, 1995). Los rendimientos comerciales actuales en condiciones de riego varían de 80 a 150 ton/ha de caña fresca (10 a 17 ton sacarosa/ha) (Waclawovsky *et al.,* 2010). A nivel mundial, un rendimiento de 120 ton/ha (14 ton sacarosa/ha) se considera un buen rendimiento en condiciones de riego completo.

Los rendimientos de la caña en condiciones de secano varían entre 30 y 90 ton/ha de caña fresca por año, dependiendo de las condiciones climáticas y del suelo, donde un rendimiento de 60 ton/ha se considera bueno. La productividad del agua en términos de la biomasa áerea y la evapotranspiración ($WP_{B/ET}$) varía entre 3.5 y 5.5 kg/m^3, y en términos de sacarosa y evapotranspiración ($WP_{sucrose/ET}$), entre 1.3 y 2.2 kg/m^3 (tomado de Thompson, 1976; Olivier y Singels, 2003; Carr y Knox, 2011).

El contenido de sacarosa de los tallos frescos varía entre los extremos de 5 a 16 %, y entre 20 y 58 % en términos de biomasa seca, dependiendo del genotipo, la edad del cultivo y las condiciones de crecimiento (temperatura y el estado hídrico) durante las cuatro últimas semanas anteriores a la cosecha. El contenido normal de sacarosa del tallo al momento de la cosecha es de 12.5 % aproximadamente, en base a la masa fresca, y de 50 % aproximadamente en base a la materia seca. Expresado como masa de sacarosa por unidad de biomasa por encima del suelo, el índice de cosecha se encuentra alrededor del 35 % (tomado de Thompson *et al.,* 1976; Inman-Bamber *et al.,* 2002; Carr y Knox, 2011)

BIBLIOGRAFÍA

Bell, M. J. y Garside A.L. 2005. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. *Field Crop Research* 92: 231-248.

Bull y Glasziou. 1976. Sugar cane. En: Evans, L.T. ed. *Crop physiology.* Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press. págs. 51-72.

Carr, M.K.V. y Knox J.W. 2011. The water relations and irrigation requirements of sugar cane *(Saccharum officinarum):* a review. *Experimental Agriculture* 47: 1-25.

Ebrahim, M.K., Zingsheim, O., El-Shourbagy, M.N., Moore P.H. y Komor E. 1998. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. *Journal of Plant Physiology* 153: 593-602.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Glaz B. y Morris D.R. 2010. Sugarcane responses to water-table depth and periodic flood. *Agronomy Journal* 102 (2): 372-380.

Golden L.E. y Ricaud R. 1963. The nitrogen, phosphorus and potassium contents of sugarcane in Louisiana. *Louisiana Agric. Exp. Stn. Bulletin* 574.

Inman-Bamber N.G. 1994. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. *Field Crops Research* 36: 41-51.

Inman-Bamber, N.G. 1995. *Climate and water as constraints to production in the South African sugar industry.* En: Proceedings of Conference South African Sugar Technology Association 69: 55-59.

Inman-Bamber, N.G., Muchow, R.C. y Robertson, M.J. 2002. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. *Field Crops Research* 76: 71-84.

Inman-Bamber N.G. y McGlinchey M.G. 2003. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research* 83 (2): 125-138.

Lingle, S.E. 1999. Sugar metabolism during growth and development in sugarcane internodes. *Crop Science* 39, 480-486.

Nelson P.N. y Ham G.J. 2000. Exploring the response of sugar cane to sodic and saline conditions through natural variation in the field. *Field Crops Research* 66: 245-255.

Olivier F. y Singels A. 2003. *Water use efficiency of irrigated sugarcane as affected by row spacing and variety.* Proceedings of Conference South African Sugar Technology Association, 77:347-351.

Rostron, H. 1972. *Some effects of environment, age and growth regulating compounds on the growth, yield and quality of sugarcane in South Africa.* Reino Unido, Leeds University. (Tesis de Maestría en Ciencias)

Rozeff, N. 1995. Sugarcane and salinity - a review paper. *Sugar Cane* 5 8-19.

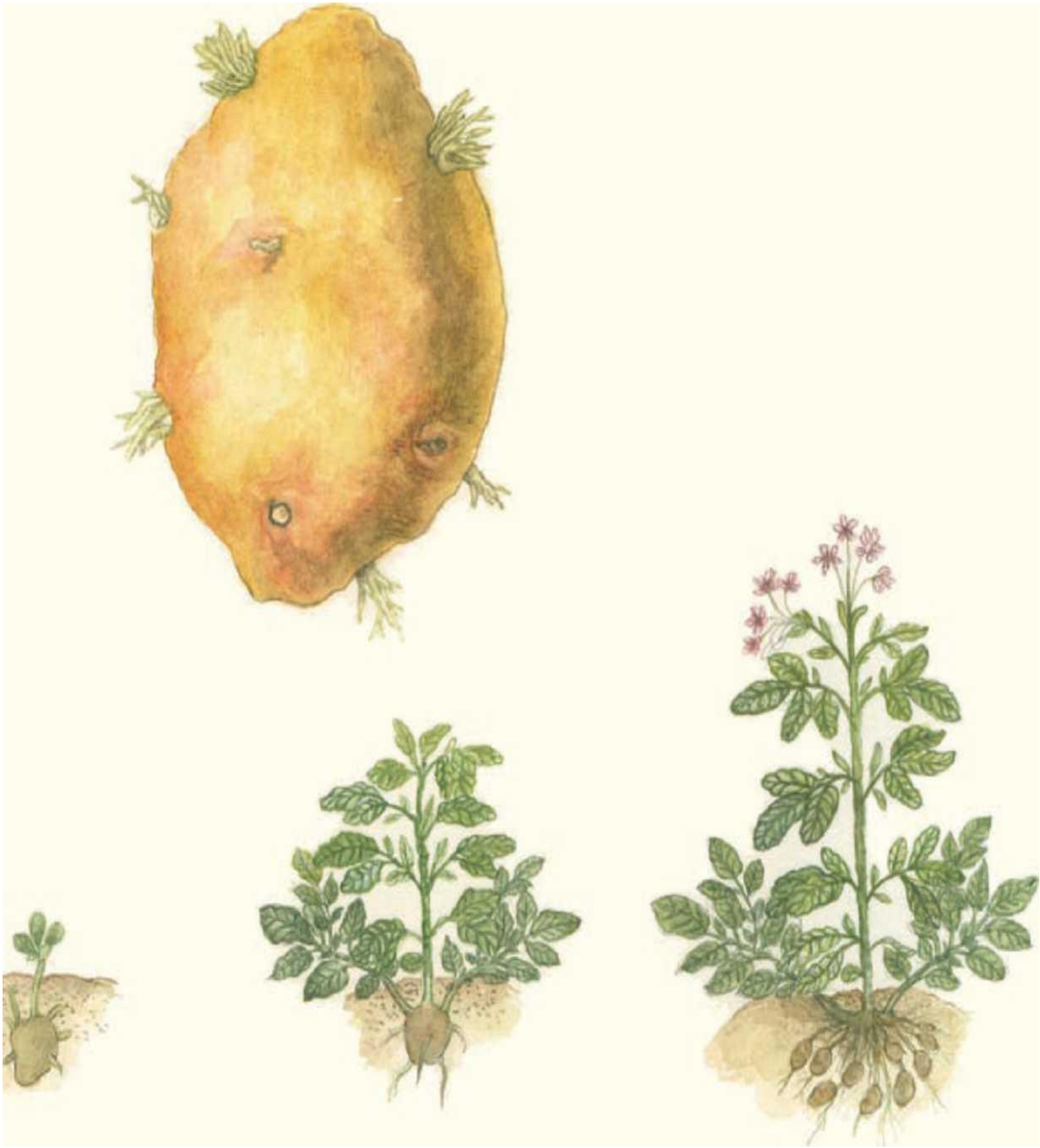
Singels, A., Smit, M.A. y Redshaw, K.A. 2005. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. *Field Crops Research,* 92, 249-260.

Smith D.M. y Inman-Bamber N.G. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research* 92: 185-202.

Thompson, G.D. 1976. Water use by sugarcane. *South African Sugar Journal* 60: 593-600 y 627-635.

Van Dillewijn, C. 1952. *Botany of Sugarcane.* Waltham, Mass, EE. UU., Chronica Botanica; Nueva York: Stechert-Hafner, 1952. 371 págs.

Waclawovsky, A.J., Sato, P.M., Lembke, C.G., Moore, P.H. y Souza, G.M. 2010 Sugarcane for bio-energy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnology Journal* 8: 263-276.



Papa o
patata

AUTOR PRINCIPAL
Roberto Quiroz
(CIP, Lima, Perú)

AUTORES COLABORADORES
Enrique Chujoy,
Víctor Mares
(CIP, Lima, Perú)

AGRADECIMIENTOS
Margarita García-Vila (Universidad de Córdoba, Córdoba, España),
Christian R. Jensen
(Real Universidad Veterinaria y Agrícola, Copenhague, Dinamarca),
Ne Bambi Lutaladio
(FAO, División de Producción y Protección de Plantas, Roma, Italia)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
John Annandale,
Martin J. Steyn
(Universidad de Pretoria, Pretoria, Sudáfrica),
Carolina Barreda, Keith MacKerron
(Instituto Escocés de Investigación de Cultivos, Dundee, Reino Unido),
Roberto Quiroz, Raymundo Gutiérrez y Carla Gavilán (CIP, Lima, Perú),
David Wolfe
(Universidad Cornell, Nueva York, EE. UU.)

Papa o patata

DESCRIPCIÓN GENERAL

La papa o patata *(Solanum tuberosum)* es un cultivo tuberoso amiláceo originario de los Andes, y las dos subespecies cultivadas, *S. tuberosum tuberosum* y *S. tuberosum andigena,* representan casi toda la producción mundial. La papa o patata es el cuarto cultivo alimentario más impoortante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz, con una producción de 329 millones de toneladas en 18.6 millones de hectáreas (FAO, 2011) (Figura 1). Los continentes mayores productores de papa o patata son Asia y Europa, con el 44 % y 37 % de la producción mundial, respectivamente. Los países mayores productores son China, India, la Federación de Rusia, Ucrania y Estados Unidos. En los últimos 20 años se ha producido una rápida expansión de la producción de papa o patata en los países en desarrollo, especialmente de África y Asia, donde la producción se ha más que duplicado. La papa o patata sigue siendo un cultivo esencial en los países desarrollados, donde la producción per capita aún es la más alta del mundo (Figura 2).

La papa o patata es especialmente apropiada para climas fríos. Se cultiva ampliamente en regiones tropicales frías, subtropicales y templadas, donde se siembra como monocultivo, en rotación, o en multicultivo. La rotación con otros cultivos a menudo es necesaria para aliviar los problemas de enfermedades y otras plagas. En regiones templadas, la temperatura fría y un período corto sin heladas limitan la producción de papa o patata a una vez al año como monocultivo, o en rotación anual de tres o más, con maíz, soya/soja, sorgo o remolacha azucarera, en áreas con precipitación alta o riego; y con trigo, maíz, millo/mijo, cebada y avena, en ambientes áridos y semiáridos. Esta región incluye las áreas de déficit hídrico, como el norte de China, donde la papa o patata es un cultivo de secano y de ciclo corto (90 a 110 días); el riego suplementario es necesario pero no se aplica con frecuencia. En el norte de Europa y América del Norte, la producción de papa o patata normalmente se realiza con prácticas agrícolas intensivas, incluidas tasas altas de fertilización, uso de pesticidas y riego en los casos en que sea necesario. Las rotaciones de dos a cuatro años se hacen con oleaginosas, cereales y legumbres. En los subtrópicos, la papa o patata se encuentra en una gran variedad de sistemas de cultivo. Se encuentra en sistemas multicultivo con dos, o incluso tres cultivos por año, en rotación con trigo o maíz, en las planicies centrales de China; en sistemas de cultivos asociados, particularmente con maíz, a menores alturas; como monocultivo en primavera en latitudes altas al suroccidente de China; o como cultivo de invierno con riego y de ciclo corto, en rotación con arroz o trigo, en la llanura Indogangética; a menores alturas al suroccidente de China y norte de Vietnam. En los trópicos fríos, la papa o patata es comúnmente un cultivo anual (en algunos países, semestral) de secano, un monocultivo de período de crecimiento largo (180 días) o se incluye en rotaciones con maíz, legumbres, quinua u hortalizas, como sucede en las tierras altas de los Andes y el oriente de África. No es raro que se hagan dos cultivos por año a menores alturas.

FIGURA 1 Área mundial cosechada de papa o patata, y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

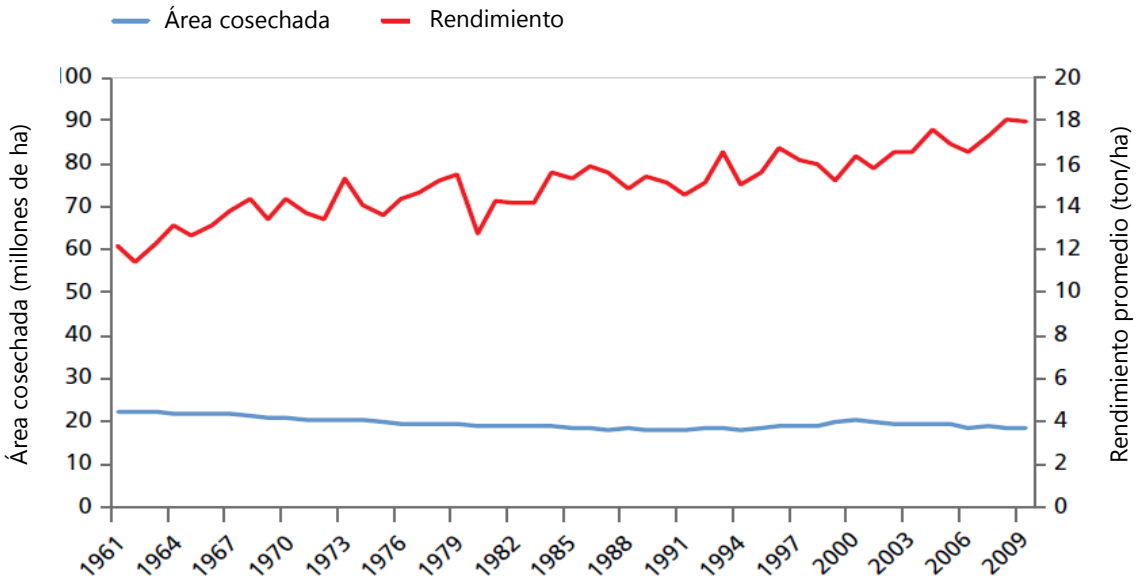
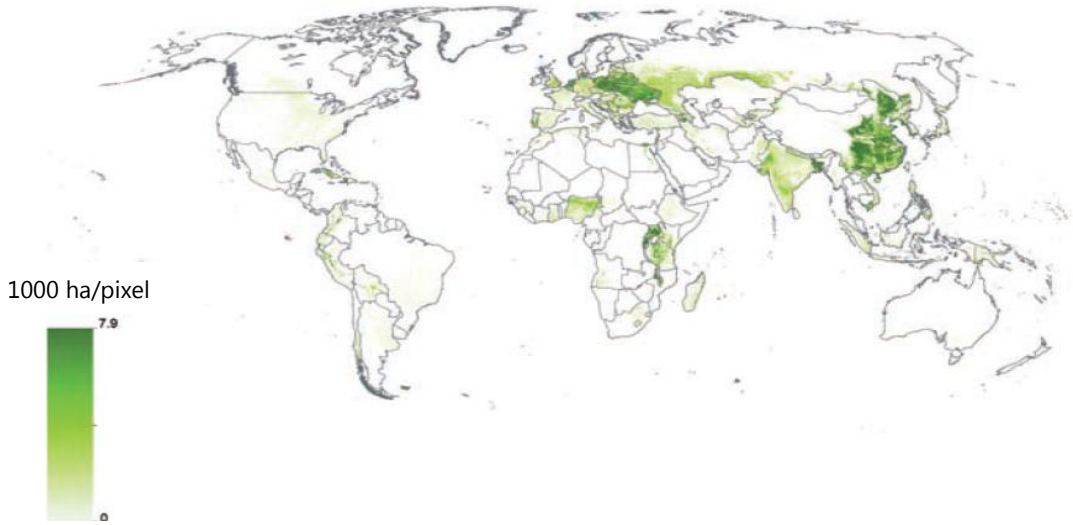


FIGURA 2 Área cosechada de papa o patata (GAEZ, 2011)



Año de referencia 2000

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

La papa o patata se siembra en caballones o en el suelo plano. Para producción de secano en condiciones secas, como en el suroccidente de China y a gran altura en trópicos fríos semiáridos, la siembra en terreno plano suele arrojar mayores rendimientos como resultado de la conservación de la humedad del suelo. En condiciones de riego, el cultivo se siembra principalmente en caballones. Aunque la papa o patata se puede sembrar como semilla botánica, en casi todos los casos se siembra como tubérculo. Las semillas del tubérculo deberían tener dos o tres ojos, de los cuales brotan nuevas yemas y brotes. La profundidad generalmente es de 5 a 10 cm, mientras que en áreas secas se prefiere la siembra más profunda. La densidad de plantas varía entre 30 000 y 60 000 plantas/ha, y varía dependiendo del tamaño de la semilla, la variedad y el uso. Una mayor densidad de plantas se usa en condiciones de riego y una menor densidad de plantas, en condiciones de secano. El arado durante el período de crecimiento debe procurar no dañar las raíces ni los tubérculos, y a menudo los caballones se aporcan para evitar el enverdecimiento de los tubérculos.

La planta emerge aproximadamente 7 días después de la siembra, bajo buenas condiciones. La emergencia puede demorarse por temperaturas más bajas del suelo, humedad limitada del suelo, tubérculos jóvenes o que no brotaron y siembra profunda. La cobertura inicial del dosel (CC_o) depende de la densidad de los tubérculos semilla y de la cantidad de brotes en desarrollo por tubérculo semilla, y de si las camas están juntas o separadas. Las variedades también pueden diferenciarse en este aspecto. Se puede acortar la duración desde la siembra hasta la cobertura del dosel máxima (CC_x), sembrando a una mayor densidad, y con prácticas que conduzcan a una emergencia más temprana de la planta, temperatura cálida y buen suministro de agua. En el momento de máxima dosel, el porcentaje de cobertura del dosel varía entre 45 % hasta casi 100 % en los trópicos fríos. En la etapa vegetativa temprana, entre la emergencia y el brote de los tubérculos, comienza la formación de estolones y tubérculos, y el agrandamiento de éstos. La duración del período de crecimiento y la producción total de tubérculos dependen de la variedad, la temperatura y la duración del día. La formación de los tubérculos sucede antes de la floración, y la floración no es necesaria para producir tubérculos.

Al igual que se cumple para otros cultivos, la profundidad de raíces de la papa o patata depende en gran medida de las condiciones del suelo, de que no haya capas de suelo que la impidan y de la temperatura del suelo. Se ha mostrado que la extracción de agua por las raíces se hace a más de 1.8 m en condiciones favorables (Wolfe *et al.,* 1983), aunque a menudo se dice que la papa o patata es un cultivo de raíces poco profundas. Normalmente, cuando la capa superior del suelo no es seca, el 70 % del total de absorción de agua ocurre en los 0.30 m superiores y casi el 100 % entre los 0.40 y 0.60 m de profundidad del suelo. Sin embargo, el patrón de absorción también depende de la ubicación del agua y los nutrientes, y la extracción de agua se realiza principalmente en las capas más profundas, cuando la parte superior del perfil del suelo está seca.

Las subespecies *tuberosum* forman tubérculos con 14 a 17 horas de fotoperíodo predominante en las regiones en latitudes altas, pero se siembra en todo el mundo porque se adapta a fotoperíodos más cortos. Algunas variedades de *S. tuberosum tuberosum,* cuando se siembran en días cortos, pueden brotar los tubérculos antes, tienen un dosel reducido, con poca o ninguna floración, y maduran antes, pero con menos rendimiento potencial de tubérculos (Condori *et al.,* 2010). *S. tuberosum andigena* y las otras siete especies Solanum cultivadas (aparte de la *Solanum tuberosum)* forman los tubérculos con 10 a 12 horas de fotoperíodo predominante en las regiones tropicales y se siembran en los Andes. Los híbridos de *tuberosum* y *andigena* se siembran cada vez más en los países en desarrollo, en los lugares y en la época en que los días son cortos. *S. tuberosum andigena* y sus híbridos, cuando se siembran en los días largos, pueden tener una brotación tardía de los tubérculos, dosel vigoroso, floración profusa, y maduración tardía, pero también tienen un rendimiento potencial reducido de tubérculos. No obstante, la variedad *andigena* adaptada de días largos arrojó incrementos altos de rendimiento (Bradshaw, 2009).

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

La papa o patata requiere de 0.35 a 0.8 m^3 de agua para producir 1 kg de materia seca de tubérculos. En condiciones de campo, esto se traduce en requerimientos hídricos de 350 a 650 mm durante el período de crecimiento, que dependen del clima y de la variedad (Sood y Singh, 2003). La productividad del agua para rendimiento de tubérculos frescos ($WP_{fresh\ Y/ET}$), que contengan cerca de 75 % de humedad, es de 4 a 11 kg/m^3. La productividad del agua producida ($WP_{Y/ET}$, expresada como materia seca de tubérculos, varía entre 1.3 y 2.8 kg/m^3. En condiciones de suministro hídrico limitado, el suministro disponible, preferencialmente, debería centrarse en maximizar el rendimiento por hectárea en lugar de repartir el agua limitada en un área más grande. Se puede ahorrar agua principalmente a través de un calendario mejorado y profundidad de la aplicación del riego.

RESPUESTAS A LOS ESTRESES

La papa o patata es sensible al déficit hídrico. La escasez de agua puede provocar un rendimiento reducido de los tubérculos, en cantidad y en tamaño, y una disminución de la calidad de los mismos. Con el fin de optimizar el rendimiento, generalmente no se debe agotar el agua disponible total (TAW) del suelo más allá del 30 al 50 %. El déficit hídrico en las primeras etapas, durante la formación de estolones, la brotación de tubérculos y después de la misma, tiene los efectos más adversos en el rendimiento final. Aunque el crecimiento foliar es muy sensible al déficit hídrico, si el déficit es moderado y corto, el crecimiento foliar después de que se termina el déficit se puede compensar por lluvia o riego, y el efecto sobre el rendimiento sería leve. La etapa de senescencia es menos sensible, siempre que el déficit no sea tan severo que acorte sustancialmente la duración del dosel verde. En general, los déficits hídricos de la mitad y hacia el final del período de crecimiento suelen reducir el rendimiento menos que en la primera parte, pero esto puede cambiar entre variedades. Algunas variedades responden mejor al riego al principio de la etapa de formación de tubérculos, mientras que otras muestran una mejor respuesta hacia el final de dicha etapa.

Las temperaturas del aire y del suelo afectan el crecimiento y el rendimiento de los tubérculos. La temperatura para estreses por frío o por heladas para la papa o patata se considera en 1 °C y menos, mientras que la temperatura para el estrés por calor es de 35 °C y más. Sin embargo, las variedades de papa o patata tienen distinta tolerancia a los estreses por heladas, frío y calor; y el alcance de los daños depende de la intensidad y duración del estrés. En algunos modelos de cultivo de papa o patata se ha usado una temperatura base de 2 °C para el cálculo de los grados día acumulados (GDD) (Stol *et al.,* 1991). Se puede usar una temperatura base de 0 °C para la subespecie *S. tuberosum andigena*. La temperatura óptima del suelo para el crecimiento de los tubérculos es de 15 a 18 °C, mientras que los requerimientos de la temperatura del aire para el crecimiento de las papas o patatas son: temperatura diurna de 25 a 32 °C y temperatura nocturna de 12 a 18 °C. A medida que aumenta la temperatura desde el extremo inferior del rango óptimo, aumenta el crecimiento vegetativo de la papa o patata, mientras que la brotación y el crecimiento de los tubérculos empiezan a suprimirse a medida que la temperatura aumenta.

Los requerimientos de fertilizante del cultivo de papa o patata son relativamente altos. La cantidad de NPK extraídos por las plantas de papa o patata se estiman en 4 a 6 kg N, 0.6 a 1.1 kg P y 7 a 11 kg K por tonelada de tubérculos frescos producidos. Dependiendo del estado de los nutrientes del suelo, para obtener un alto rendimiento se recomiendan dois de fertilización que van de 100 a 250 kg/ha N, 50 a 100 kg/ha P_2O_5, y 60 a 260 kg/ha K_2O, para suelos que van desde muy fértiles hasta muy deficientes para el nutriente específico.

El cultivo es moderadamente sensible a la salinidad del suelo, con un umbral de conductividad

eléctrica del extracto de suelo saturado (EC_e) de 2-3 dS/m, alcanzando el 100 % de pérdida de rendimiento a 10 dS/m.

PRÁCTICA DE RIEGO

Los métodos de riego más comunes para la papa son por surcos y aspersión. La respuesta del rendimiento al riego frecuente es considerable y se obtienen rendimientos muy altos con los sistemas mecanizados de aspersión, en el que las pérdidas por evapotranspiración se reponen diariamente o cada dos días. El riego frecuente y oportuno reduce la proporción de tubérculos malformados al momento de la cosecha. Cuando la precipitación es baja y el suministro de agua es restringido, el calendario de riego debería tratar de evitar los déficits hídricos durante la etapa de formación de estolones, la brotación de los tubérculos y después de esta última. El suministro de agua puede ser restringido al principio del crecimiento; es decir, antes de la floración, pero el crecimiento del dosel sería más lento, así que la restricción debe tener ciertos límites. Para usar más el agua almacenada en el suelo, el riego debe cortarse llegando a o en la etapa de senescencia. Esta práctica también puede acelerar la madurez e incrementar el contenido de materia seca de los tubérculos. Una correcta programación del riego puede ahorrar de 1 a 4 aplicaciones de riego, incluido el último riego antes de la cosecha, dependiendo de la situación.

RENDIMIENTO

En la región templada del norte de Europa y América del Norte, un buen rendimiento, en condiciones de riego donde sea necesario, es superior a 40-50 ton/ha de tubérculos frescos por hectárea. En regiones muy húmedas, el rendimiento suele ser inferior puesto que las enfermedades son más difíciles de controlar. Los rendimientos de la papa de secano e incluso de riego en los subtrópicos y los trópicos fríos son mucho más bajos; entre 5 y 25 ton/ha. Sembrar tubérculos semilla de baja calidad, menor densidad de plantas, tasas inferiores de fertilizante y riego, y problemas de plagas y enfermedades conducen a bajos rendimientos. La calidad del tubérculo semilla es muy importante para que la producción sea alta, como se refleja en la gran cantidad de tubérculos semilla en el comercio mundial, que llega a 1.4 millones de toneladas por año. El contenido de materia seca de los tubérculos frescos normalmente varía entre 20-25 % de peso fresco.

El rendimiento económico depende en gran medida de la calidad del tubérculo, y puede verse afectado por el manejo del riego. El déficit hídrico en la primera parte de la etapa de formación de tubérculos incrementa la ocurrencia de tubérculos fusiformes, lo cual es más notorio en variedades de tubérculos cilíndricos, comparadas con las de tubérculos redondos. El déficit hídrico durante esta etapa, seguido del riego, puede provocar agrietamiento de los tubérculos o tubérculos con el corazón negro. El déficit hídrico que sigue a la brotación de los tubérculos puede reducir el rendimiento de los tubérculos comercializables de un 90 % a 70 %, o incluso 50 %.

BIBLIOGRAFÍA

Bradshaw, J.E. 2009. A genetic perspective on yield plateau in potato. *Potato Journal* 36 (3-4):79-94.

Condori, B., Hijmans, R.J., Quiroz, R. y Ledent, J.-F. 2010. Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modelling. *Field Crops Research* 119(1):135-144.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Sood, M.C. y Singh, N. 2003. Water Management. En: Khurana, S.M.P., Minhas, J.S., Pandey, S.K., eds. *The potato: Production and utilization in Sub-Tropics.* Nueva Delhi, India, Mehta Publishers, págs. 111-120.

Stol, W., De Koning, G.H.J., Kooman, P.L., Haverkort, A.J., Van Keulen, H. y Penning de Vries, F.W.T. 1991. *Agro-ecological characterization for potato production.* A simulation study at the request of the International Potato Center (CIP), Lima, Perú. TPE/CABO-DLO Report 155, Wageningen, Países Bajos, 53 págs.

Wolfe, D. W., Henderson, D. W., Hsiao, T. C. y Alvino, A. 1988. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. I. Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. *Agronomy Journal* 80:859-864.

Tomate

AUTOR PRINCIPAL
Adriano Battilani
(Consorzio di Bonifica CER, Bolonia, Italia)

AUTORES COLABORADORES
M. Henar Prieto
(SIA, Junta de Extremadura, Badajoz, España),
Cosme Argerich
(INTA La Consulta, Mendoza, Argentina),
C. Campillo
(SIA, Junta de Extremadura, Badajoz, España),
Vito Cantore
(CNR, ISPA, Bari, Italia)
AGRADECIMIENTOS
Blaine R. Hanson
(Universidad de California, Davis, EE. UU.),
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Adriano Battilani
(Consorzio di Bonifica CER, Bolonia, Italia),
Vito Cantore
(CNR, ISPA, Bari, Italia),
EU-Qualitom Consortium *(autores correspondientes: Y. Dumas, P. Bussieres; INRA, Francia),*
Gabriella Izzi
(anteriormente FAO, División de Agua y Suelo, Roma, Italia; actualmente WB, Washington, EE. UU.)
M. Henar Prieto
y C. Campillo
(SIA, Junta de Extremadura, Badajoz, España)

Tomate

DESCRIPCIÓN GENERAL

El tomate *Solanum lycopersicum,* L. *(anteriormente Lycopersicon esculentum,* Mill.) es una planta diurna herbácea perenne, de fotoperíodo neutro, que normalmente se cultiva como anual en regiones templadas. Hay tres tipos de tomate cultivado: indeterminado, semideterminado y determinado. Las plantas indeterminadas son altas, frecuentemente de más de 2 m de alto, con un crecimiento vegetativo que continúa por mucho más tiempo después del comienzo de la floración, en comparación con los otros dos tipos. El fruto madura gradualmente a partir de los racimos de frutos basales. Las plantas semideterminadas son de menor altura que las anteriores, alcanzando una altura máxima de 0.9-1.5 m. Su característica es que los racimos de frutos principales maduran juntos, aunque la planta también seguirá produciendo frutos adicionales. Los tomates indeterminados y semideterminados deben estar estacados o en espaldera, se cultivan para el mercado fresco y se cosechan a mano. Los tipos determinados, los llamados tomates de arbusto, en su mayoría reposan en el suelo, y tienen una floración relativamente concentrada y el cuajado de sus frutos dura solamente cerca de tres semanas. El crecimiento vegetativo continúa durante este periodo. La mayoría de los frutos de variedades determinadas maduran en un período relativamente corto y por esta razón son aptos para la recolección mecanizada. Las variedades de tomate para procesamiento se cultivan buscando firmeza y piel fuerte, y son del tipo determinado, con excepción de los tomates pelados tipo San Marzano, que son variedades indeterminadas o semideterminadas. Los parámetros de la versión actual de *AquaCrop* están establecidos solamente para el tomate de procesamiento, ya que considera únicamente una cosecha por cultivo.

La producción actual de tomate a nivel mundial es de aproximadamente 152 millones de toneladas de fruto fresco, en alrededor de 4.4 millones de hectáreas (Figura 1). El tomate es el segundo cultivo de hortícola más valioso después de la papa o patata (FAO, 2011). El área cultivada aumentó 1.4 millones de hectáreas (+40 %) en el período de 1997-2007; pero la producción total del fruto, incluyendo el tomate fresco para el mercado, solamente aumentó 20 millones de toneladas (15 %). Anualmente se cultivan más de 38 millones anuales de toneladas para la industria de procesamiento, haciendo del tomate la hortaliza líder para procesamiento en el mundo. La producción del fruto para procesamiento aumentó aún más en proporción, en 11 millones de toneladas (+49 %), mientras que solamente se cosecharon 0.5 millones de hectáreas (+10 %) con tomate para procesamiento *(WPTC, 2011*). El consumo mundial de tomate aumentó en un promedio de 4.5 % anual entre 1990 y 2004. Los productores de tomate se encuentran localizados principalmente entre zonas subtropicales y templadas, siendo China, Estados Unidos, India, Turquía, Egipto, Italia, Irán, España, Brasil y México los principales países productores. (Véase la Figura 2 para áreas cosechadas).

FIGURA 1 Área mundial cosechada de tomate y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011)

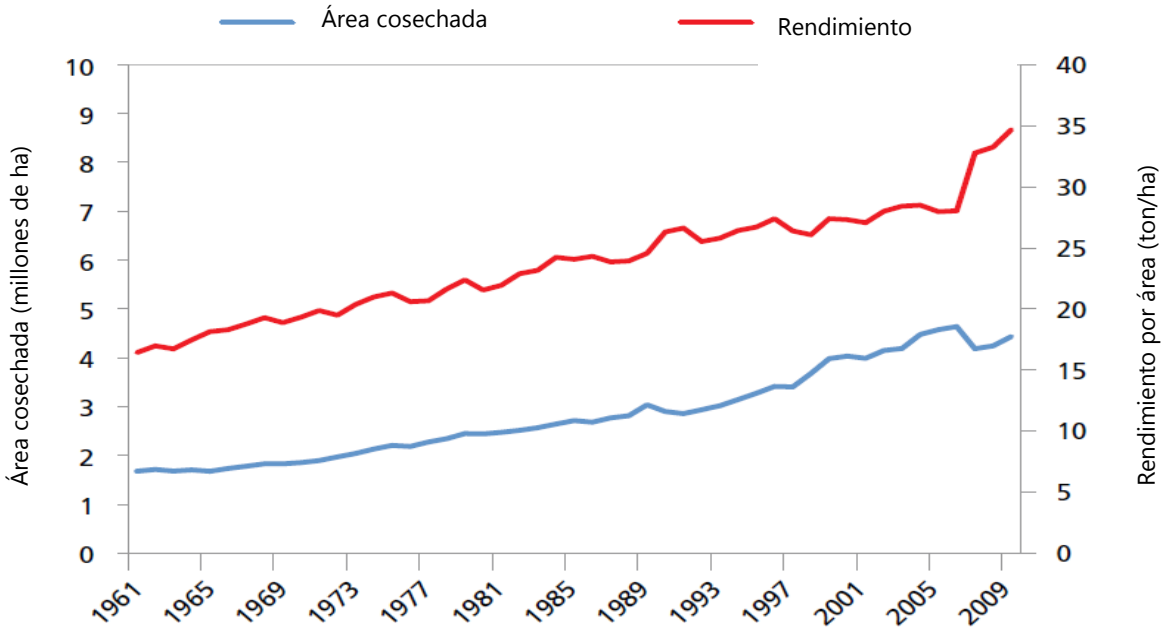
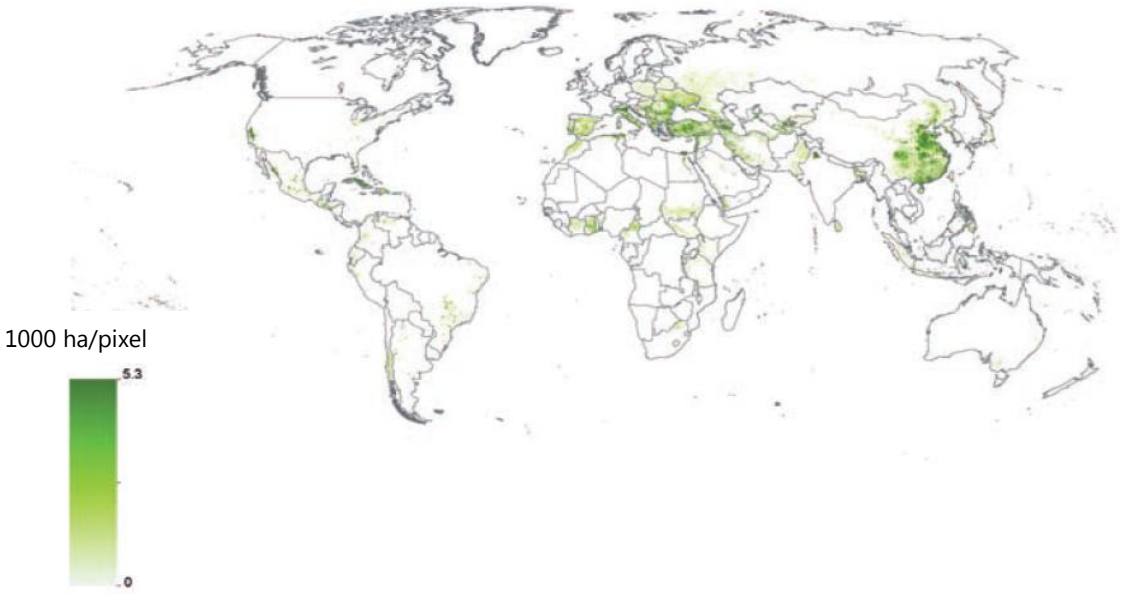


FIGURA 2 Área cosechada de tomate (SAGE, 2000)



Año de referencia 2000

El tomate requiere suelos con adecuada capacidad de retención de agua y aireación. Se prefieren suelos bien drenados, profundos y franco arenosos, aunque suelos más pesados pueden ser también altamente productivos con un manejo adecuado. El tomate es intolerante a la compactación del suelo y encharcamiento; por lo tanto la capa superior de 15-20 cm del suelo tiene que ser permeable. En suelos arcillosos, en ocasiones es necesario el arado profundo para permitir el drenaje del agua y una mejor penetración de las raíces. En algunos lugares, el tomate necesita una rotación de 3 años con otros cultivos que no sean solanáceas (por ejemplo papa o patata, pimienta, berenjena, tabaco) para reducir al mínimo los nematodos, virus y enfermedades bacterianas. El tomate se cultiva generalmente en rotación, a menudo únicamente con un ciclo de 2 años.

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

Con mucha frecuencia, los tomates se trasplantan para lograr una emergencia, densidad y desarrollo más uniforme de la planta. Es difícil alcanzar uniformidad y un porcentaje alto de emergencia cuando se siembra en el campo, debido a sus semillas pequeñas. La siembra directa se limita generalmente a variedades estándar; este método con híbridos es poco rentable debido al alto costo de las semillas. Los lechso de siembra deben prepararse cuidadosamente para eliminar obstrucciones del suelo que afecten la siembra directa. El uso de máquinas de siembra de precisión, en comparación con plantadoras tradicionales o siembra manual, permite el uso de semillas peletizadas y evita el raleo en la etapa de la cuarta hoja, o después. Los tomates se siembran mejor cuando la temperatura promedio de la capa superior de 100 mm del suelo, durante 7 días, es > 10°C. El período de siembra se extiende desde finales de febrero a mayo en el hemisferio norte, o de agosto a mediados de diciembre en el hemisferio sur. Por supuesto, la estación está mucho menos definida en los trópicos y subtrópicos.

La profundidad óptima de siembra es de 2-4 cm. La densidad de los tomates sembrados para procesamiento es generalmente más alta que los trasplantados porque, hasta cierto punto, las densidades mayores de siembra conducen a mayores rendimientos y esto se contrarresta con el aumento del costo de las plántulas para trasplantar a densidades mayores. Normalmente se requieren alrededor de 100 000 semillas por hectárea (1-1.5 kg/ha) cuando se siembra tomate para procesamiento. En contraste, se utilizan entre 0.3 y 0.5 kg/ha de semillas en caso de siembra de precisión con semillas peletizadas. Las plántulas para trasplante se siembran en bandejas dentro de un vivero (25-35 mm de diámetro por plántula), con una densidad de entre 750 y 1000 plántulas/m^2, y se trasplantan de 25 000 a 33 000 plantas/ha. Las plántulas se trasplantan normalmente en la etapa de 4-5 hojas verdaderas, de 4 a 7 semanas después de la siembra. Las plántulas deben ser cortas, 150-200 mm, incluyendo la raíz enterrada, y menos si el trasplante es mecanizado, y deben tener una base de tallo gruesa (diámetro > 4 mm). Estos requisitos solamente se pueden cumplir si hay un alto nivel de radiación en el vivero. El período de trasplante va desde finales de marzo hasta finales de junio, principios de julio en el hemisferio norte, o desde septiembre hasta mediados de diciembre en el hemisferio sur.

El espaciamiento de las plantas varía considerablemente dependiendo de las condiciones, el costo de las semillas o plántulas, tipos y variedades de plantas y prácticas locales. Los rangos de densidad varían entre 2 a 6 plantas/m^2 y los rangos de espaciamiento entre surcos de 0.75 m a 1.6 m. A menudo, el tomate para procesamiento se siembra con una mayor densidad que el tomate de mercado. En el último caso, se deja un espacio más amplio para el acceso del cosechador, de manera que se pueda cosechar el fruto maduro con frecuencia. El tomate para procesamiento se puede plantar en surcos dobles sobre camas anchas para obtener un rendimiento ligeramente mayor. Generalmente, el tomate empieza a florecer temprano, 25-40 días después del trasplante o 35-50 días después de la emergencia, dependiendo en gran medida de la temperatura. El ciclo

biológico oscila ente 95-115 días para el tomate para procesamiento, o hasta más de 145 días para el tomate fresco indeterminado para mercado.
Las flores del tomate se desarrollan a partir de yemas situadas en el eje del ángulo entre la hoja y el tallo. En consecuencia, las flores se forman en secuencia a medida que aumenta el número de hojas en el tallo, y la aparición de flores y frutos se superpone al crecimiento vegetativo durante todo el período. Este período dura más tiempo en el tipo indeterminado que en el determinado, debido a la diferencia de duración del desarrollo de las hojas nuevas. Los primeros nudos en el tallo que pueden potencialmente formar flores se producen entre el quinto y el séptimo nodo, según la variedad y las temperaturas en las primeras semanas de cultivo (Dieleman y Heuvelink, 1992); sin embargo, no hay muchas diferencias entre los tres tipos de determinacia.

El tomate tiene una marcada tendencia a dejar caer tempranamente yemas florales, flores y frutos jóvenes bajo ciertas condiciones, como un nivel bajo de radiación solar y alta temperatura y humedad. El nitrógeno y el estado hídrico de la planta son igualmente influyentes. Un alto nivel de nitrógeno o estado hídrico estimula el crecimiento vegetativo; esto al parecer compite por los asimilados con las flores y frutos en desarrollo, provocando abscisión de las flores y aborto de frutos jóvenes. Además, un suministro limitado de agua puede suprimir el desarrollo de nuevas hojas, dando como resultado un período reducido de formación del fruto. Por lo tanto, es difícil generalizar, ya que la observación de campo de los estados fenológicos del tomate puede ser, en ocasiones, muy variable, incluso para la misma variedad y tipo de planta. Por otra parte, la notable capacidad de adaptación de la planta de tomate hace posible el cultivo en todo el mundo, junto con la aplicación de diversas técnicas de cultivo en invernaderos y en el campo.

Las plantas de tomate que crecen a partir de semillas desarrollan una fuerte raíz primaria, que alcanza una profundidad > 1.5 m en suelos sin capas que restrinjan el crecimiento radicular (Battilani *et al.,* 2002). En los suelos de buena calidad y profundidad de California se ha documentado un enraizamiento de hasta casi 3 m. Sin embargo, la mayor parte de la absorción de agua y nutrientes se produce en la capa de suelo a 0.2-0.75 m, en donde se concentra el 50-80 % de las raíces. Las raíces laterales se inician normalmente dentro de los 5 cm de la punta de la raíz primaria, aumentando en longitud hacia arriba junto con la raíz primaria a una posición alrededor de 20 cm desde la punta de la raíz primaria. La raíz primaria de trasplante está rota o es curva; por lo tanto, en las primeras 3-4 semanas se desarrollan como raíces primarias varias laterales grandes que penetran hacia abajo. La mayor densidad de longitud de raíces se encuentra en la capa de los primeros 40 cm del suelo, donde se concentra la mayor parte de las raíces activas, cuando el suelo recibe agua de forma intermitente en forma de lluvia o riego. El riego por goteo altera el patrón de desarrollo de la raíz; sin embargo, las raíces crecen preferentemente en suelo húmedo, independientemente de las áreas mojadas por el goteo de superficie o subterráneo (Oliveira *et al.,* 1996).

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

El tomate para procesamiento consume 400-800 mm de agua desde la emergencia/trasplante hasta la cosecha, dependiendo del clima, tipo de planta, suelo, riego y manejo de cultivo. Las plantas de tomate pueden tolerar la sequía en cierto grado; por lo tanto, los niveles de humedad del suelo pueden alcanzar el 50 % del total de agua disponible (TAW) sin pérdidas significativas de rendimiento, después de que se ha completado el desarrollo del dosel. Es importante mantener niveles adecuados de humedad en el suelo al inicio del ciclo biológico, al momento del trasplante y desde la primera flor hasta que el cuajado completo del fruto (por ejemplo, del quinto racimo en los ejes principales). El riego puede detenerse un par de semanas antes de la cosecha, dependiendo del almacenamiento de humedad del suelo y las previsiones de lluvia. El uso máximo del agua es en promedio 4-7 mm/día durante el máximo período de crecimiento en un clima subhúmedo, pero puede llegar 8-9 mm/día en zones más áridas. La productividad del tomate del tomate para

biomasa ($WP_{B/ET}$) oscila entre 1.3 a 3.5 kg/m^3, siendo 3 kg/m^3 considerada común para condiciones y prácticas favorables (Battilani, 2006). El extremo inferior del rango es posiblemente evidente en climas de alta demanda evaporativa, así como en donde la cobertura cobertura del dosel baja y hay humedecimiento frecuente de la superficie expuesta del suelo por lluvia o riego. Esto último aumenta la E de la ET. Se encontró en algunos estudios que la $WP_{B/ET}$ es en gran medida independiente de la fertilización con nitrógeno y de la salinidad, pero dentro de unos límites. But some $WP_{B/ET}$ se reducirá si el nitrógeno y la salinidad son limitantes (Heuvelink y Dorais, 2005). *AquaCrop* requiere entonces una calibración local con la biomasa producida por un tratamiento sin limitaciones de nitrógeno (o un tratamiento no salino), con el fin de simular tales casos de manera realista.

RESPUESTA A ESTRESES

La relación vegetativa/reproductiva del tomate depende también del estado hídrico de la planta en un grado similar pero menor que el algodón (véase el capítulo Algodón). Como ya se ha mencionado, un estado hídrico elevado estimula el crecimiento vegetativo y por lo general conduce a la caída de flores y al cuajado del nuevo fruto temprano en la estación. Por otra parte, si un estrés hídrico de leve a moderado dura muchos días al inicio de la estación, se puede producir un dosel visiblemente más pequeño, y por lo tanto, hay una menor producción de biomasa como resultado de una intercepctación reducida de radiación. La fotosíntesis por unidad de área foliar es moderadamente resistente al estrés hídrico. Por lo tanto, el cultivo es bastante resistente a la sequía moderada, una vez se consigue una buena cobertura del dosel. El riego en exceso provoca un crecimiento foliar excesivo y las plantas con alto vigor vegetativo tienden a producir frutos de baja calidad debido al contenido reducido de sólidos solubles. Por otra parte, el exceso de agua cerca de la cosecha puede causar la acumulación de nitratos en el fruto. En algunas variedades, las grandes fluctuaciones en los niveles de humedad del suelo durante la maduración del fruto pueden causar agrietamiento del fruto, manchas, pudrición apical y variación en el tamaño y forma.

El cultivo es sensible a las heladas. Las bajas temperaturas, si persisten por más de unos pocos días, reducen las tasas de brotación de hojas y racimos. La planta produce hojas más gruesas que interceptan menos luz, lo que reduce el cuajado de los frutos como resultado de una pobre polinización. Ya se había señalado la caída de flores y frutos jóvenes a bajas temperaturas. La exposición a altas temperaturas provoca una reducción en el número de granos de polen y perjudica su viabilidad y germinabilidad, afectando notablemente al cuajado. Las altas temperaturas diurnas y nocturnas ocasionan la aceleración en la floración y una visible reducción en el número de racimos, flores por racimo y un aumento en la caída de flores y aborto de frutos. La humedad elevada, combinada con temperaturas por encima de 27 °C, también afecta la germinación del polen, dando como resultado un rendimiento reducido. El tomate, al igual que muchos otros cultivos, puede compensar las temperaturas diurnas y nocturnas, mitigando los estreses ya sufridos. No obstante, las diferencias entre temperaturas diurnas y nocturnas de menos de 12 °C aproximadamente afectan negativamente el rendimiento de muchas variedades (Gent y Ma, 1998). Sin embargo, las variedades de tomate para procesamiento producidas en climas cálidos semiáridos no responden negativamente a las temperaturas máximas en el rango de 35-40 °C.

Como sucede para otros cultivos, el requerimiento de nutrientes minerales es grande para una alta producción. La aplicación de fertilizante puede ser hasta de 220-250 kg de N, 40-80 kg de P_2O_5, 300 kg de K_2O y 20-50 kg de MgO por hectárea para los cultivos con rendimientos cercanos a 100 ton/ha. Los tomates frescos para el mercado, con un rendimiento de más de 150 ton/ha, requieren hasta 300-600 kg de N, 150-300 kg de P_2O_5 y 600-1000 kg de K_2O por ha. El nitrógeno a menudo se suministra en aplicaciones espaciadas, una en la siembra y otra en la etapa inicial del cuajado cuaja del fruto. El nitrógeno, en exceso o cuando se aplica tarde durante el período de crecimiento, afecta y retrasa la maduración del fruto. El exceso de nitrógeno temprano en la estación induce la caída

del fruto y minimiza el cuajado (Adam, 1986; Benton, 1999).

El cultivo es moderadamente sensible a la salinidad. El umbral promedio de salinidad de la zona radicular (EC_e) es de aproximadamente 2.5 dS/m. El rendimiento disminuye alrededor del 50 por ciento en EC_e de 8 dS/m a medida que aumenta la EC_e, y es nulo en EC_e de 13 dS/m en algunos estudios. Para efectos prácticos, el umbral de salinidad del agua de riego para uso a largo plazo es alrededor de 3.5 dS/m en suelos arenosos, 2.0 dS/m en suelos francos y 1.2 dS/m en suelos arcillosos (Ayers y Westcot, 1985). Durante la maduración del fruto, estreses salinos leves pueden mejorar la calidad del fruto sin ningún efecto perjudicial sobre el rendimiento. De hecho, la calidad del fruto es mejor con salinidad moderada, pero al costo de una producción reducida, como muestran diversos estudios en Israel.

PRÁCTICA DE RIEGO

El riego luy superficie. por surco es aún una práctica común. Los métodos de riego presurizados (riego por aspersión, mini aspersión y goteo) son ahora comunes en muchos de los principales países productores. Los grandes productores de tomate aprendieron desde hace mucho tiempo a limitar el riego a medida que el cultivo se aproxima a la madurez. El manejo del riego debe enfocarse en el ahorro de agua, manteniendo el rendimiento y mejorando la calidad del fruto, debido a los cambios vegetativos VC que se producen en respuesta al estado hídrico. En los últimos años, los experimentos con riego deficitario se han dirigido a estos objetivos, ya sea manteniendo el déficit a un nivel seleccionado durante un largo tiempo (a menudo conocido como DI), o con el riego deficitario únicamente en etapas seleccionadas del ciclo biológico del cultivo, lo que se conoce como riego deficitario regulado (RDI) (Battilani *et al.,* 2008). En las zonas más áridas se practica el riego de presiembra, cuando las precipitaciones pasadas no son suficientes para reponer el perfil del suelo. Los riegos de presiembra también se utilizan para lixiviar suelos más salinos. Frecuentemente se utilizan uno o dos riegos durante un período de 2-4 semanas para el establecimiento del cultivo, después del trasplante o siembra, si el suelo está inicialmente bien cargado. El riego debe ser suficiente para asegurar un crecimiento rápido del dosel durante su desarrollo y gran parte del período de floración, pero no tanto como para causar un crecimiento foliar excesivo y la caída asociada de flores y frutos jóvenes. Poco después del cambio de color del fruto, se debe reducir el riego, aunque el inicio del recorte del riego depende de la humedad restante en la zona radicular del suelo y la tasa de ET para ese período. Esto es simulado fácilmente por *AquaCrop*. El recorte en el estado de maduración ahorra agua, pero debe ser óptimo para mejorar la calidad del fruto, al tiempo que permite que los últimos frutos alcancen el tamaño comercial y se mantenga la cobertura del dosel para proteger los frutos de las quemaduras solares.

RENDIMIENTO

El rendimiento de los tomates para procesamiento se ha incrementado en más de 50 % en los últimos 30 años en California y los países del Mediterráneo. Un buen rendimiento comercial de fruto fresco oscila entre 60 y 120 ton/ha en tomates para procesamiento, y más de 150 ton/ha en variedades frescas para el mercado. El rendimiento puede ser mucho mayor en la producción en invernaderos para el mercado de frutosfresco. En las zonas más áridas, la producción de cultivos de secano oscila entre 40 y 70 % de los de riego. El contenido de sólidos solubles en el jugo de las variedades más utilizadas puede variar entre 4.2 y 5.5 %. Las fábricas requieren una calidad mínima para el procesamiento de tomates: la acidez del jugo debe oscilar entre 0.34 y 0.40 g/100 ml, azúcares reductores entre 2.5 y 3.0 g/100 ml, y la consistencia Bostwick entre 8 y 12 cm/30 s. El contenido de materia seca del fruto fresco oscila entre 4.0 hasta 7.0 % (Leoni, 2002). El índice de cosecha (HI, la relación entre el rendimiento medido como materia seca y la biomasa total por encima del suelo) normalmente varía entre 0.5 y 0.65. El HI disminuye cuando las plantas son

regadas en exceso o reciben fertilización exagerada con nitrógeno, debido a un crecimiento vegetativo desmesurado. Sin embargo, puede que el rendimiento no se vea afectado o incluso aumente ligeramente, siempre que el aumento de la producción de biomasa compense el menor HI. Por otra parte, el rendimiento puede verse afectado negativamente cuando el crecimiento vegetativo es tan excesivo que retrasa mucho el cuajado del fruto y el HI se reduce lo suficiente. *AquaCrop* proporciona los medios para simular este comportamiento y la posibilidad de optimizar el rendimiento mediante el uso de la estrategia apropiada de riego.

BIBLIOGRAFÍA

Adams, P. 1986. Mineral nutrition. En: Atherton, J.G. y Rudich, J., eds. *The Tomato Crop.* Londres, Chapman & Hall, págs. 281-334.

Ayers, R.S. y Westcot, D.W. 1985. La calidad del agua en la agricultura. *Estudio FAO: Riego y drenaje n.º* 29, Rev. 1. Roma, FAO.

Battilani, A. 2006. Water and nitrogen use efficiency, dry matter accumulation and nitrogen uptake in fertigated processing tomato. IX ISHS Symposium on Processing Tomato, Melbourne, nov. 15-18 de 2004. *Acta Horticulturae,* 724:67:74.

Battilani, A., Bonetti, G. y Di Lucca, G. 2002. Tomato root growth under different soil and climate conditions. *Acta Horticulturae,* 613:47-56.

Battilani, A., Plauborg, F.L., Andersen, M.N., Jensen, C.R., Sandei, L. y Solimando, D. 2008. Water saving irrigation strategies for processing tomato. XI ISHS Symposium on Processing Tomato, Toronto, 2008. *Acta Horticulturae,* 823:69-76.

Benton, J.J. 1999. *Tomato plant culture.* Londres, Reino Unido, CRC Press.

Dieleman, J.A. y Heuvelink, E. 1992. Factors affecting the number of leaves preceding the first inflorescence in the tomato. *Journal of Horticultural Science* 67:1-10.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Gent, M.P.N. y Ma, Y.Z. 1998. Diurnal temperature variation of the root and shoot affects yield of greenhouse tomato. *Horticultural Science* 33, 47-51.

Heuvelink, E. y Dorais, M. 2005. Crop growth and yield. En: Heuvelink, E., ed. *Tomatoes.* CABI Publishing, Crop production science in horticulture, n.º 13.

Leoni, C., 2002. Improving the nutritional quality of processed fruit and vegetables: the case of tomatoes. En: Jorgen, W.M.F., ed. *Fruit and vegetable processing - improving quality,* Woodhead Publishing y CRC Press LLC.

Oliveira M.R.G., Calado, A.M. y Portas, C.A.M. 1996. Tomato root distribution under drip irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 121: 644-648.

SAGE. 2000. Center for Sustainability and the Global Environment, Universidad de Wisconsin-Madison. Base de datos en línea disponible en el enlace http://www.sage.wisc.edu/mapsdatamodels.html. Consultada en diciembre de 2011.

WPTC, 2011. Comunicados del Consejo Mundial del Tomate para Procesamiento disponibles en: www.wptc.to/Releases-wptc.aspx . Último acceso el 11 de diciembre de 2011.

Remolacha azucarera

AUTOR PRINCIPAL
Michele Rinaldi
(CRA, Bari, Italia)

AUTORES COLABORADORES
Stefaan Horemans *(SESVanderhave, Tienen, Bélgica)*

AGRADECIMIENTOS
Pasquale Garofalo (CRA, Bari, Italia), Theodore C. Hsiao (Universidad de California, Davis, EE. UU.)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Philippe Clouet *(Cristal Union, Francia),* Sam Geerts, Nirman Shrestha *(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica),* Michele Rinaldi, Pasquale Garofalo *(CRA, Bari, Italia)*

Remolacha azucarera

DESCRIPCIÓN GENERAL

La remolacha azucarera *(Beta vulgaris)* es una planta bianual que produce una gran raíz reservante como parte de la raíz primaria, y que contiene de 14 a 20 % de sacarosa en una base de materia fresca. Cuando se cultiva para la producción de azúcar, se cosecha en la primera estación, mientras que si es para floración y producción de semillas, el cultivo se prolonga hasta el segundo año. La primera estación del cultivo sembrado en otoño va desde el otoño hasta inicios del verano del año siguiente, y para el cultivo sembrado en primavera, de primavera hasta el otoño de ese mismo año.

La producción mundial actual es de aproximadamente 227 millones de toneladas de remolacha producidas en 4.2 millones de hectáreas (FAO 2011). A pesar de que el área cultivada ha ido disminuyendo en las últimas dos décadas, la producción total de la raíz se mantuvo estable en el mismo período debido a los rendimientos en aumento (Figura 1). La remolacha azucarera se cosecha en la franja de 60° latitud N y 30° latitud S, siendo Francia, Estados Unidos, Alemania, Federación de Rusia, Turquía, Polonia, Ucrania, Reino Unido y China los principales países productores, en ese orden (FAO , 2011) (Figura 2).

La remolacha azucarera usualmente se cultiva en rotaciones de 3-5 años (p. ej., trigo - remolacha azucarera - cebada - guisantes o arvejas) con cereales (Europa, Federación de Rusia y Ucrania), maíz (sur de Europa, América), fríjoles/judías y soya/soja (Estados Unidos, China). Los rendimientos óptimos de la remolacha se obtienen después del trigo o la cebada, mientras que la disponibilidad excesiva de nitrógeno que se presenta después del maíz o la soya/soja reduce la producción de azúcar. Se requiere como mínimo una rotación de 3 años para minimizar las enfermedades de la raíz, mancha foliar del hongo Cercospora y el arrastre de herbicidas.

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

Las semillas de remolacha son voluminosas y ligeras en masa; una semilla pesa únicamente alrededor de 10 mg. Las semillas se plantan de 1 a 2 cm de profundidad en un solo surco, pocas veces en un surco doble, con los surcos espaciados entre 0.40 y 0.76 m. Las semillas monogermen permiten la siembra de precisión con 120 000 semillas/ha, para obtener entre 60 000 y 110 000 plantas/ha en la cosecha. En algunas situaciones, se requiere el aclareo a mano o mecanizado para obtener la densidad de siembra óptima y un espaciamiento uniforme. La siembra debe hacerse cuando la temperatura del suelo es superior a 4 °C y el riesgo de heladas es nulo. También depende del manejo de los cultivos y la programación de la cosecha. Los períodos de siembra oscilan entre el otoño (India, climas de tipo mediterráneo), a inicios de la primavera (Europa occidental y oriental, Estados Unidos) y a finales de la primavera (Federación de Rusa, Reino

FIGURA 1 Área mundial cosechada de remolacha azucarera y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

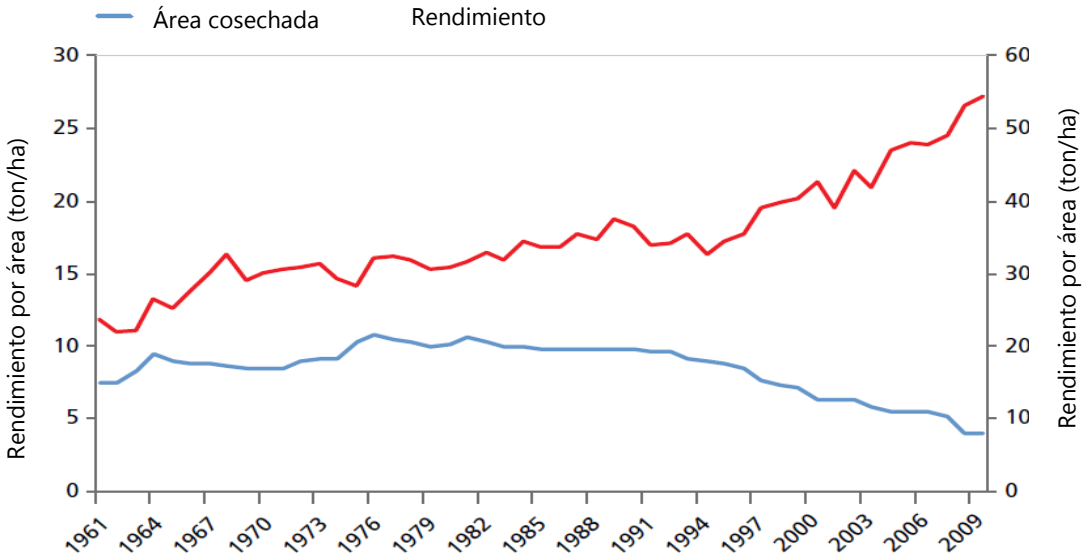
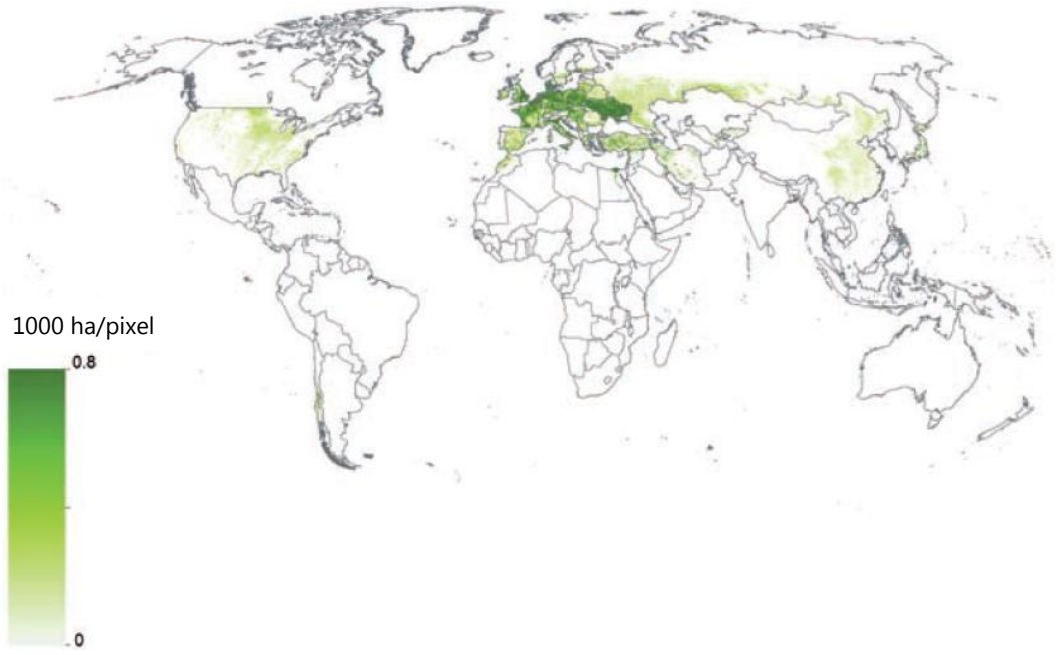


FIGURA 2 Área cosechada de remolacha azucarera (GEAZ, 2011)



Año de referencia 2000

Unido, Estados Unidos). La siembra en el Norte de África y Oriente próximo va de septiembre a diciembre, dependiendo del inicio de las lluvias. La siembra en la India se puede hacer en verano, invierno y en el período *kharif* . Extender el tiempo de siembra de la remolacha azucarera en invierno y otoño ha sido un objetivo importante del cultivo en las últimas décadas, con el fin de reducir el requerimiento de agua. Esto se logra evitando partes del verano, mientras se extiende el ciclo del cultivo y se aumenta así la productividad (Rinaldi y Vonella, 2005).

La temperatura mínima del suelo para la germinación puede ser tan baja como 4 °C. Una vez establecida, la plántula entra en un período de brotación foliar con prácticamente ninguna extensión de la parte superior de la raíz primaria para almacenamiento. A las seis semanas, la planta tiene 8-10 hojas, pero la porción reservante de la raíz aún se está engrosando (véanse Tabla 1 y Figura 3). A partir de esta etapa, el crecimiento de las hojas y la porción reservante de la raíz ocurre simultáneamente con la raíz que construyen una proporción cada vez mayor del peso seco total de la planta.

La remolacha azucarera desarrolla una zona radicular efectiva de 1.20 m o más profunda. El cultivo puede desarrollar un sistema radicular principal profundo en suelos profundos. Como es el caso de otros cultivos, la mayor parte del agua se extrae normalmente de la mitad superior del suelo de la zona radicular cuando el perfil del suelo es relativamente húmedo, aunque se ha reportado extracción de agua a 3 m en remolachas azucareras con riego deficitario en suelos muy profundos y abiertos. Dado que se cultiva para la producción de azúcar, la duración del ciclo influye en la concentración de sacarosa en la raíz. El período de tiempo del cultivo en el campo está limitado por la duración del ciclo bianual y por las restricciones de agua, luz y temperatura. En general, un ciclo de cultivo prolongado durante el verano puede modificar la relación fuente-absorción entre hojas y raíz, y en consecuencia, reducir el contenido de sacarosa de las raíz reservante que puede fluir hacia las hojas.

La evolución de la cobertura del dosel (CC) depende principalmente de la temperatura, y con frecuencia se alcanza la CC (CC_X) máxima después de 8 a 10 semanas, aproximadamente. La duración en días es simplemente indicativa, ya que la temperatura y la disponibilidad de agua puede influir sobre la duración de cada fase. La duración del tiempo en que permanecen verdes las hojas (y por lo tanto el dosel) depende de la temperatura y el estrés hídrico. Los cultivos plantados en primavera en el oeste y el este de Europa y los Estados Unidos se cosechan entre septiembre y noviembre, mientras que los cultivos plantados en otoño se cosechan a finales de primavera o inicios del verano (de mayo a julio en el hemisferio norte). En la Tabla 1 se presentan las duraciones de las principales etapas de los cultivos con referencia a diferentes regiones de cultivo y fechas de siembra.

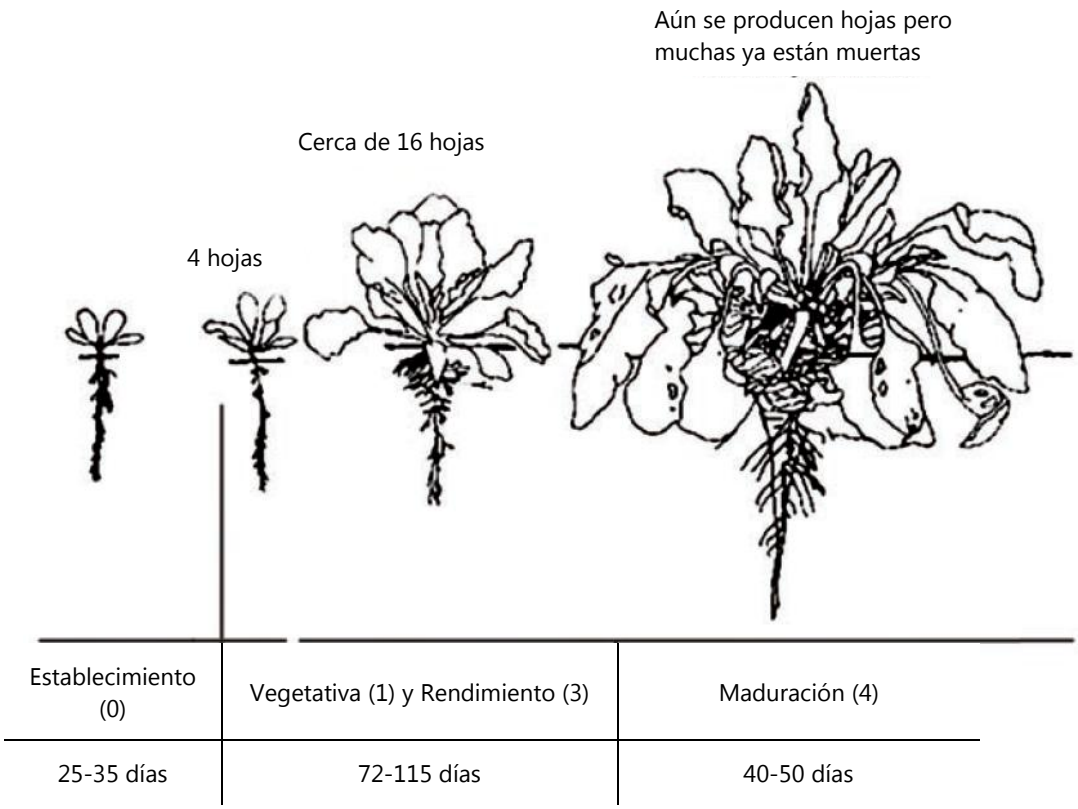
Se obtuvo un crecimiento foliar más rápido a 24 °C, y se observó un crecimiento más rápido de las raíces reservantes o principales a una temperatura considerablemente más baja, menos de 17 °C, cuando se cultivan a varias temperaturas constantes (rango de 7 a 31 °C, distanciadas por 4 a 7 °C de diferencia) (Terry, 1968; Milford y Riley, 1980). El crecimiento foliar es una función lineal de la temperatura por encima de 3 °C, y en el campo el crecimiento foliar está cerca de una función lineal de grados día acumulados calculados con una temperatura base de 1 °C (Milford *et al.,* 1985).

Las variedades modernas de remolacha azucarera son casi insensibles a la duración del día y a la granazón prematura (aparición del tallo de floración) y la floración no se produce en condiciones normales de cultivo en la primera estación. La granazón prematura reduce el rendimiento de sacarosa y es inducida por una combinación de las bajas temperaturas del invierno (0-10 °C) y días largos. Los mejoradores han seleccionado variedades con requerimientos muy fuertes para la inducción floral, que ahora se pueden utilizar para siembra temprana. La planta solamente florece en el segundo año cuando el objetivo es la producción de semillas.

TABLA 1 Fenología de la remolacha azucarera en varios ambientes (duraciones en días)

	Período de siembra	Siembra-emergencia	Siembra-cobertura del dosel máxima	Siembra-inicio de senescencia del dosel	Madurez de la siembra
Países mediterráneos	Noviembre	10-14	100-130	130-160	200-250
	Febrero	16-20	80-100	100-120	160-180
Europa septentrional	Marzo	18-22	80-100	100-120	160-190
	Abril	18-22	70-90	90-120	150-180
India	Octubre	8-12	40-60	60-80	120-140
EE. UU.	Septiembre	8-20	90-110	110-130	240-270
	Marzo	16-20	80-100	100-120	170-190
	Junio	7-17	70-80	80-90	130-150

FIGURA 3 Etapas típicas de desarrollo de la remolacha azucarera



PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

La remolacha azucarera consume 500-800 mm de agua durante el período de crecimiento. Los requerimientos hídricos estacionales dependen del clima y las condiciones meteorológicas, de la fecha de siembra y densidad, riego y manejo del cultivo (Allen *et al.,* 1998). Las remolachas azucareras son más sensibles a la escasez de humedad en las primeras etapas de crecimiento, pero su pico de consumo de agua llega tarde en la estación, cuando se alcanza la cobertura del dosel máxima. Se deben mantener los niveles de humedad del suelo por encima de la mitad a un tercio del total de agua disponible (TAW) para evitar el cierre estomático. Durante el período máximo de crecimiento de 30 días, el uso máximo del agua oscila entre 6 a 9 mm/día, dependiendo del clima. Por lo general hay una relación positiva entre el uso del agua, la producción radicular y el contenido de azúcar. El estrés hídrico reduce el rendimiento, mientras que el riego excesivo cerca de la cosecha reduce la concentración de sacarosa en la raíz e incrementa los costos de procesamiento, lo que reduce los beneficios (Ehlig y Lemert, 1979).

En cuanto a la productividad del agua, la remolacha sembrada en primavera, estudiada comúnmente en el Norte de Europa y América, ha reportado una productividad del agua consumida para la producción de materia seca ($WP_{B/ET}$) entre 2.1 y 6.8 kg/m^3 (Dunham, 1993). Este rango amplio de valores reflejan la diversidad de climas en términos de demanda evaporativa y el hecho de que muchos valores de $WP_{B/ET}$ no se normalizaron por este parámetro. Es pertinente indicar aquí que la materia seca de interés se compone principalmente de materia seca de la raíz reservante, con materia seca del tayo que constituye solamente una pequeña porción (p. ej., 20 %). Esto contrasta con todos los cultivos que no son de raíces, en los que la materia seca de interés se centra en la porción por encima del suelo, dejando de lado la parte radicular, porque es extremadamente difícil de extraer cuantitativamente del suelo (Rinaldi *et al.,* 2006).

RESPUESTA A LOS ESTRESES

La remolacha azucarera es sensible a los déficits hídricos en el momento de la emergencia del cultivo y durante un período de aproximadamente un mes después de la emergencia. Se prefieren riegos frecuentes y ligeros durante este período. El riego puede requerirse también para reducir la formación de costra superficial en el suelo y reducir la salinidad de la capa superior del mismo. Un exceso de riego temprano puede retardar el desarrollo foliar y puede estimular la floración durante el primer año (granazón prematura). Los déficits hídricos en medio del período de crecimiento (períodos vegetativos y de formación de fruto) tienden a afectar los rendimientos de azúcar con más fuerza que cuando se presentan en períodos posteriores. El suministro de agua no limitado cerca de la época de cosecha tiende a reducir la concentración de azúcar en la raíz a pesar de que aumenta el peso fresco de las raíces. El efecto final es que el rendimiento de sacarosa es pequeño. Los déficits hídricos moderados, junto con deficiencias leves de nitrógeno hacia el final del período de crecimiento, reducen el crecimiento de la raíz pero elevan la concentración de sacarosa. En general, el crecimiento de la parte superior hacia el final del período de crecimiento tiende a tener una correlación negativa con la producción de azúcar, aparentemente como resultado de la competencia por los asimilados entre el crecimiento vegetativo y la raíz reservante. Normalmente, la estación de riego termina entre 2 a 4 semanas antes de la cosecha, dependiendo de la capacidad de retención humedad del suelo, para aumentar la concentración de sacarosa de las remolachas. Sin embargo, el suelo no debe estar demasiado seco para que no se dificulte la extracción de las remolachas durante la cosecha. Por lo tanto, parece que el cultivo no es muy sensible a déficits hídricos moderados, excepto durante la emergencia y el crecimiento inicial. Cuando las plantas están bajo estrés hídrico, las hojas se vuelven de color verde oscuro, y si el estrés es severo, las hojas no se recuperan a partir del mediodía, marchitándose por la tarde (Hanks *et al.,* 1981).

Se requiere de una disponibilidad adecuada de nitrógeno en el suelo para garantizar un buen crecimiento vegetativo en primavera. El nitrógeno se suministra a menudo en aplicaciones separadas; una pequeña cantidad en la siembra y el resto después del raleo. Como se mencionó, el exceso de nitrógeno, especialmente al final de la estación estimula el crecimiento foliar excesivo y reduce la concentración de azúcar de la remolacha. La aplicación de fertilizantes puede ser de hasta 150 kg/ha de N, 50 a 70 kg/ha de P_2O_5 y 100 a 160 kg/ha de K_2O en la siembra.

El cultivo es bastante tolerante a la salinidad, con excepción de las primeras etapas de crecimiento después del establecimiento del cultivo, (Katerji *et al.,* 1997). La disminución del rendimiento es 0 % a una EC_e de 7 dS/m, 50 % a una EC_e de 15 dS/m, y 100 % a una EC_e de 24 dS/m. La EC_e no deberá exceder 3 dS/m durante el crecimiento inicial.

PRÁCTICA DE RIEGO

Cerca de un cuarto de las 4.2 millones de hectáreas de remolacha azucarera en el mundo reciben riego, pero la fracción varía mucho de región a región. En los Estados Unidos, este del Mediterráneo, Irán y Chile, se riega entre el 80 y el 100 % del área de remolacha azucarera; en el oeste del Mediterráneo el área de riego suma 20-80 % del total; mientras que en Europa Central y del Norte es menos del 40 %. El riego es suplementario en la mayoría de áreas de cultivo de remolacha azucarera en el mundo, y por lo general solamente se necesitan 100-200 mm. En otras áreas (Estados Unidos, Egipto, Pakistán) el riego es esencial para la producción de remolacha y comúnmente se aplican de 500-1000 mm. En la remolacha azucarera se utilizan prácticamente todos los métodos de riego, principalmente por aspersión (pivote, cañones), aunque también riego de superficie, e incluso riego por goteo en raras ocasiones.

Cuando el suministro de agua es limitado, pero el suelo no el agua no se debe utilizar para satisfacer las necesidades completas de los cultivos. En lugar de esto, se debe cortar el riego pronto y utilizar el agua ahorrada para expandir el área cultivada. Esto se debe a que la eficiencia del uso del agua para el rendimiento de sacarosa aumenta cuando se restringe el agua cerca de la cosecha, por las razones ya analizadas. El índice de cosecha aumenta significativamente por encima del valor obtenido bajo riego completo en ésas condiciones.

RENDIMIENTO

Un buen rendimiento comercial de remolacha azucarera de 160 a 200 días es de 40 a 60 ton/ha de remolacha fresca. Se han obtenido rendimientos de hasta 100 ton/ha o más bajo condiciones muy favorables. La producción total de materia seca varía de menos de 10 ton/ha a más de 20 ton/ha. El contenido en sacarosa varía principalmente entre 14 y 18 % sobre una base de materia fresca, lo que corresponde a rendimientos de sacarosa de 5 hasta 15 ton/ha. La $WP_{sucrose/ET}$ varía entre 0.9 y 1.7 kg/m^3.

El índice de cosecha (HI) de la remolacha azucarera se define mejor como la fracción de la sacarosa producida con respecto a la biomasa de la raíz reservante y tallo. No se presta atención a la biomasa de las raíces fibrosas, porque la mayoría de los estudios no intentan medirla. Además, la biomasa del brote no suele medirse. El HI en términos de sacarosa producida caería comúnmente en el intervalo de 0.4 a 0.55, suponiendo que la biomasa de las raíces reservantes sea de cuatro a ocho veces la biomasa del tallo, aunque también se han encontrado valores fuera de este rango en la bibliografía. El HI tiende a disminuir cuando las condiciones favorecen un crecimiento vegetativo exuberante, principalmente altos niveles de nitrógeno y elevado suministro hídrico, especialmente cuando se acerca el tiempo de cosecha. El HI aumenta generalmente al extender el tiempo de la cosecha hasta más tarde en la estación, pero solamente hasta cierto punto.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO: Riego y drenaje n.º 56,* Roma, FAO, 300 págs.

Dunham, R.J. 1993. Water use and irrigation. En: Cooke, D.A. y Scott, R.K., eds. *The Sugar Beet Crop: Science into practice.* Chapman & Hall. págs. 279-309

Ehlig C.F. y LeMert R.D. 1979. Water use and yields of sugar beet over a range from excessive to limited irrigation. *Soil Science Society American Journal,* 43:403-407.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

GAEZ. 2011. Global Agro-Ecological Zones ver. 3.0, FAO, IIASA.

Hanks, R.J., Riley, J.P., Danielson, R.E., Pruitt, W.O., Martin, P.E., Hagan, R.M. y Jackson, E.B. 1981. *Predicting crop production as related to drought stress under irrigation.* Reporte de Investigación 65 de la Estación Experimental de Agricultura de Utah, págs. 17-202.

Katerji, N., van Hoorn, J.W., Hamdy, A., Mastrorilli, M. y Muo Karzel, E. 1997. Osmotic adjustment of sugar beets in response to soil salinity and its influence on stomatal conductance, growth and yield. *Agricultural Water Management,* 34:57-69.

Milford G.F.J. y Riley J. 1980. The effects of temperature on leaf growth of sugar beet varieties. *Annales of Applied Biology,* 94:431-443.

Milford, G.F.J., Pocock, T.O. y Riley, J. 1985. An analysis of leaf growth in sugar beet. II. Leaf appearance in field crops. *Annals of Applied Biology,* 106:173-185.

Rinaldi, M. y Vonella, A.V. 2005. The response of autumn and spring sown sugar beet *(Beta vulgaris* L.) to irrigation in Southern Italy: water and radiation use efficiency. *Field Crops Research,* 95, 2-3:103-114.

Rinaldi, M., Di Paolo E. y Vonella, A.V. 2006. Efficiency of water use in sugar beet *(Beta vulgaris* L.) and processing tomato *(Lycopersicon esculentum* Mill.) cropped in Southern Italy. *Italian Journal of Agronomy,* 3:369-377.

Terry, N. 1968. Developmental Physiology of Sugar Beet: I. The influence of light and temperature on growth. *Journal of Experimental Botany,* 19, 4:795-811.

Alfalfa

AUTOR PRINCIPAL
Derrick Moot
(Universidad de Lincoln, Lincoln, Nueva Zelanda)

AUTORES COLABORADORES
Edmar Teixeira,
Hamish Brown
(Plant & Food Research Ltd, Nueva Zelanda)

AGRADECIMIENTOS
Julio Dardanelli,
(INTA, Buenos Aires, Argentina),
Gilles Lemaire
(INRA, París, Francia),
Michael Robertson
(CSIRO, Clayton South, Australia),
Alexandre Varella,
(EMBRAPA, Brasilia, Brasil)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Senthold Asseng
(anteriormente CSIRO, Wembley, Australia; en la actualidad Universidad de la Florida, Gainesville, EE. UU.),
Steven R. Evett,
Terry A. Howell, Judy A. Tolk (USDA-ARS, Laboratorio de Investigación en Conservación y Producción, Bushland, Texas, EE. UU.),
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.),
Derrick Moot
(Universidad de Lincoln, Lincoln, Nueva Zelanda),
Edmar Teixeira,
Hamish Brown
(Plant & Food *Research Ltd, Nueva Zelanda)*

Alfalfa

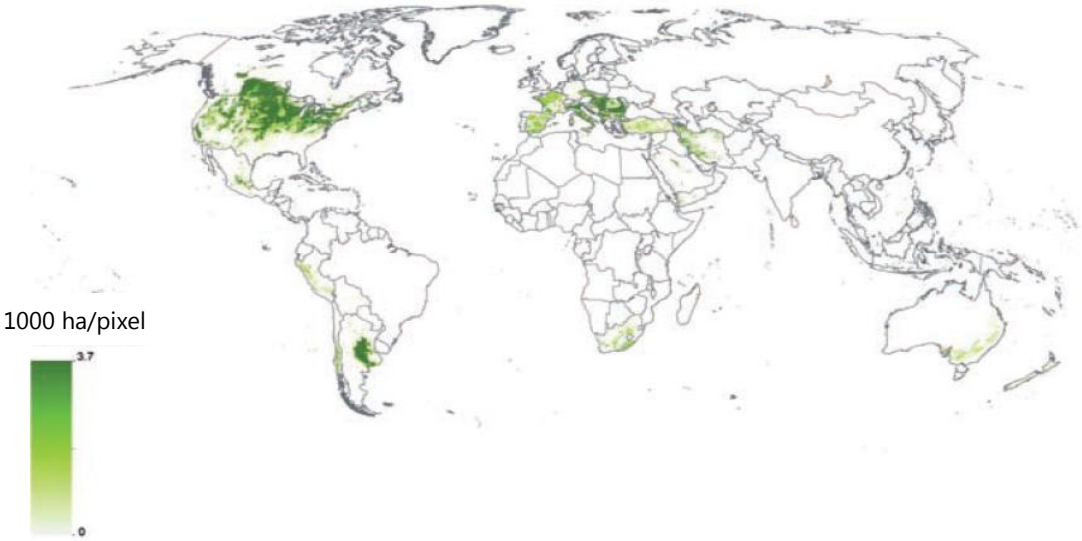
DESCRIPCIÓN GENERAL

La alfalfa *(Medicago sativa* L.) es el cultivo de forraje más antiguo e importante a nivel mundial (Michaud *et al.,* 1988). Es una planta leguminosa perenne, ampliamente adaptada a climas continentales y templados. La alfalfa se puede conservar como heno, ensilaje o gránulos, o se puede pastar en forma pura o mezclada con gramíneas. Es una fuente efectiva de nitrógeno proveniente de la fijación simbiótica, lo cual contribuye a su alto nivel de proteína en las hojas y contenido de energía metabolizable.

La alfalfa se originó en la región del Cáucaso con especies relacionadas diseminadas por toda Asia Central. Inicialmente fue sembrada en Europa, México y América del Sur por los ejércitos invasores para alimentar a sus caballos. China ha cultivado alfalfa por más de 2000 años, y en los últimos años se ha reavivado el interés en este cultivo debido a su habilidad para mitigar los daños en suelos proclives a la erosión. En América del Norte, Australia y Nueva Zelanda, los colonizadores introdujeron germoplasma proveniente de varias fuentes para apoyar la cría de ganado. En la actualidad hay más de 30 millones de hectáreas de alfalfa cultivadas en todo el mundo como monocultivos o en combinación con otras gramíneas. (La Figura 1 muestra las áreas cultivadas en el mundo).

Los requerimientos agronómicos y de manejo específicos de la alfalfa dependen del uso al que esté destinada y del ambiente agroclimático. La alfalfa se puede utilizar para secar el perfil del suelo, reducir el drenaje y las pérdidas de nitrógeno en el agua subterránea y minimizar la filtración de agua salina a la superficie del suelo. Se puede sembrar de manera convencional, después del arado, en un lecho de siembra firme y fino o por siembra directa en pastizales existentes que hayan sido suprimidos con un herbicida de amplio espectro. Las semillas de alfalfa son pequeñas (aprox. 2.0 g/1000 semillas), así que se deben sembrar a una profundidad inferior a 20 mm cuando las condiciones de humedad del suelo son favorables, y a una profundidad no superior a 35 mm en suelos semiáridos o proclives a la sequía. Cuando se siembra en primavera, la alfalfa posterior a la emergencia se debe dejar crecer hasta que las plantas se aproximen a la etapa de floración. Esto les permite acumular reservas en las raíces para brindar un mejor establecimiento. El crecimiento de los tallos y la expansión del dosel son más lentos durante la etapa de plántulas, porque la alfalfa distribuye los las sustancias fotosintetizadas preferentemente por debajo del suelo. La alfalfa puede fijar nitrógeno (N) una vez que ha establecido una relación simbiótica con las bacterias Rhizobium, más específicamente, *Ensifer meliloti. E. meliloti* se conocía formalmente como *Rhizobium meliloti* y también se denominaba *Sinorhizobium meliloti* (Willems, 2006).

FIGURA 1 Área cosechada de alfalfa (SAGE, 2000).



CRECIMIENTO Y DESARROLLO

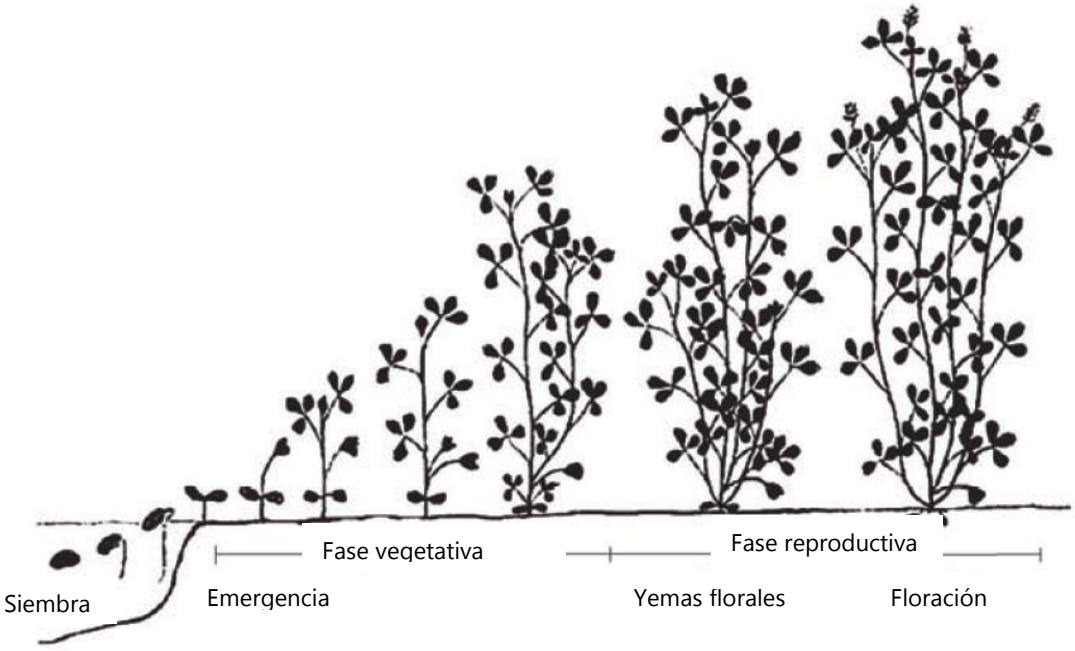
La alfalfa se puede sembrar en cualquier momento del año dependiendo de las condiciones ambientales, como la disponibilidad de humedad del suelo y la ocurrencia de heladas. En climas templados y continentales que experimenten inviernos fríos, los cultivos deben sembrarse antes de que finalice el verano para que las plantas sobrevivan el invierno. Cuanto más temprana sea la fecha de siembra en primavera o verano, mayor será la producción en la siguiente primavera (Justes *et al.,* 2002). El tiempo y la tasa de germinación dependen de la temperatura, las condiciones de humedad, la salinidad del suelo y la profundidad de las plántulas. En regiones con inviernos cálidos, se prefiere sembrar en otoño para garantizar el adecuado control de las malas hierbas y para obtener condiciones aptas de humedad del suelo y temperatura.

Una vez que el cultivo está establecido, la longevidad del mismo depende en gran medida de su manejo, la población de plantas y del clima. La población inicial de plantas, determinada por las tasas de siembra y emergencia, se autoadelgaza de manera progresiva, y en consecuencia, la población disminuye. En la mayoría de los casos, esta disminución progresiva no afecta de inmediato al rendimiento de los tallos. Se ha demostrado que los cultivos de alfalfa mantienen rendimientos máximos con poblaciones que disminuyen de 140 a menos de 60 plantas/m^2. Los rendimientos se mantienen en una amplia gama de poblaciones porque el autoadelgazamiento se ve compensado por aumentos en otros componentes del rendimiento, como (i) la cantidad de tallos por planta (ii) el peso de los tallos individuales y (iii) el grado de ramificación. La muerte de plantas es ocasionada principalmente por la competencia por la captación de luz entre las plantas de alfalfa o con otras especies (p. ej., las malas hierbas) y se acentúa con el manejo deficiente (p. ej., no permitir un rebrote suficiente antes de la latencia del invierno). Estreses adicionales, como la aparición de plagas y enfermedades, acelera la muerte de las plantas. El rendimiento y la longevidad del cultivo se ven afectados cuando las poblaciones de plantas disminuyen por debajo de un nivel crítico, en el cual la compensación mediante otros componentes del rendimiento es imposible. En este punto, es necesario restablecer el cultivo para recuperar la productividad. Con el

fin de mantener cultivos de alto rendimiento (superior a 10 toneladas DM/ha), se requiere una población de plantas mayor de 40 plantas/m^2 o aproximadamente 450 tallos/m^2.

El desarrollo fenológico de la alfalfa, desde la emergencia hasta la madurez (Figura 2), está determinado principalmente por la temperatura (Fick *et al.,* 1988), la cual se cuantifica en unidades de temperatura acumulada (tiempo térmico en grados día: °Cd). Las tasas de desarrollo son insignificantes por debajo de 5 °C, lo cual define la temperatura base (T_{base}) de la alfalfa. Por encima de la T_{base}, las tasas de desarrollo aumentan de manera linear con la temperatura hasta alcanzar un punto óptimo (T_{opt}) de aprox. 30 °C. Por encima de la T_{opt}, las tasas de desarrollo disminuyen hasta llegar a cero con temperaturas superiores a 45 °C. La duración del día también influye en el desarrollo de la alfalfa durante la etapa vegetativa. La alfalfa es una planta de días largos, ya que alcanza la etapa reproductiva (caracterizada por la aparición de yemas florales) con mayor rapidez durante el verano cuando los días son más largos. Por el contrario, cuando los días son más cortos a finales del verano y en otoño, la etapa vegetativa se prolonga. Después de la emergencia, en la etapa de plántula, el crecimiento y desarrollo son más lentos que durante el rebrote. Esto se debe a que las plántulas carecen de un sistema radicular maduro, nodulan y preferentemente acumulan reservas de carbono y nitrógeno en los órganos perennes durante esta etapa temprana. El cultivo de plántulas atraviesa un período "juvenil" de desarrollo vegetativo, donde el desarrollo no es sensible a la duración del día y la floración se retrasa con respecto a los cultivos de rebrote (Teixeira *et al.,* 2011).

FIGURA 2 Etapas típicas de desarrollo de la alfalfa.



La cantidad de veces que la alfalfa se puede cosechar durante un año depende de las condiciones climáticas y el manejo (Teixeira *et al.,* 2007). Después de cada cosecha, se genera una nueva cohorte de brotes vegetativos. La duración del día y la temperatura pueden modificar el intervalo de tiempo desde la iniciación de los nuevos brotes hasta la etapa reproductiva. La respuesta a la duración del día difiere según la variedad y es más pronunciada en latitudes altas. Después de la iniciación floral,

la temperatura es el único factor que determina el desarrollo durante la floración, el llenado de semillas y la madurez. Las temperaturas superiores a 27 °C, el estrés hídrico o las condiciones de humedad excesiva del suelo pueden disminuir los rendimientos de las semillas.

El principal factor que determina el crecimiento de la alfalfa –es decir, la tasa de acumulación de biomasa– es la cantidad de carbono asimilado a través de la fotosíntesis, el cual a su vez depende de la cantidad de luz interceptada por el dosel. La interceptación de luz aumenta con la cobertura del dosel, ya que aparecen nuevas hojas que se expanden. La tasa de aparición de hojas está determinada por la temperatura, donde una nueva hoja del tallo principal aparece cada 34-37 °Cd bajo condiciones óptimas. La duración del día también puede regular la tasa de aparición de hojas al observarse un retraso en otoño, particularmente en las variedades dormantes. En verano, es posible que la alfalfa se expanda hasta 20 nudos del tallo principal. Se trata de una planta indeterminada y por tanto, la aparición de hojas continúa después de la floración, aunque a un ritmo más lento. La senescencia foliar es una función del envejecimiento de las hojas, el ambiente de luz del dosel y otros estreses del entorno. La arquitectura del dosel de la alfalfa permite la captación eficiente de luz como resultado de la distribución de hojas en posición horizontal en del dosel inferior y de hojas en posición vertical en el superior. Esta arquitectura se caracteriza por su alto coeficiente de extinción de luz por unidad de área foliar de 0.8-0.9, el cual es alto y estable en diferentes variedades comerciales de alfalfa. La tasa de expansión del área foliar es más alta en primavera y en verano que en otoño, en respuesta a las altas temperaturas y a la mayor duración de los días.

La eficiencia en el uso de radiación de la alfalfa para la biomasa total (brotes, coronas y raíces), unindicador de la fotosíntesis neta del dosel, es de aprox. 1.8 g/MJ (radiación solar total). Una vez que el carbono es asimilado a través de la fotosíntesis, la biomasa se puede distribuir hacia los órganos superficiales (hojas y tallos) o los órganos perennes por debajo del suelo (coronas y raíces). La alfalfa sobrevive durante el invierno al almacenar compuestos de carbono y nitrógeno como reservas en sus órganos perennes. Estas reservas luego se utilizan para reanudar el crecimiento durante la siguiente primavera y después de cada cosecha (Avice *et al.,* 1997). El nitrógeno y el carbono se movilizan para formar nuevas hojas y tallos, mientras que el carbono también se procesa a fin de suministrar energía para mantener las actividades metabólicas de las raíces. La partición del carbono asimilado hacia las coronas y raíces principales es estacional.

Durante la primavera, la mayor parte de la biomasa se retiene en los tallos y menos del 5-15 % se distribuye por debajo del suelo. Desde mitad del verano hasta finales del otoño, más del 50-60 % del total de carbono asimilado se puede distribuir a los órganos perennes debajo del suelo para mantener el crecimiento y la persistencia del cultivo en la siguiente primavera (Teixeira *et al.,* 2008). Estos patrones estacionales de partición de biomasa difieren según la variedad de alfalfa, dependiendo de su origen mediterráneo o septentrional. Las variedades de latitudes altas presentan una estacionalidad más evidente con mayor partición de biomasa hacia las raíces al final del verano/otoño, en respuesta a las temperaturas más bajas y la menor duración de los días. El grado de respuesta de la variedad a la disminución de la temperatura y la reducción de la duración de los días se define mediante su clasificación de latencia, que va desde 1 hasta 11. Las variedades más dormantes (clasificación de 1-5) presentan una reducción en las tasas de crecimiento y la producción de brotes, y una mayor partición debajo del suelo en otoño, en comparación con variedades no dormantes (activas en invierno).

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

Al ser un cultivo perenne, la alfalfa puede producir materia seca durante todo el año si las condiciones ambientales son favorables. Durante el período de crecimiento más activo de primavera a otoño, los valores diarios de evapotranspiración (ET) están determinados por la

interacción del ambiente y el manejo de la defoliación (corte). La eliminación del área foliar reduce la transpiración, de modo que ocurren valores de ET inferiores a 1 mm/día inmediatamente después de la defoliación, principalmente a través de la evaporación del suelo y en condiciones de inviernos fríos. Cuando el cultivo alcanza el dosel completo, la ET puede aumentar a más de 8 mm/día. A medida que el dosel se recupera y el índice de área foliar aumenta, la ET diaria se puede calcular a partir de la ET potencial multiplicada por la fracción de cobertura del dosel (French y Legg, 1979). Durante esta fase, la proporción de evaporación del suelo en relación con la ET disminuye y la transpiración se incrementa. La relación entre la ET real y la ET de referencia alcanza el máximo alrededor de 1.1-1.15 cuando el dosel está completo, y disminuye cuando ocurre la senescencia como resultado de la autosombreado (es decir, a altos índices de área foliar), el inicio de la floración y las heladas. La ET total acumulada varía entre menos de 200 mm en condiciones áridas hasta más de 1000 mm en condiciones favorables de humedad del suelo.

La pendiente de la relación entre el rendimiento acumulado de la vegetación en comparación con el uso acumulado del agua proporciona una indicación de la productividad del agua ($WP_{Y/ET}$). La $WP_{Y/ET}$ promedio normalmente se encuentra alrededor de 1.0-2.6 kg/m^3 (Grimes *et al.,* 1992), pero se han reportado niveles hasta de 2.9 kg/m^3 (Brown *et al.,* 2005). En un estudio, la $WP_{Y/ET}$ descendió de 2.1 kg/m^3 a 0.4 kg/m^3 inmediatamente después de la defoliación (Asseng y Hsiao, 2000). En climas templados, los niveles más altos de productividad del agua se registran en la primavera, y los valores disminuyen durante el invierno y el otoño. La alta productividad del agua durante la primavera obedece a bajos déficits de presión del vapor en la atmósfera y a las altas proporciones de la producción total de biomasa que se distribuye a la fracción de brotes cosechados (hoja y tallo). La productividad del agua es más baja en verano debido a la alta demanda evaporativa y a los déficits concomitantes altos de presión de vapor. La productividad del agua disminuye en otoño a causa de los cambios en la partición del cultivo hacia las raíces y de las bajas temperaturas. Estas condiciones reducen la producción de brotes por unidad de agua usada. La relación lineal entre la producción de materia seca y la ET parece ser estable en variedades con diferente clasificación de latencia en otoño.

Los requerimientos anuales de agua de un cultivo de alfalfa se pueden estimar en cualquier lugar mediante la suma de las estimas diarias de ET durante el período de crecimiento activo. Los requerimientos de riego se pueden estimar a partir de la demanda total de agua del cultivo restando la precipitación efectiva durante el período de crecimiento más la cantidad de humedad del suelo fácilmente disponible al inicio del período de crecimiento. Si se alcanza la recarga completa de la humedad del suelo antes del inicio del período de crecimiento, un valor de 50 % de la capacidad de agua disponible del suelo (capacidad de campo menos límite inferior a una profundidad de 1.5 m) comúnmente se considera como una representación de la cantidad de agua fácilmente disponible. Si la recarga es incompleta, un balance de agua sencillo se puede utilizar para estimar el contenido de humedad del suelo al inicio de la estación, y el 50 % de este valor se usa para representar el agua fácilmente disponible.

RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO

La alfalfa tiene una estrategia para evitar la sequía al acceder al agua a través de su profundo sistema radicular; no obstante, su resistencia a la sequía es deficiente y se ve rápidamente afectada por la escasez de agua (Sheaffer *et al.,* 1988). La escasez de agua ocurre cuando el suministro hídrico es insuficiente para satisfacer la demanda de agua. Cuando la humedad del suelo está cerca de la capacidad de campo, el uso del agua de la alfalfa se ve limitado por las necesidades impuestas por la demanda de transpiración para el dosel del cultivo, la cual está determinada por condiciones atmosféricas.

Cuando los requerimientos de agua del cultivo exceden la humedad total disponible del suelo en la zona radicular, se restringen los principales procesos de la planta; es decir, expansión del dosel, transpiración y fotosíntesis o eficiencia en el uso de la radiación, y se acelera la senescencia foliar. Las tasas relativas de expansión del área foliar disminuyen de su punto máximo a un umbral entre 15-20 % por debajo de la capacidad de campo, hasta llegar a ser insignificantes cuando la humedad total disponible del suelo disminuye desde la capacidad de campo hasta cerca del 30 % o más de la capacidad total de agua disponible del suelo. La eficiencia en el uso de la radiación es menos sensible al estrés hídrico que la expansión del dosel y disminuye en una respuesta de 1:1 ante la disminución de la humedad disponible del suelo (Brown *et al.,* 2009). Si el suministro hídrico corresponde solamente a la mitad de la demanda del cultivo, la producción únicamente será la mitad del potencial.

La cantidad de extracción de agua se puede calcular para diferentes capas de suelo (Brown *et al.* 2009). Iniciando en la capa superior, la extracción es el mínimo del suministro potencial de esa capa y la demanda de la atmósfera. La extracción de agua de las capas subyacentes depende de la demanda restante después de la extracción en las capas superiores. De hecho, la alfalfa sigue un patrón descendente de extracción de agua durante el período de crecimiento en plantaciones a partir de plántulas y rebrotes. Se observan reducciones en las tasas de extracción de agua en situaciones de escasez de agua. Si no se disponen de otras mediciones, cabe asumir que la alfalfa puede extraer del suelo cerca del 3 % del agua disponible de la planta al día. De hecho, el suministro hídrico diario potencial se puede estimar a partir de la capacidad de agua disponible del suelo y la profundidad de las raíces del cultivo de alfalfa. Los coeficientes de la tasa de extracción de la alfalfa son bajos en comparación con otros cultivos (Dardanelli *et al.,* 1997), de modo que la alfalfa prolonga el uso del agua del suelo a la que tiene acceso, principalmente porque sus raíces profundas amplían el depósito de suministro.

La alfalfa es menos tolerante al encharcamiento (suelos saturados) que otras especies forrajeras (gramíneas). Las condiciones anaeróbicas por más de 7-14 días provocan la muerte de las raíces e infección por enfermedad secundaria, particularmente de la especie *Phytophthora*.

FERTILIDAD DEL SUELO

Los cultivos exitosos de alfalfa se siembran en suelos profundos (>1.0 m) con buen drenaje, para aprovechar su raíz principal, con un pH de 6.0-8.0. Normalmente se requieren cantidades adecuadas de fósforo (P), azufre (S), boro (B) y molibdeno (Mo), dependiendo del estado de los nutrientes del suelo. Se recomienda el uso de fertilizantes a base de potasio (K), especialmente bajo condiciones de corte intensivo, porque las hojas de alfalfa, una natrófoba, tienen mayor contenido de potasio y menor contenido de sodio (Na) que muchas otras especies forrajeras.

TEMPERATURA

El desarrollo de la alfalfa es insignificante en temperaturas inferiores a 5 °C o superiores a 45 °C. Dentro de estos umbrales, las tasas de desarrollo de la alfalfa se incrementan de manera lineal hasta alcanzar un punto máximo a aprox. 30 °C. Las bajas temperaturas también limitan las tasas netas de fotosíntesis del dosel. Se observó que la eficiencia en el uso de la radiación aumentó de forma lineal de 0.6 g/MJ a 6 °C hasta 1.6 g/MJ a 18 °C (Brown *et al.* 2006).

SALINIDAD

La alfalfa es tolerante a un nivel de salinidad relativamente alto en la parte inferior de la zona radicular, siempre que la zona superior esté libre de sales. Es más sensible a Na+ que a Cl^-, así que la acumulación de sodio es el motivo principal por el cual el rendimiento disminuye cuando se riega con agua salina. El riego, incluso si se aplica con agua moderadamente salina, puede provocar la acumulación de sales en lo profundo del perfil del suelo, lo cual permite que las raíces proliferen en regiones de salinidad relativamente baja. Cuando se presentan concentraciones de sales superiores a 10 dS/m, se prevén reducciones significativas en el rendimiento. Bajo estas condiciones, es posible que el rendimiento absoluto de la alfalfa siga siendo mayor que el de las gramíneas "tolerantes a las sales".

RENDIMIENTO Y CALIDAD

La diversidad de climas y tipos de suelos utilizados para sembrar alfalfa reportó rendimientos dentro del rango de menos de 1 tonelada DM/ha en sistemas de secano, en suelos de baja capacidad de retención de agua en combinación con baja precipitación anual (<300 mm/año), hasta más de 28 toneladas DM/ha por año en suelos franco-limosos profundos con buena disponibilidad de agua en Nueva Zelanda (Brown *et al.,* 2005). Un rendimiento máximo similar se reportó en África, con rendimientos de 10 a 20 toneladas DM/ha, comúnmente producidos en Europa, China y América del Norte bajo condiciones de riego. Bajo condiciones de secano con 500-800 mm de precipitación anual, se reportaron rendimientos de 5 a 17 toneladas DM/ha. La productividad y persistencia de los cultivos de alfalfa se ven afectadas por el manejo y la ubicación, con una disminución en la población de plantas esperada en los primeros 4-5 años. Los cultivos pueden persistir por más de 20 años en climas de poca precipitación presententando un período marcado de latencia en invierno, siempre que los suelos no se congelen y ocasionen la muerte de las plantas.

En el caso de la alfalfa, la calidad de los pastizales está directamente relacionada con la fracción de hoja y tallo aceptables, en comparación con el tallo lignificado de menor calidad. Durante el crecimiento vegetativo del cultivo, las primeras 2 toneladas DM/ha son predominantemente de forraje de alta calidad, con un contenido de proteína cruda del 25 %, como mínimo. A medida que la madurez de la alfalfa avanza más allá de esta fase, la proporción de material de tallo de poca calidad se incrementa y la relación global de hojas y tallos disminuye (Marten *et al.,* 1988). Por tanto, para obtener heno de alta calidad, la alfalfa normalmente se corta en la etapa de floración temprana o antes. Cuando la alfalfa es pastoreada en un sistema rotativo, se recomienda que cada prado se deje descansar por 35-42 días antes de la introducción ingreso de nuevo ganado (Moot *et al.* 2003). El pastoreo continuo (o densidad de pastoreo) contribuye a la disminución de las reservas de las raíces y la posterior muerte de las plantas debilitadas. Designar un período de ampliación de rebrote en otoño es beneficioso para reponer las reservas de las raíces y también para contribuir a la persistencia del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

Asseng, S. y Hsiao, T.C. 2000. Canopy CO_2 assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. *Field Crops Research* 67(3): 191-206.

Avice J.C., Lemaire G., Ourry, A. y Boucaud, J. 1997. Effects of the previous shoot removal frequency on subsequent shoot regrowth in two *Medicago sativa* L. cultivars. *Plant and Soil* 188, 189-198.

Brown, H. E., Moot, D. J., Fletcher, A. L. y Jamieson, P. D. 2009. A framework for quantifying water extraction and water stress responses of perennial lucerne. *Crop & Pasture Science,* 60, 785-794.

Brown, H. E., Moot, D. J. y Pollock, K. M. 2005. Herbage production, persistence, nutritive characteristics and water use of perennial forages grown over 6 years on a Wakanui silt loam. *New Zealand Journal of Agricultural Research,* 48, 423-439.

Brown, H.E., Moot, D.J. y Teixeira, E.I. 2006. Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne *(Medicago sativa)* in a temperate climate. *European Journal of Agronomy* 25: 319-327.

Dardanelli, J. L., Bachmeier, O. A., Sereno, R. y Gil, R. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Research,* 54, 29-38.

Fick, G.W., Holt, D.A. y Lugg D.G. 1988. Environmental physiology and crop growth. En: Hanson, A.A., Barnes, D.K. y Hill, R.R., Jr. eds. *Alfalfa and alfalfa improvement.* Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Vol. 29, 163-194.

French, B.K. y Legg, B.J. 1979. Rothamsted irrigation 1964-76. *Journal of Agricultural Science,* Reino Unido, 92, 15 - 37. doi: 10.1017/S0021859600060469.

Grimes, D.W., Wiley, P.L. y Sheesley, W.R. 1992. Alfalfa Yield and Plant Water Relations with Variable Irrigation. *Crop Science* 32: 1381-1387.

Justes, E., Thiébeau, P., Avice, J.C., Lemaire, G., Volenec, J.J. y Ourry, A. 2002. Influence of summer sowing dates, N fertilization and irrigation on autumn VSP accumulation and dynamics of spring regrowth in alfalfa *(Medicago sativa* L.). *Journal of Experimental Botany* 53:111-2121.

Marten, G.C., Buxton, D.R. y Barnes, R.F. 1988. Feeding value (Forage Quality). En: Hanson, A.A., Barnes, D.K. y Hill, R.R., Jr. eds. *Alfalfa and alfalfa improvement.* Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Vol. 29, 463-491.

Michaud, R., Lehman, W. F. y Rumbaugh, M. D. 1988. World distribution and historical development. En: Hanson, A.A., Barnes, D.K. y Hill, R.R., Jr. eds. *Alfalfa and alfalfa improvement.* Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc, Vol. 29, 25-91.

Moot, D.J., Brown, H.E., Teixiera, E. y Pollock, K.M. 2003. Crop growth and development affect seasonal priorities for lucerne management. En: Moot, D.J., ed. *Legumes for dryland pastures.* Proceedings of a New Zealand Grasslands Association Symposium, Universidad de Lincoln, 18-19 de noviembre de 2003. Grassland Research and Practice Series n.º 11, págs. 201-208.

SAGE. 2000. Center for Sustainability and the Global Environment, Universidad de Wisconsin-Madison. Base de datos en línea disponible en el enlace http://www.sage.wisc.edu/mapsdatamodels.html. Consultada en diciembre de 2011.

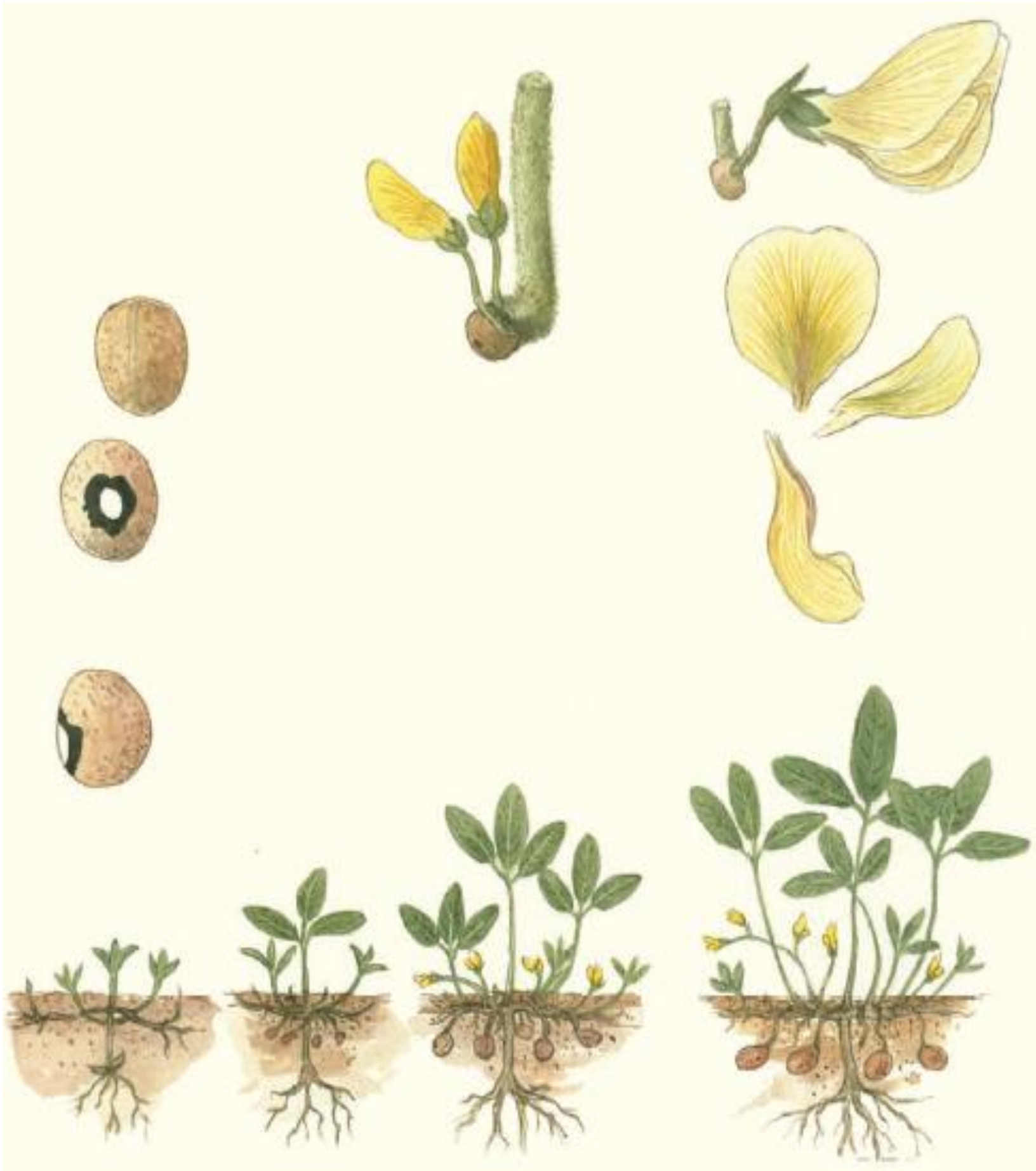
Sheaffer, C. C., Tanner, C. B. y Kirkham, M. B. 1988. Alfalfa water relations and irrigation. En: Hanson, A.A., Barnes, D.K. y Hill, R.R., Jr. eds. *Alfalfa and alfalfa improvement.* Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Vol. 29, 373-409.

Teixeira, E.I., Moot, D.J., Pollock, K.J. y Brown H.E. 2007. How does defoliation management affect yield, canopy forming processes and light interception in lucerne *(Medicago sativa* L.) crops? *European Journal of Agronomy* 27, 154-164.

Teixeira, E. I., Moot, D. J. y Brown, H. E. 2008. Defoliation frequency and season affected radiation use efficiency and dry matter partitioning to roots of lucerne *(Medicago sativa* L.) crops. *European Journal of Agronomy,* 28 (2): 103-111.

Teixeira, E.I., Brown, H., Moot, D.J. y Meenken, E.D. 2011. Growth and phenological development patterns differ between seedling and regrowth alfalfa crops *(Medicago sativa* L.). *European Journal of Agronomy* 35(1): 47-55

Willems, A. 2006. The taxonomy of rhizobia: an overview. *Plant and Soil* 287: 3-14.



Maní bambara

AUTOR PRINCIPAL
Asha Karunaratne
(anteriormente, Universidad de Nottingham, Facultad de Biociencias, Reino Unido; en la actualidad, Universidad de Sabaragamuwa, Belihuloya, Sri Lanka)

AUTOR COLABORADOR
Sayed Azam-Ali
(Universidad de Nottingham y CFFRC, Campus de Malasia, Jalang Broga, Selangor Darul Ehsan, Malasia)

AGRADECIMIENTOS
Gabriella Izzi
(anteriormente FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia; en la actualidad WB, Washington, EE. UU.),
Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia),
Programas INCO STD-3, FP5 y FP6 de la Unión Europea

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Ibraheem Al-Shareef,
Stanley Noah,
Rutger Cornelissen
(Universidad de Nottingham, Facultad de Biociencias, Reino Unido),
Abu Sesay
(Botswana College of Agriculture, Gaborone, Botswana)

Maní bambara

DESCRIPCIÓN GENERAL

El maní bambara guandsú *(Vigna subterranea)* es un cultivo leguminoso y comestible, autóctono de las regiones entre la meseta de Jos en el norte de Nigeria y Garu en Camerún. La variedad *subterranea* es la forma cultivada con formas silvestres pertenecientes a la variedad *spontanea* (Pasquet *et al.,* 1999). No existen variedades establecidas y hasta la fecha, no se han desarrollado programas coordinados de mejora genética que reduzcan la alta variabilidad genética dentro de los campos cultivados. Agricultores marginales y de subsistencia en África siembran "variedades locales" seleccionadas, las cuales frecuentemente se cultivan a partir de semillas almacenadas de cosechas previas o de suministros no regulados de semillas adquiridas en los mercados locales.

El maní se ha cultivado ampliamente en África por muchos siglos y ahora juega un papel significativo en los sistemas de cultivo en las tierras semiáridas del África subsahariana. Es sembrado principalmente por mujeres dedicadas a la agricultura para proporcionar el sustento a sus familias. Con frecuencia, se intercala con cultivos de cereales, tubérculos, hortalizas y otras legumbres (Linnemann, 1991). El maní se ha introducido a través de migraciones históricas en Indonesia, Tailandia y Malasia. Más recientemente, el cultivo se ha evaluado de manera experimental en la India. (Véanse en la Figura 1 el área cosechada y rendimiento).

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

Debido a que la formación de las vainas ocurre en la superficie del suelo o justo debajo de ella, un lecho de siembra bien preparado es beneficioso para este cultivo. La densidad de siembra es variable, y parece que presenta una plasticidad significativa en respuesta a ésta. En Suazilandia, se investigaron cinco densidades de plantas entre 33 000 y 267 000 plantas/ha (Edje *et al.,* 2003). Dentro de este rango, la cantidad de vainas por planta varió entre 40.5 y 5.8. Sin embargo, estas densidades de siembra no tuvieron ningún efecto en el rendimiento de las semillas.

FIGURA 1 Área mundial cosechada de maní y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).

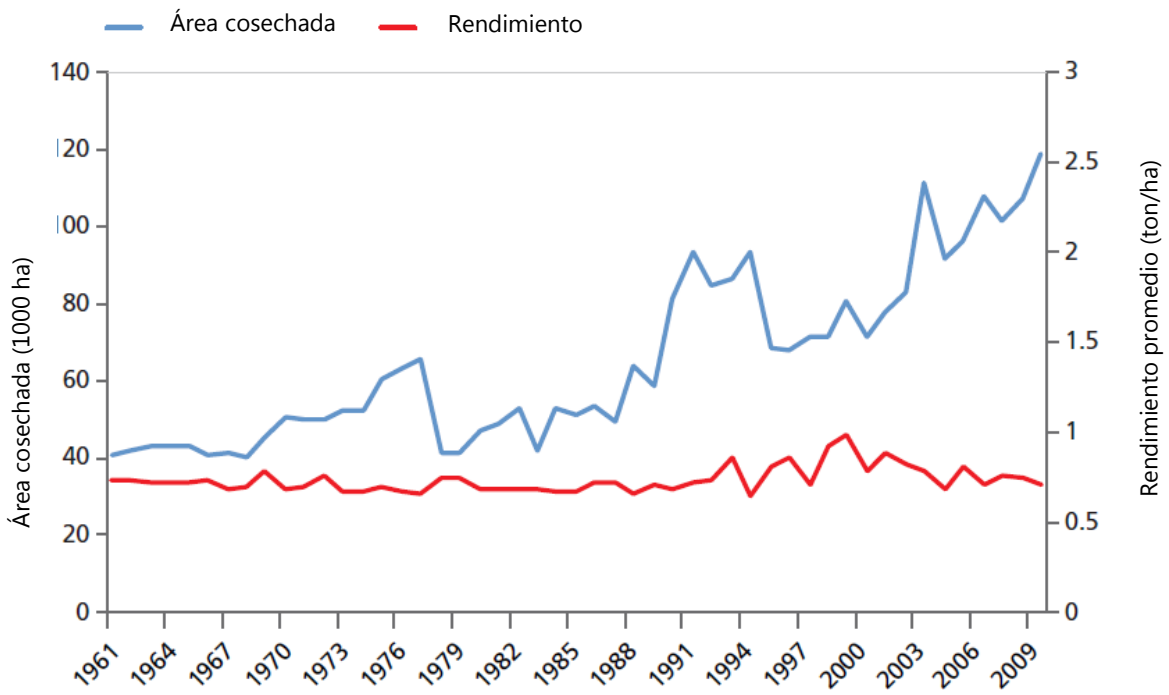


TABLA 1 Duración de las etapas de desarrollo de la variedad local de maní Uniswa Red con diferentes fechas de siembra en Botsuana y Suazilandia.

Región	**Notwane, Botsuana**			**Malkens, Suazilandia**
Variedad local	**Uniswa Red**			**Uniswa Red**
	Fecha de siembra			**Fecha de siembra**
	21 de dic. de 2006	**18 de ene. de 2007**	**1.º de feb. de 2007**	**26 de nov. de 2002**
Días después de la siembra para:				
Emergencia	7	7	7	11
Floración	55	55	57	74
Profundidad máxima de las raíces	58	58	60	79
Dosel máx.	68	69	72	93
Senescencia del dosel	77	80	84	105
Maduración	127	130	135	130
Duración de la formación de fruto	40	48	66	58
Duración de la floración	23	25	28	31

Por lo general, el período de crecimiento inicia en diciembre en la mayor parte de la región de África meridional, mientras que en partes de África oriental, los agricultores pueden sembrar en dos estaciones alrededor de diciembre y junio. Cuando el suministro hídrico es ilimitado, la tasa de germinación depende de la temperatura, la variabilidad genética, y el tamaño y edad de las semillas. La germinación generalmente tarda de 7 a 15 días, y la tasa máxima de germinación de semillas ocurre cerca de los 30 °C, sin germinación por debajo de 9 °C o por encima de 45 °C (Massawe *et al.,* 2003). La Tabla 1 muestra la duración de las principales etapas de crecimiento. Una vez que están establecidas, las plántulas entran en un período de iniciación foliar caracterizado por muy poco crecimiento de las raíces. Después de aproximadamente 35 días, la planta tiene de 6-10 hojas y un sistema radicular poco profundo. Desde esta etapa en adelante, el crecimiento de las hojas y las raíces ocurre de manera simultánea, donde las partes ubicadas por encima del suelo constituyen una proporción cada vez mayor del peso seco total de la planta. La evolución de la cobertura del dosel (CC) depende de la temperatura, y a una temperatura óptima, la CC máxima (CC_x) se alcanza después de casi 60 días en condiciones de campo. El inicio de la floración varía entre cerca de 45 y 70 días después de la siembra. El maní es un cultivo indeterminado, con solapamiento de las fases vegetativa y reproductiva, ya que la producción de hojas continúa junto con la floración y la formación de vainas. El período total de crecimiento varía de 120 a 140 días. En las diversas variedades locales, los cultivos de maní extraen agua de manera efectiva a una profundidad de al menos 0.90 m en tiempo de sequía, mientras que cuando el agua es ilimitada, la mayor parte de la extracción ocurre en los 0.50 m superiores del perfil del suelo.

Una labor importante es el aporcado, también conocida como aporque, la cual consiste en cubrir con tierra las vainas en desarrollo. Se aducen diferentes razones para esta práctica, entre ellas el mejoramiento del desarrollo de las vainas, la protección de las vainas contra plagas y enfermedades, y la prevención del encharcamiento en zonas donde la intensidad de la precipitación es alta. No obstante, no se cuenta con evidencia cuantitativa clara de los beneficios del aporque en diferentes ambientes.

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

La transpiración estacional en condiciones adecuadas de suministro hídrico varía entre 500 y más de 600 mm, dependiendo de la variedad local y el entorno. Se dispone de poca información sobre la transpiración de cultivos con suministro limitado de agua. La productividad del agua ($WP_{Y/ET}$) varía dependiendo de la variedad local; quizá está dentro del rango de 2-3 kg/m^3.

RESPUESTA A ESTRESES

El maní tolera una amplia gama de condiciones agroecológicas y suelos poco fértiles. Esta adaptabilidad a sistemas variables y precarios lo convierte en un cultivo popular entre los agricultores con recursos limitados. En particular, presenta varios rasgos de tolerancia a la sequía que le confieren ventajas agronómicas sobre otras legumbres en áreas de precipitación escasa y variable. No obstante, condiciones severas de sequía durante la fase vegetativa afectan la producción de hojas y materia seca. La disponibilidad de agua incide en la distribución de materia seca para el rendimiento reproductivo, en donde el índice de cosecha (HI) decrece hasta en un 16 % cuando el agua es limitada.

Hay informes del efecto significativo del estrés por calor en la formación de las vainas en algunas variedades locales (p. ej., Uniswa Red de Suazilandia). La evidencia experimental en invernaderos de ambiente controlado en Nottingham, Reino Unido, mostró que, si bien la variedad Uniswa Red produjo un dosel frondosa a través de la producción y expansión foliar sin restricciones, presentó

una reducción del 45 % en el HI tras la exposición a temperaturas superiores a 33 °C. Si bien es evidente que las altas temperaturas inciden de manera desproporcionadamente mayor en el comportamiento reproductivo que en el comportamiento vegetativo, no se conoce cómo el estrés por temperatura reduce la formación de vainas. Ya sea que el mantenimiento de la producción y expansión foliar a altas temperaturas pueda ser una causa o una consecuencia de la poca formación de vainas, trae como consecuencia la distribución de una mayor proporción de biomasa para el desarrollo vegetativo. La reducción de la viabilidad del polen debido al estrés por calor puede estar asociada a la poca formación de vainas.

El maní es una especie de días cortos. Aunque la floración está usualmente determinada por el tiempo térmico, en casos muy inusuales, el inicio del crecimiento de vainas se ve afectado por el fotoperíodo (Harris y Azam-Ali, 1993). Cuando los días tienen una duración superior a 12 horas, el cultivo se demora más en iniciar el llenado de las vainas, lo cual retrasa la madurez.

PRÁCTICA DE RIEGO

Por lo general, el maní se siembra como cultivo de secano en las zonas semiáridas de África. Cuando están disponibles, las prácticas de riego aumentan la productividad total del cultivo. Sin embargo, incluso cuando el agua no limita el rendimiento, sigue estando supeditada al control de la duración del día en relación con el crecimiento de las vainas. Este aspecto tiene implicaciones importantes tanto para la producción de secano como la de riego, dado que la fecha de siembra se debe fijar según el período óptimo de duración de los días para favorecer el llenado de las vainas y la precipitación estacional y/o el riego se debe aplicar dentro de este intervalo de producción. Cuando los recursos hídricos son limitados y la duración del día no constituye una restricción, el agua disponible se debe aplicar durante la fase tardía del período vegetativo (hasta la floración) para garantizar que se forme la máxima cantidad de vainas, siempre que esa agua no sea tan limitada que reduzca notablemente el ciclo biológico del cultivo.

RENDIMIENTO

Los rendimientos bajo condiciones favorables pueden variar entre 3.0 y 3.8 ton/ha (Collinson *et al.,* 2000). Sin embargo, como resultado de la variabilidad genética y dado que los ambientes en donde se cultiva el maní se caracterizan por presentar diversos estreses bióticos y abióticos, los rendimientos típicos son extremadamente bajos y varían entre 0.65 y 0.85 ton/ha para la mayoría de los trópicos semiáridos (Hampson *et al.,* 2000). En la práctica, existen grandes diferencias en los rendimientos reportados en diferentes países, con rendimientos tan bajos como 0.06 a 0.11 ton/ha (Zambia), 0.05 a 0.66 ton/ha (Suazilandia) y 0.07 a 0.86 ton/ha (Zimbabue). En el momento de la cosecha, la relación entre las vainas y la materia seca total (índice de cosecha, HI) se encuentra dentro del rango de 0.30 a 0.45. El HI disminuye en condiciones de sequía, estrés por temperatura y mayor duración de los días, y alcanza su punto máximo cuando el agua aplicada es suficiente para lograr la máxima cobertura del dosel y cuando la duración de los días y las temperaturas son óptimas. La composición nutricional del maní (el contenido de proteína es de 16-25 %) es comparable o superior a otras legumbres (Linnemann y Azam-Ali, 1993), y proporciona un suplemento importante a las dietas a base de cereales.

BIBLIOGRAFÍA

Collinson, S. T., Sibuga, K. P., Tarimo, A.J.P. y Azam-Ali, S.N. 2000. Influence of sowing date on the growth and yield of bambara groundnut landraces in Tanzania. *Experimental Agriculture,* 36, 1-13.

Edje, O.T., Mavimbela, E.K. y Sesay, A. 2003. *Effect of seed source on growth and yield of three landraces of bambara groundnut (Vigna subterranea) in Swaziland.* En: *Proceedings of the International Symposium on Bambara Groundnut,* Botswana College of Agriculture, 8-12 de septiembre de 2003.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Hampson, K., Azam-Ali, S.H., Sesay, A., Mukwaya, S.M., Azam-Ali, S.N. 2000. *Assessing opportunities for increased utilisation of bambara groundnut in Southern Africa.* Unidad de investigación de cultivos tropicales, Facultad de Biociencias, Universidad de Nottingham. DFID CPHP Project R-7527.

Harris, D. y Azam-Ali, S.N. 1993. Implication of daylength sensitivity in bambara groundnut *(Vigna subterranea)* for production in Botswana. *Journal of Agricultural Sciences* (Cambridge), 120, 75-78.

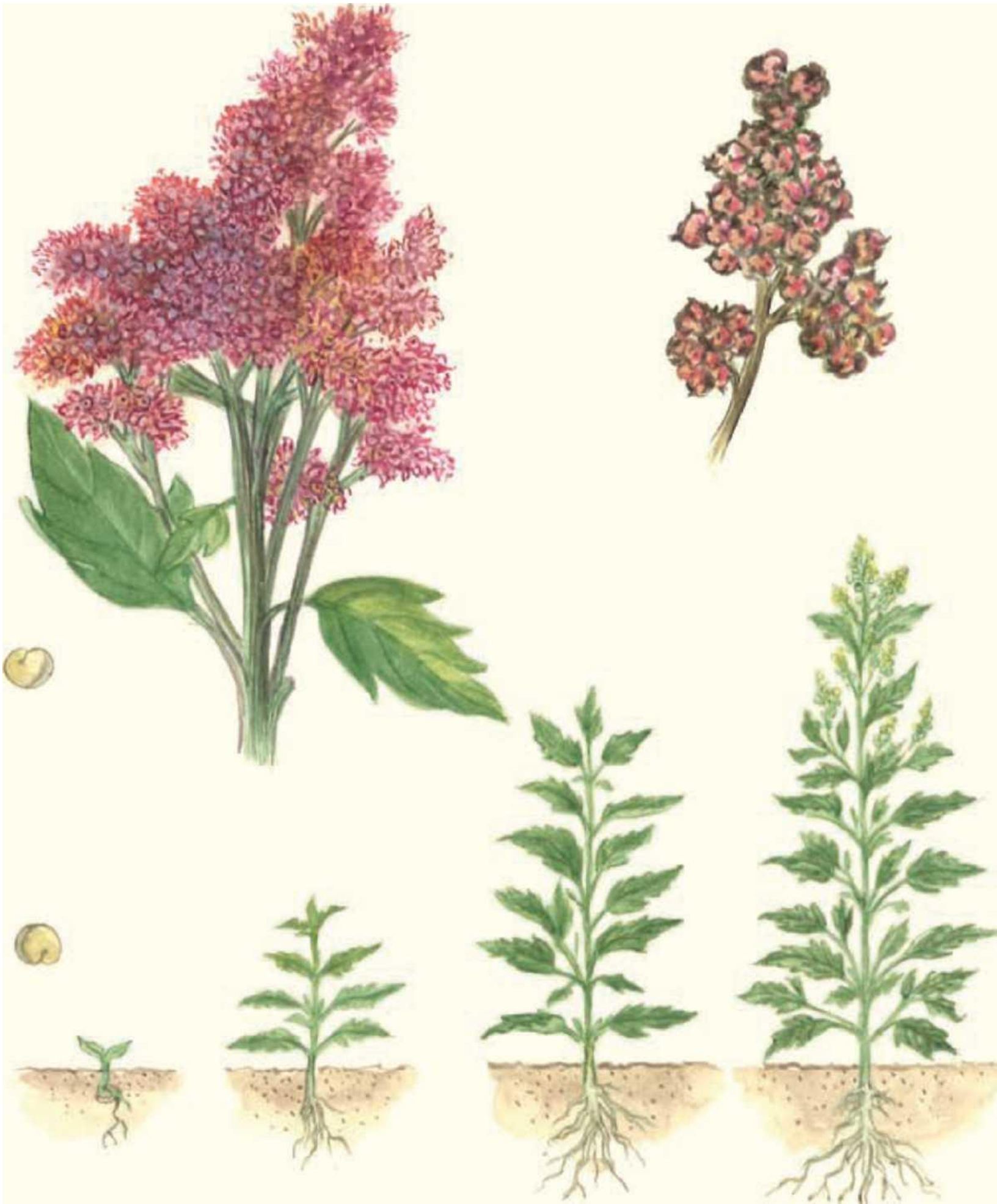
Linnemann, A.R. 1991. Preliminary observations on photoperiod regulation of phonological development in bambara groundnut *(Vigna subterranea). Field Crop Research,* 26, 295-304.

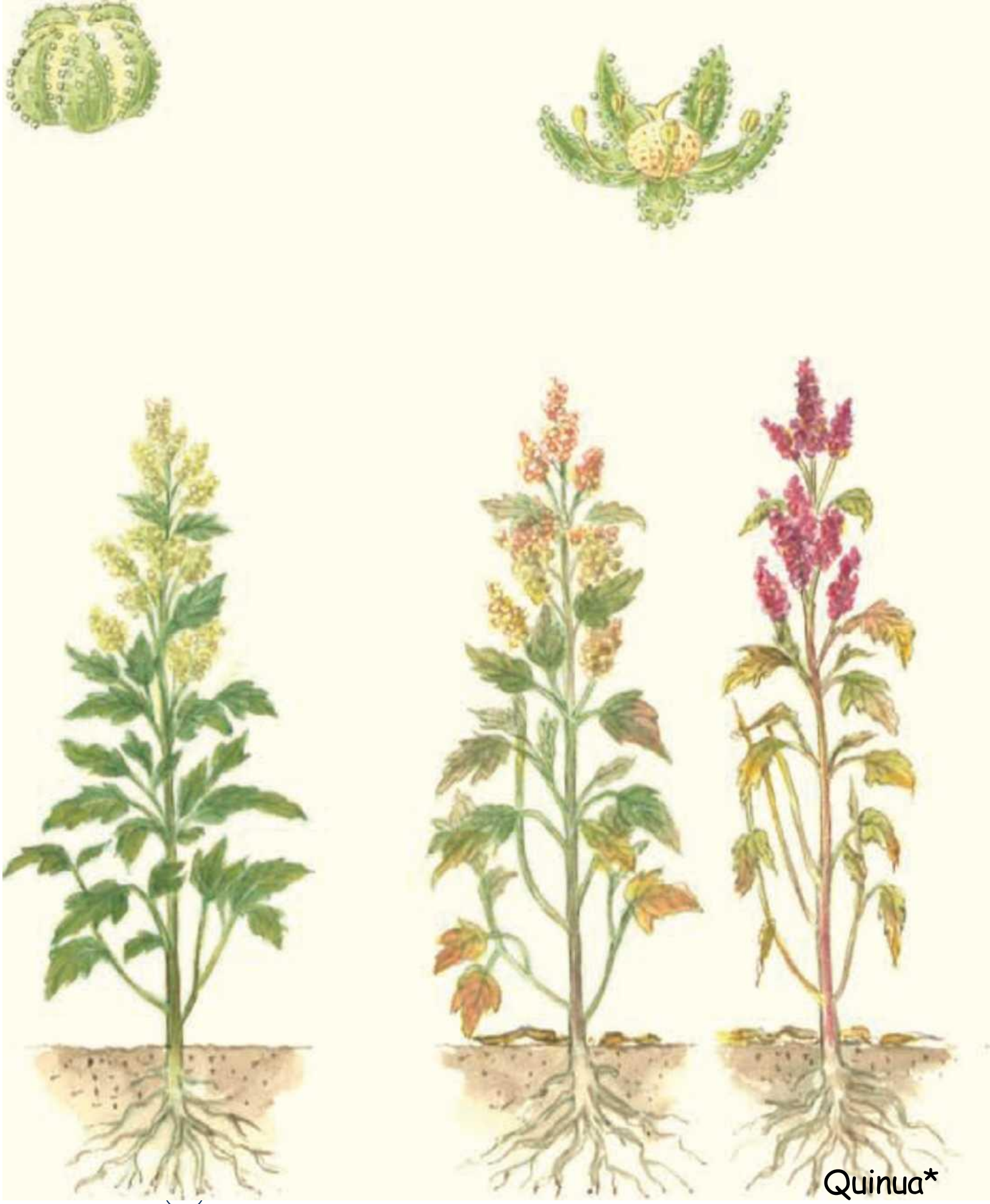
Linnemann, A.R. y Azam-Ali, S.N. 1993. Bambara groundnut *(Vigna subteranea). En: Underutilised crops pulses and vegetables,* Londres, Chapman and Hall.

Massawe, F.J., Azam-Ali, S.N. y Roberts, J. A. 2003. The impact of temperature on leaf appearance in bambara groundnut landraces. *Crop Science,* 43, 1375-1379.

Mwale, S.S., Azam-Ali, S.N. y Massawe, F.J. 2007. Growth and development of bambara groundnut *(Vigna subterranea)* in response to soil moisture 1. Dry matter and yield. *European Journal of Agronomy,* 26, 345-353.

Pasquet, R. S., Schwedes, S. y Gepts, P. 1999. Isozyme diversity in bambara groundnut. *Crop Science,* 39, 1228-1236.





** El color de la flor y del grano que se presenta en la figura solamente es un ejemplo. Dependiendo de la cantidad de antocianos, este color varía de verde amarillento a púrpura oscuro, e incluso negro, a lo largo de las variedades de quinua.*

AUTORES PRINCIPALES
Sam Geerts
(Universidad Católica de Lovaina Lovaina, Bélgica)
Magali García (Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia)

AUTORES E INSTITUCIONES COLABORADORES
Sven-Erik Jacobsen
(Universidad de Copenhague, Taastrup, Dinamarca),
Jean Vacher
(Embajada de Francia, Lima, Perú),
Thierry Winkel
(IRD, CEFE-CNRS, Montpellier, Francia),
Daniel Bertero
(Universidad de Buenos Aires y CONICET, Buenos Aires, Argentina)

AGRADECIMIENTOS
Agradecemos a la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Andrés, La Paz, Bolivia (*UMSA*) por el apoyo a la labor que lleva a los resultados que aquí se presentan. Agradecemos también a VLIR-UOS, Bruselas, Bélgica, por el apoyo financiero para el trabajo de campo.
Dirk Raes
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica)
Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Edwin Yucra,
Cristal Taboada,
Roberto Miranda,
Jorge Cusicanqui,
Félix Mamani
(Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia)

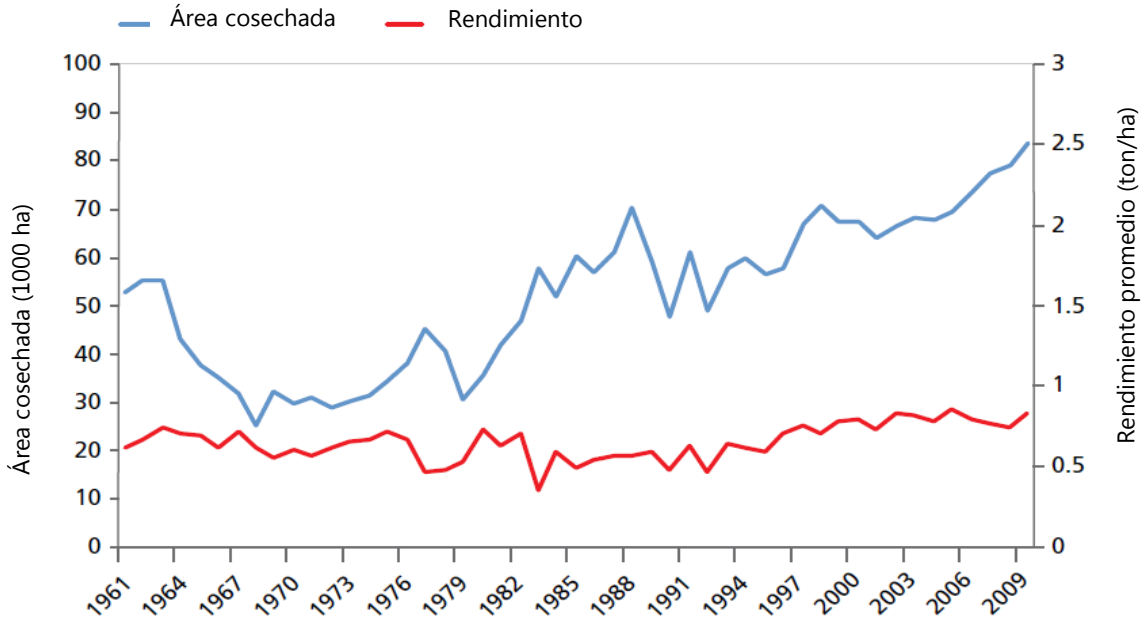
Quinua

DESCRIPCIÓN GENERAL

La quinua *(Chenopodium quinoa* Willd.), una especie del género quenopodio *(Chenopodium)*, de la familia de la remolacha azucarera, remolacha, acelga y espinaca, es un cultivo de grano que se cultiva principalmente por sus semillas comestibles. Es un cultivo de semillas y no un verdadero cereal o un grano, ya que no pertenece a la familia de las gramíneas. Es originaria de las montañas de los Andes. Este tradicional cultivo de semilla se siembra en los Andes peruanos y bolivianos desde hace más de 7000 años. Aunque la producción disminuyó significativamente durante la conquista española, la popularidad de la quinua aumentó de nuevo en el último siglo. La producción se ha extendido en los Andes, abarcando Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia y el norte de Argentina y Chile. Ya que es un cultivo con un gran potencial de utilización como alimento, está rápidamente ganando interés a nivel mundial, siendo ya bastante conocido en América del Norte y Centroamérica, Brasil, Europa y Asia (Schulte auf'm Erley *et al.,* 2005). Los primeros resultados también indican el potencial de la quinua en África. En el año 2009, se sembraron 83 mil hectáreas de quinua, con una producción de 69 000 toneladas de grano con un rendimiento promedio de grano de 0.8 ton/ha (FAO, 2011). En la Figura 1 se muestra la tendencia mundial del área cultivada y la producción en los últimos 50 años.

La quinua se caracteriza por suenorme variedad intraespecífica y plasticidad que permite que el cultivo crezca en condiciones climáticas y agronómicas altamente diversas. Se adapta bien a zonas áridas y semiáridas, y crece desde el nivel del mar hasta altitudes elevadas como la del altiplano andino, localizado cerca de los 4000 m sobre el nivel del mar, en donde su cultivo es de especial importancia. La quinua se cultiva como un monocultivo (p. ej., en el altiplano boliviano del sur) o en rotación con la papa o patata y la cebada, y en ocasiones, con el trigo y el maíz en las altitudes más bajas. Cuando se cultiva como monocultivo, los campos se dejan en barbecho por 1 a 3 años y en ocasiones durante más tiempo (hasta 10-12 años) para el control de plagas, regeneración de la fertilidad del suelo y acumulación de la reserva de agua del suelo. Tradicionalmente, se cultiva una amplia gama de variedades no mejoradas de quinua en la misma zona, aunque para efectos de exportación, generalmente se prefieren solamente pocas variedades locales sembradas en monocultivo (p. ej., quinua var. Real Blanca). Hay variedades de quinua de fotoperiodo neutro que se pueden cultivar en las condiciones de días largos de Europa septentrional (Christiansen *et al.,* 2010).

FIGURA 1 Área mundial cosechada de quinua y rendimiento promedio durante el período 1961-2009 (FAO, 2011).



CRECIMIENTO Y DESARROLLO

La quinua es una dicotiledónea anual C_3 de 0.5 a 2 m de altura, que termina en una panícula conformada por flores pequeñas, cada una de las cuales produce una sola semilla de aproximadamente 2 mm. Normalmente, la quinua se cultiva en el altiplano andino de septiembre a mayo, sin fertilizantes ni pesticidas. En el altiplano boliviano, la fecha de siembra varía entre inicios de septiembre y finales de noviembre, de acuerdo con la duración del ciclo de cultivo de las diferentes variedades y el clima local, especialmente cuando el suelo está lo suficientemente húmedo para la germinación. La práctica de la siembra es la clave para el éxito de la quinua. En la siembra superficial, la semilla corre el riesgo de deshidratación o quemaduras por el sol; mientras que la siembra profunda puede impedir la emergencia. En ambos casos, un pobre establecimiento del cultivo y una cobertura del dosel irregular, producen efectos perjudiciales sobre el rendimiento final. La práctica habitual es sembrar entre 8 y 15 kg de semillas por hectárea en surcos con 0.4 a 0.8 m de separación, ya sea en el caballón o en el surco, con una distancia entre plantas de alrededor de 10 cm dentro del surco después del aclareo. Otra práctica, adaptada a los ambientes áridos en donde hay una producción comercial muy extendida, es agrupar varias plantas, cada una en un hoyo, con distancias de aproximadamente 1 m entre sí. El trasplante (valles interandinos) o la siembra a boleo son menos comunes. Como los nutrientes con frecuencia son escasos en el altiplano, el deshierbe temprano (alrededor de ± 30 días después de la siembra) y aclareo del exceso de plantas son actividades importantes en las zonas donde la lluvia es suficiente para permitir el crecimiento rápido de la planta. En cambio, en las zonas áridas no se practica el deshierbe ni el aclareo, aún en la producción comercial.

El desarrollo fenológico es muy cambiante entre las variedades. Además, la fenología es muy flexible en respuesta al estrés hídrico, con diferencias en el tiempo hasta la maduración de hasta 30

días para la misma variedad (Geerts *et al.,* 2008c). Bajo condiciones sin estrés, el tiempo desde la siembra hasta la emergencia es de 3 a 10 días. El tiempo hasta la cobertura máxima del dosel (CC_x) depende de la densidad de siembra y el régimen de temperatura. La fenología se complica más por una respuesta al fotoperíodo; una respuesta de día corto a la duración desde la emergencia hasta la floración, y a la duración de todas las fases de desarrollo en algunas variedades (Bertero, 2003). El tiempo desde la emergencia hasta la madurez fisiológica varía entre 100 y 230 días, de nuevo debido a una gran variación entre variedades. La floración empieza entre los 60 y 120 días, y dura alrededor de 20 días. La senescencia del dosel comienza generalmente alrededor de un mes antes de la madurez fisiológica, y avanza relativamente rápido. Es importante señalar que estos valores indicativos están determinados para variedades cultivadas en alturas elevadas, y podrían estar sesgados debido a que las condiciones de crecimiento (temperatura, fertilidad, suministro de agua) no son óptimas. Las raíces, frecuentemente con numerosas ramificaciones, pueden enterrarse a 1.80 m de profundidad en casos de estrés por sequía en suelos ligeros.

En el sur de los Andes, la quinua se cosecha en abril-mayo, principalmente arrancando o cortando las plantas y dejándolas apiladas en el campo para que se sequen. La cosecha puede tardar hasta 1.5 meses debido a la floración y maduración asincrónica. En principio, la simulación realista de dicha práctica de producción con *AquaCrop* supondría ejecutar simulaciones para cada grupo de maduración y luego sumar los rendimientos de todos los grupos en función de su densidad de población o superficie de suelo ocupada (Figura 2. Ejemplo de quinua).

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

En mitad de la estación, la quinua alcanza la cobertura del dosel máxima (CC_x), poco después de la primera antesis. La CC_x depende en gran medida de las condiciones de manejo y en mayor medida, determina la transpiración de la quinua. La quinua transpira a una tasa similar a la evapotranspiración de referencia (ET_o) con una cobertura del dosel completa del suelo y bajo condiciones de nutrientes no limitados. Los valores estacionales de ET para la quinua con una duración normal del ciclo de 150-170 días son alrededor de 500 mm bajo condiciones sin estrés. Como cultivo C_3, la productividad del agua normalizada del cultivo (WP*) es baja, con valores típicos alrededor de 10.5 g/m^2 en la baja fertilidad natural del altiplano boliviano (Geerts *et al.,* 2009). La disminución del valor de la productividad del agua para biomasa de referencia (WP*) solamente se produce ante cantidades mayores totales de transpiración, y sólo en un 10 %, aún en condiciones de baja fertilidad. La ruta metabólica C_3 se adapta bien a las bajas temperaturas promedio predominantes en el altiplano. Los valores reportados de rendimiento de semillas por unidad de agua consumida ($WP_{Y/ET}$) son bastante bajos y se sitúan entre 0.3 y 0.6 kg/m^3, debido a las condiciones de baja fertilidad generalmente predominantes (Geerts *et al.,* 2009). Por otro lado, este es un cultivo sumidero de una gran cantidad de nitrógeno, causando así un elevado costo metabólico o mayor nivel de glucosa-equivalente por unidad de materia seca producida. A nuestro entender, no se han realizado investigaciones sobre la respuesta de la quinua a los aumentos del CO_2.atmosférico.

FIGURA 2 El color de la flor y del grano que se presenta en la figura solamente es un ejemplo. Dependiendo de la cantidad de antocianos, este color varía de verde amarillento a púrpura oscuro, e incluso negro, a lo largo de las variedades de quinua.

RESPUESTA A ESTRESES

La quinua es altamente resistente a una serie de estreses abióticos (Jacobsen *et al.,* 2003). La quinua presenta varios mecanismos de resistencia a la sequía. La sequía en las primeras etapas vegetativas puede prolongar su ciclo biológico, lo que le permite a la planta compensar las pérdidas de crecimiento durante la sequía inicial si hay disponibilidad de agua más adelante. Además, la disponibilidad de variedades con diferentes duraciones de ciclo permite hacer coincidir los requerimientos hídricos del cultivo de quinua con las precipitaciones disponibles o el agua del suelo almacenada en un lugar determinado. Los tejidos de la quinua tiene una relativamente alta concentración de solutos osmóticos y experimenta un ajuste osmótico sustancial en condiciones de sequía, lo que permite que los estomas permanezcan algo abiertos a un rango de potencial hídrico foliar de -1.5 MPa. Las plantas son capaces de mantener el potencial hídrico foliar y la fotosíntesis durante el secado del suelo, debido a la compleja respuesta estomática, que redunda en un aumento de la eficiencia del uso del agua por parte de la hoja. El ABA originado por la raíz juega un papel en el funcionamiento estomático durante el secado del suelo. La regulación del ABA parece ser uno de los mecanismos utilizados por la quinua cuando se enfrenta a una sequía que induce la disminución de la turgencia de las células oclusivas estomáticas (Jacobsen *et al.,* 2009). La planta también evita los efectos negativos de la sequía a través de un enraizamiento rápido y profundo, especialmente en suelos secos. La quinua también reduce su área foliar a través de una senescencia foliar controlada en condiciones de sequía.

La quinua es una planta halófita facultativa (Bosque-Sánchez *et al.,* 2003) y puede crecer en condiciones no salinas hasta condiciones de extrema salinidad, dependiendo de la variedad. Una salinidad moderada (EC en el rango de 5-15 dS/m) mejora la producción de semillas y puede que

no se reduzca drásticamente, incluso con una EC de 40 a 50 dS/m en algunas variedades (Jacobsen *et al.,* 2003). El ajuste osmótico por acumulación de iones de sal en los tejidos le permite a la planta mantener la turgencia celular y la transpiración en condiciones salinas.

Además de la sequía, las heladas y el frío son otros factores importantes que limitan el crecimiento en el altiplano. La quinua es tolerante a las heladas, en parte debido a la protección que proporciona su dosel heterogéneo (Winkel *et al.,* 2009), aunque la tolerancia cambia de acuerdo a la variedad y parece disminuir en las últimas etapas fenológicas (Jacobsen *et al.,* 2005). La congelación de la hoja de quinua se produjo solamente entre -5 y -6°C, y se retrasa en caso de estrés hídrico leve (Bois *et al.,* 2006). La resistencia a las heladas se asocia con el super enfriamiento del agua de los tejidos y la tolerancia a la formación de hielo extracelular (en la pared celular), como es común para la mayoría de los cultivos de invierno.

La resistencia a las heladas está asociada a una baja temperatura base (T_{base}) de los procesos de la planta. En un estudio de la tasa de aparición foliar de diferentes variedades de quinua, procedentes de diversas alturas y latitudes, la T_{base} fue en promedio 2 °C, y la temperatura a la que se alcanzó la tasa máxima fue 22 ^{o}C en promedio. Otros estudios encontraron una T_{base} de 3 °C, T_{opt} de 30-35 °C y T_{max} estimada de 50 °C (Bertero *et al.,* 2000; Jacobsen y Bach, 1998). La sensibilidad de la quinua a la temperatura fue mayor en variedades originarias de climas fríos y secos, y menor en variedades de climas más cálidos y húmedos (Bertero *et al.,* 2000).

Los casos de cultivo de quinua en condiciones no limitantes de fertilidad son muy raros, debido a que la fertilidad del suelo es generalmente pobre en su centro de origen. La investigación realizada en Colorado, Estados Unidos, sobre los requerimientos de nitrógeno y fósforo, encontró que es posible alcanzar rendimientos máximos de más de 4.5 toneladas por hectárea cuando se aplican 170 a 200 kg N/ha (Oelke *et al.,* 1992). Si se confirman estos resultados en otros estudios, la WP* de la quinua bajo condiciones de fertilidad no limitada sería mucho mayor que el valor de 10.5 g/m^2 reportado anteriormente para las condiciones naturales de baja fertilidad del altiplano andino. No se observó efecto alguno sobre el rendimiento cuando se aplicaron 34 kg de fósforo (como ácido fosfórico) por hectárea, en comparación con una parcela de terreno no tratada (Oelke *et al.,* 1992). En las áreas de cultivo tradicional, se aplica estiércol de oveja o llama cuando está disponible; pero sobre todo, la quinua se siembra en campos no fertilizados. Si se siembra después de la papa o patata, el suministro de nutrientes es generalmente mayor gracias a los nutrientes sobrantes de la fertilización de la papa o patata.

PRÁCTICA DE RIEGO

Como la quinua es resistente a la sequía, se cultiva tradicionalmente en condiciones de secano, incluso en zonas semiáridas. Sin embargo, los investigadores empezaron a estudiar el impacto del agua adicional en la producción de quinua, y encontraron que el riego deficitario (DI) fue altamente beneficioso en varios sitios experimentales. Ya se está practicando el DI para la reintroducción de la quinua en las regiones áridas de Chile. Por otro lado, actualmente es raro el cultivo de quinua bajo riego completo, ya que la investigación de quinua bajo riego completo arrojó resultados ligeramente mejores que la quinua cultivada bajo riego deficitario (Geerts *et al.,* 2008a y b); además se presenta el problema de que en la mayoría de casos no hay agua suficiente para el riego completo.

RENDIMIENTO

La quinua produce semillas nutritivas (Álvarez-Jubete *et al.,* 2009) con un alto contenido proteico (de 12 hasta 20 %), en comparación con el maíz, arroz e incluso el trigo. Una composición equilibrada de aminoácidos hace que la calidad de la proteína sea comparable a la de la leche, convirtiéndola en sustituto eficaz de la carne y la leche. Además, la quinua no contiene gluten, lo cual es una ventaja en la producción comercial de alimentos para consumo de celíacos. Por otra parte, las semillas también contienen la sustancia antinutricional conocida como saponina (Mastebroek *et al.,* 2000), que la planta produce como una protección inherente contra las plagas. La saponina se elimina lavando o puliendo en seco antes del consumo.

Aunque se han reportado ocasionalmente altos rendimientos (hasta 4.5 ton/ha y más) en algunas variedades de quinua bajo condiciones no limitantes de fertilidad y agua, los rendimientos de secano en el altiplano peruano y boliviano no superan 0.85 ton/ha en promedio. Las plagas –incluyendo aves y roedores– y las enfermedades son las principales causas de la pérdida de rendimiento, además de la baja fertilidad y los déficits hídricos. El índice de cosecha (HI) de la quinua en el campo oscila entre 0.3 y 0.5. El incremento del HI es breve en variedades de ciclo corto, y dura de 80 a 100 días para las variedades de ciclo largo. El tamaño del grano es muy variable entre variedades. El peso de 1000 granos varía de 1.2 a 6.0 g en condiciones libres de estrés (Rojas, 2003).

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez-Jubete, L., Arendt, E.K., Gallagher, E. 2009. Nutritive value of pseudo cereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science & Technology* 21: 106-113.

Bertero, H.D. 2003. Response of Developmental Processes to Temperature and Photoperiod in Quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International* 19, 87-97.

Bertero, H.D., King, R.W. y Hall, A.J. 2000. Photoperiod and temperature effects on the rate of leaf appearance in quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.). *Australian Journal of Plant Physiology* 27, 349-356.

Bois, J.F., Winkel, T., Lhomme, J.P., Raffaillac, J.P. y Rocheteau, A. 2006. Response of some Andean cultivars of quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy* 25, 299-308.

Bosque-Sánchez, H., Lemeur, R., Van Damme, P. y Jacobsen, S.E. 2003. Ecophysiological analysis of drought and salinity stress of quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International* 19: 111-119.

Christiansen, J.L., Jacobsen, S.-E. y Jorgensen, S. T. 2010. Photoperiodic effect on flowering and seed development in quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.). Acta Agriculturae Scandinavica, Sección B - *Plant Soil Science,* 1-6.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Geerts, S., Raes, D., García, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., Cusicanqui, J. y Taboada, C. 2008a. Introducing deficit irrigation to stablize yields of quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy* 28, 427-436.

Geerts, S., Raes, D., García, M., Condori, O., Mamani, J., Miranda, R., Cusicanqui, J., Taboada, C. y Vacher, J. 2008b. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano? *Agricultural Water Management* 95, 909-917.

Geerts, S., Raes, D., García, M., Mendoza, J. y Huanca, R. 2008c. Indicators to quantify the flexible phenology of quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Research* 108, 150-156.

Geerts, S., Raes, D., García, M., Taboada, C., Miranda, R., Cusicanqui, J., Mhizha, T. y Vacher, J. 2009. Modelling the potential for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano. *Agricultural Water Management* 96, 1652-1658.

Jacobsen, S.-E. y A.P. Bach. 1998. The influence of temperature on seed germination rate in quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.). *Seed Science and Technology* 26, 515-523.

Jacobsen, S.E., Mujica, A. y Jensen, C.R. 2003. The Resistance of Quinoa *(Chenopodium quinoaWilld.)* to Adverse Abiotic Factors. *Food Reviews International* 19, 99-109.

Jacobsen, S.-E., Monteros, C., Christiansen, J.L., Bravo, L.A., Corcuera, L.J. y Mujica, A. 2005. Plant responses of quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy* 22, 131-139.

Jacobsen, S.-E., Liu, F. y Jensen, C.R. 2009. Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Horticulturae* 122, 281-287.

Mastebroek, H.D., Limburg, H., Gilles, T. y Marvin, H.J.P. 2000. Occurrence of sapogenins in leaves and seeds of quinoa *(Chenopodium quinoa* Willd). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80(1): 152-156.

Oelke, E.A., Putnam, D.H., Teynor, D.M. y Oplinger, E.S. 1992. *Alternative field crops manual-quinoa.* EE. UU., Universidad de Purdue.

Rojas, W. 2003. Multivariate Analysis of Genetic Diversity of Bolivian Quinoa Germplasm. *Food Reviews International* 19, 9-23.

Schulte auf'm Erley, G., Kaul, H.-P., Kruse, M. y Aufhammer, W. 2005. Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy* 22, 95-100.

Winkel, T., Lhomme, J. P., Nina Laura, J.P., Mamani Alcon, C., del Castillo, C., Rocheteau, A. 2009. Assessing the protective effect of vertically heterogeneous canopies against radiative frost: The case of quinoa on the Andean Altiplano. *Agricultural and Forest Meteorology,* 149, 1759-1768.

Tef

AUTOR PRINCIPAL
Alemtsehay Tsegay *(Universidad de Mekele, Tigray, Etiopía)*

AUTORES COLABORADORES
Dirk Raes,
Sam Geerts,
Eline Vanuytrecht *(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica),*
Margarita García-Vila *(Universidad de Córdoba, Córdoba, España),*
Berhanu Abrha
(Universidad de Mekele, Tigray, Etiopía)

AGRADECIMIENTOS
Theodore C. Hsiao
(Universidad de California, Davis, EE. UU.),
Gabriella Izzi
(anteriormente FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia; en la actualidad WB, Washington, EE. UU.),
Pasquale Steduto
(FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia)

CIENTÍFICOS QUE APORTARON DATOS EXPERIMENTALES Y ENSAYOS PARA LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP
Reinout Reggers,
Nikolaas Viaene,
Willem Raes,
Nele Delbecque,
Hanne Van Gaelen
(Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica)

Tef

DESCRIPCIÓN GENERAL

Tef *(Eragrostis tef* [Zucc.] Trotter) es una gramínea anual C_4 (Holden, 1973;. Hirut *et al.,* 1989) también conocida como gramínea macollante, que se originó y diversificó en Etiopía (Vavilov, 1951). Es uno de los cultivos de cereales más importantes de ese país; se encuentra en el primer lugar en área cultivada entre todos los cultivos anuales y ocupa alrededor del 29 % del suelo dedicado a los cereales. El rendimiento del tef es muy bajo (es alrededor de 1 ton/ha o menos en promedio), pero representa alrededor del 20 % de la producción total de cereales (en la mayoría de los casos es segundo después del maíz) en Etiopía. La tendencia en la última década es un aumento en el área cultivada (cerca del 25 %) y un aumento de 45 % en el rendimiento por hectárea. Fuera de Etiopía, el tef también se cultiva tradicionalmente en Eritrea, y en menor medida en la India.

El tef se cultiva principalmente solo, aunque ocasionalmente se intercala con cultivos oleaginosos como la colza, cártamo y girasol, o se cultiva asociado con maíz y sorgo (Seyfu, 1997). En Etiopía, el tef se rota frecuentemente con legumbres, como guisantes, habas, garbanzos, o cultivos oleaginosos como la linaza, dependiendo de la ubicación y el tipo de suelo. En la mayoría de los casos es común una rotación de 4 ó 5 años, con legumbre/tef/tef, trigo o cebada/legumbre y legumbre/tef/ tef/otros cereales/legumbre.

El tef se produce principalmente como alimento básico para el consumo local y es un importante cultivo comercial para los hogares rurales. El grano se muele y se convierte en harina para hacer un pan local similar a un panqueque, conocido como *Injera*. Proporciona aproximadamente dos tercios de la ingesta diaria de proteína dietética para la mayoría de etíopes (NRC, 1996). El contenido proteico del grano es de aproximadamente 9-11 %, ligeramente mayor que el sorgo, el maíz o la avena, pero menor que el trigo o la cebada. El tef también se aprecia como un cultivo de forraje, con una paja nutritiva que se les da preferentemente a las vacas y bueyes utilizados para tracción. Por otra parte, su paja es el material aglutinante preferido en Etiopía para paredes, ladrillos y recipientes domésticos de barro.

El gluten del grano del tef carece de la fracción de gliadina que causa la enfermedad celíaca; por lo tanto puede ser consumido por personas con intolerancia al gluten. Los aminoácidos de la proteína en el grano del tef están relativamente equilibrados. Estas propiedades hacen del tef un cultivo potencialmente atractivo fuera de sus áreas tradicionales. Países como Estados Unidos, Canadá, Australia, Sudáfrica y Kenia comenzaron la producción de tef para diferentes propósitos, como cultivo de forraje, componente de papillas y panqueques, y espesante para sopas y salsas, probablemente debido a que la harina de tef le confiere al producto una textura corta, consistente y un ligero sabor dulce similar al de la melaza.

CRECIMIENTO Y DESARROLLO

El método común de siembra del tef es el voleo a mano. Las semillas de tef son extremadamente pequeñas, con un peso de 250 a 350 mg por 1000 semillas *(NRC, 1996)*. Por lo tanto, requiere de un cuidado especial en la preparación de un lecho de siembra fino y suave. Esto implica arar el campo de 3 a 6 veces (Aune *et al.,* 2001) para pulverizar el suelo y cubrir ligeramente las semillas después de la siembra. Se recomienda una dosis de siembra de 25-30 kg/ha para la siembra a voleo (Fufa, *et al.,* 2000 and Seyfu, 1997). El período de siembra en Etiopía varía entre mediados de julio y comienzos de agosto, dependiendo del clima local, tipo de suelo y duración del ciclo biológico de la variedad, y por lo general cuando la humedad del suelo está cerca de la capacidad de campo.

La emergencia tarda unos días o más (entre cuatro y 11 días), dependiendo de la humedad del suelo y la temperatura. Una temperatura del suelo por debajo de 19 °C retrasa la velocidad de emergencia. El crecimiento vegetativo y desarrollo del dosel (Alemtsehay *et al.,* 2011) sigue el patrón común para otros cultivos, al igual que la acumulación de biomasa. La cobertura del dosel completa (CC_x) se alcanza antes porque el tef se planta usualmente a una densidad alta (p. ej., 2000 plantas/m^2). La altura final de la planta oscila entre 0.6 m y justo por encima de 1 m.

El tef se autopoliniza, con flores muy pequeñas e inadvertidas, típicas de gramíneas que nacen en panículas (Figura 1), que pueden variar de sueltas a compactas (Seyfu, 1997). Es sensible al fotoperíodo, y su tiempo hasta la floración se acelera con los días cortos. Bajo ciertas condiciones, la floración puede comenzar tan pronto como a los 40 días después de la siembra, o incluso antes. Dado que el tallo termina en la panícula, cuanto más temprano ocurra la floración menos hojas se producirán en el tallo. El tiempo hasta la floración oscila entre 35 a 65 días aproximadamente, como se observó en varios estudios. La senescencia del dosel comienza unos 55 días o más después de la siembra, dependiendo del genotipo y condiciones ambientales. La profundidad de raíces del tef cultivado en tubos de plástico difiere con el genotipo, y oscila entre 0.6 a 1.0 m en el espigazón (Mulu *et al.,* 2001).

El encamado suele ser un problema a medida que el grano de tef se llena y se acerca a la maduración, especialmente si el grano es abundante y hay vientos fuertes y lluvias intensas. El tef se cosecha cuando la parte vegetativa se vuelve amarilla o marrón. El tef se puede cosechar entre 60 y 150 días después de la siembra, dependiendo del grupo de maduración de la variedad y el fotoperíodo (Fufa *et al.,* 2001).

FIGURA 1 A la izquierda, el tef mostrando una inflorescencia tipo panícula; y a la derecha, las panículas llevando semillas.

PRODUCTIVIDAD Y USO DEL AGUA

En Etiopía, el tef se comporta bien con una precipitación anual de 750-850 mm o 450-550 mm durante su periodo de crecimiento, pero se puede obtener un rendimiento razonable con 300 mm de lluvia en su período de crecimiento (Seyfu, 1997). Hay muy poca investigación reportada acerca de la productividad del agua (WP) del tef, aparte de los primeros intentos de estimación de su WP normalizada (WP *) para ser usadas en las simulaciones de *AquaCrop* . Los valores obtenidos en dos estudios (Araya *et al.,* 2010; Alemtsehay *et al.,* 2011) entran dentro del rango de 14 a 20 g/m^2, los cuales son similares a los valores comunes de las especies C_3, pero muy inferiores a los 30 g/m^2 que se obtuvieron para otras especies C_4. La baja WP* del tef es atribuible, al menos en parte, a una menor fertilización con N, ya que el cultivo se fertilizó con sólo 60 kg/ha de N en ambos estudios. Los valores generales de WP* señalados anteriormente para especies C_3 y C_4 corresponden a cultivos que crecen con una nutrición mineral óptima (que recibieron 150 a 250 kg de N/ha). Es necesario realizar estudios adicionales y más definitivos de la WP del tef.

RESPUESTA A ESTRESES

El tef es genéticamente diverso, siendo cultivado en alturas de 1000 a 2500 m y un rango de temperatura media de 10 °C a 27 °C (Seyfu, 1997). El cultivo se considera tolerante a la sequía y al encharcamiento (Mulu *et al.,* 2001). Esta característica es importante para los agricultores pobres en lugares con condiciones ambientales muy variables.

Con respecto al estrés hídrico, al menos uno de los mecanismos de adaptación es aparentemente el ajuste osmótico. En un estudio (Mulu *et al.,* 2001) con muchos genotipos, se encontró que la mayoría de las líneas de tef se ajustaron osmóticamente en más de 0.4 MPa ante una sequía de desarrollo lento. Sin embargo, la senescencia del dosel se aceleró bajo estrés hídrico (Araya *et al.,* 2010) como en la mayoría de los cultivos. Muchas variedades requieren de 200 a 300 mm de agua durante su crecimiento inicial (NRC, 1996). Seyfu (1997) mencionó que 300 a 500 mm de precipitación son adecuados en el período de crecimiento, e incluso menos de 300 mm de

precipitación estacional pueden ser suficientes para variedades de maduración temprana. Esta es la razón por la cual el tef se planta con frecuencia como cultivo de rescate en la misma estación después de que fracasa un cereal debido a una sequía temprana, aprovechando las lluvias posteriores para producir algo de grano y paja. La ET estacional del tef con maduración temprana, estimada utilizando *AquaCrop* u otros modelos de simulación, para las tierras altas etíopes, se encuentra en el rango de 280 a 300 mm. Por lo tanto, puede que incluso un tef de un corto ciclo biológico no experimente estrés hídrico en dicha situación, aunque el rendimiento sería menor en comparación con variedades de ciclos más largos.

El tef crece en una amplia gama de tipos de suelo. Una recomendación para mejorar el rendimiento donde los nutrientes son una limitación, es aplicar fósforo a la tasa de 60 kg de P_2O_5/ha durante la siembra, tanto en suelos ligeros como pesados, y 40 kg y 60 kg de nitrógeno por hectárea, respectivamente, a suelos ligeros y pesados (EARO, 2002). El tef tiene cierta tolerancia a las heladas e inundaciones, y a temperaturas altas de hasta 35 °C, pero no puede sobrevivir a una congelación prolongada (NRC, 1996).

PRÁCTICA DE RIEGO

El riego no es una práctica común en las zonas tradicionales de cultivo, aunque la escasez de agua es el principal factor limitante para el crecimiento del tef en las regiones áridas y semiáridas de Etiopía, debido a las precipitaciones escasas y erráticas. Las investigaciones muestran claramente que el tef se beneficia del riego suplementario en lugares propensos a la sequía terminal, manteniendo el dosel verde por más tiempo (Araya *et al.,* 2010).

RENDIMIENTO

El rendimiento promedio nacional en condiciones de secano en Etiopía es alrededor de 1 ton/ha, aunque puede ser posible obtener rendimientos de más de 2 ton/ha con una buena agronomía. Una razón para el bajo rendimiento es la limitación de nitrógeno. En un estudio (Tulema *et al.,* 2005) en dos tipos de suelo y tres ubicaciones en el centro de Etiopía, un variedad de tef de maduración tardía rindió 0.77, 1.6 y 1.9 ton/ha, y el N medido (grano más paja) totalizó 58, 103 y 126 kg/ha en los tres lugares. Se aplicaron 64 kg/ha de N al suelo en todos los casos. Para el rendimiento más alto, la cantidad de N aplicada fue aproximadamente la mitad del N eliminado en 1.9 ton/ha de cultivo. Estos resultados indican que el N puede ser un factor importante que limita los rendimientos actuales. No obstante, el aumento de la fertilización con N puede aumentar el encamado. Otra probable razón del bajo rendimiento es la tendencia del tef a encarnarse mientras el dosel está todavía verde. Un estudio mostró el aumento potencial en el rendimiento al minimizar el encamado (Teklu y Tefera, 2005), donde se cultivaron muchas variedades de forma óptima en el campo a través de mallas fijas para proporcionar apoyo a los tallos y prevenir el encamado. Los rendimientos variaron desde 2.9 hasta 4.6 ton/ha, con una media de 3.8 ton/ha. Aparentemente se están haciendo esfuerzos para mejorar la resistencia al encamado (van Delden *et al.,* 2010).

Otra razón para el bajo rendimiento del tef es su bajo índice de cosecha (HI). Seyfu (1997) reporta un HI nacional promedio de 0.24 en Etiopía. Teklu and Tefera (2005) encontraron que el HI está en un rango similar para sus diferentes variedades de tef. Por otra parte, Temesgen *et al.* (2005) reportaron un HI promedio oscilando entre 0.33 y 0.38 para diferentes grupos de accesiones de germoplasma, pero no especificaron la densidad de plantas. En contraste, el HI de variedades modernas de otros cultivos de cereales se encuentra alrededor de 0.45 a 0.50.

BIBLIOGRAFÍA

Araya, A., Keesstra, S.D. y Stroosnijder, L. 2010. Simulating yield response to water of Teff *(Eragrostis tef)* with FAO's *AquaCrop* model. *Field Crops Research* 116:196-204.

Aune, J., Mateweos, T.B., Fenta, G.A. y Abyie, A.N. 2001. The oxen ploughing system in Ethiopia: can it be sustained? *Outlook Agriculture,* 30, 275-280.

EARO. 2002. *Research recommendations for improved crop production.* Addis Abeba, Dirección de Investigación de Cultivos: Organización Etíope para la Investigación Agrícola.

Fufa, H., Tesfa, B., Hailu T., Kebebew, A., Tiruneh, K., Aberra, D. y Seyfu, K. 2001. Agronomy research in Tef. En: Hailu Tefera, Getachew Beley y Sorrells, M., eds. *Narrowing the Rift. Tef Research and Development.* Memorias del Taller Internacional sobre Genética y Mejoramiento del Tef, Debre Zeit, Etiopía; 16 al 19 de octubre de 2000, págs. 167-176.

Hirut, K., Johnson, R.C. y Ferris, D.M. 1989. Photosynthetic response of *Eragrostis tef* to temperature. *Physiologia Plantarum,* 77, 262-266.

Holden, M. 1973. Chloroplast pigments in plants with the C4-dicarboxylic acid pathway of photosynthesis. *Photosynthetica* 7: 41-49;

Mulu, A., Blum, A. y Nguyen, H.T. 2001. Diversity for osmotic adjustment and root depth in TEF. *[Eragrostis tef* (Zucc) Trotter]. *Euphytica,* 121: 237-249.

NRC. 1996. Consejo Nacional de Investigación. *Lost crops of Africa. Volumen I: Grains.* Washington, D.C., National Academy Press.

Seyfu, K. 1997. Tef. *Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Instituto de Genética Vegetal e Investigación en Cultivos, Gatersleben/Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Roma.

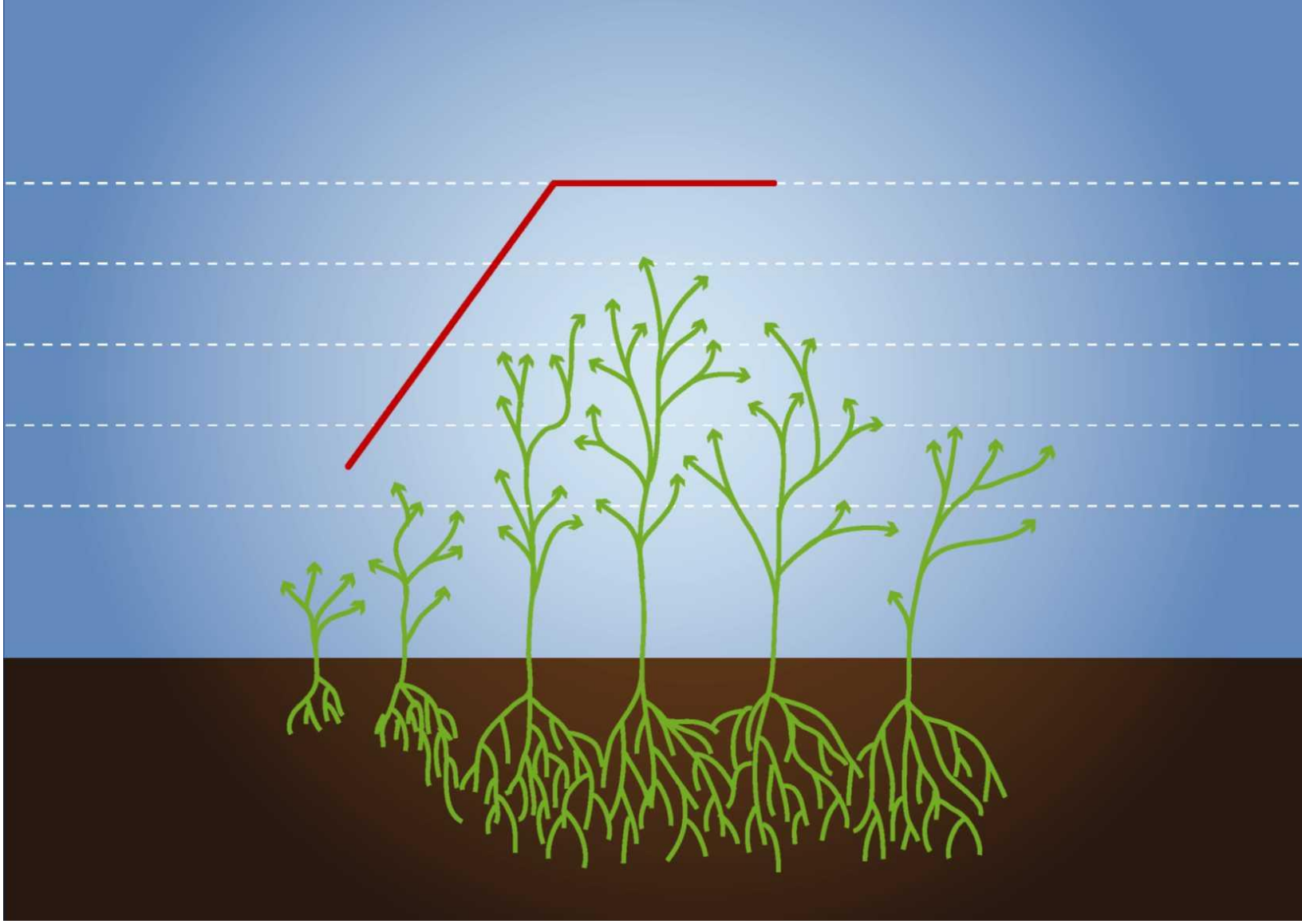
Temesgen, A., Seifu, K, Hailu, T. y Sridhara, H. 2005. Genetic diversity in tef *[Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] germplasm. *Genetic Resources and Crop Evolution,* 52, 891-902.

Teklu, Y. y Tefera, H. 2005. Genetic improvement in grain yield potential and associated agronomic traits of tef *(Eragrostis tef*). Euphytica, *International Journal of Plant Breeding* 141: 247-254.

Tulema, B., Zapata, F., Aune, J. y Sitaula, B. 2005. N fertilisation, soil type and cultivars effects on N use efficiency in tef *[Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71: 203-211.

van Delden, S. H., Vos, J., Ennos, A. R. y Stomph, T. J. 2010. Analysing lodging of the panicle bearing cereal tef *(Eragrostis tef). New Phytologist* 186: 696-707.

Vavilov, N.I. 1951. *The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants.* Nueva York, The Ronald Press Co., [Traducido del ruso por K. StarrChester].



Respuesta del rendimiento de árboles frutales y vides al agua: guías

AUTORES PRINCIPALES
Elías Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España),

David A. Goldhamer
(anteriormente Universidad de California, Davis, EE. UU.; en la actualidad Profesor emérito de Extensión Cooperativa),

Victor O. Sadras
(SARDI Waite Campus, Australia)

AUTORES COLABORADORES
Martin Smith (anteriormente FAO, División de Tierras y Agua, Roma, Italia)

Jordi Marsal
(IRTA, Lleida, España),

Joan Girona
(IRTA, Lleida, España),

Amos Naor
(GRI, Universidad de Haifa, y Migal - Centro de Tecnología de Galilea, Israel),

Riccardo Gucci
(Universidad de Pisa, Pisa, Italia),

Angelo Caliandro
(Universidad de Bari, Italia),

Carmen Ruz
(IAS-CSIC, Córdoba, España)

AGRADECIMIENTOS
Cristos Xiloyannis
(Universita degli studi della Basilicata, Potenza, Italia)

Elías Fereres, Joan Girona y Jordi Marsal agradecen al Ministerio de Educación de España por la subvención CONSOLIDER-RIDECO.

4. Respuesta del rendimiento de árboles frutales y vides al agua: guías

Introducción y antecedentes

Los huertos y los viñedos son a largo plazo, e inversiones costosas. Al desarrollar plantaciones se deben evitar dos problemas críticos: a) condiciones de suelos pobres (p. ej., demasiado superficiales, drenaje inadecuado, alta salinidad), y b) incertidumbre en el suministro del agua de riego. Las condiciones limitantes del suelo son una amenaza a la viabilidad de las plantaciones a largo plazo, y los déficits hídricos severos impuestos por la falta de agua de riego no solamente reducirían los rendimientos del año actual, sino que podrían afectar negativamente a la producción de los años subsiguientes, aumentar la variabilidad de producción y dañar o matar los árboles, ya sea directa o indirectamente. En plantaciones perennes, los productores deben limitar los riesgos al mínimo; por esto, los huertos y los viñedos tradicionalmente se han desarrollado bajo buenas condiciones ambientales. Sin embargo, debido a la escasez de agua, los huertos y los viñedos están sujetos a sequías periódicas y últimamente muchos huertos y viñedos han sido plantados en situaciones en las que el suelo y/o el agua pueden ser limitantes. Por esto es importante comprender las respuestas de los huertos y los viñedos a las variaciones del suministro de agua, para garantizar un manejo prudente de la misma.

Los cultivos arbóreos y los viñedos tienen un comportamiento más complejo y se han estudiado menos que los grandes cultivos anuales. Por lo tanto, no es posible, en este momento, diseñar un modelo dinámico, robusto y sencillo de simulación de la respuesta del rendimiento al agua, como *AquaCrop* es en el caso de los cultivos herbáceos, en el Capítulo 3. Como alternativa, primero presentamos un panorama general de las respuestas generalizadas al suministro de agua de los cultivos arbóreos y viñedos, seguido de secciones sobre cada cultivo que delinean las respuestas específicas de cada cultivo arbóreo y de vid, de las cuales se tenga suficiente información, plantados principalmente en climas templados y subtropicales. El material presentado se enfoca en los problemas relevantes relacionados con el desarrollo de huertos y viñedos en cuanto a: a) requerimientos hídricos; b) respuestas a los déficits hídricos; c) técnicas para diseñar calendarios de riego; d) relaciones entre el rendimiento y el uso del agua; y e) estrategias de manejo del agua sugeridas para cuando el suministro de agua sea limitado.

Tendencias mundiales en producción de vides y árboles frutales

El rápido desarrollo de la economía mundial en las últimas décadas ha estado acompañado de muchas transformaciones. Una importante es el cambio de la dieta de los seres humanos; por ejemplo, el incremento de la demanda de productos de origen animal en muchas economías emergentes. En la mayoría de los países, los problemas relacionados con la salud han suscitado el interés e incrementado el consumo de frutos (frutas) y verduras. Una demanda alta del consumidor ha redundado en la producción de productos hortícolas de alta calidad; una prioridad muy alta de las instituciones tanto públicas como privadas de todo el mundo. Se espera que este aumento de la demanda de frutos continúe y sirva de incentivo para que los productores desarrollen industrias hortícolas eficientes, las cuales, en la mayoría de regiones, dependerán del riego.

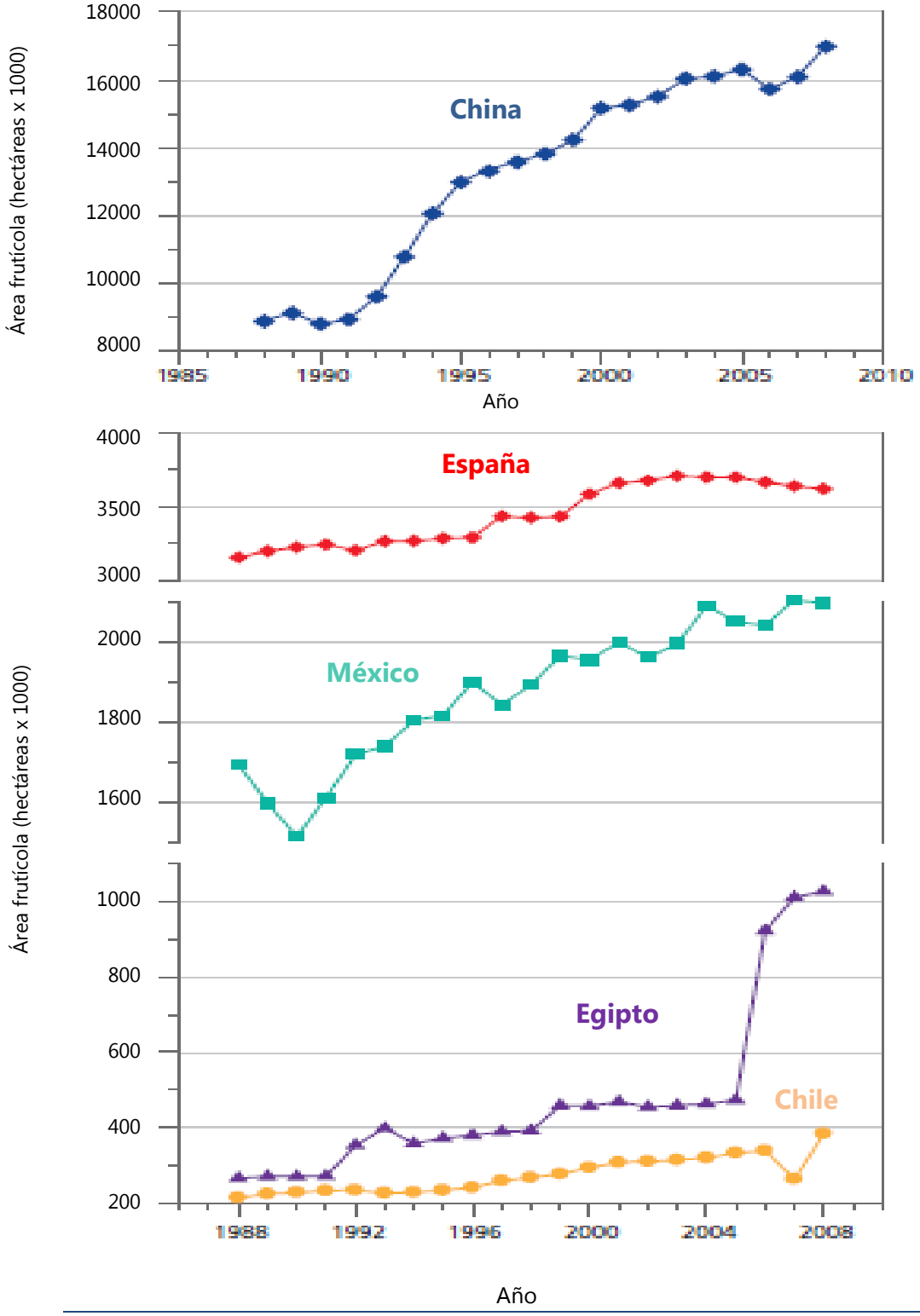
Las demandas hídricas actuales por parte de otros sectores de la sociedad necesitan que el sector agrícola reduzca el uso del agua para riego, el principal uso del agua derivada (canalizada) en el mundo. De hecho, algunos intereses encontrados consideran que el uso actual del agua para prácticas agrícolas es sencillamente otro 'recurso' hídrico, puesto que el fomento de suministros adicionales de riego ha sido limitado, especialmente en los países desarrollados. En muchas partes del mundo, uno de los resultados del reducido suministro hídrico para la agricultura ha sido el cambio de los patrones de cultivo a cultivos más viables desde el punto de vista económico; desde cultivos extensivos anuales en campo hasta cultivos hortícolas, como las hortalizas y los árboles frutales. La Figura 1 muestra que en los últimos 20 años se han incrementado significativamente las áreas dedicadas a cultivar frutales y vides en algunos países, lo que indica que esta es una tendencia general en la agricultura de riego en la mayor parte del mundo.

Las mejoras recientes de los métodos de riego y de manejo han reducido las pérdidas de agua relacionadas con el riego; por tanto, ha disminuido la cantidad de agua aplicada por unidad de suelo regado. Tanto el cambio hacia cultivos de alto valor, como el cambio hacia una mayor eficiencia en la aplicación, sugieren que debería haber aumentado el agua disponible para riego de árboles y vides. Sin embargo, estas mejoras han coincidido con una expansión de las tierras regadas, al punto que la mayoría de agua ahorrada generalmente se ha empleado para regar tierras adicionales o cultivos que tienen requerimientos hídricos más altos. En muchos casos, los requerimientos hídricos de los cultivos arbóreos superan aquellos de los principales cultivos sembrados previamente en estas áreas. Por tanto, lo más probable es que la disponibilidad de agua para riego de árboles y vides siga disminuyendo. Esto será más marcado en áreas donde el suministro haya sido estirado hasta el límite y donde la sociedad considere que las necesidades hídricas ambientales sean prioritarias, y estén en competencia directa con las necesidades de riego.

Hacia una producción intensiva de vides y frutales

Durante las últimas décadas, la tendencia general en la producción de frutas –al igual que en otras formas de agricultura– ha sido hacia la intensificación. Esta tendencia se manifiesta en un incremento de la densidad de árboles o vides, a menudo acompañada del uso de patrones enanos para reducir el vigor de los árboles. Hay muchas razones para que estas plantaciones intensivas tengan éxito, comparadas con las tradicionales de baja densidad. La mayor intercepción de radiación aumenta la asimilación del carbono y la productividad, y la disminución del vigor reduce las necesidades de poda y a menudo los costes de cosecha; ambos gastos significativos en la producción hortícola. Como el acceso al huerto mejora porque los caminos (áreas entre las hileras de árboles) normalmente no se humedecen con micro-riego, las aplicaciones de control de plagas son más fáciles y a tiempo. En pocas palabras, los huertos intensivos son más manejables. Su mayor limitación son los altos requerimientos de capital por unidad de área de suelo para el establecimiento del huerto, pero los huertos pequeños pueden ser sostenibles económicamente si se diseñan adecuadamente para la producción intensiva. Otra desventaja son los altos requerimientos hídricos asociados a la mayor intercepción de radiación, especialmente durante los primeros años de los huertos (Cuadro 1).

FIGURA 1 Tendencias entre 1988 y 2008 del área dedicada a árboles frutales y vides en China (cuadro superior), España, México, Egipto y Chile (FAO, 2011).



Métodos de riego

El riego tiene componentes tanto científicos como tecnológicos, y las mejoras recientes de los cultivos arbóreos y vides están relacionadas principalmente con los segundos; la adopción de sistemas de riego mejorados. El método tradicional empleado en el pasado era el riego por superficie, principalmente con surcos o pequeñas amelgas, y aún se practica hoy en día en muchas áreas (Figuras 2 y 3). La introducción del riego por aspersión en los años cincuenta tuvo poco impacto en los cultivos arbóreos, aunque fue útil para desarrollar nuevas plantaciones en suelos de pendiente que no eran manejables con riego por superficie (Figura 4). A mediados de los sesenta, se inventaron el goteo y otras formas de micro-riego, las cuales presagiaron un cambio drástico en el riego de los árboles y las vides. Por primera vez, los productores no solamente tenían el control de cuánta agua se aplicaba, sino que podrían superar completamente las limitaciones debidas a las topografías de difícil acceso. Además, era posible aplicar agua solamente a las áreas cercanas a los árboles platados en suelos inclinados, evitando pérdidas de distribución y evaporación de las zonas no exploradas por las raíces de los árboles. Esto fue especialmente importante en los primeros años del huerto, cuando se podían lograr importantes ahorros de agua usando el micro-riego. Esta ventaja disminuyó con el tiempo, a medida que los huertos se acercaban a la madurez, y más área de terreno era sombreada; las pérdidas por evaporación se volvieron solo un pequeño componente del uso del agua de consumida. No obstante, si los árboles se espaciaban lo suficiente y las áreas de suelo humedecidas eran extensas y recibían la luz del sol, la evaporación superficial de la superficie del suelo aún podría ser una parte significativa del uso del agua del huerto, como en la fotografía de la Figura 5.

Otra ventaja significativa del micro-riego es su adaptabilidad a los productores grandes y pequeños, y la sencillez de su manejo. El éxito del método de riego por goteo para huertos ha sido tanto que, cuando los agricultores pueden comprar dichos sistemas, estos son preferidos en las nuevas plantaciones en todo el mundo. Al igual que con los otros sistemas de riego permanente, el problema más importante del manejo es determinar la cantidad de agua que se va a aplicar, mientras que la frecuencia de las aplicaciones es mucho menos importante. Si bien el riego se aplica para suplir la suma de pérdidas de transpiración de las hojas y de evaporación de la superficie del suelo, normalmente se presentan algunas pérdidas durante el proceso de riego, aunque éstas deberían ser relativamente pequeñas usando sistemas de micro-riego bien diseñados y manejados.

CUADRO 1 Costes de inversión (USD/ha) de los huertos convencionales o con riego intensivo: ejemplo.

Espaciamiento convencional de los árboles: 8 x 6 m equivalentes a 208 árboles/ha

Espaciamiento intensivo de los árboles: 5 x 2 m equivalentes a 1000 árboles/ha

	208 árboles/ha Costos (US$/ha)	1000 árboles/ha Costos (US$/ha)
Árboles	505	2438
Tutoreo	169	810
Hoyos	1685	8100
Sistema de micro-riego	3650	13 740
Total	**6009**	**25 078**

Los costes (determinados en España en 2010) son aproximadamente 4 veces más altos para el huerto intensivo en este caso; sin embargo, los beneficios también serán diferentes y es posible que, en algunos casos, la mayor producción en los primeros años y la mayor productividad de los huertos intensivos pueda pesar más que los costes.

FIGURA 2 Riego por superficie de árboles de pistacho

FIGURA 3 Riego de cítricos por inundación.

FIGURA 4 Viñedo en suelo con pendiente con riego por aspersión.

FIGURA 5 Huerto joven de aguacate sembrado en suelo con pendiente con riego por goteo

Uso eficiente del agua en riego de huertos

La clave para usar el agua para el riego de manera eficiente es cuantificar la disposición del agua aplicada a un campo. En la Figura 6 se muestra un balance de agua esquemático de un huerto bajo micro-riego, en el que se muestran las distintas pérdidas que ocurren durante y después del riego. El riego eficiente se alcanza cuando la mayor parte del agua aplicada se consume como Tr, y las pérdidas de E, escorrentía y percolación son mínimas. Tradicionalmente, la eficiencia del riego mediante el riego por superficie era baja y menos del 50 % del agua aplicada se usaba para ET. Una nivelación precisa del suelo y un manejo adecuado pueden mejorar la eficiencia hasta en un 70 % o más. La eficiencia de los sistemas de micro-riego que estén bien diseñados, operados y con buen mantenimiento, puede llegar al 90 %.

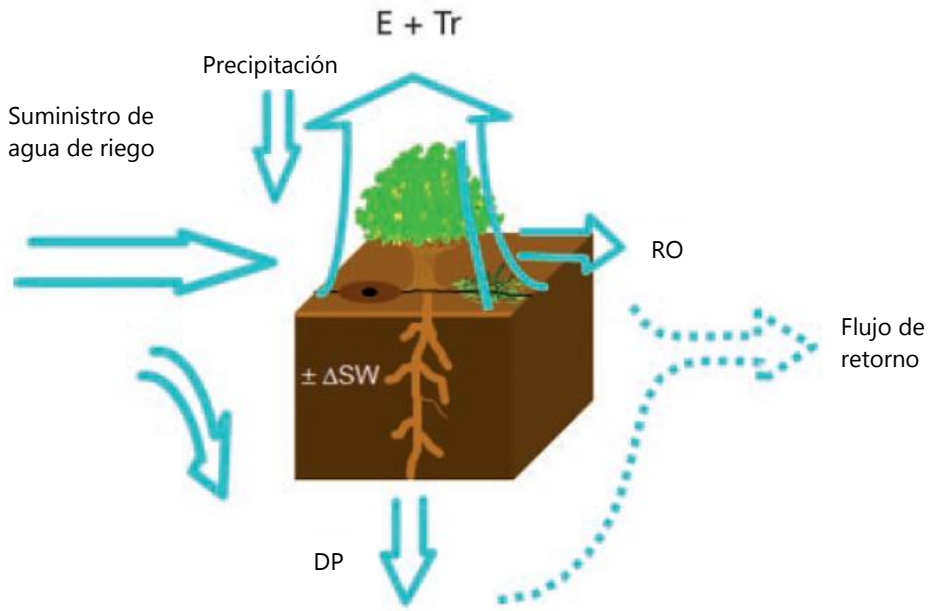
Un aporte importante de la investigación a la mejora del manejo del agua ha sido fijar los requerimientos del uso del agua de consumo para los cultivos. En el caso de los cultivos arbóreos, debido a que en muchas áreas los árboles y las vides se cultivaron en condiciones de secano, la cantidad de riego empleada tradicionalmente era insuficiente para alcanzar el máximo rendimiento. Como la exactitud de las estimaciones del uso del agua de los cultivos arbóreos mejoró, y con la intensificación de la producción, los requerimientos hídricos de los cultivos arbóreos se han incrementado. Este cambio ha provocado un aumento del uso del agua, pero también ha incrementado la producción.

A nivel mundial, las decisiones de manejo del riego se basan principalmente en la experiencia local, con información técnica muy limitada. La principal razón para no adoptar muchos procedimientos técnicos existentes es la percepción de los productores de que no es necesario mejorar las prácticas actuales. A medida que mejoran los métodos de riego y el agua escasea más, esta percepción está cambiando y los productores están empezando a ver la necesidad de ser más precisos en el manejo del riego para los huertos y los viñedos. Una mayor regulación gubernamental, e incluso algunas decisiones legales, pueden forzar el tema del manejo de riego mejorado. Los retos que enfrentan los productores de vides y árboles frutales para maximizar su productividad sostenida exigen: i) conocimiento de los requerimientos de riego para suplir las necesidades totales de los árboles; ii) determinar el calendario de riego que sea mejor en términos de beneficios netos, entre los cuales se encuentran, una reducción moderada del agua aplicada con respecto a las necesidades máximas determinadas en i) ; iii) configurar ese calendario de acuerdo con las condiciones propias y monitorear la respuesta del cultivo al agua aplicada, y iv) conocimiento de la respuesta del huerto a la reducción del agua de riego por debajo de la necesaria para maximizar los beneficios netos, lo que puede ser causado por sequías regionales u otras restricciones.

Manejo del agua en condiciones de escasez

Los agricultores que afrontan restricciones de suministro de riego deben tomar decisiones a nivel de finca mediante la asignación del suministro disponible entre los diversos cultivos. La respuesta inicial a la escasez de agua normalmente se centra en *reducir las pérdidas del sistema de riego*, mejorando así la eficiencia del riego (véase Figura 6). Esto se logra mejorando los sistemas existentes o instalando unos nuevos, como el micro-riego, que tiene una alta eficiencia potencial de aplicación. Además, cuando el agua de riego es escasa, se usan con más frecuencia los procedimientos para *calendario técnico de riego*, que ajustan las aplicaciones de agua con las tasas de uso de la misma. Sin embargo, en la práctica existen límites para reducir las pérdidas de agua asociadas al riego. Una vez estas pérdidas se han eliminado casi en su totalidad, mayores reducciones en el suministro de agua inevitablemente acarrearán déficits hídricos en el cultivo. Cuando esto ocurre, es importante comprender las respuestas fisiológicas a los déficits hídricos específicas de cada especie.

FIGURA 6 Balance de agua de un huerto, mostrando la disposición del agua de riego. E: Evaporación del suelo; Tr: Transpiración; RO: Escorrentía; DP: Percolación profunda, y ±SW: Cambios en el contenido de agua en la zona radicular. Nótese que las pérdidas de RO y DP de los sistemas de riego se pueden recuperar si los flujos de retorno se usan en otro lugar.



Los déficits hídricos que reducen la transpiración de la planta también disminuyen la producción de biomasa en todos los cultivos. Si el cultivo se siembra para biomasa, como alfalfa o ensilado de maíz, disminuirán los ingresos de los agricultores. Para los principales cultivos anuales como el trigo, el maíz y el arroz, una reducción de la transpiración también disminuye el rendimiento de grano y el ingreso bruto. Sin embargo, para muchos cultivos arbóreos y vides (y para algunos cultivos anuales, como el algodón), en los que el fruto es el producto económico, una reducción de la producción de biomasa no siempre acarrea una reducción proporcional de la producción de fruto. No obstante, algunos parámetros de calidad como el tamaño o la apariencia del fruto, pueden verse afectados negativamente.

El otro rasgo distintivo de la respuesta de los cultivos perennes a los déficits hídricos es el efecto de arrastre de los déficits hídricos que afectan a la producción en años posteriores. No se sabe si la longevidad de las plantaciones pueda verse afectada por los déficits hídricos de largo plazo; en algunas especies, como el durazno (o melocotonero) o algunos cítricos, una longevidad más corta puede no ser muy importante, porque las variedades nuevas con mejores oportunidades de mercado reemplazan a variedades más antiguas que ya hace mucho han pasado la madurez completa del huerto. Sin embargo, en otras especies puede tener consecuencias económicas importantes que deben tenerse en cuenta.

Además, puede haber casos de déficits hídricos que tengan efectos beneficiosos en la producción de árboles y vides. Desde hace mucho tiempo se sabe que los frutos de árboles cultivados en condiciones de déficit hídrico tienen mejor sabor que los de árboles con riego completo. Gran parte de la investigación de los últimos años ha mostrado que los déficits hídricos afectan muchos rasgos de la calidad de los frutos, y que también pueden afectar positivamente a la calidad de los productos derivados de los zumos de las frutos, como el vino. Por lo tanto, además de ahorrar

agua, puede haber otros incentivos al aplicar y manejar el estrés hídrico en cultivos perennes, en términos de mejorar la calidad del producto y los ingresos de los productores.

EVAPOTRANSPIRACIÓN Y REQUERIMIENTOS DE RIEGO DE LOS ÁRBOLES FRUTALES Y VIDES

Antecedentes

El agua se evapora del suelo (E) y del interior de las hojas de las plantas, un proceso que se conoce como transpiración (Tr). La suma de la evaporación del suelo y la transpiración de la planta (Cuadro 2) de un campo se denomina evapotranspiración (ET; Figura 6), y equivale al uso del agua consumida de ese campo. La evaporación del agua necesita energía, proporcionada por la radiación solar, la fuente primaria de energía y la fuerza impulsora del proceso de ET. La ET es el resultado de la intercepción de la radiación solar por parte de la vegetación y las superficies húmedas del suelo. Otros factores meteorológicos que influyen en la tasa de ET son la temperatura, la humedad y el viento.

Como el proceso de ET es complejo, muy dinámico y se ve afectado por las condiciones ambientales locales, los investigadores han desarrollado ecuaciones para estimar la ET usando parámetros meteorológicos. La ecuación de Penman-Monteith de la FAO, aceptada actualmente en todo el mundo como el método estándar, calcula la pérdida de agua a partir de una superficie herbácea teórica que dé sombra a todo el terreno y nunca carezca de agua, de donde se obtiene la ET de referencia (ET_o). Los procedimientos para calcular la ET_o a partir de los datos de radiación, viento, humedad y temperatura se presentan en FAO: *Riego y Drenaje N.º 56.* La ET_o es una medida de la demanda de evaporación de un determinado ambiente. Hay muchos otros métodos para calcular la ET_o, algunos de ellos usan únicamente datos de temperatura y son útiles en lugares donde no se dispone de otros datos climáticos. En todo caso, no se deberían usar a menos que la información sea insuficiente para calcular la ET_o con la ecuación de Penman-Monteith de la FAO.

La ET_o proporciona una referencia útil para calcular la ET máxima (ET_c) de cualquier cultivo. Las investigaciones anteriores han generado información sobre la relación entre la ET y la ET_o, definida como el coeficiente de cultivo, K_c. Así, si se conoce K_c, la ET_c se calcula como:

$$ET_c = K_c\, ET_o \qquad (1)$$

Este es el procedimiento estándar para estimar los requerimientos de uso consuntivo del cultivo como se muestran en FAO: *Riego y Drenaje N.º 56,* donde se proporciona una lista de valores del K_c para cada cultivo y etapa de desarrollo. Este enfoque del K_c también se puede emplear para obtener la ET_c para los diversos cultivos arbóreos y de vides, como se muestra a continuación.

La publicación FAO: *Riego y Drenaje N.º 56* también brinda la opción de diferenciar E de Tr usando un enfoque de coeficiente doble de cultivo, según la ecuación:

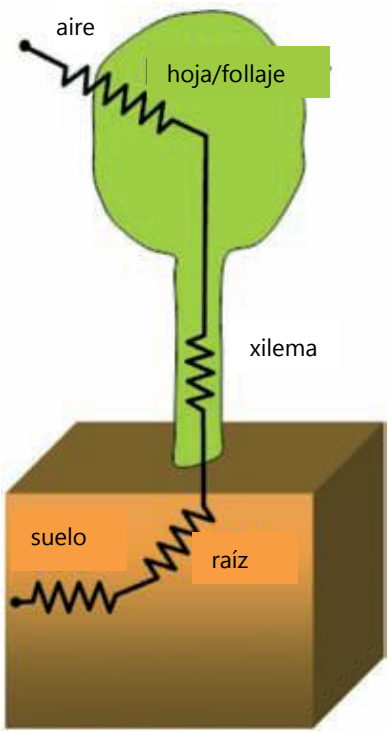
$$ET_c = (K_{cb} + K_e)\, ET_o \qquad (2)$$

Donde K_{cb} es un coeficiente de transpiración y K_e es un coeficiente de evaporación.

CUADRO 2 Comprensión del proceso de transpiración

La pérdida de agua en las hojas de la planta ocurre principalmente a través de los poros, llamados estomas, los cuales están abiertos durante el día y cerrados durante la noche. Los estomas también son el medio de entrada del dióxido de carbono a las hojas, necesario para la fotosíntesis. Las pérdidas de transpiración a través de las hojas desencadenan una secuencia de eventos en el sistema suelo-árbol: el agua se desplaza de los brotes a las hojas para compensar las pérdidas foliares, extrayendo agua del tronco a los brotes, lo cual a su vez extrae agua de las raíces al tronco y finalmente, del suelo a las raíces. Así, el agua en estado líquido fluye del suelo a las partes de las hojas donde se evapora, antes de difundirse a la atmósfera a través de los estomas. El agua se desplaza pasivamente a través de esta ruta siguiendo un gradiente de potencial de energía, del suelo a las hojas. En cualquier lugar de esta ruta, se puede determinar el nivel de energía, denominado potencial hídrico. Además, el flujo del agua encuentra resistencia en todo el camino, del suelo a la atmósfera (ver diagrama). El árbol ejerce algo de control sobre el flujo del agua, necesario para compensar la pérdida por transpiración con respecto a la demanda evaporativa del ambiente. Cuando hay desequilibrios entre el suministro y la demanda, el árbol controla su pérdida de agua ajustando el grado de apertura estomática y por otros medios.

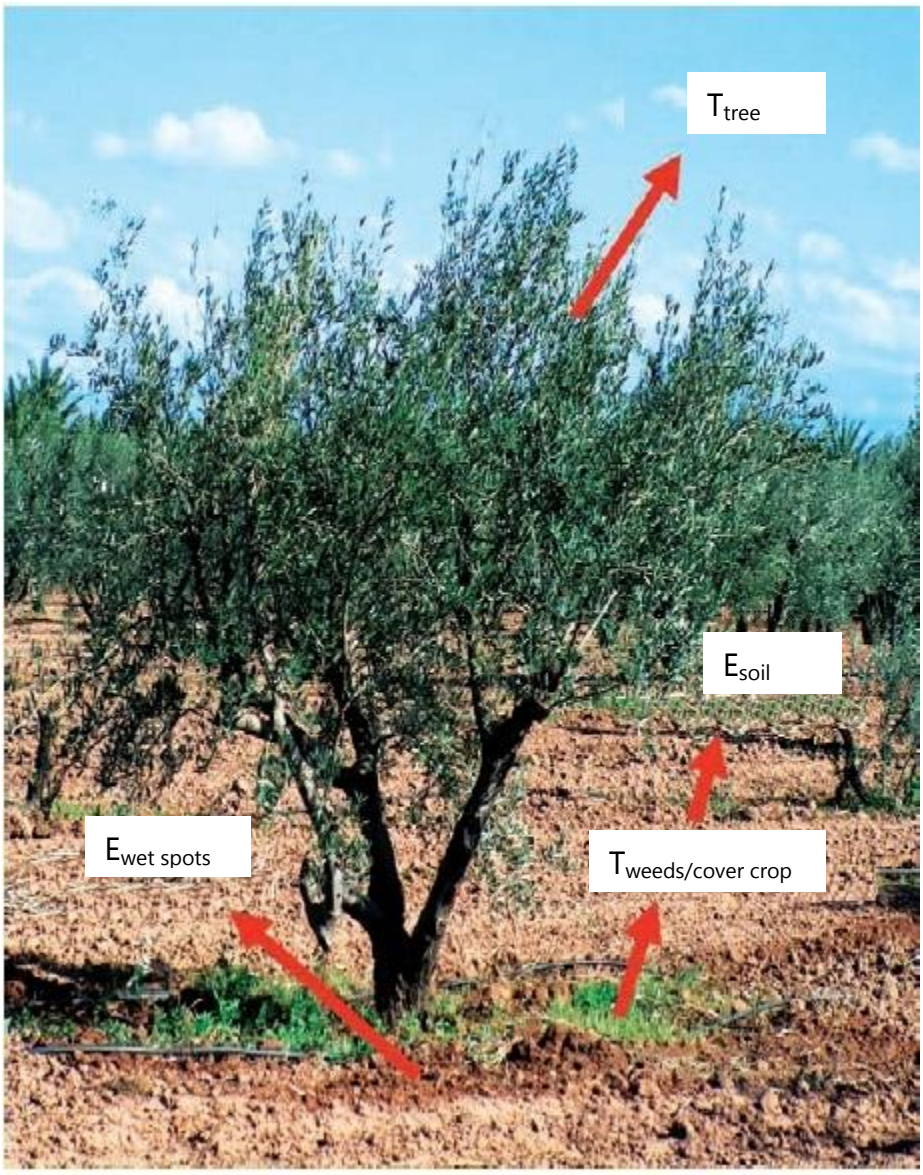
Flujo del agua desde el suelo a través del árbol hacia la atmósfera



Proceso de ET del huerto

La ET_c de un huerto es más compleja que la de un cultivo herbáceo uniforme porque tiene distintos componentes que contribuyen a la pérdida de agua del huerto. Además de la Tr arbórea, podría haber pérdidas de Tr de un cultivo de cobertura o de las malas hierbas y hay pérdidas de E del suelo. En el caso de micro-riego, hay dos componentes de la E que pueden diferir en sus tasas: uno es la E de las áreas de suelo humedecidas por los emisores, y el otro es la E del resto de la superficie del suelo que solamente se humedece por la lluvia. La Figura 7 muestra los cuatro componentes del vapor de agua que contribuyen a la ET del huerto y que se explican más adelante.

FIGURA 7 El proceso de evapotranspiración de un huerto con micro-riego.

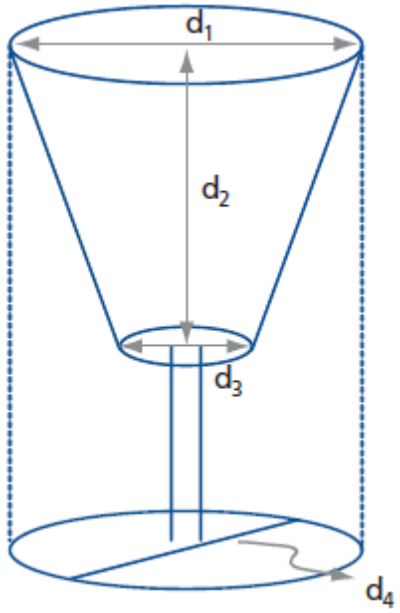


Transpiración del huerto

La Tr de los árboles está determinada por la cantidad de radiación interceptada por el dosel de los árboles y por el comportamiento de los estomas. El grado de apertura estomática se ve influenciado por los factores climáticos mencionados anteriormente: radiación, temperatura, humedad y viento. El comportamiento de los estomas de las hojas de los árboles es complejo; refleja un conflicto entre maximizar la absorción de dióxido de carbono y minimizar la pérdida de Tr, y se ve afectado no solamente por el ambiente, sino también por los factores internos del árbol. Mientras que la Tr de las hojas individuales depende de la conductancia estomática y del ambiente que la rodea, la Tr de los árboles depende de la cantidad y del comportamiento de todas las hojas individuales, y de la disposición de las mismas con respecto a la radiación incidente. La conductancia del dosel –concepto útil para comprender el proceso de Tr– es el resultado de la integración de la conductancia de las hojas individuales en todo el dosel de los árboles. En cultivos herbáceos, el dosel puede ser considerado como una "gran hoja"; en el caso de los cultivos arbóreos y las vides, aunque la cobertura sea más compleja debido a la naturaleza tridimensional y a los espacios entre árboles, el concepto de conductancia del dosel también es válido para representar el comportamiento de todo el árbol. Es importante caracterizar el tamaño de la copa porque ésta determina la cantidad de radiación solar interceptada, la cual está directamente relacionada con la Tr. El Cuadro 3 muestra cómo estimar algunos parámetros relacionados con el tamaño de la copa.

CUADRO 3 Cómo caracterizar el tamaño de la cobertura de los árboles.

El dosel de los árboles se puede caracterizar usando dos parámetros: volumen de la copa (m^3 del volumen del árbol/m^2 de superficie del terreno) y densidad de área foliar (m^2 del área foliar /m^3 del volumen del árbol). El primero se puede estimar fácilmente con una vara de medir, una vez la forma del árbol se ha aproximado a una esfera, una elipsoide o un cono truncado invertido. Sin embargo, el segundo parámetro es mucho más difícil de evaluar y requiere instrumentos especializados. Como alternativa a las mediciones o cálculos de radiación efectivamente interceptada por el árbol, un parámetro sencillo que es fácil de determinar es el grado de cobertura vegetal. La cobertura vegetal (expresada normalmente en porcentaje) se obtiene midiendo el área de sombra indicada por la proyección horizontal (en el plano horizontal) de la copa del árbol (Véase la Figura a continuación).



Cobertura vegetal en porcentaje

$$\text{Área sombreada} = A = \frac{\pi d_4^2}{4} \quad (m^2)$$

$$\text{Cobertura vegetal en porcentaje} = \frac{A}{\text{Espaciamiento de los árboles}}$$

Ejemplo:
Diámetro del área sombreada d_4 = 1.5 m
Espaciado de los árboles = 5 x 2 m

A = 1.77 m^2
Cobertura vegetal en % = A x 10 = 17.7%

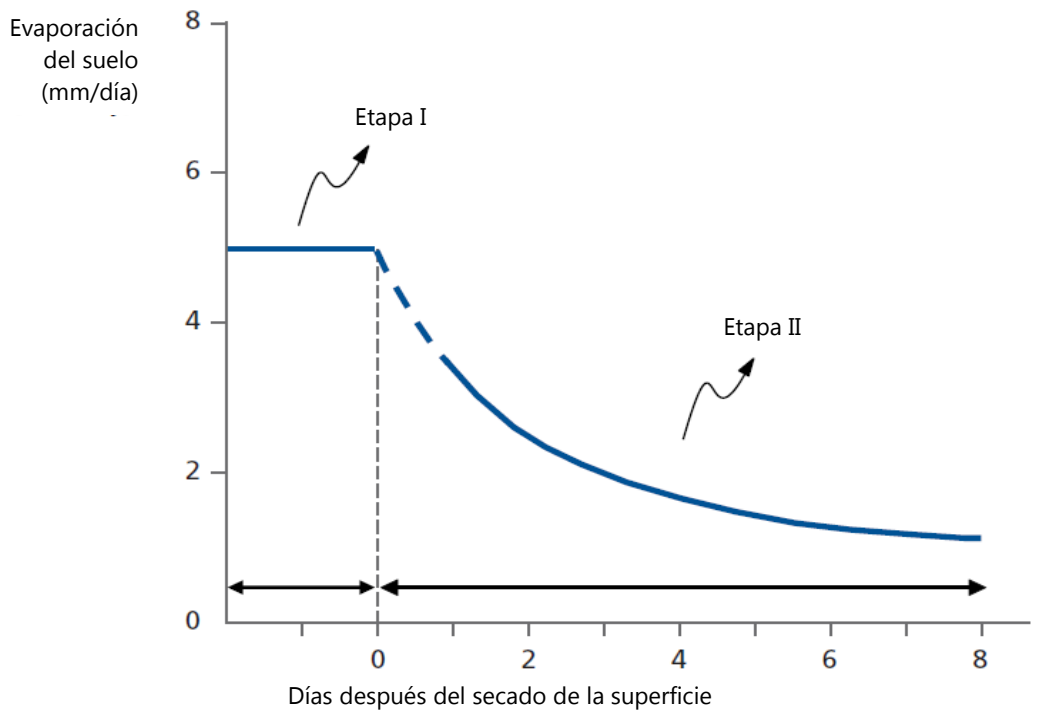
Volumen de la copa: $\frac{1}{3} \pi \, d_2 \left(\frac{d_1^2}{4} + \frac{d_3^2}{4} + d_1 d_3 \right)$

El tamaño de la copa y la conductancia estomática los dos principales parámetros para determinar la Tr de los árboles. Cuando los huertos y los viñedos se acercan a la madurez, interceptan gran parte de la radiación incidente, aunque para la mayoría de las especies la proyección horizontal de sus copas rara vez cubre más del 70-75 % del terreno. Esto es porque su crecimiento a menudo es controlado por la poda para permitir la mecanización y alcanzar una distribución más directa de la radiación solar a las ramas fructíferas. Para el mismo nivel de radiación interceptada, la Tr de los árboles difiere entre especies, dependiendo de sus hábitos de crecimiento (perennifolio frente a caducifolio), arquitectura y tamaño de copa, etapa de desarrollo, y comportamiento estomático. Por lo tanto, los modelos necesarios para calcular la Tr en los diferentes huertos como función de la cobertura y la conductancia de la copa de los árboles deben ser específicos para cada especie de árbol.

Evaporación del huerto

El proceso de evaporación del suelo comprende dos etapas, como se presentan en detalle en el Capítulo 3 del *Manual de Referencia de AquaCrop*. La primera, después de que el suelo se ha humedecido por la lluvia o el riego, se realiza la E del suelo a una tasa constante y limitada solamente por la radiación incidente (Figura 8). La primera etapa continúa hasta que la superficie se seca a un nivel en el cual las capas superficiales del suelo restringen la pérdida por E. Este punto señala el comienzo de la segunda etapa, cuando la E, con el tiempo, disminuye casi de manera exponencial. Una cierta cantidad de agua debe evaporarse antes de que la E empiece a disminuir (Etapa II), y esta cantidad es constante para un suelo determinado, variando desde cerca de 5 mm en suelos arenosos hasta 10 mm en suelos franco arcillosos. En el período de disminución de la tasa de E, la E acumulada se puede expresar como una función de la raíz cuadrada del tiempo o como una función del contenido de humedad del suelo en las capas más superficiales del mismo.

FIGURA 8 El proceso de evaporación del suelo.

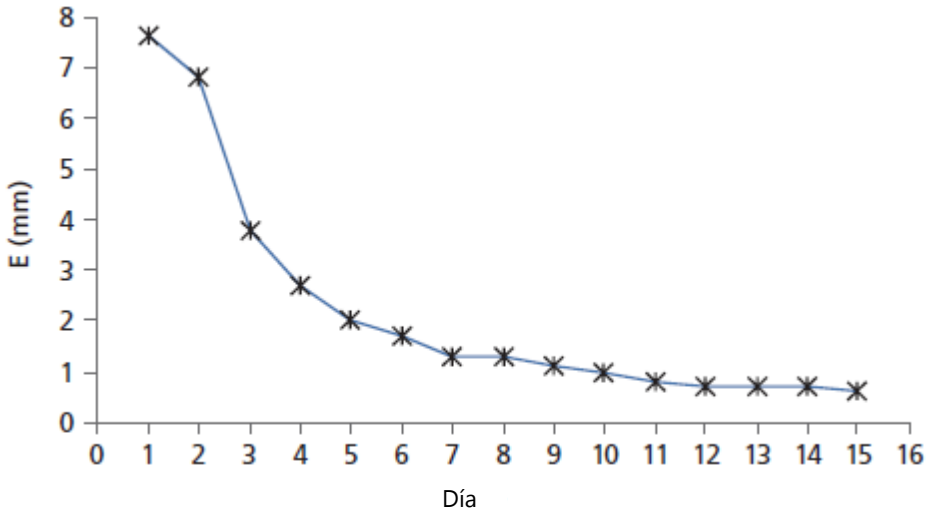


El modelo *AquaCrop* calcula la E para las dos etapas de acuerdo con las ecuaciones:

$$E_{Stage\ I}=(1-CC^*)Ke_xET_o$$
$$E_{Stage\ II}=Kr(1-CC^*)Ke_xET_o \quad (3)$$

Donde CC es la cobertura del dosel, (1-CC*) es la parte del suelo expuesta, que no recibe sombra, donde se produce la evaporación, corregida con un coeficiente de advección; Ke_x es un coeficiente ajustado en 1.1, y Kr es un coeficiente de reducción, calculado en función del contenido de humedad del suelo en las capas superficiales.

FIGURA 9 Evaporación desde un suelo desnudo en mitad del verano calculada con el modelo de *AquaCrop* después de 60 mm de riego.



La mayor dificultad para calcular la E de un huerto o viñedo es que el suelo reciba sombra del dosel de manera parcial y dinámica, e incluso si la superficie está húmeda, la E es limitada por la energía incidente.

La variación espacial de la energía incidente al piso del huerto depende del espaciamiento de los árboles, el tamaño de la copa y la arquitectura y densidad de área foliar. Algunos modelos han sido desarrollados para calcular la E de los huertos y pueden usarse para calcular la E del suelo humedecido, ya sea por la lluvia o por un riego de cobertura completa.

Con el micro-riego, hay variaciones espaciales en el grado de humedecimiento del huerto, ya algunas áreas son regadas con frecuencia por los emisores, mientras que el resto de la superficie del suelo permanece seca cuando no llueve. Como las líneas de goteo se ubican cerca de los árboles, las áreas húmedas generalmente son sombreadas por la cobertura del dosel, aunque son humedecidas con la suficiente frecuencia como para considerarse que tienen E limitada por la radiación. Las mediciones y los modelos sugieren que la E de las áreas del suelo en los huertos, que son humedecidas con frecuencia (cada 1 ó 2 días) por los emisores es equivalente a cerca del 60 % de la ET_o de las áreas húmedas, como una primera aproximación. Cálculos más exactos de la E de los puntos húmedos en un huerto regado por goteo están disponibles usando un modelo semiempírico (Bonachela, 2001).

Evapotranspiración del huerto

Los requerimientos brutos de riego tienen dos componentes: ET del huerto, la cual es considerada el requerimiento neto de riego, y las pérdidas por ineficiencia, como serán analizadas en la próxima sección. En el riego bien manejado, la ET es el mayor componente de los requerimientos de riego, y las pérdidas son pequeñas. La ET del huerto se puede calcular con los coeficientes de cultivo y la ET_o, o estimando sus componentes individuales, es decir: transpiración y evaporación del suelo. Los coeficientes de cultivo se usan cuando la falta de datos, especialmente la transpiración de los árboles, impide la aplicación del enfoque de los componentes.

A CÁLCULO DE LA ET_c A PARTIR DE SUS COMPONENTES

Con base en la Figura 7, la ET del huerto o el viñedo se puede calcular como la suma de cuatro componentes:

$$ET_c = Tr + Tr_{cc} + E_{wz} + E_{dz} \quad (4)$$

Donde:
Tr es la transpiración de los árboles
Tr_{cc} es la transpiración del cultivo de cobertura (o de las malas hierbas que crece activamente)
E_{wz} es la evaporación superficial del suelo humedecido por los emisores; y
E_{dz} es la evaporación superficial del resto del suelo fuera del patrón de humedecimiento de los emisores.

Este método necesita estimar los cuatro componentes de la ET_c y aún no se usa tan ampliamente. Sin embargo, como en la actualidad existen métodos disponibles para medir la Tr de los árboles independientemente de la ET_c, en el futuro será el método estándar, cuando se hayan probado totalmente los modelos usados para la estimación de los componentes de la ET_c, tales como el presentado aquí (Testi *et al.,* 2006). (Véanse ejemplos de cálculo en el Cuadro 4).

Cálculo de la E_{dz} usando un modelo empírico
Se propone la siguiente ecuación, derivada de la investigación de la ET en un huerto de olivos, (Testi *et al.,* 2006; Orgaz *et al.,* 2006), para estimar el valor mensual promedio:

$$E_{dz} = K_{s,e}\ ET_o\ (mm/day) \quad (5)$$

$$K_{s,e} = [0.28-0.18\ G\ -0.03\ ET_o + (3.8\ F\ (1-F))/ET_o)]\ (1-wz) \quad (6)$$

Donde G es la fracción de cobertura vegetal de los árboles, F es la frecuencia mensual de días de lluvia y wz es la fracción de la superficie del suelo humedecida por los emisores.

CUADRO 4 Cálculo sencillo de la E_{dz}, E_{wz}, y la Tr_{cc}.

Supóngase un huerto de olivos con cobertura vegetal de los árboles, G, de 0.33; el promedio mensual de ET_o en abril es de 3.5 mm/día; los emisores humedecen el 7 % del terreno (wz=0.07); y llueve 7 días al mes (F=7/30 = 0.23).

a) Cálculo de la E del suelo no humedecido por los emisores, E_{dz},

Usando las ecuaciones 5 y 6, la E_{dz} promedio para el mes de abril es de: $K_{s,e}$ = 0.31 x (1-0.07) = 0.29

E_{dz} = 0. 29 x 3.5 = 1.01 mm/día o 30.4 mm/mes

b) Cálculo de la E de los puntos húmedos E_{wz}

El resultado de la ecuación 8 es:

E_{wz} = 0.6 x 3.5 x 0.07 = 0.147 mm/día o 4.4 mm/mes

c) Cálculo de la Tr_{cc} del cultivo de cobertura

Si el huerto de olivos con 8 x 6 m de espaciamiento de los árboles, tiene un cultivo de cobertura que cubre una franja de 4 m de ancho cada hilera de árboles (f_{cc} = 4/8), y es bastante denso y se mantiene cortado a 5-8 cm de altura, el uso del agua del cultivo de cobertura se estimaría así:

Tr_{cc} = 0.45 x 3.5 mm/día x 0.5 = 0.79 mm/día o 23.6 mm para el mes de abril

Cálculo de la E_{wz}

Aquí, como una primera aproximación, E_{wz} se calcula como

$$E_{wz} = 0.6\ ET_o\ wz \qquad (7)$$

Donde 0.6 es un factor empírico, descrito arriba, y wz es la fracción de la superficie del suelo que los emisores mantienen húmeda.

Cálculo de la transpiración del cultivo de cobertura,, Tr_{cc}

Los huertos con cultivos de cobertura tienen tasas de ET más altas que los huertos que son cultivados limpios. La tasa de uso del agua de los cultivos de cobertura en los huertos es difícil de medir y no se ha investigado a fondo. O bien, se siembran cultivos de cobertura en franjas de ancho variable entre las hileras de árboles, o a veces, se deja crecer las malas hierbas en estas áreas y luego se controlan deshierbado periódicamente a mano o con herbicidas. Los cultivos de cobertura reciben sombra por lo menos una parte del día, y es difícil medir su ET independientemente de otros componentes de la ET_c. La Tr_{cc} variará ampliamente, dependiendo de la frecuencia de corte, la densidad de plantas, el grado de sombra de la copa de los árboles, y de si tiene agua suficiente disponible; es decir, si las aplicaciones de riego humedecen completamente el cultivo de cobertura. Así, la estimación de la Tr_{cc} es específica para el sitio. El enfoque para calcularla utiliza un coeficiente, K_{cc}, y la ET_o de la siguiente manera:

$$Tr_{cc} = K_{cc}\ ET_o\ f_{cc} \quad (8)$$

Donde f_{cc} es la fracción de la superficie del terreno del huerto ocupada por el cultivo de cobertura, y K_{cc} es un coeficiente de cultivo de cobertura que varía entre 0.25 y 0.35 cuando la vegetación es rala, y entre 0.4 y 0.5 para cultivos de cobertura relativamente densos y bajos (menos de 10 cm), hasta entre 0.6 y 0.8 para cultivos de cobertura densos.

Cálculo de la transpiración de los árboles Tr

El enfoque aquí es usar un coeficiente de transpiración ($K_{c,Tr}$) que, multiplicado por la ET_o, daría el resultado de la Tr.

$$Tr = K_{c,Tr}\ ET_o$$

Los diferentes capítulos del cultivo ofrecen información que se podría usar para derivar los valores de $K_{c,Tr}$; aunque para muchas especies, la información que existe no es lo suficientemente acertada como para generalizar los valores. Hay varios factores que afectan los valores estacionales del $K_{c,Tr}$ de los viñedos o huertos maduros con buen suministro de agua. Además del nivel de radiación interceptada, si la especie es caducifolia o perennifolia, las respuestas estomáticas al ambiente, la presencia o ausencia de fruto, son factores que influyen en el $K_{c,Tr}$, e incluso se han descrito algunas diferencias entre variedades de una especie.

Los valores del $K_{c,Tr}$ de huertos maduros caducifolios varían desde casi cero en el momento del desborre de las yemas, hasta un valor máximo después de que el crecimiento de la hoja es suficiente para interceptar toda la radiación incidente. El valor máximo (que varía entre 0.75 y 1.0) se mantiene durante el resto de la estación hasta cuando comienza la senescencia, siempre que el árbol reciba agua suficiente. La cosecha de frutos disminuye temporalmente el valor del coeficiente de transpiración máxima ($K_{c,Trx}$), hasta un nivel que depende de la especie, pero el $K_{c,Tr}$ normalmente se recupera dos o tres semanas después de la cosecha. La Figura 10 muestra un patrón de estación típico del coeficiente de cultivo para los manzanos (obtenido en un lisímetro con riego por goteo, incluyendo el componente E de la ET_c), y se puede encontrar información similar para otros cultivos en las diversas secciones específicas.

En el caso de los árboles frutales perennifolios, las dos especies más grandes de árboles perennifolios son los cítricos y los olivos. Los árboles cítricos tienen valores de $K_{c,Trx}$ que dependen de los niveles de humedad del aire; en climas secos, los valores del $K_{c,Tr}$ para huertos maduros varían durante la estación entre 0.6 y 0.7, mientras que en las zonas húmedas oscilan entre 0.7-0.85. Los valores del $K_{c,Tr}$ para el olivo también varían durante la estación y se ven afectados por las condiciones climáticas. En climas templados, semiáridos, tiene un mínimo de 0.4 en primavera, cerca de 0.5 en verano y puede llegar a 0.6-0.65 en otoño. Se ha desarrollado un modelo para calcular el $K_{c,Tr}$ y la Tr para los olivos (Testi *et al.,* 2006 y Orgaz *et al.,* 2006), el cual se describe brevemente en el Cuadro 5. Actualmente se están desarrollando modelos similares para otras especies de árboles frutales, que pronto estarán disponibles.

CUADRO 5 Cálculo de la transpiración del olivo independientemente de los otros componentes de la ET.

Después de calcular la E mediante los métodos descritos anteriormente en el Cuadro 4, la transpiración del árbol, Tr (mm), se puede calcular como el producto de la radiación interceptada por el árbol y dos factores (F_1 y F_2) relacionados con la conductancia de la copa. Estos factores se calibraron y ensayaron para el olivo en un ambiente mediterráneo (Testi *et al.,* 2006 y Orgaz *et al.,* 2006). El método también se ensayó en un ambiente árido en Argentina y en otros de tipo mediterráneo.

$$Tr = ET_o\, K_{c,Tr}$$

Donde $K_{c,Tr}$ es un coeficiente de transpiración calculado como:

$$K_{c,Tr} = (Q_d\, F_1)\, F_2$$

Donde Q_d es la radiación interceptada por el árbol (fracción), calculada como:

$$Q_d = 1 - e^{-K_{ext}\, V_u}$$

Donde

$$K_{ext} = 0.52 + 0.00079\, d_p - 0.76\, e - 1.25\, DAF,$$

$$DAF = 2 - 0.53\,(Vu - 0.5);\ \textbf{(Nota: DAF debe ser <2),}$$

$$V_u = V_o\,(d_p/10\,000)\ \ \textbf{y,}$$

$$V_o = 1/6\,\pi\, D^2\, H$$

Símbolos:

Tr: Transpiración del árbol (mm)

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm)

$K_{c,Tr}$: Coeficiente de transpiración

F_1: Depende de la densidad de los árboles; F_1 = 0.72 para densidades de árboles <250 árboles/ha y F_1=0.66 para densidades de árboles> 250 árboles/ha

F_2: Coeficiente mensual de la Tabla a continuación

K_{ext}: Coeficiente de extinción de radiación

d_p: Densidad de árboles (árboles/ha)

DAF: Densidad de área foliar

V_u: Volumen de la copa por unidad de superficie del terreno (m^3/m^2)

V_o: Volumen de la copa (m^3/árbol)

D: Diámetro promedio del follaje (m)

H: Altura de la copa (m)

e: Exponente (2.718)

CUADRO 5 (CONTINUACIÓN)

VALORES F_2 (hemisferio norte)

Mes	F_2
Enero	0,70
Febrero	0,75
Marzo	0,80
Abril	0,90
Mayo	1,05
Junio	1,25
Julio	1,25
Agosto	1,20
Septiembre	1,10
Octubre	1,20
Noviembre	1,10
Diciembre	0,70

B CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DEL K_c

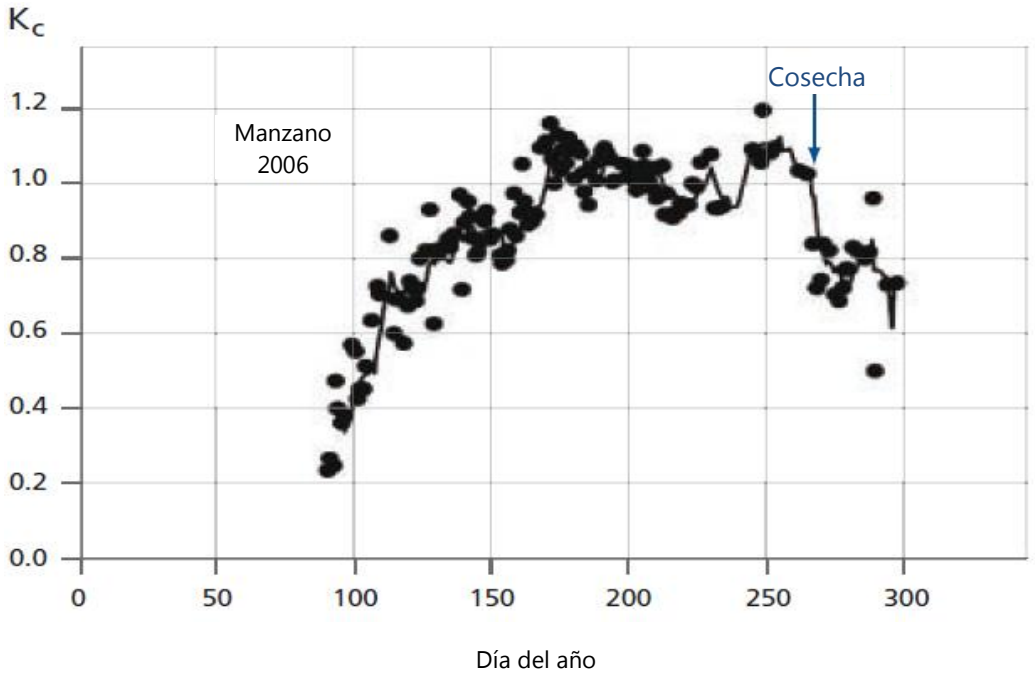
Si no es posible calcular la Tr por separado, lo que se necesita es un coeficiente global de cultivo (K_c) que incorpore todos los componentes de la ET_c. El estudio FAO: *Riego y Drenaje N.° 56* proporciona los valores del K_c para los cultivos arbóreos y las vides, tomados de los valores originales publicados en el estudio FAO: *Riego y Drenaje N.° 24*. Los diferentes capítulos en esta publicación proporcionan conjuntos de valores del K_c para los distintos cultivos arbóreos y vides, que son una actualización de aquellos publicados en estudios anteriores en FAO: *Riego y Drenaje N.° 56*.

Como se muestra en la Figura 10, el coeficiente de cultivo (K_c) para huertos caducifolios en suelo desnudo se incrementa abruptamente en primavera, en respuesta al desborre de las yemas y salida de las hojas, hasta que alcanza el máximo a principios de verano. El valor máximo de K_c se mantiene hasta la cosecha, después de la cual disminuye temporalmente en algunos cultivos arbóreos. En otros, el K_c máximo permanece más o menos igual hasta el comienzo de la senescencia, cuando comienza a disminuir hasta que la hoja se cae. En el caso de los árboles perennifolios, puede haber variaciones del K_c durante la estación, causadas por los cambios del área foliar, y por respuestas ya sea a cambios ambientales o a señales internas del árbol. Se debe hacer énfasis en que los valores estándar del K_c incluyen un componente de E promedio pero no incluyen la Tr_{cc} de los cultivos de cobertura, a menos que se indique específicamente.

Determinación de la ET de los doseles parciales de árboles

Cuando se tiene la información para calcular la ET_c como la suma de sus componentes (Ecuación 4), se aplica el mismo procedimiento para huertos no maduros, en desarrollo, en los cuales los árboles no han alcanzado su tamaño maduro. Es suficiente medir los parámetros de copa que caracterizan la radiación interceptada por los árboles jóvenes y calcular la Tr usando un método como el descrito en el Cuadro 5. El procedimiento K_c estándar descrito anteriormente se aplica específicamente para árboles maduros que han alcanzado su tamaño máximo. En los sistemas de producción intensiva, esto es equivalente a alcanzar una cobertura vegetal en porcentaje (proyección horizontal) de no más de 70-80 %; los valores máximos de cobertura vegetal generalmente están dictados por la cosecha y por otras operaciones mecanizadas del huerto. Los huertos y los viñedos tradicionales maduros generalmente tienen menores valores de cobertura vegetal, aunque dichos valores pueden ser mayores al 80 % en algunas especies, como los nogales o las vides de uvas de mesa.

FIGURA 10 Curva de coeficiente de cultivo (K_c) determinada para un huerto de manzanos maduro, regado por goteo, con un lisímetro de pesada en 2006, en Lleida, España. Nótese que la disminución del K_c después de la cosecha ocurre cerca del comienzo de la senescencia de las hojas en los manzanos.



Para realizar el calendario de riego de las plantaciones en desarrollo o en huertos plantados con densidad baja, como es el caso de las plantaciones tradicionales en condiciones de suministro limitado de agua, es necesario relacionar la ET de un huerto joven con la de uno maduro, para lo cual se desarrollaron los valores del K_c. Si se usa el enfoque del K_c, se necesita un nuevo coeficiente para calcular la ET como:

$$ET_c = ET_o \, K_c \, K_{r,t} \quad (9)$$

Donde $K_{r,t}$ es un coeficiente empírico que relaciona la ET_c de un huerto de cobertura incompleta con la de un huerto maduro. Aquí, el $K_{r,t}$ está relacionado con la proyección horizontal de la sombra del árbol (cobertura vegetal).

La Figura 11 muestra la relación entre la cobertura vegetal en porcentaje y la ET en porcentaje de un huerto maduro, con base en una original obtenida experimentalmente para los almendros (Fereres *et al.,* 1982) y ajustada con datos de experimentos realizados en varias especies. El Cuadro 6 muestra dos ejemplos de cómo calcular la ET de doseles de árboles inmaduras de distintos tamaños. El parámetro del dosel del árbol empleado en la ecuación de la Figura 11 es la proyección horizontal de la copa, sin corregir las diferencias en la densidad de área foliar que podrían dejar espacios en la sombra del árbol. Nótese que esta relación se ha desarrollado para copas de árboles de varias formas, todas formadas como árboles aislados, con alguna forma esférica o cónica.

CUADRO 6 Ejemplos para determinar la ET de los doseles con cobertura parcial.

La relación mostrada en la Figura 11 puede ser aproximadamente entre 0 y 70 % de la cobertura vegetal en porcentaje (G%) usando la ecuación:

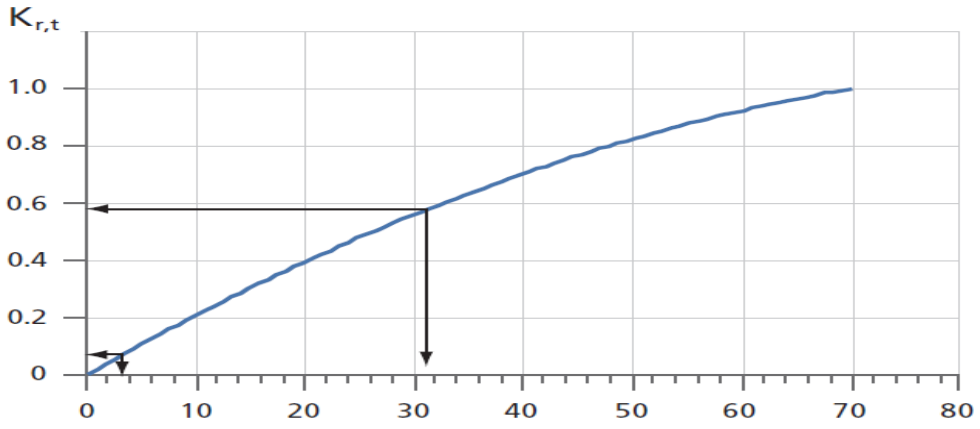
$$K_{r,t} = -0.00012\,(G\%)^2 + 0.0226\,(G\%) \quad (10)$$

Los dos ejemplos a continuación se refieren cítricos y almendros, donde la proyección horizontal promedio de la copa del árbol tiene diámetros de 2.8 y 1.2 m, respectivamente.

	Diámetro (m)	Espaciamiento de los árboles (m)	Cobertura vegetal en %	$K_{r,t}$	ET_o (mm/día))	K_c	ET_c[1] (mm/día)
Ejemplo para un cítrico	2,8	5 x 4	30,8	0,58	5,0	0,70	2,03
Ejemplo para un almendro	1,2	7 x 6	2,7	0,06	7,4	1,05	0,47

$T_c = ET_o\, K_c\, K_{r,t}$

FIGURA 11 Relación entre la proyección horizontal del árbol a mediodía (porcentaje de cobertura vegetal) y el coeficiente de reducción, $K_{r,t}$, que relaciona la ET de huertos con cobertura parcial con la de plantaciones maduras con cobertura completa, formadas por árboles aislados (para setos, véase la Sección Manzanos).



Cobertura vegetal en porcentaje

Para sistemas de poda en un plano vertical, como los sistemas de emparrado usados para las vides, los peros/perales y los manzanos, aplicaría una relación diferente a la de la Figura 11 entre el porcentaje de cobertura vegetal o la radiación interceptada al mediodía y el porcentaje de ET. La razón de esto es que, a medida que estos doseles se expanden, crecen verticalmente con poco incremento del porcentaje de cobertura vegetal o de la radiación interceptada a mediodía, pero su Tr sigue incrementándose. Esto se debe al crecimiento vertical (muro) que intercepta más radiación en la mañana y en la tarde, y también a la mayor transferencia de energía más advectiva a las hileras de emparrado. Las Secciones de peros/perales y manzanos describen las relaciones específicas entre la radiación interceptada y ET en la madurez en porcentaje para dichos cultivos, las cuales deberían usarse para setos y otros tipos de doseles.

Otro aspecto específico de las plantaciones jóvenes es que sus doseles crecen y se expanden con el tiempo hasta la caída de las hojas. Por lo tanto, la evolución estacional del K_c es diferente en los huertos jóvenes que en los maduros. Entonces, se deberían actualizar las estimaciones de cobertura vegetal cada mes o dos meses en los cultivos o viñedos jóvenes, para ajustar las estimaciones de la ET y las tasas de riego resultantes.

Variaciones de la E y la Tr de huertos y viñedos

La especificidad del lugar afecta la ET_c de los huertos y los viñedos más que a la de los cultivos herbáceos. En los cultivos perennes, la cobertura del dosel de los árboles o vides y la densidad de área foliar determinan la tasa de Tr, mientras que la frecuencia de precipitación y riego determina la tasa de E. En arboricultura, la cobertura del dosel puede ser manipulada por la poda; por ende, la Tr puede variar según las prácticas de poda. Sin embargo, en los sistemas de producción intensiva la poda se restringe al mínimo y la Tr no está sujeta a variaciones marcadas año a año, distintas a las causadas por cambios en la demanda evaporativa o por controles internos de los árboles, a menudo relacionados con la carga de producción.

Las pérdidas de E de un huerto o viñedo de alguna manera son más fáciles de manipular. La evaporación del suelo se minimiza cuando las aplicaciones de riego son lo menos frecuentes posible (sin causar déficits hídricos en los árboles). Si los árboles tienen doseles pequeños y una fracción de suelo significativa está expuesta a la radiación solar directa, la E puede ser un

componente importante de la ET, en especial si el método de riego humedece una porción significativa de la superficie de suelo. En estos casos la frecuencia de riego debería manejarse para minimizar la pérdida de E. Bajo micro-riego, las pérdidas de E son comparativamente mucho menores, porque las áreas humedecidas del suelo son más pequeñas y normalmente se encuentran a la sombra de las copas. No obstante, una frecuencia alta (diaria) de riego es común en los sistemas de goteo, y las áreas humedecidas por los emisores siempre permanecen húmedas. Si el número de emisores por árbol es alto y las áreas húmedas están expuestas, pueden ocurrir pérdidas significativas de E en estos puntos. En situaciones donde escasea el suministro de agua, la frecuencia de micro-riego debería disminuirse al intervalo más largo compatible con un régimen óptimo de humedad del suelo, como una semana o incluso más en casos extremos de suministro muy bajo. En estos casos, se deberían considerar los sistemas de goteo subsuperficial que eliminan la E de las aplicaciones de riego.

Como la Tr y la E no ocurren de manera independiente, es importante comprender sus interacciones, que están relacionadas con el balance de energía del huerto. La transferencia de energía advectiva de las superficies de suelo secas y calientes en las hileras hacia los árboles aumentará la Tr. Por otro lado, la Tr disminuirá cuando la E sea alta después de un riego o lluvia. Estas interacciones no están documentadas completamente; por esto, no se pueden incluir en los procedimientos actuales para calcular la ET de huertos o viñedos. Sin embargo, se deben considerar, al menos cualitativamente.

Determinación de los requerimientos de riego

Hay varias pérdidas debidas a la agricultura de riego, a menudo inevitables, asociadas con la aplicación de agua de riego; pérdidas que el cultivador debe considerar para determinar los requerimientos reales de un huerto o viñedo de regadío. Cabe anotar que en este contexto, el término "pérdidas" no se refiere a la E y la Tr, que son usos consuntivos del agua más que pérdidas.

Hasta ahora, cuando se determina la ET_c, se ha considerado una situación en la que el cálculo aplica para un huerto ideal, uniforme, en el que todos los árboles tienen la misma ET_c. Sin embargo, la uniformidad de la aplicación del agua de riego en un campo no es perfecta, y algunas áreas reciben más agua que otras. Para regar adecuadamente las áreas que reciben menos, el sistema debería aplicar más agua de la necesaria para suplir todas las necesidades del campo. Así, algunas áreas del campo recibirán más agua que la ET y esto puede provocar la percolación profunda (pérdida) de agua por debajo de la zona radicular. Adicionalmente, parte del agua de riego inadvertidamente puede transformarse en escorrentía y esto también se considera una pérdida, al menos para ese campo en particular.

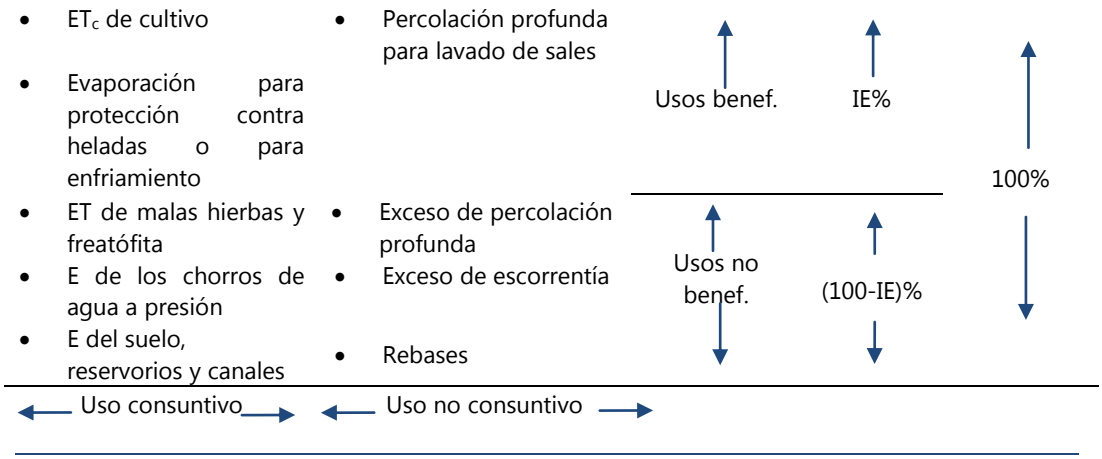
Que la percolación profunda y la escorrentía sean pérdidas verdaderas depende de la escala considerada (campo, finca, distrito, cuenca) y de si alguna o todas estas pérdidas se pueden recuperar. Por ejemplo, si la escorrentía de un campo se recoge y luego se aplica al mismo campo o a uno adyacente, no es una pérdida verdadera. Lo mismo se aplica para la percolación profunda que entra a la capa frenática y con el tiempo se bombea y reutiliza, aunque su calidad pueda haberse deteriorado. Si el agua entra a un sumidero salino, como una capa freática salina aislada o al sumidero salino final, el océano, se trata de una pérdida verdadera.

Para mantener un balance de sales favorable, es necesario algo de percolación profunda de agua para transportar las sales introducidas por el agua de riego fuera de la zona radicular. La cantidad de percolación profunda requerida se conoce como "fracción de lavado" y depende de la calidad del agua de riego y de la sensibilidad del cultivo a la salinidad. Se han establecido métodos para estimar las fracciones de lavado apropiadas y se pueden obtener en el estudio FAO: *Riego y Drenaje N.º 29*. El lavado del exceso de sales es un requisito para la sostenibilidad de la agricultura de riego.

La eficiencia de la aplicación se usa para expresar la eficacia del riego y se describe como el porcentaje de agua aplicada disponible para uso de los árboles. Las variaciones dependen del sistema de riego y de la habilidad del regante y de si se considera un campo individual, varios campos, una finca o región. El gráfico del Cuadro 7 indica la disposición del agua de riego en usos de consumo y no consumo, y en usos beneficiosos y no beneficiosos. Para el cultivador es importante comprender que parte de las pérdidas por riego son inevitables, pero que se deben minimizar.

CUADRO 7 Usos del agua de consumo y no consumo.

El agua se puede usar benéficiosamente para riego si se usa considerando la ET_c para lavado de sales o protección contra heladas. La eficiencia del riego (IE) es la proporción entre los usos beneficiosos y no beneficiosos del agua. También se muestran los varios usos de consuntivos y no consuntivos del agua.



Para el cultivador, es importante tener una alta eficiencia de la aplicación y la mejor uniformidad de distribución del agua aplicada posible. La uniformidad de la distribución (DU) para los métodos de riego de superficie y aspersión aplicados a los sistemas que operan con árboles y vides se puede determinar usando técnicas de evaluación de los sistemas para fincas. Con los sistemas de micro-riego, es relativamente fácil medir la DU verificando las tasas de caudal del emisor o las presiones operativas a lo largo del sistema. En los huertos o viñedos bajo micro-riego, es posible alcanzar valores de DU de 80 a 90 % y así, eficiencias de aplicación igualmente altas si los sistemas están bien diseñados, con buen mantenimiento y manejo.

El Cuadro 8 ilustra cómo varía el agua de riego en distintas partes del campo; en algunas supera la profundidad requerida, mientras que en otras es inferior a la requerida. El área sombreada indica el grado de déficit en el campo. Este déficit podría reducirse o incluso eliminarse aplicando una profundidad bruta de riego mayor a la requerida, lo que conduce a mayores pérdidas por percolación profunda. Los sistemas con DU altas en la Figura del Cuadro 8 tienen líneas de distribución de agua cercanas a la horizontal, con poco exceso de agua y déficit, mientras que valores inferiores de DU causan que la línea sea más pronunciada (mayor variación entre las zonas del campo) y por tanto mayores pérdidas y déficits en el campo.

Con el fin de calcular los requerimientos brutos de riego (GIR) de un huerto o viñedo, la ET_c calculada, que se considera como requerimiento neto de riego (NIR), debería dividirse por la eficiencia de aplicación (AE), así:

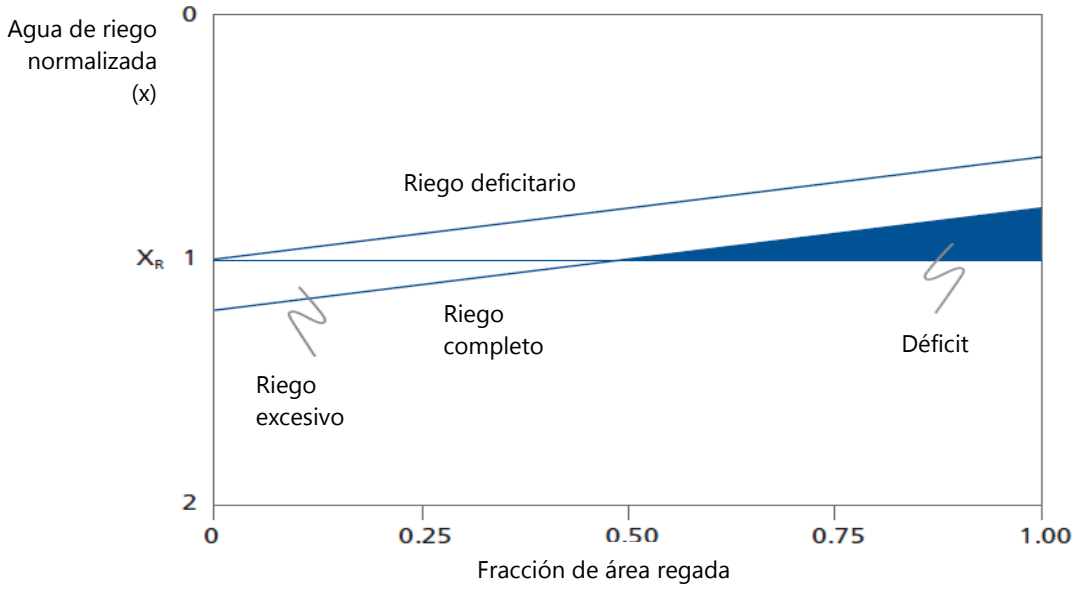
$$GIR = NIR / AE \quad (11)$$

Donde AE se expresa como una fracción.

Esto incrementa efectivamente la cantidad de riego neto en una cantidad determinada por la eficiencia de aplicación. Por ejemplo, una eficiencia de la aplicación de 80 % requiere que al campo se le aplique el 20 % más de agua que la ET_c. Saber la eficiencia del sistema de aplicación es tan importante como saber la ET_c cuando se calculan los requerimientos de riego. Sería inútil esforzarse por calcular exactamente la ET_c y después no prestarle atención al proceso de distribución real en el campo y el grado de uniformidad del sistema de riego.

CUADRO 8 Relación espacial entre la distribución del agua sobre el campo y su área.

La Figura muestra un diagrama simplificado de la distribución espacial de la profundidad del riego, X, como función de la fracción de área regada. Las dos líneas rectas representan las relaciones hipotéticas entre la lámina de agua aplicada (x, normalizada con respecto a la profundidad requerida para reabastecer el déficit de humedad del suelo antes del riego) como función de la fracción del área regada. Las dos líneas inclinadas representan la distribución del agua para riego deficitario y riego completo. Nótese que bajo riego completo, el 50 % del área recibe más agua de la profundidad requerida, X_R, necesaria para reabastecer la zona radicular. La pendiente de la línea representa el grado de uniformidad; a mayor pendiente, menor uniformidad de la aplicación del riego.



El monitoreo periódico de la uniformidad del riego es un componente importante de un buen programa de mantenimiento de riego.

CALENDARIO DE RIEGO

Antecedentes

El objetivo del calendario de riego es determinar cómo suministrar la cantidad correcta de agua al árbol o a la vid en el momento adecuado. El riego se aplica para prevenir que los árboles sufran déficits hídricos que no sean compatibles con los objetivos de manejo. Por lo general, el objetivo del gerente es maximizar el beneficio económico neto, lo cual no siempre coincide con los rendimientos máximos, como cuando el riego deficitario puede mejorar la calidad del fruto y por tanto el valor del cultivo. La mayoría de los productores toman decisiones de riego en base a su experiencia práctica y teniendo en cuenta las limitaciones prácticas de sus sistemas. A partir de investigaciones se han desarrollado procedimientos técnicos de programación para optimizar el manejo del agua en los huertos. Los procedimientos técnicos son adoptados por productores que buscan mayor precisión en su manejo de riego, en aras de lograr el objetivo principal de obtener ingresos (beneficios netos). Conservar agua reduce los insumos de los productores, lo cual por sí solo aumenta los ingresos en una proporción que depende del coste del agua. Sin embargo, reducir el uso de consuntivo del agua también contribuye a conservar un recurso que el resto de la sociedad considera muy valioso. Demostrar que son buenos gerentes de sus recursos hídricos debe constituir una ventaja para los productores, en la competencia cada vez mayor por el suministro de agua existente.

Tres enfoques técnicos se pueden utilizar para la toma de decisiones sobre el calendario. Estos enfoques están basados en: a) supervisión del estado hídrico del suelo; b) supervisión del estado hídrico de la planta, y c) cálculo de las necesidades hídricas de la zona radicular del árbol. Es posible, y a menudo conveniente, combinar más de uno de estos enfoques para llegar al procedimiento deseado. A pesar de la vasta bibliografía científica sobre la gran cantidad de métodos desarrollados utilizando los diferentes enfoques, únicamente unos pocos han demostrado ser prácticos e implementarse efectivamente para determinar el calendario de riego de cultivos arbóreos y vides. Incluso los métodos que han demostrado ser útiles son implementados por un grupo reducido de productores.

Existen muchas razones para la limitada implementación de procedimientos técnicos. La más común que aducen los productores es que no perciben beneficios en comparación con sus prácticas tradicionales, las cuales consideran adecuadas. No obstante, a medida que la escasez de agua se hace más frecuente, y cuando el valor del cultivo es alto, como es el caso de los cultivos arbóreos y las vides, un número cada vez mayor de productores está intentando mejorar sus prácticas de riego convencionales mediante la implementación de nuevos procedimientos técnicos para el manejo del riego. La elección del procedimiento está determinada principalmente por el grado de precisión que requiere el gerente, el cual normalmente se incrementará en situaciones de riego deficitario o cuando el suministro hídrico es limitado o costoso. Los productores también tienen en cuenta la facilidad de uso y los gastos relacionados. En algunos países, entidades públicas o asesores privados ofrecen servicios a los productores para determinar el calendario de riego, en forma de paquetes informáticos, instalación de sensores y supervisión.

Supervisión del estado hídrico del suelo

Los instrumentos para determinar el contenido de humedad y la tensión hídrica del suelo se desarrollaron hace mucho tiempo, pero en la última década las técnicas han alcanzado un mayor grado de sofisticación gracias a los avances en los sistemas electrónicos. El enfoque más común ha sido supervisar la humedad del suelo a uno o más niveles de profundidad, hasta alcanzar un umbral que indique la necesidad de riego. Actualmente, se pueden obtener registros continuos del estado hídrico del suelo y se toman decisiones en base a las tendencias de extracción de agua, en lugar de fijar un punto absoluto como umbral.

Dentro de los sensores tradicionales basados en el suelo se incluyen el tensiómetro, el cual mide la tensión del agua en el suelo, y el bloque de yeso, que mide la resistencia eléctrica. Estos dos dispositivos y otros desarrollados más recientemente, como los sensores de matriz granular, utilizan medios porosos en los que el agua se introduce y está en equilibrio energético con el suelo circundante. Los sensores más modernos se basan en la medición de las propiedades dieléctricas del suelo o la disipación de calor. Existen dos enfoques basados en la constante dieléctrica de los medios del suelo: reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR). Hasta el momento, los sensores basados en la disipación del calor son principalmente herramientas de investigación.

Conocer el contenido volumétrico de agua del suelo tiene ventajas, en el sentido de que permite al gerente determinar cuantitativamente la cantidad de agua en el suelo. Con el objetivo de determinar con precisión el contenido volumétrico de humedad del suelo, todos los sensores mencionados previamente se deben calibrar para un suelo en particular, a excepción del TDR. El contenido de humedad del suelo se puede medir gravimétricamente o con la sonda de neutrones. Un estudio reciente en el que se comparó la sonda de neutrones con muchos otros dispositivos más modernos, reveló que no se dispone de una tecnología apropiada que pueda sustituirla para la medición del contenido volumétrico de humedad del suelo. La principal ventaja de los nuevos sensores es que proporcionan registros continuos de la humedad del suelo, que pueden ser útiles para ajustar el calendario de riego y se prestan para el control automatizado del riego. Un factor limitante de muchos de los sensores más modernos es que exploran un volumen de suelo muy pequeño, lo cual conduce a una gran variabilidad entre las replicaciones.

Uso de sensores de humedad del suelo para determinar el calendario de riego

Los dos problemas críticos con este método son establecer la ubicación de los sensores en el campo y la cantidad de lugares de observación (sensores) que se necesitan para caracterizar un campo de manera adecuada. Conviene realizar un análisis del suelo, en términos de profundidad y textura, para encontrar una ubicación que sea representativa de un campo determinado. La decisión con respecto a la ubicación dependerá de si el cultivador desea aplicar riego al campo primero en las áreas donde las plantas presentan déficits hídricos (suelos menos profundos o de textura más fina), en una ubicación promedio o con base en algún otro criterio de manejo. La cantidad de sensores que se debe instalar depende de su costo y del grado de precisión que exija el gerente. Instalar dos sensores en el mismo lugar a dos profundidades diferentes suministra información más útil que si se instalan de manera separada en dos puntos diferentes, porque pueden detectar la dirección del movimiento del agua en el suelo (Cuadro 9). Uno de los sensores se instala a poca profundidad (20-30 cm), mientras que el segundo sensor se instala a mayor profundidad (50-60 cm, o incluso más), dependiendo de la profundidad del sistema radicular. Instrumentos más sofisticados pueden proporcionar registros continuos de la humedad del suelo a diferentes profundidades en una ubicación.

Supervisión del agua de la planta

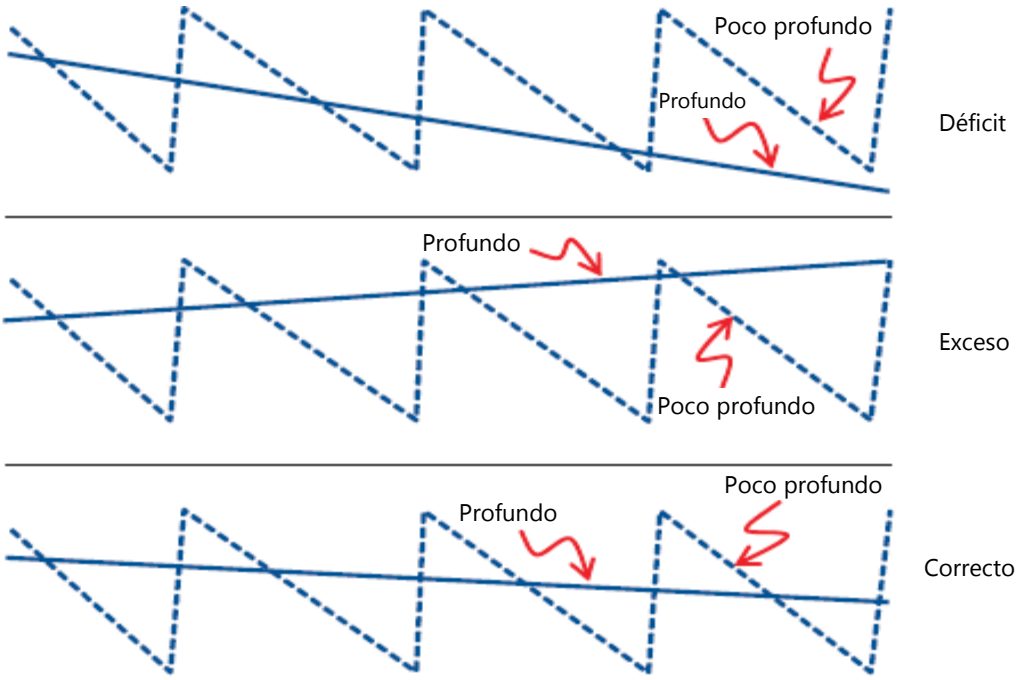
Si bien los instrumentos basados en el suelo brindan información sobre los niveles de humedad del suelo en la zona radicular de la planta, el mejor indicador del estado hídrico de la planta es la planta misma. Se han realizado amplias investigaciones sobre la medición del estado hídrico de las plantas y su incidencia en los procesos fisiológicos de la misma; sin embargo, no se han adelantado muchos estudios encaminados a desarrollar protocolos específicos para utilizar las mediciones basadas en las plantas, a fin de determinar el calendario de riego. La principal dificultad radica en la naturaleza dinámica del estado hídrico de los árboles, la cual se ve afectada por el estado hídrico del suelo y el ambiente atmosférico. El estado hídrico de los árboles cambia durante el día y a lo largo de la estación; por este motivo no es fácil definir umbrales de uso práctico. Las mediciones

del estado hídrico de los árboles se deben evaluar de manera comparativa con las mediciones equivalentes que representen plantas sometidas a riego completo en el mismo ambiente. Esto se puede lograr desarrollando "referencias" o "líneas de base" que representen el comportamiento de las plantas bajo condiciones no limitantes de humedad del suelo, y se puedan utilizar para normalizar las mediciones hídricas de la planta.

Potencial hídrico de la planta

El parámetro utilizado para caracterizar el estado hídrico en las plantas es el potencial hídrico, el cual usualmente se mide con una cámara de presión. La medición exige que se introduzca una hoja en la cámara y se selle con el extremo cortado del peciolo hacia el exterior, y luego se aplique presión a la cámara con gas nitrógeno hasta que aparezca la savia del xilema en el extremo cortado del peciolo (Cuadro 10). Esta presión equilibra el potencial hídrico foliar bajo ciertos supuestos. El método establecido que se emplea para evaluar el estado hídrico de los árboles es el potencial hídrico del tallo (SWP). Para medir el SWP, una hoja interna sombreada esté ubicada cerca de la rama principal se cubre (con una bolsa plástica pequeña revestida con papel de aluminio u otro material opaco, bolsa sellada) por un intervalo de tiempo (cerca de 20 min.) antes de cortarla. La eliminación práctica de la transpiración, mediante el aislamiento de la hoja, equilibra su estado hídrico con el del tallo adyacente y, presuntamente, con el tronco. El SWP se ve afectado en menor medida por la demanda de evaporación (y por las variaciones de la apertura estomática entre una hoja y otra) y es más representativo del estado hídrico del árbol completo que el potencial hídrico de una hoja expuesta. En algunas especies, las mediciones del potencial hídrico de hojas descubiertas sombreadas en el interior del dosel han demostrado estar estrechamente relacionadas con el SWP. Por tanto, realizar la medición en hojas sombreadas puede ser una alternativa viable y más rápida que tener que cubrir las hojas con bolsas.

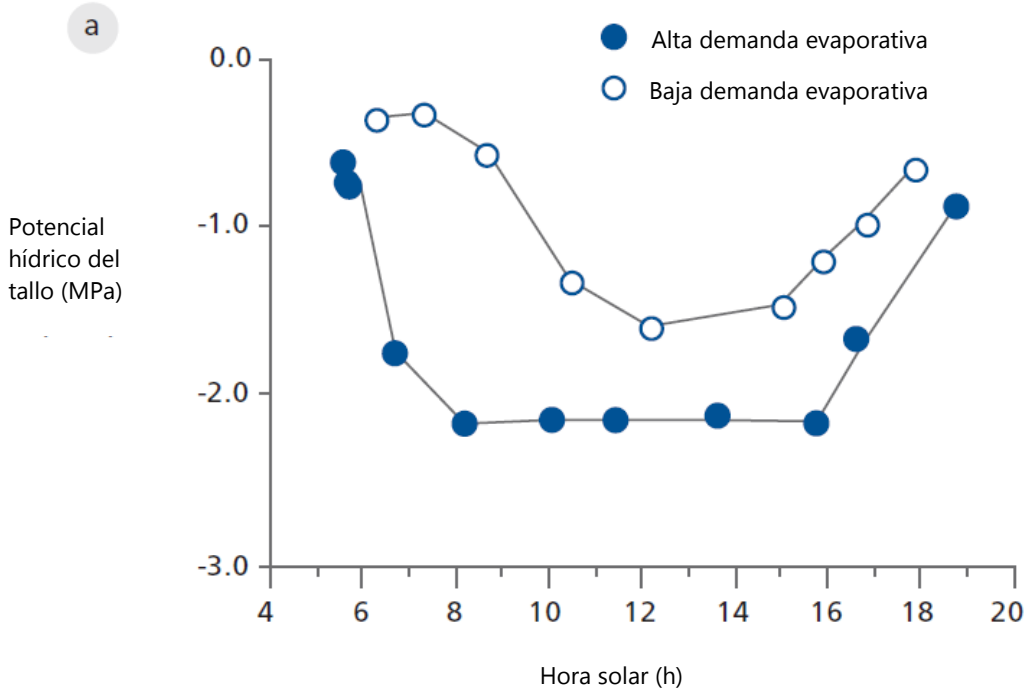
CUADRO 9 Ejemplos de monitoreo de humedad del suelo en situaciones diferentes

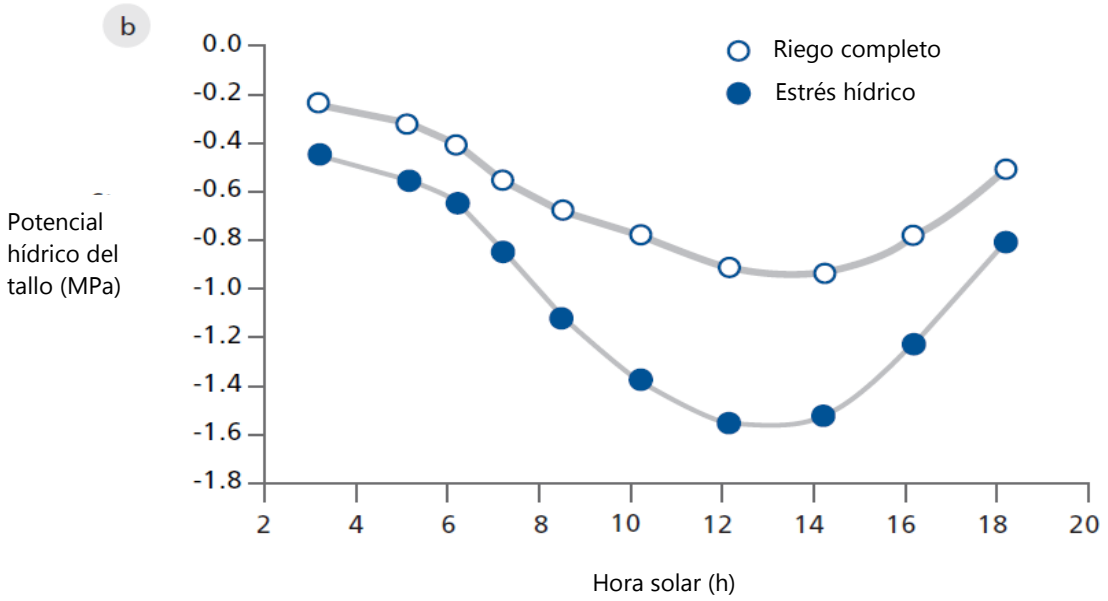


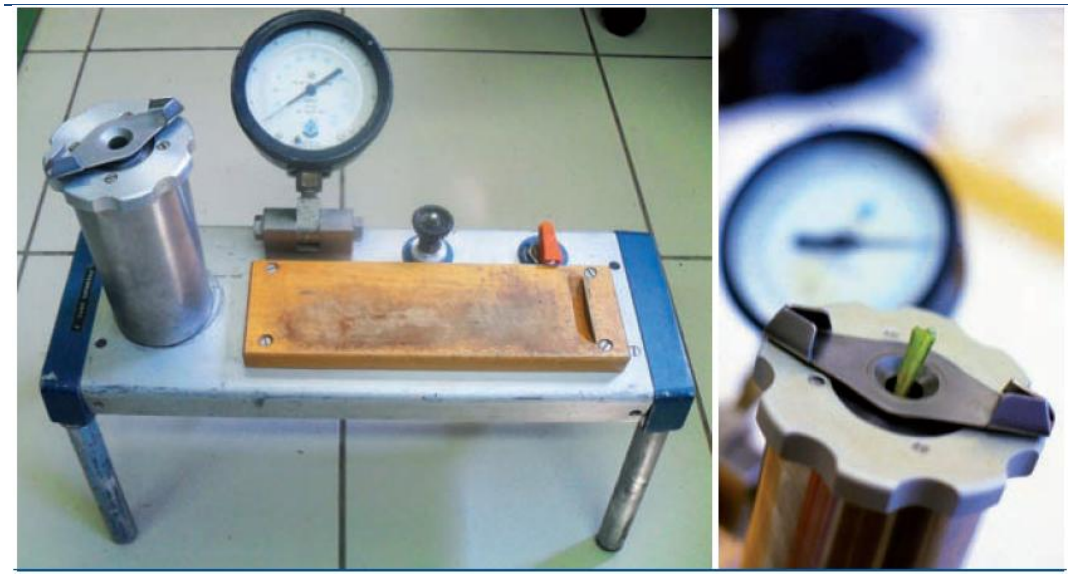
Las tres tendencias del estado hídrico del suelo se obtuvieron con sensores instalados en capas del suelo poco profundas (líneas punteadas) y profundas (líneas continuas). El ejemplo de la parte superior indica la aplicación **insuficiente** de agua (riego deficitario), en base a la disminución de la humedad del suelo a poca profundidad (línea continua). El gráfico del centro muestra un incremento gradual en la humedad del suelo en lo profundo del perfil, lo cual indica una aplicación **excesiva**. Las fluctuaciones de la humedad del suelo a poca profundidad (línea punteada) muestran las respuestas típicas a las aplicaciones de riego, seguidas de una rápida extracción a poca profundidad. El tercer gráfico en la parte inferior representa un patrón que indica una aplicación de riego **adecuada**. Observe que, incluso si el contenido de agua en la capa profunda no cambia, es posible que ocurra una percolación profunda incluso sin cambios aparentes en el contenido hídrico.

El estado hídrico de la planta varía en respuesta a la demanda atmosférica y a los niveles de humedad del suelo. Incluso cuando el nivel de humedad del suelo es alto, el SWP varía, disminuyendo desde las horas previas al amanecer hasta cerca del mediodía solar, para luego estabilizarse después de las horas del mediodía, al menos en los días despejados. Las mediciones del SWP usualmente se realizan durante este período de estabilización; desde el mediodía solar hasta 1400, el cual representa el mínimo del día. El valor máximo tomado en las horas previas al amanecer se emplea, en algunos casos, para representar un SWP cercano al equilibrio con la humedad del suelo. No es práctico medir el potencial hídrico antes del amanecer para determinar el calendario con fines comerciales, dada la hora del día y el limitado tiempo para realizar las mediciones.

CUADRO 10 En esta página: ejemplos de la evolución diurna del potencial hídrico foliar de: a) olivos (árboles bajo condiciones de secano a inicios de la primavera y mediados del verano); y b) árboles de durazno o melocotoneros bajo riego completo y bajo estrés hídrico. Siguiente página: instrumento de cámara de presión utilizado para medir el estado hídrico de la planta.







El principal factor que limita el uso del SWP para el manejo de riego es el requisito de mano de obra, una limitante que aumenta en gran medida en las mediciones previas al amanecer, debido a que exigen el desplazamiento a los campos y a que no se pueden automatizar. Se han propuesto técnicas alternativas a la cámara de presión, como la medición de los cambios en el diámetro diurno del tronco empleando dendrómetros. Esta técnica brinda registros continuos de manera automática y se ha ensayado en unas cuantas especies, aunque no se utiliza ampliamente fuera de las actividades de investigación. Otra desventaja de los enfoques de calendarios basado en las plantas es que no proporcionan información cuantitativa sobre cuánta agua se debe aplicar, como sí lo hacen los métodos de supervisión de la humedad del suelo y determinación de necesidades hídricas. La información sobre las investigaciones relacionadas con el SWP de varias especies de árboles y vides está disponible para diagnosticar el nivel relativo del estado hídrico en un huerto, es una de las aplicaciones más útiles de las mediciones del SWP. El Cuadro 11 muestra valores indicativos para algunas especies de árboles. Se suministra información más detallada en los

capítulos que tratan específicamente sobre cada cultivo. Tanto la demanda de evaporación como el momento de la estación pueden afectar los valores de referencia del SWP.

Temperatura del dosel

La temperatura del dosel del árbol es otro indicador de estrés hídrico. El mecanismo subyacente es que el cierre de los estomas, motivado por los déficits hídricos, ocasiona un aumento en la temperatura del dosel debido al menor enfriamiento por transpiración. En un día despejado, los doseles de las plantas que gozan de buen suministro de agua registran temperaturas inferiores a las del aire circundante en varios grados. Cuando el suministro hídrico es restringido y se impone el estrés hídrico, los doseles se calientan debido a la disminución de la transpiración, de modo que sus temperaturas pueden llegar a ser iguales o superiores a la temperatura del aire. En un ambiente dado, la temperatura del dosel se incrementa con la severidad del estrés hídrico. El desarrollo del termómetro infrarrojo (IRT) hizo posible medir la temperatura del dosel de manera remota, sin tener contacto físico con la planta, y esto permitió utilizar las temperaturas del dosel para orientar el manejo de riego. Por ejemplo, la diferencia entre las temperaturas del dosel y del aire puede variar desde -3 °C, cuando los doseles gozan de buen suministro hídrico, hasta +3 °C bajo un nivel significativo de estrés, lo cual ofrece un buen indicador para detectar el estrés.

CUADRO 11 Valores de referencia del potencial hídrico del tallo (SWP) en algunas especies de frutales y vides.

Rango de valores de SWP para árboles con buen riego (sin estrés) de varias especies de cultivo perennes. Los valores se observaron cerca del mediodía en días despejados. El rango indica la variación observada en situaciones de alta y baja demanda evaporativa, y entre inicios (poco después del desarrollo completo del dosel) y finales de la estación (antes de que la senescencia del dosel sea evidente mediante observación).

SWP (Mpa)	Inicios de la estación	Mediados a finales de la estación
Olivar Cítricos	-0.8 a -1.0	-1.0 a -.12
Vides	-0.4 a -0.6	-0.6 a -0.8
Pistacho	-0.7 a -0.8	-1.0 a -1.2
Almendros	-0.6 a -0.8	-0.8 a -1.0
Durazno o Melocotonero	-0.5 a -0.6	-0.7 a -0.9
Nogal	-.0.4 a -0.5	-0.5 a -0.7

Con base en las temperaturas del dosel, se desarrolló el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) para cuantificar el nivel de estrés hídrico de las coberturas del cultivo. El CWSI utiliza la diferencia de temperatura entre el dosel (T_c) y el aire circundante (T), la cual se normaliza para tener en cuenta de las diferencias en las condiciones climáticas empleando el déficit de presión de vapor del aire.

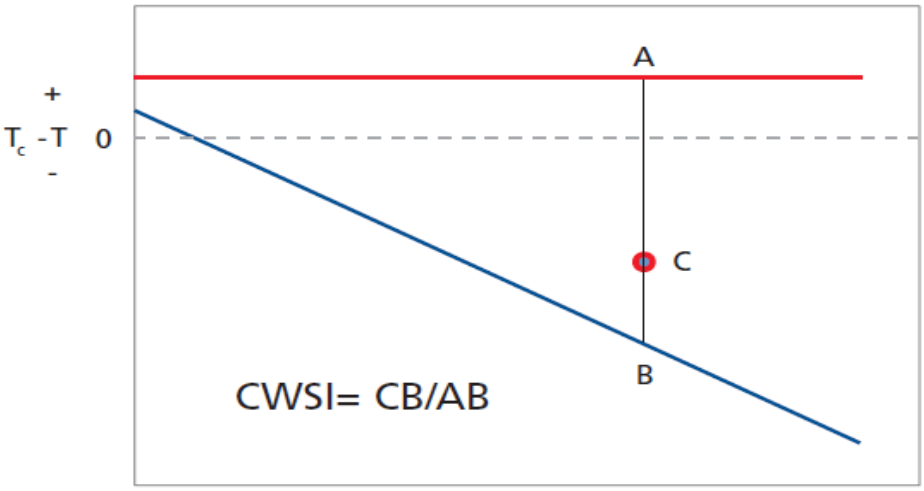
El Cuadro 12 muestra cómo se calcula el CWSI utilizando dos líneas base, una para una cobertura con riego completo (línea base inferior) y otra para un dosel con estrés hídrico severo (línea base superior). Las dos líneas se determinan de manera empírica o de manera teórica, derivadas de

condiciones equivalentes de demanda evaporativa. Los protocolos para uso en el calendario de riego se centran en no exceder los umbrales predeterminados de CWSI durante períodos específicos de la estación. Los doseles que no presentan estrés registran valores del CWSI cercanos a cero, mientras que los cultivos con un grado severo de estrés hídrico exhiben un CWSI que se aproxima a uno.

El indicador del CWSI ha permitido detectar el estado hídrico de los doseles homogéneos de los principales cultivos extensivos. Es más difícil aplicarlo a doseles heterogéneos de árboles y vides porque el suelo desnudo, el cual registra una temperatura mucho más alta, interfiere en las lecturas de la temperatura superficial de copas de árboles aisladas en superficies de suelo caliente. Asimismo, en el caso de los cultivos arbóreos, el uso del CWSI ha estado limitado por las pequeñas diferencias en el gradiente de la temperatura dosel-aire, debido a la aspereza del dosel de los árboles en comparación con la suavidad de las coberturas de cultivos extensivos homogéneos. Con estos últimos, las temperaturas del dosel del cultivo aumentan más que en el caso de las coberturas de los árboles para la misma disminución relativa en temperatura. Sin embargo, recientemente se ha demostrado que el enfoque del CWSI es capaz de detectar estrés hídrico en los doseles de árboles frutales, como se observa en el Cuadro 12 para los árboles de pistacho.

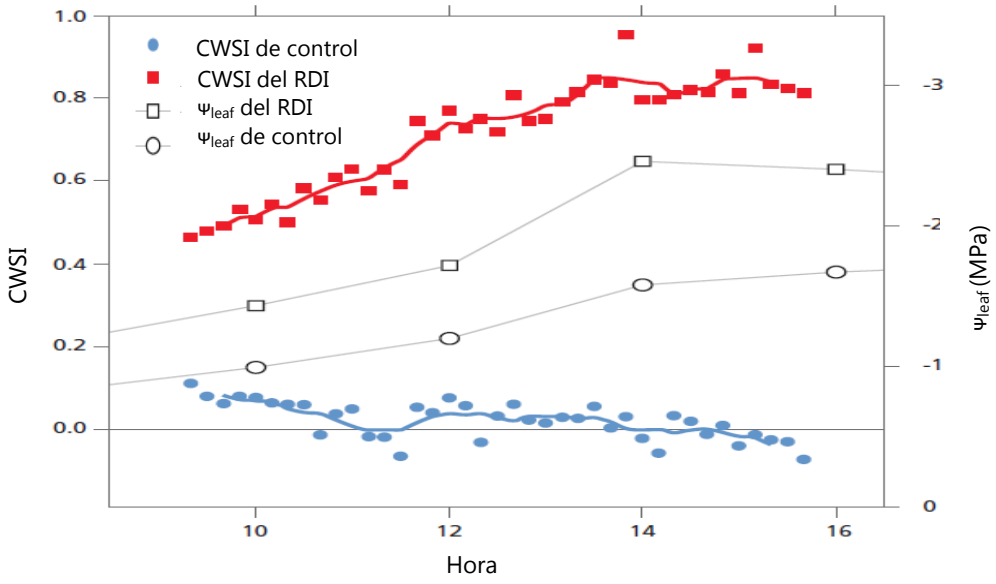
CUADRO 12 Definición del CWSI y un ejemplo que muestra las relaciones entre el CWSI y la WP foliar en árboles de pistacho.

El punto C describe la T_c - T medida de un dosel; B es el límite inferior de T_c - T para el dosel en su potencial máximo de transpiración y C es la T_c - T de un dosel que no presenta transpiración, ambos para el VPD existente.



Déficit de presión de vapor (VPD)

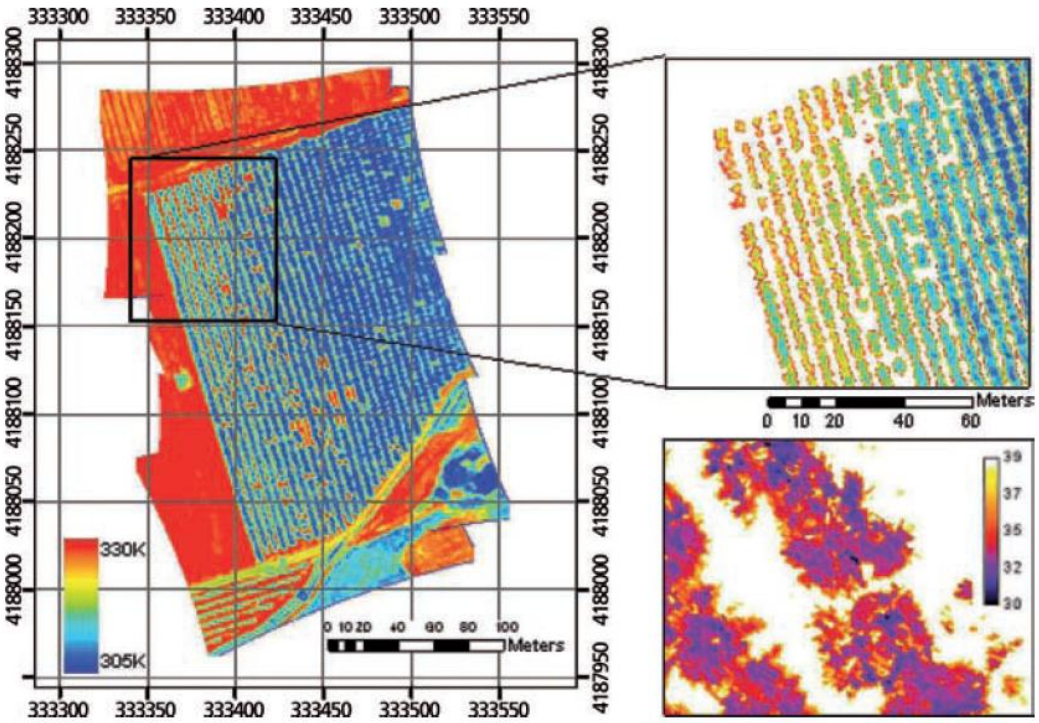
Tendencias diurnas del CWSI en árboles de pistacho control (puntos) y en árboles bajo déficits hídricos (RDI; cuadros negros) el 3 de julio de 2006 en Madera, California. Los valores del potencial hídrico foliar también se representan en la Figura (adaptación a partir de Testi *et al.,* 2008).



La principal ventaja de las técnicas de temperatura del dosel es la posibilidad de obtener imágenes térmicas que representen huertos completos desde vehículos aéreos o satélites. Esto permite caracterizar un campo completo, en lugar de supervisar sólo algunos puntos o árboles, como es ahora el caso con las técnicas basadas en el suelo y las plantas. Adicionalmente, analizar árbol por árbol la variabilidad de los datos de temperatura del dosel obtenidos por teledetección puede generar otros indicadores de las necesidades hídricas del huerto. El Cuadro 13 muestra mapas del CWSI de un huerto y el grado de detalle que se puede obtener a partir de las imágenes térmicas, las cuales tienen el grado suficiente de resolución para representar la copa de cada árbol con detalle.

CUADRO 13 Ortomosaico térmico captado por un vehículo aéreo no tripulado (UAV) sobre un huerto de durazno o melocotoneros, con resolución de 40 cm.

La imagen ampliada en la parte superior muestra los árboles que experimentan estrés hídrico (más calientes, en rojo y amarillo) en comparación con los árboles con riego completo (azul). En el costado inferior derecho se muestra una imagen captada desde poca altitud, donde se observa la variabilidad térmica entre las copas (adaptación a partir de Berni *et al.,* 2009).



Método de estimación de blance de agua

Según este método, la zona radicular del árbol se considera un depósito del agua del suelo que se agota a medida que la E y la Tr tienen lugar. El depósito de agua disponible en el suelo que el árbol agota mediante la ET puede perder agua hasta que alcanza un umbral de humedad del suelo (agotamiento permisible), por debajo del cual el estrés hídrico es perjudicial para la producción o la calidad del cultivo, o ambas. En este punto se debe aplicar riego para volver a llenar el perfil del suelo. La cantidad de riego necesaria es equivalente a las pérdidas de ET_c desde el último riego. El Cuadro 14 describe el proceso para establecer el calendario de riego mediante el método de estimación de balance de agua para cultivos arbóreos.

CUADRO 14 Aplicación del método de balance de agua para determinar el calendario de riego.

Información necesaria

- Capacidad de retención de agua del suelo disponible o agua disponible total en el suelo (TAW). Definida como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, varía según la textura del suelo entre 50 mm/m y 200 mm/m.

- Profundidad de raíces

- Las raíces de los árboles se extienden profundamente en suelos abiertos y pueden alcanzar varios metros, pero su profundidad se puede ver mucho más limitada por restricciones mecánicas en el perfil del suelo.
- Agotamiento permisible (AD) Este es el nivel umbral de la capacidad de almacenamiento de la zona radicular, por debajo del cual el nivel de déficit hídrico en el árbol es perjudicial. En este punto, se aplica el riego. Los niveles usuales de AD varían entre el 50-70 % del TAW.

- Tasa de ET_c
- Las pérdidas de ET_c se acumulan hasta que se alcanza el nivel de agotamiento permisible.

Consideraciones prácticas

- Aunque las raíces de los árboles pueden alcanzar varios metros, la profundidad efectiva de raíces para efectos de riego se considera mucho inferior por razones prácticas. Incluso en suelos abiertos y profundos, 1.5 a 2 m es la profundidad máxima considerada para realizar el balnce de agua. Un perfil de suelo de 2 m puede retener hasta 400 mm de H_2O, y si el AD es el 50 % del TAW, el cultivo puede extraer 200 mm antes de que se aplique el siguiente riego. A una tasa de ET_c de 5 mm/día, ¡el siguiente riego se aplicaría después de 40 días! Este método no es práctico por muchas razones; por ejemplo, sería difícil contrarrestar ese déficit en un período de tiempo razonable, ya que es muy difícil infiltrar 200 mm de agua en la mayoría de los suelos dentro del tiempo estándar de riego. Por consiguiente, la práctica común es fijar una profundidad determinada de agua para aplicar el riego, a menudo mucho inferior al AD, (entre 50 y 100 mm de agua), y variar los intervalos de riego de acuerdo con la pérdida de ET_c. De este modo, establecer el AD es fundamentalmente una decisión de manejo y debe tener en cuenta todos los aspectos prácticos de los procesos del riego agrícola.

La técnica del balance de agua es muy útil cuando se necesitan cantidades significativas de mano de obra para aplicar el riego, porque permite que el agua se aplique con la menor frecuencia posible, reduce el número de riegos por estación y, por tanto, los costes de mano de obra. Este es el caso de los métodos de riego por superficie y aspersión móvil. Cuando el sistema de riego es permanente y abarca todo el huerto o viñedo, como es el caso del micro-riego, el problema de la frecuencia del riego es mucho menos relevante, y el cultivador debe aplicar riego con la frecuencia que desee, teniendo en cuenta las pérdidas potenciales de E. No obstante, es importante tener en cuenta el balance de agua para la planificación estacional, incluso bajo riego de alta frecuencia.

Con el método de micro-riego, el objetivo no es rellenar todo el perfil del suelo, sino únicamente reponer el agua consumida por la ET_c desde la aplicación previa. En consecuencia, el papel principal

del balance de agua utilizando micro-riego es determinar la cantidad de agua que se debe aplicar. Sin embargo, también se puede emplear para hacer un seguimiento del agotamiento del agua del suelo en la zona radicular. Este método puede ser beneficioso si se practica riego deficitario o en caso de un problema de distribución de agua, porque se puede utilizar para determinar cuánta agua disponible queda en el perfil. De allí que sea una buena herramienta de planificación, como se muestra en el Cuadro 15.

RESPUESTAS DE LOS CULTIVOS ARBÓREOS Y VIDES A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

En cada ciclo diurno, el agua se evapora desde las hojas, se presentan déficits hídricos internos y el agua fluye desde el suelo hacia las hojas para reponer las pérdidas. Para que el agua se dirija del suelo a las hojas, los árboles deben experimentar algunos déficits hídricos durante el curso del día. Sin embargo, cuando el suelo no puede suministrar agua a una tasa suficiente que permita reponer las pérdidas, o cuando la Tr es muy alta debido a la demanda evaporativa, el árbol se deshidrata parcialmente y experimenta déficits hídricos que pueden ser excesivos y pueden afectar a importantes procesos fisiológicos que redundan en menores rendimientos, deterioro de la calidad de los frutos, o ambos.

Efectos en el desarrollo fenológico

Los déficits hídricos afectan al desarrollo de los árboles frutales y las vides. La formación de yemas florales, el desarrollo floral y el cuajado de los frutos son los principales procesos relevantes para la producción de fruto. En los árboles caducifolios, el fruto surge a partir de la diferenciación de yemas que ocurre en el año previo. Por consiguiente, los déficits hídricos que se presenten en un año pueden afectar la floración de retorno y la producción del año siguiente. En algunos cultivos arbóreos, los déficits hídricos afectan de manera negativa la viabilidad floral en el año siguiente, pero también se ha reportado el mejoramiento de la floración de retorno después de la presencia de estrés hídrico en el verano anterior. Esta respuesta es crucial para determinar la carga de frutos y por tanto, el rendimiento en relación con el agua. Dado que esta respuesta es específica en cada especie, se aborda en las secciones correspondientes a cada cultivo. No obstante, un hecho general evidente es que los períodos de desarrollo floral y cuajado de frutos son muy sensibles a los déficits hídricos, así que se deben evitar las consecuencias perjudiciales del estrés hídrico. No obstante, la aparición del estrés hídrico durante estos eventos de desarrollo es relativamente rara en las especies caducifolias, debido a que la Tr es muy baja al inicio de la estación, dada la carencia de área foliar y la generalmente baja demanda evaporativa en climas templados. La probabilidad de que ocurra estrés hídrico en las etapas de floración y cuajado del fruto es mayor en climas subtropicales y en especies perennifolias, y se debe manejar según corresponda.

Efectos en el crecimiento vegetativo y la asimilación de CO_2

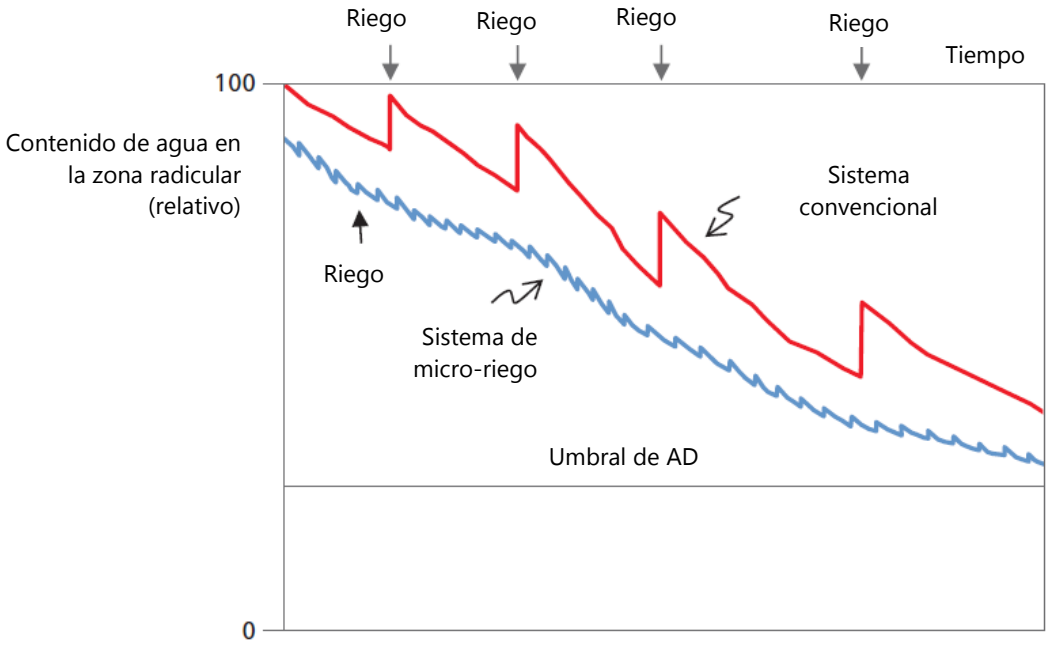
El crecimiento se encuentra dentro de los primeros procesos afectados por los déficits hídricos. Cuando se presenta déficit hídrico, cualquier órgano que se esté expandiendo en ese momento disminuye su tasa de crecimiento, sea una hoja, un fruto, una rama o el tronco. Esto se debe a que altas tasas de expansión requieren alta presión interna en las células en crecimiento, o turgencia, la cual depende directamente del estado hídrico del tejido. La alta sensibilidad del crecimiento de los brotes al estrés hídrico tiene importantes implicaciones para el riego de los árboles; por un lado, podría ser conveniente en algunos casos reducir el crecimiento de los brotes vegetativos en relación con su crecimiento potencial bajo un suministro ilimitado de agua. Por otro lado, si producir frutos de gran tamaño es un factor importante que determina los ingresos de los productores, se debe evitar por completo el estrés hídrico durante el período de expansión rápida

del fruto. Existen evidencias para diferentes especies que demuestran que los diversos procesos de crecimiento –iniciación de brotes, extensión de brotes, crecimiento de hojas y frutos y crecimiento del tronco– exhiben diferentes niveles de sensibilidad al estrés hídrico dentro de un nivel de sensibilidad generalmente alto, como se analizará en los capítuloss de los diferentes cultivos. Cabe recalcar que durante los primeros años de vida útil de un huerto o viñedo, la expansión del dosel es el proceso más importante que da lugar a un alto nivel de productividad. A medida que la plantación alcanza la madurez, decrece la importancia de los déficits hídricos que afectan el crecimiento vegetativo. Otra respuesta importante a los déficits hídricos es la aceleración de la senescencia foliar. En algunas especies como los almendros, esta respuesta es bastante marcada, mientras que en otras especies se requieren déficits hídricos severos, como en el caso del olivar.

CUADRO 15 Evolución de la humedad del suelo bajo riego deficitario

Si el riego se aplica en tasas inferiores a la ET_c, se desarrollan déficits hídricos. Es posible que tales déficits no sean perjudiciales, salvo que alcancen niveles que incidan negativamente en el huerto o viñedo. Cuando el micro-riego se aplica con una tasa fija, el balance de agua hace seguimiento al depósito de agua del suelo y facilita la extracción segura de parte de este depósito, haciendo el mejor uso del agua almacenada en el suelo. Sin embargo, tenga en cuenta que, en áreas o años donde la precipitación estacional es insuficiente para humedecer la zona radicular potencial, el depósito de agua del suelo con micro-riego puede ser mucho menor que bajo riego de cobertura completa.

Por tanto, el riego deficitario manifestará estrés hídrico en el cultivo más rápidamente con micro-riego bajo esas condiciones específicas. Por otro lado, debido a que el riego se puede aplicar con frecuencia, es más fácil superar el inicio del estrés perjudicial con aplicaciones frecuentes bajo micro-riego, siempre que el sistema tenga suficiente capacidad. El gráfico a continuación muestra la evolución estacional contenido de agua del suelo bajo riego deficitario, con sistemas convencionales y de micro-riego. En ambos casos, el agua aplicada es menor que la ET_c y el depósito de agua del suelo se está agotando, pero sin alcanzar el umbral.

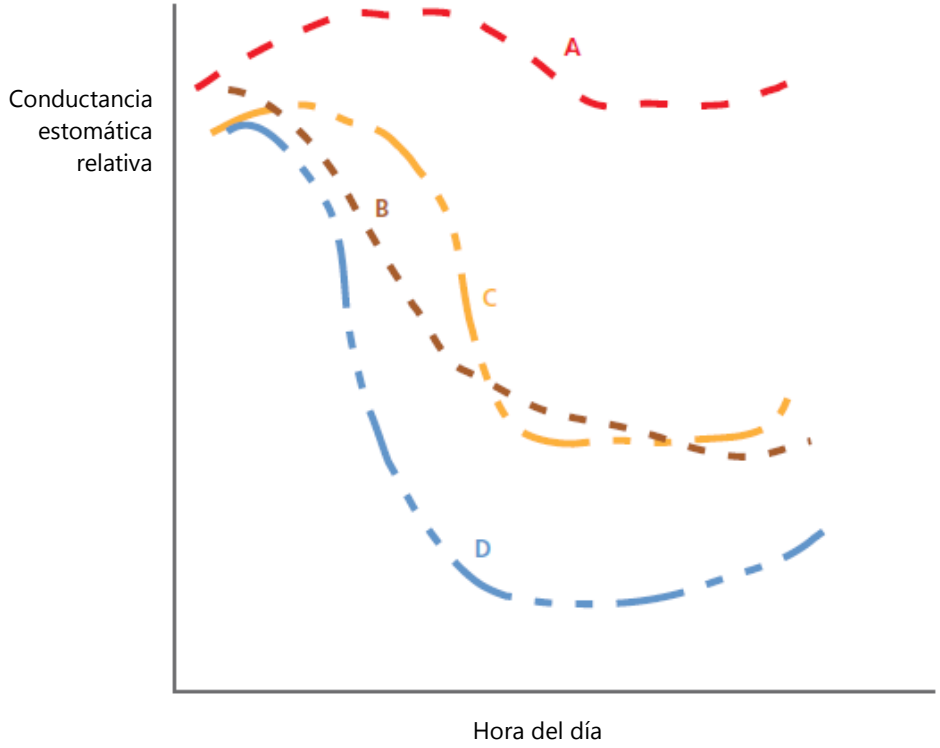


La asimilación de carbono por las plantas depende de la absorción de CO_2 a través de los estomas, los cuales responden a los déficits hídricos con un cierre parcial. El comportamiento de los estomas

en muchos árboles frutales sigue un patrón que maximiza la absorción de CO_2 por unidad de pérdida de agua. Sin embargo, la regulación estomática también puede implicar un conflicto entre la maximización de la absorción de CO_2 por unidad de pérdida de agua (la cual puede exigir el cierre estomático en momentos de alta demanda evaporativa) y la tolerancia al estrés por calor (que exige alta conductancia estomática para permitir el enfriamiento por evaporación). El Cuadro 16 muestra diferentes patrones de comportamiento estomático para varias especies de árboles. La conductancia estomática es más alta durante la mañana, cuando el déficit de presión de vapor es bajo, y disminuye a un punto estable al mediodía, cuando el VPD es alto (Cuadro 16, C). Este patrón se ha observado en muchas especies de árboles frutales, pero es diferente en otras, como el manzano y la vid (Cuadro 16, A), donde los estomas permanecen completamente abiertos durante la mayor parte del día si la planta tiene un buen suministro de agua.

CUADRO 16 Ejemplos de patrones diurnos de conductancia estomática

El gráfico a continuación muestra A) estomas completamente abiertos con una pequeña depresión al mediodía, típico de los manzanos y la vid en condiciones de suministro abundante de agua; B) disminución continua de la apertura estomática después de un incremento en el VPD, típica de los cítricos; C) valor máximo en la mañana con una considerable depresión al mediodía, típico de muchas especies frutales caducifolias y del olivar; D) mismo patrón que en C, pero cuando los árboles se encuentran bajo un estrés hídrico significativo. La escala relativa puede diferir para patrones diferentes.



Se ha documentado minuciosamente que la conductancia estomática y la tasa de asimilación de CO_2 por unidad de área foliar de los principales cultivos extensivos no son tan sensibles a los déficits hídricos como lo es el crecimiento vegetativo. Déficits hídricos considerables se requieren

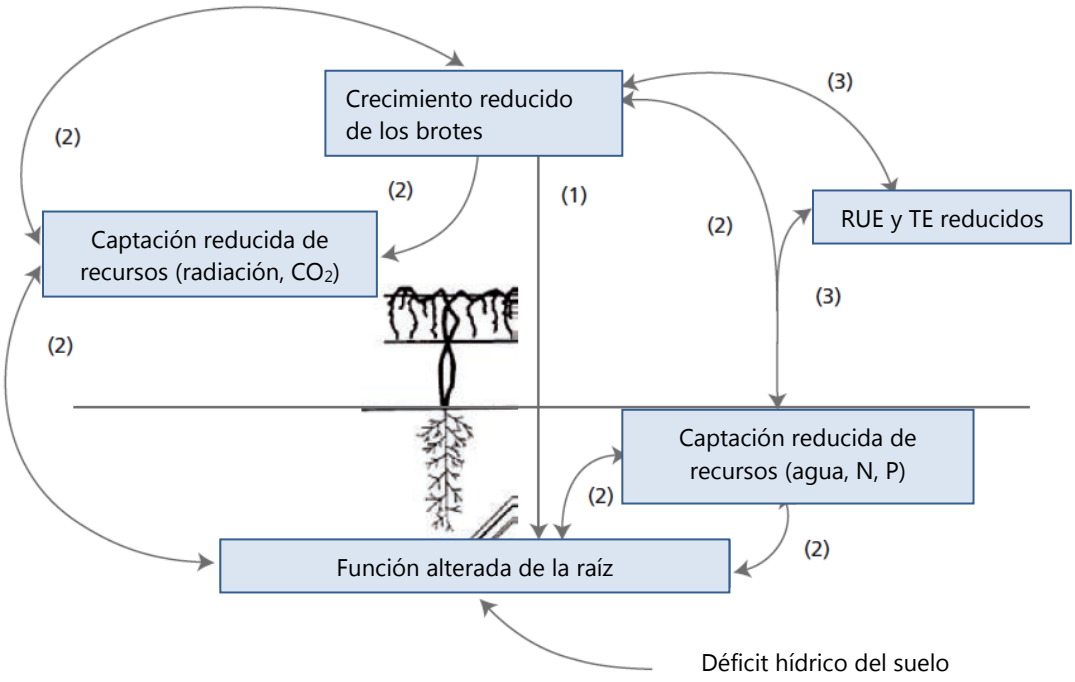
en la mayoría de los cultivos anuales para reducir la apertura estomática y la fotosíntesis con respecto a los niveles máximos. La respuesta de muchas especies de árboles frutales parece ser similar, aunque se dispone de evidencia menos sólida de que, para los árboles frutales y las vides, estos dos procesos son tan insensibles al estrés hídrico leve como lo son para la mayoría de cultivos anuales. Además de la regulación estomática de los árboles en respuesta al estado hídrico, la carga de producción y otros factores endógenos también pueden afectar a las tasas de intercambio de gases, lo cual dificulta generalizar los patrones de comportamiento estomático observados a lo largo de diferentes especies. Asimismo, hay gradientes de estado hídrico dentro del árbol, y estas diferencias en el suministro de agua pueden provocar el cierre estomático parcial en algunas ramas del árbol, pero no en otras. La respuesta característica de los estomas a los déficits hídricos se muestra en el Cuadro 16, donde los niveles cada vez mayores de estrés inciden en la magnitud de los niveles máximo y estable de conductancia estomática.

Mecanismos implicados en las respuestas

La comprensión de los mecanismos fisiológicos que participan en la respuesta a los déficits hídricos está bien desarrollada con respecto a las relaciones hídricas y las señales hidráulicas y químicas, pero es necesario diseñar un marco que integre estos procesos en un modelo para todo el cultivo, que dé cuenta de la captura de recursos y la eficiencia en su uso. El Cuadro 17 muestra los mecanismos de respuesta de los cultivos a los déficits hídricos, agrupados en tres clases. La ruta (1) representa las señales hidráulicas y químicas de la raíz al brote y del brote a la raíz, las cuales han atraído gran atención. La ruta (2) contiene un círculo de refuerzo muy sólido, por medio del cual la reducción inicial en el crecimiento de los brotes, las raíces o ambos forma un círculo que eventualmente podría anular otros procesos. La ruta (3) implica cambios en la eficiencia de la radiación –y la transpiración; estas eficiencias son estables salvo en condiciones de estrés severo. Este modelo ilustra las interacciones y la interdependencia de la multitud de procesos fisiológicos que participan en las relaciones hídricas y el crecimiento de la planta, y como tal, es una parte integral de la comprensión de las respuestas de los cultivos a los déficits hídricos. Esta comprensión es fundamental y constituye la base para el desarrollo de prácticas mejoradas de riego.

CUADRO 17 Mecanismos fisiológicos de las respuestas de los cultivos al déficit hídrico del suelo.

La ruta (1) supone la percepción directa del déficit hídrico del suelo por parte de la raíz y las señales de la raíz que provocan la reducción del crecimiento de los brotes; la flecha con dos puntas indica la retroalimentación de brotes a raíces. La ruta (2) supone un círculo de refuerzo sólido de reducción del crecimiento de brotes y raíces, el cual está mediado por la incapacidad de los sistemas radiculares y los doseles para captar recursos. La ruta (3) supone reducciones de la eficiencia en el uso de recursos, como se ejemplifica mediante la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) y la eficiencia de la transpiración (TE) (Sadras, 2009).



Efectos sobre el rendimiento

Es necesario conocer las respuestas del rendimiento y la calidad de los frutos ante los déficits hídricos, a fin de predecir la respuesta del huerto a reducciones del suministro hídrico en años de poca disponibilidad de agua o en áreas de escasez de agua, donde no es posible suministrar las cantidades necesarias para alcanzar la ET_c máxima. Normalmente, la posibilidad de que se presenten déficits hídricos aumenta el riesgo de que haya reducciones en el rendimiento, y estos temores a menudo se materializan cuando los déficits hídricos son muy severos y ocurren en etapas cruciales en las que se determinan algunos de los componentes del rendimiento. Sin embargo, en ocasiones es posible eludir los impactos negativos del suministro reducido de riego al restringir los déficits hídricos de la planta a períodos del ciclo tolerantes al estrés. Además, existen algunos casos en que es posible aprovechar las respuestas positivas a los déficits hídricos para mejorar la calidad del fruto y por ende aumentar el valor de la cosecha con un uso consuntivo reducido. De este modo, los productores se beneficiarían del aumento de los ingresos brutos y la reducción de los costes del agua.

A fin de evaluar la respuesta de los árboles frutales y las vides ante los déficits hídricos, es necesario realizar ensayos durante varios años, porque las plantas perennes requieren tiempo para aclimatarse a un nuevo régimen hídrico y porque es posible que haya consecuencias de arrastre de los déficits hídricos en la productividad de la(s) estación (estaciones) posterior(es). En otras palabras, el historial de estrés es un aspecto importante del riego deficitario de los cultivos permanentes. Normalmente el agua almacenada en el suelo y el desarrollo de brotes, hojas, raíces y frutos se ven afectados por la primera estación de déficits hídricos y todo lo que influya en los resultados de ese año. Después del primer año, se requieren al menos dos años más para evaluar la respuesta; principalmente es el resultado de los impactos de arrastre del estrés y la tendencia a la alternancia en la producción de muchas especies arbóreas que incidirían en el rendimiento, independientemente de los déficits hídricos. Para caracterizar la respuesta del rendimiento a la disponibilidad de agua en los cultivos perennes, es necesario realizar experimentos durante 3-4 años, como mínimo, y preferiblemente más. La variabilidad de árbol a árbol aumenta la cantidad de parcelas con repeticiones que se necesitan para detectar diferencias estadísticamente significativas en procesos fisiológicos y componentes de rendimiento entre los tratamientos. Todo esto hace que los experimentos de riego en árboles y vides requieran demasiado tiempo y dinero, y por tanto que sean escasos, particularmente aquellos de largo plazo.

Calidad del fruto y el producto

Muchas características de la calidad del fruto se pueden ver afectadas por los déficits hídricos y, en una última estancia, la suma del impacto sobre el rendimiento y la calidad de un producto es el aspecto que suministra información para determinar estrategias de riego deficitario. Así, únicamente los factores de calidad que influyen en los precios del producto se deben tener en cuenta al evaluar los efectos de los déficits hídricos sobre la calidad. El tamaño del fruto fresco es uno de los aspectos de calidad más importantes que incide en los ingresos generados por el huerto. El tamaño del fruto generalmente se reduce debido a los déficits hídricos que ocurren durante los períodos de crecimiento del fruto. No obstante, el impacto depende del momento en que se presente el estrés; es posible que las reducciones en la tasa de crecimiento al inicio de la estación no sean evidentes al momento de la cosecha debido a la aceleración del crecimiento del fruto, siempre y cuando se restablezca el riego completo. A pesar de eso, dado que lo ideal es obtener frutos grandes al momento de la cosecha, se deben evitar los déficits hídricos durante el crecimiento del fruto en la mayoría de las especies. Por el contrario, la calidad del producto final de muchos frutos de hueso y pomáceas se incrementa con déficits hídricos leves, normalmente porque incrementa su contenido de azúcar o aumenta la proporción entre azúcar y ácidos, y otros compuestos químicos responsables del sabor y el aroma. Existen otras respuestas positivas de la calidad del fruto ante los déficits hídricos, como la mejora del color; sin embargo, se ha observado el aumento en la incidencia de varios trastornos a causa del déficit hídrico. Las respuestas son

definitivamente específicas de cada especie e incluso de cada variedad (véanse los capítulos especificos de cada cultivo). En el caso de las uvas de vino, el aspecto de la calidad es de suma importancia para la producción del vino. El precio al que se venden las uvas puede diferir significativamente en algunas regiones, dependiendo del tamaño, la química y el color del fruto. El manejo del agua es el factor principal que determina esta calidad, como se analizará en el capítulo de la vid.

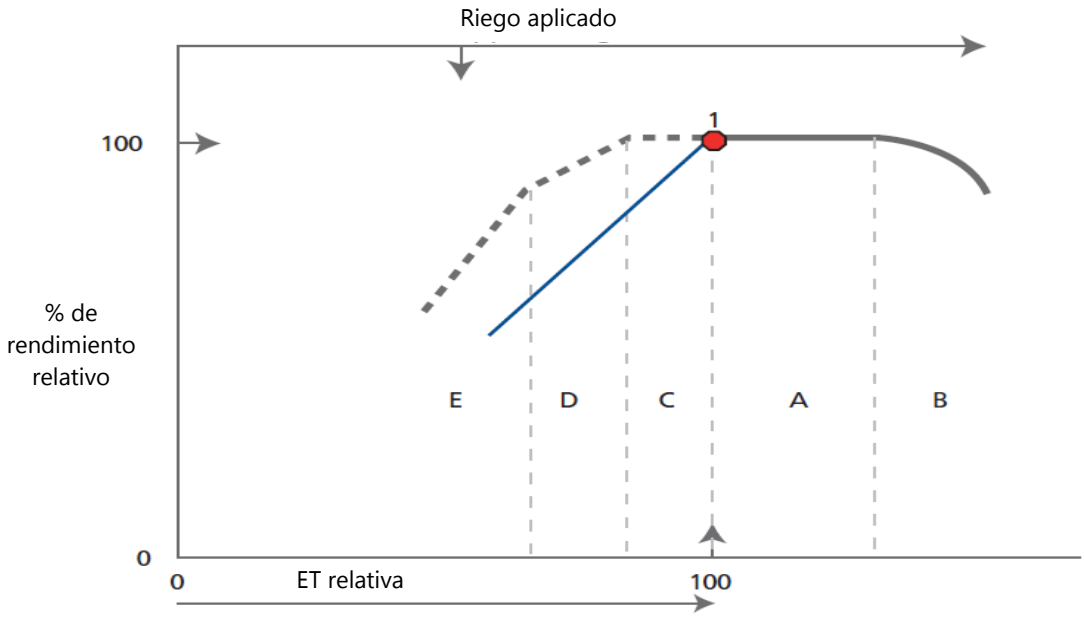
FUNCIONES DE PRODUCCIÓN DEL AGUA EN CULTIVOS ARBÓREOS Y VIDES

Desde un punto de vista práctico, es importante conocer cómo el rendimiento y la calidad responden a las variaciones en agua usada; es decir, la relación entre el agua y el rendimiento, la cual se denomina función de producción del agua. Tales funciones cuantifican la sensibilidad del rendimiento a la reducción del uso consuntivo o la ET por debajo del potencial máximo, y por consiguiente, describen la respuesta esperada del rendimiento al agua. Las funciones de producción del agua se definieron en el *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 33* para la mayoría de los cultivos extensivo; sin embargo, en ese momento no se disponía de datos suficientes para formular funciones similares en cultivos arbóreos y vides. Un objetivo importante de los siguientes párrafos es desarrollar las funciones de producción para diferentes especies de árboles frutales, con base en las investigaciones realizadas en los últimos 30 años. Si bien cada especie tiene su propia respuesta, existe un patrón general de respuesta para la mayoría de las especies de árboles frutales, como se muestra en el Cuadro 18.

La relación generalizada entre el agua de riego aplicada (AIW), la ET_c y el rendimiento de los cultivos arbóreos que se muestra en el Cuadro 18 tiene diferentes regiones de respuesta. Partiendo del Punto 1, el rendimiento máximo normalmente se alcanza a la máxima ET; en este punto, el nivel de AIW es tal que no se presentan pérdidas por drenaje y se alcanza el nivel de agotamiento permitido. Para garantizar que se suplan las necesidades de ET, algunos productores aplican más riego (Región A), pero el rendimiento se mantiene en su nivel máximo, aunque con algunas pérdidas por drenaje. En muchos cultivos arbóreos, existe un nivel de riego más allá del cual el rendimiento empieza a decrecer, ya sea como resultado de los efectos directos del encharcamiento o los efectos indirectos ocasionados por enfermedades asociadas a altos niveles de humedad del suelo, las cuales pueden incluso provocar la muerte del árbol en casos extremos (Región B).

Cuando el AIW se reduce por debajo del nivel del Punto 1 (riego deficitario), inicialmente, es posible que el rendimiento no se reduzca (Región C, Cuadro 18); la amplitud de esta región depende de la especie y del régimen de riego, pero generalmente está limitada a un rango de ET_c real entre 75 y 100 %. A medida que el AIW se reduce aún más, los rendimientos finalmente disminuyen debido al déficit de riego (Región D), y disminuirán aún más a una tasa más acelerada si el AIW sigue decreciendo (Región E). En esta última región, la probabilidad de que se presenten grandes pérdidas de rendimiento es alta debido al marcado declive del rendimiento en respuesta a la disminución del AIW. Observe que, dada la pronunciada inclinación de la pendiente en la Región E, la productividad del agua (rendimiento por unidad de AIW) de las cantidades iniciales de riego es más alta.

CUADRO 18 Relaciones generalizadas entre rendimiento, ET_C y agua de riego aplicada en árboles frutales. La línea punteada representa la respuesta esperada de los árboles de fruta y frutos secos, mientras que la línea continua azul indica la respuesta típica de un cultivo extensivo anual para efectos comparativos.



A = Región de rendimiento máximo con aumento de pérdidas por drenaje después del Punto 1. (El nivel de humedad del suelo se incrementa con la cantidad de riego).
B = Región de exceso de agua que provoca reducción del rendimiento.
C = Región de mantenimiento del rendimiento con riego deficitario.
D = Región de pérdida de rendimiento con riego deficitario.
E = Región de alto riesgo de pérdidas comerciales como resultado de estrés hídrico severo.

Funciones de respuesta del rendimiento y calidad del fruto

Los objetivos de los agricultores se centran en obtener los máximos ingresos netos, y en muchos casos en la producción de fruta, los ingresos no están determinados únicamente por la cantidad de producción, sino que existen factores de calidad que también pueden incidir en el precio del producto. En estos casos, el valor del cultivo no solo depende del peso total de la cosecha, sino también de su calidad. Como se mencionó anteriormente, se ha demostrado que el agua incide en los parámetros de calidad de los frutos, y el estrés hídrico puede tener efectos positivos y negativos en la calidad de los mismos.

Los mercados valoran la calidad del fruto de maneras complejas; en algunos casos, se paga un precio alto por los frutos grandes de algunas especies (manzano, durazno o melocotonero), mientras que otros mercados no le conceden tanta importancia al tamaño incluso en las mismas especies. Los mercados no tienen en cuenta específicamente las características específicas de calidad de la mayoría de los frutos, como alto contenido de azúcar o mejor sabor, porque es difícil cuantificarlas, y el precio se basa únicamente en el peso y la apariencia general. En algunas variedades estas características se valoran más que en otras, pero esto también depende del mercado. Es posible que la misma variedad se aprecie más en algunos países y regiones que en

otros. Aunque la calidad del fruto no ha sido un factor importante en el pasado para determinar el valor del fruto, la situación está cambiando, debido al mayor conocimiento del consumidor y a nuevas técnicas que permiten la cuantificación de algunas características de calidad.

El cultivo cuyo precio varía en mayor medida dependiendo de su calidad es el de las uvas de vino. En este caso, se sabe que los precios pueden variar considerablemente incluso para la misma variedad y región, dependiendo de la calidad de las uvas. Esto se refleja (parcialmente) en el precio del vino, el cual varía ampliamente dependiendo de su calidad, según se determine en los mercados. Se ha demostrado que, por lo general, el estrés hídrico mejora la calidad de las uvas de vino, dependiendo de su severidad y de cómo se maneje.

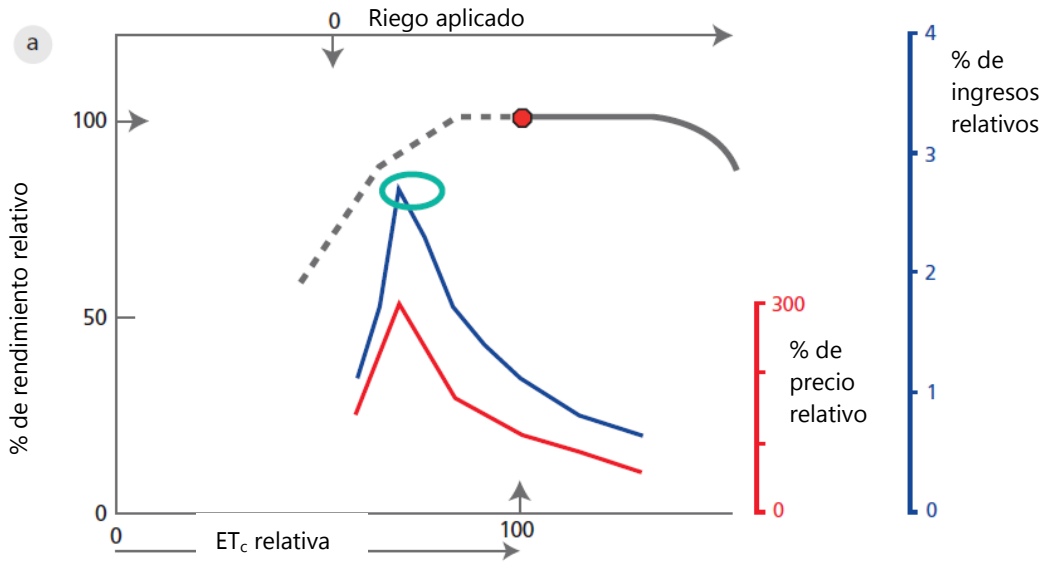
Para ilustrar cuantitativamente la influencia del riego en la calidad, el Cuadro 19 muestra la función de producción general de rendimiento del Cuadro 18 con una función de producción de ingresos (ingresos brutos relativos) para dos casos, que difieren en la respuesta de la calidad del fruto al riego. En el primer caso (Cuadro 19 a), los déficits hídricos tienen efectos positivos en la calidad del fruto hasta cierto punto, después del cual la calidad se reduce, al igual que el precio del producto (línea roja).

Estrategias para reducir el uso del agua de riego en árboles frutales y vides

Uno de los principales objetivos de esta publicación es ofrecer a los profesionales de la agricultura varias opciones para lidiar con la escasez de agua; donde el suministro de agua de riego es insuficiente para suplir la máxima demanda del cultivo. En algunos casos, las estrategias diseñadas para aplicar menos riego que el necesario para alcanzar la máxima ET_c también pueden ser las mejores para maximizar los ingresos. Existen muchas posibilidades que pueden ser efectivas para aumentar la eficiencia en el uso del agua cuando el suministro es escaso, como se muestra a continuación.

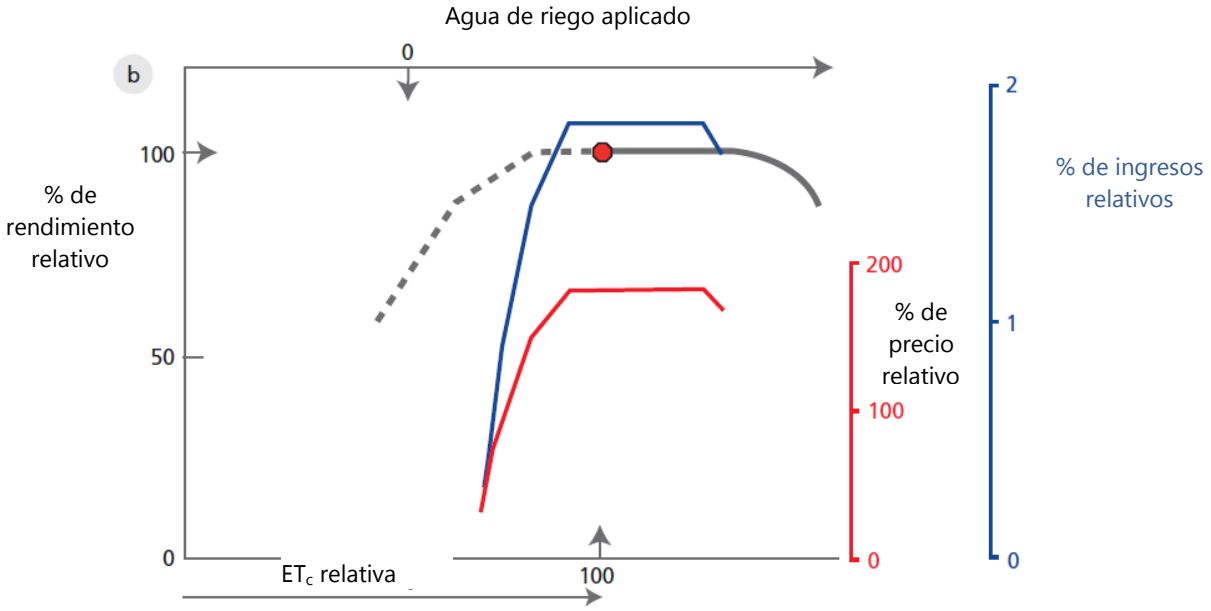
CUADRO 19 Respuestas de los ingresos relativos a las variaciones en la ET_c cuando la calidad del fruto afecta a los precios de los productos.

En el primer caso (a), los ingresos (línea azul) aumentan con los déficits hídricos porque los precios (línea roja) están directamente relacionados con la calidad, la cual aumenta con los déficits hídricos hasta cierto punto, y luego disminuye a medida que los déficits hídricos se vuelven más severos. La curva de precio junto con la línea de respuesta del rendimiento generan una función de producción de ingresos con una ET_c óptima y AIW por debajo del nivel necesario para obtener rendimientos máximos.



CUADRO 19 (CONTINUACIÓN)

(b) En el segundo caso, donde el tamaño del fruto determina el valor del cultivo, el precio (línea roja) se ve afectado negativamente por los déficits hídricos debido a que el estrés hídrico reduce el tamaño del fruto, incluso en un nivel mayor a medida que se intensifican. Aquí, la función de ingresos (línea azul) es diferente y con mayor pendiente que la función de rendimiento, favoreciendo de este modo la aplicación de altos niveles de AIW hasta el punto o muy cerca del punto necesario para asegurar la ET máxima.



Manejo del sistema de riego

Mejorar la uniformidad en la distribución del agua en el campo y maximizar la eficiencia de la aplicación son dos objetivos clave que se deben perseguir en situaciones de déficit. La meta es eliminar la pérdida no productiva de agua, tanto como sea posible, a fin de garantizar que la mayor parte del agua aplicada esté disponible para uso de la planta. Para lograr una alta eficiencia en la aplicación se requiere tomar decisiones acertadas en el calendario de riego (cuándo aplicar el riego y cuánta agua aplicar) y utilizar sistemas de riego diseñados y manejados para alcanzar la uniformidad adecuada. La falta de uniformidad cuando el suministro de agua es escaso podría dejar áreas en el huerto con niveles de suministro tan bajos que podrían ocasionar estrés hídrico severo. La uniformidad máxima alcanzable depende del método de riego. Es difícil exceder el 90 % en la práctica, pero es crítico alcanzar el nivel más alto posible con cualquier método que se utilice. Una consideración importante al determinar el calendario de riego en condiciones limitantes de agua es aprovechar toda el agua almacenada en el suelo disponible en la zona radicular del árbol, de modo que la estación termine con un perfil de suelo seco listo para ser reabastecido por la precipitación estacional, en las áreas geográficas donde esto es viable.

Modificación de las prácticas de horticultura

Poda: es posible que intensificar la poda sea un método efectivo para reducir el uso del agua, debido a que la Tr está relacionada con el tamaño de la copa y la densidad de área foliar. Sin embargo, las relaciones entre el tamaño de copa y la Tr no son lineales (véase la Figura 11) y es posible que se requiera una poda significativa para modificar la Tr. Cuando la reducción del suministro hídrico está convirtiéndose en drástica (una pequeña fracción de la Tr del árbol), una plantación madura se puede salvar durante los siguientes años mediante una poda intensa (en ocasiones denominada "descuerne"). El objetivo es retirar la mayor parte de la copa, dejando cortos solamente los armazones primarios. Esto elimina efectivamente el rendimiento durante esa estación, pero le permite al árbol sobrevivir a la sequía. Es posible que no se reanude la producción máxima en muchos años.

Raleo del fruto o aclareo de frutos: el raleo intenso del fruto bajo condiciones hídricas limitadas le permite al cultivador producir frutos de tamaños comercializables, y de este modo, aumentar el valor del cultivo con relación al raleo/aclareo normal. Esta práctica es común y produce grandes ingresos para el cultivador, aunque los rendimientos son más bajos. Asimismo, debido a que la presencia del fruto aumenta la Tr, realizar un raleo intenso puede reducir ligeramente las tasas de Tr en muchas especies arbóreas y disminuir el nivel de estrés hídrico en los árboles, lo cual permite lograr un tamaño comercialmente aceptable para los frutos restantes. Como conclusión general, cabe señalar que no existe evidencia suficiente de que estas medidas sean muy efectivas, con respecto a otras que se mencionan en esta Sección, excepto en situaciones extremas de suministro hídrico muy bajo. Además, debido a que la reducción de la transpiración asociada con el raleo del fruto está mediada por la reducción de la conductancia estomática, esta práctica podría aumentar el daño por calentamiento donde el déficit hídrico y las altas temperaturas ocurren al mismo tiempo.

Reducción de la evaporación del suelo: si se evita la escorrentía y se minimiza la percolación profunda, la única opción que queda para disminuir el uso del agua no productiva es reducir o incluso eliminar la pérdida de E. En sistemas de cobertura completa, aplicar riego con la menor frecuencia posible también minimizaría la E. Las pérdidas por evaporación en el riego por goteo son bajas, pero se pueden reducir aún más si los sistemas no se ejecutan a diario, sino cada dos o tres días. El intervalo óptimo dependerá de la profundidad del agua requerida y del tipo de suelo, dado que la percolación profunda también se debe evitar. Debido a que la profundidad del agua aplicada se reduce cuando se presenta un déficit hídrico, la configuración (duración) del riego no se debe modificar, pero el intervalo entre aplicaciones se debe ampliar (disminución en la frecuencia de riego). Ubicar las líneas de riego por goteo debajo del dosel contribuirá a la reducción de E debido a la sombra y a la capa de mantillo de hojas muertas sobre el suelo húmedo. Las redes subterráneas de riego por goteo pueden, en teoría, eliminar la E; sin embargo, se ha reportado un poco de humedecimiento de la superficie con muchos sistemas subterráneos de riego por goteo, incluso cuando la línea se ubica a 45 cm de profundidad. Parece ser que la magnitud de este problema depende de las propiedades de transporte del suelo, la profundidad de la instalación, el método utilizado para la instalación de las líneas y la duración del riego. Además, estos sistemas son relativamente costosos y es más difícil realizarles mantenimiento. Por tanto, la instalación de sistemas subterráneos de riego por goteo con el fin de reducir la E generalmente no se justifica, ya que el ahorro en comparación con el riego por goteo superficial sería muy poco en términos absolutos. En casos donde la cantidad de agua aplicada es muy poca, la importancia relativa de la E se incrementa y el reducido ahorro de E en los sistemas subterráneos de riego por goteo podría ser rentable.

Riego deficitario

Una vez que todas las medidas descritas anteriormente se han considerado y adoptado, según lo necesario, la única opción que queda para enfrentar la escasez de agua es reducir la aplicación del

agua de riego. El riego deficitario (DI) se define como un régimen donde el agua de riego aplicada es inferior a los requerimientos de ET del huerto. Cuando la tasa de riego es menor a la tasa de ET, habrá una extracción neta de agua del depósito del suelo. En tal caso, dos situaciones se pueden presentar. En el primer caso, si la cantidad de agua almacenada en el suelo es suficiente y la transpiración no está limitada por el agua del suelo, el uso consuntivo (ET) no se verá afectado a pesar de la reducción en el volumen del agua de riego. Sin embargo, si el suministro de agua del suelo es insuficiente para suplir la demanda de ET, los déficits hídricos del cultivo conducen a la reducción del crecimiento y la transpiración. En la última situación, el DI reduce la ET por debajo de su potencial máximo. Es importante tener en cuenta la sensibilidad del cultivo específico a los déficits hídricos. Como se describirá en las secciones específicas, algunos cultivos son muy sensibles a los déficits hídricos y no son susceptibles al DI, como el nogal, el aguacate y el kiwi. Otros cultivos varían de moderadamente sensibles a ligeramente tolerantes y por consiguiente, son susceptibles a estrategias de DI en grados de intensidad variable.

Estrategias de riego deficitario

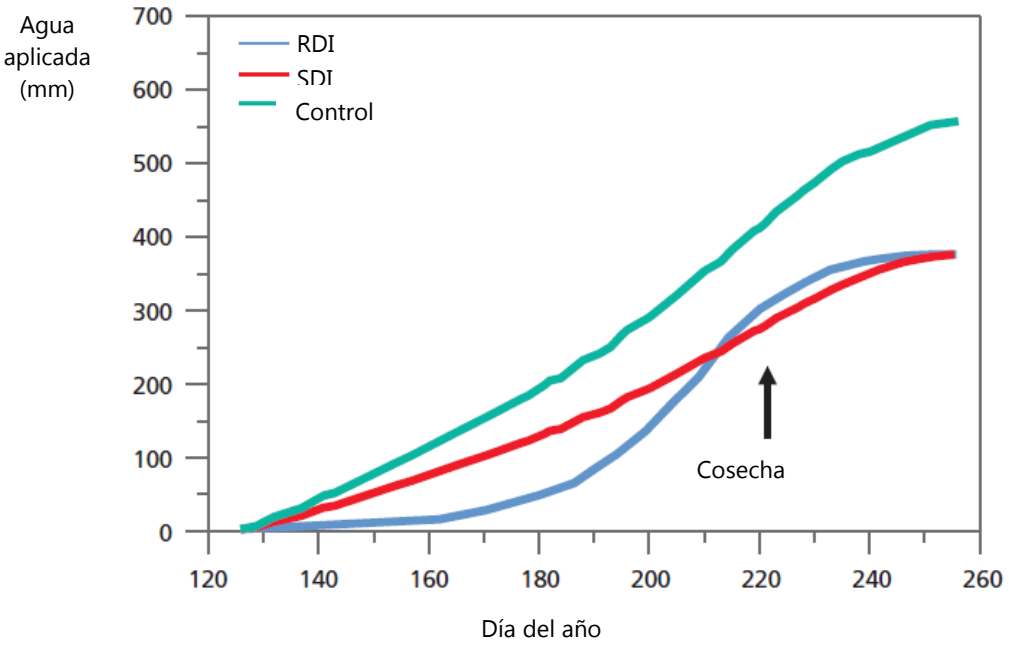
Existen muchos enfoques para el diseño de un programa de DI, pero todos siguen dos estrategias diferentes. Una de las estrategias se denomina DI continuo o sostenido (SDI), donde se aplica una fracción constante de la ET del cultivo a intervalos regulares. Si el perfil del suelo está lleno al inicio de la estación, los árboles absorben el agua del suelo para compensar los déficits; a medida que la estación avanza, el agua del suelo se agota progresivamente y los déficits hídricos aumentan con el tiempo en ausencia de precipitación. El otro enfoque se conoce como DI regulado (RDI), el cual se define como un régimen que de manera deliberada somete a árboles o vides a condiciones de estrés en etapas de desarrollo específicas del cultivo, las cuales se consideran como las menos sensibles a los déficits hídricos. El objetivo del RDI, cuando los suministros hídricos son relativamente altos, es que el impacto negativo sobre el rendimiento de productos comercializables y sobre beneficios brutos sea escaso o nulo. Cabe recalcar que bajo el RDI, los árboles se someten a déficits de riego únicamente en ciertas etapas de desarrollo, pero usualmente reciben riego completo durante las demás etapas. Por lo general, el RDI impone el estrés hídrico durante etapas en que el crecimiento reproductivo es relativamente bajo. Los déficits hídricos impuestos en estas etapas también reducen generalmente el crecimiento vegetativo (y, por tanto, los costes de poda y los potenciales problemas de quema agrícola) y puede incidir en otros procesos de la planta, a menudo mejorando la calidad del fruto. La Figura 12 presenta de manera gráfica un ejemplo de las dos estrategias de SDI y RDI, en relación con la ET_c máxima.

En situaciones de suministro hídrico abundante, el RDI está diseñado para reducir el uso consuntivo sin generar efectos negativos, además de los casos donde los déficits hídricos mejoran la calidad del fruto, mejorando los ingresos del cultivador y los beneficios netos. No obstante, el concepto de RDI también se puede utilizar en años de sequía, donde los suministros de riego disponibles son limitados. En la práctica, el gerente debe decidir si impone déficits hídricos más intensos durante los períodos de tolerancia al estrés o si empieza a ampliar el estrés a las etapas menos tolerantes al estrés de la estación, o una combinación de las dos estrategias. Por lo tanto, la programación, magnitud y duración de los períodos de estrés dependerá del suministro de agua, con el objetivo de obtener la utilidad máxima para el cultivador; tanto en la estación actual como en la siguiente.

Una forma de riego deficitario es aplicar riego de manera alterna a cada lado del árbol o vid, para generar ciclos de humedad y secado en los dos lados del sistema radicular. De este modo, solo se aplica riego a la mitad del sistema radicular en una ocasión, mientras que la otra mitad se seca. Después de algún tiempo (cada dos semanas aprox.), el sistema rota y se aplica riego al lado seco. Esta técnica se denomina secado parcial de raíces (PRD). Aunque una parte del sistema radicular siempre se encuentra en un ciclo de secado, es posible que no ocurran déficits hídricos en la planta bajo el PRD, debido a que se puede aplicar riego a la otra parte de la zona radicular para satisfacer los requerimientos de ET. Experimentos realizados y las prácticas comerciales han demostrado que bajo PRD se puede aplicar menos agua de riego que bajo riego completo, lo cual resulta en una

mayor producción por unidad de agua usada. La hipótesis es que el ciclo de secado induce la producción de señales químicas en las raíces, las cuales se trasladan a las hojas y producen el cierre estomático parcial y la regulación del crecimiento. Esto a su vez, reduce el crecimiento vegetativo y mejora la turgencia de las células del fruto, lo cual redunda en impactos positivos en el rendimiento y/o la calidad. En la práctica, la mayoría de los experimentos de PRD hasta la fecha también han impuesto DI, lo cual hace imposible diferenciar los impactos del déficit hídrico en comparación con la alternancia de ciclos de secado. De hecho, las comparaciones entre PRD y otras formas de DI, en las que se aplican los mismos niveles de riego bajo condiciones de campo, no han mostrado ninguna ventaja específica del PRD sobre el RDI, en términos de producción por unidad de agua de riego, en un número significativo de experimentos (Figura 13) (Sadras, 2009).

FIGURA 12 Patrones de agua estacional aplicada a un huerto bajo riego deficitario máximo, regulado (RDI) y sostenido (SDI).



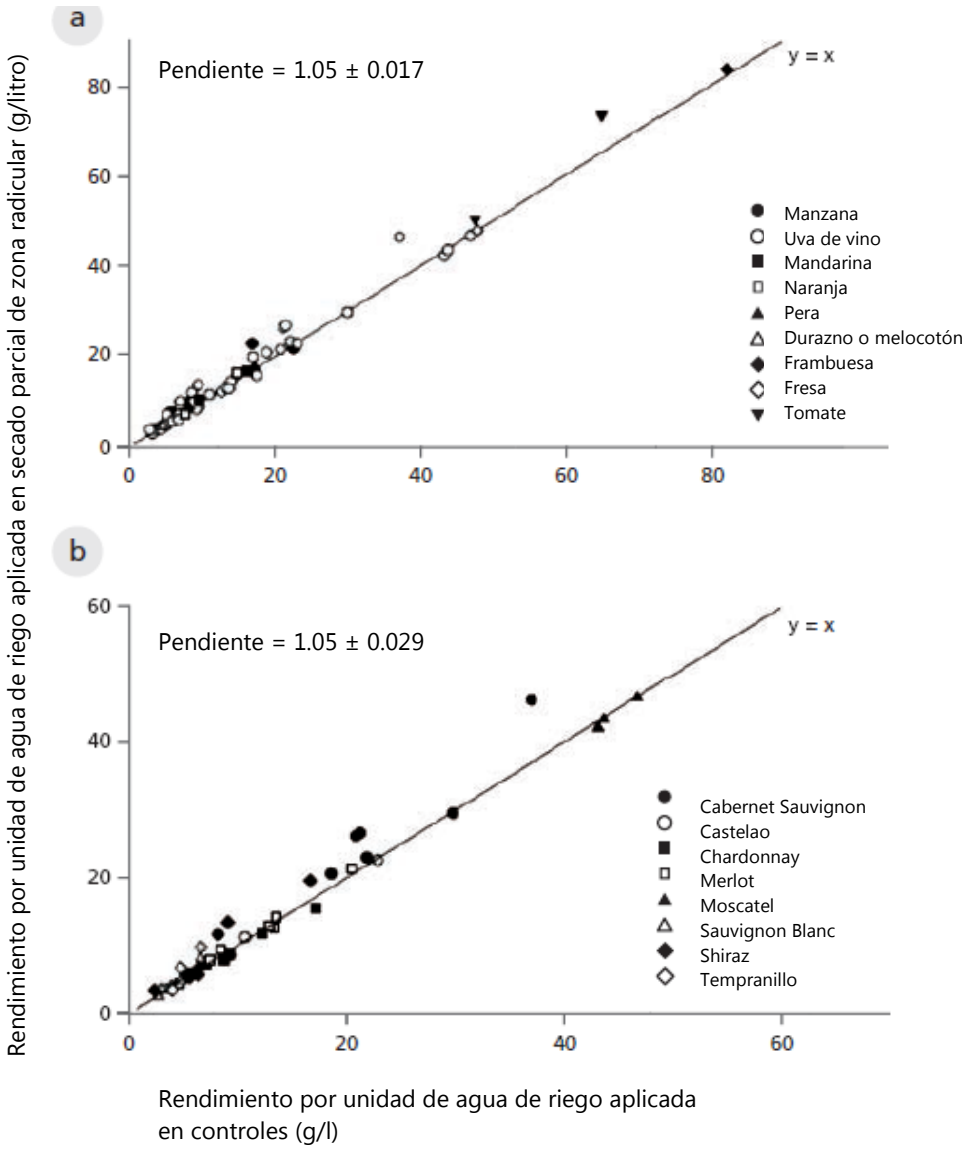
Respuestas al riego deficitario

Todas las estrategias de DI están dirigidas a controlar los déficits hídricos de los cultivos, manipulando el suministro hídrico de la mejor manera posible, a fin de mantener los ingresos de los productores en situaciones de disponibilidad limitada de agua. Contrario a las respuestas de la mayoría de los cultivos anuales, donde el rendimiento disminuye de manera lineal con la ET, bajo muchos regímenes hídricos, la modulación de los déficits hídricos tiene un impacto diferente en los cultivos arbóreos y las vides. Como ejemplo, la Figura 14 muestra que tres estrategias diferentes de DI para almendros tuvieron impactos muy diferentes en la respuesta del rendimiento al agua aplicada.

La mayoría de los enfoques actuales de manejo de RDI se basan en regar un cierto porcentaje de ET durante períodos de la estación tolerantes al estrés. Este concepto funciona relativamente bien a mediados y finales de la estación, después de que se ha agotado la precipitación invernal del depósito de humedad del suelo. Sin embargo, al inicio de la estación, el agua almacenada en el

perfil del suelo a menudo amortigua el impacto del riego deficitario sobre el estrés de la planta. Por consiguiente, aunque se reduzca el riego, probablemente habrá un retraso en términos de la generación del estrés deseado en la planta. La duración del retraso depende de la profundidad de la zona radicular, la capacidad de retención de humedad del suelo, la precipitación invernal efectiva y la demanda evaporativa de la atmósfera. Por tanto, existe una mayor necesidad de establecer indicadores precisos de estrés hídrico basados en la planta, como mediciones con la cámara de presión, al inicio de la estación cuando se utiliza RDI. Por ejemplo, una estrategia de RDI para la vid recomienda retrasar el riego hasta que se alcance un potencial hídrico foliar objetivo y luego aplicar riego con cierto porcentaje de ET hasta después de que el color del fruto cambie *(etapa de envero*).

FIGURA 13 Comparación del rendimiento por unidad de riego entre cultivos manejados con secado parcial de la zona radicular (PRD) y cultivos sometidos a riego convencional con cantidades similares de agua. (a) árboles frutales (b) detalle de variedades de vid (Sadras, 2009).

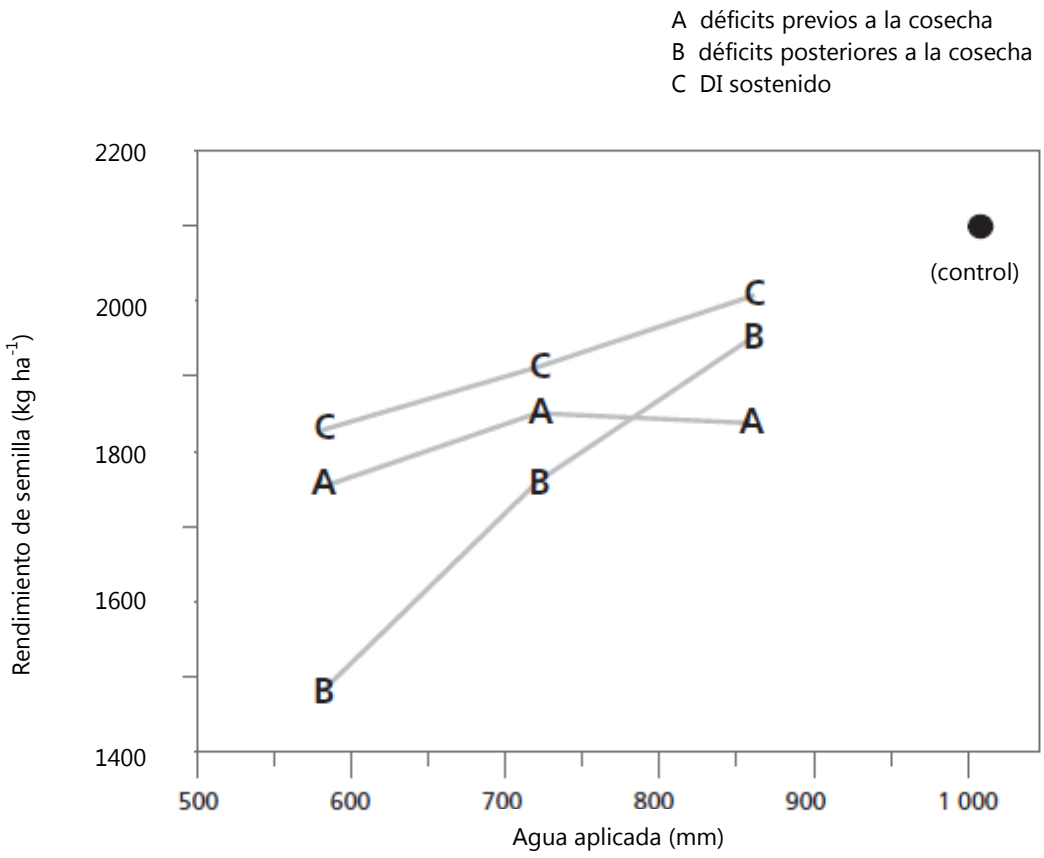


Las prácticas de DI que se analizan aquí se refieren a árboles y vides maduros. Se ha demostrado que los huertos en desarrollo no se deben de someter a estrés hasta que sus doseles hayan

alcanzado la madurez, para garantizar que se alcance la producción máxima en la etapa más temprana posible de la vida del huerto/viñedo. El crecimiento vegetativo es muy sensible a los déficits hídricos, y éstos deben evitarse, de ser posible. En consecuencia, satisfacer plenamente las necesidades de los huertos y los viñedos jóvenes es de suma importancia desde el punto de vista económico, y la asignación de insumos agrícolas totales debe tener en cuenta el objetivo de suplir completamente las necesidades de los bloques de huertos jóvenes, siempre que sea posible.

No se han realizado suficientes investigaciones sobre la fertilidad del suelo y el manejo de las plagas bajo DI que permitan realizar generalizaciones. Debido a que los fertilizantes comúnmente se aplican a través del sistema de riego, la reducción del agua aplicada tendrá como consecuencia la reducción de la cantidad de fertilizante aplicado. Esta situación debe prevenirse ajustando la programación de aplicación de fertilizante, para garantizar que se agreguen las cantidades recomendadas. Existe poca evidencia que sustente que el RDI redunda en bajos niveles de nutrientes en la planta, al menos con base en el análisis de los tejidos de las hojas. Esto puede ser porque el RDI reduce el crecimiento foliar y por tanto, las concentraciones de los tejidos son las mismas aunque se presente una menor absorción de nutrientes del suelo. Existen interacciones positivas y negativas entre el DI y la incidencia de plagas y enfermedades. En las secciones específicas de cada cultivo, se presentan consideraciones sobre el manejo de plagas relacionadas con el estrés y las enfermedades de la planta, cuando corresponde.

FIGURA 14 Respuesta de un huerto de almendros a tres regímenes de DI: DI previo y posterior a la cosecha y SDI durante cuatro años. Observe que la disminución del rendimiento es más alta para el DI posterior a la cosecha y que en este caso, el SDI es la estrategia de DI más ventajosa (según Goldhamer *et al.,* 2006).



Manejo de la salinidad bajo riego deficitario

Toda el agua de riego contiene sales, pero únicamente el agua pura se evapora de las plantas y del suelo, de modo que las sales quedan atrás. Por tanto, el proceso de riego concentra las sales en el perfil del suelo hasta el punto en que puedan alcanzar niveles perjudiciales, salvo que se lixivien fuera de la zona radicular. La tasa a la cual se concentran las sales como resultado del riego depende de la calidad del agua de riego, la cantidad de precipitación anual, las cantidades de riego y la ET_c. Si el balance de agua estacional es tal que se presenta cierta cantidad de drenaje, las sales se desplazarán de la zona radicular y se trasladarán con las aguas de drenaje por debajo de la zona radicular. En muchos casos, se requieren redes de drenaje artificial para evacuar el exceso de agua y las sales fuera de las áreas de riego a fin de garantizar la sostenibilidad de la agricultura de riego. El *Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 25* proporciona guías y procedimientos sobre la calidad del agua para evaluar los requerimientos de lixiviación, y maneras de cuantificar el impacto de la salinidad en los rendimientos de los cultivos.

Cuando se practica el DI, la cantidad de agua de riego aplicada es inferior a la ET_c, y el balance de agua de la zona radicular es tal que la lixiviación sería escasa o nula durante la estación de riego. De ahí que los riesgos de acumulación de salinidad sean mayores bajo DI que bajo riego completo. Cuando las reducciones en el suministro hídrico duran solamente uno o dos años, es posible utilizar DI, de leve a moderado, con un impacto limitado en el rendimiento e ingresos netos, y con poca

acumulación de sales. Esto obedece a que normalmente hay suficiente humedad del suelo almacenada del año previo, un año normal para contribuir a la ET, y los riesgos de salinidad son limitados si el riego completo se reanuda uno o dos años después de la imposición del DI.

Si el DI se practica a largo plazo, es preciso diseñar una estrategia de manejo de salinidad para hacer que el DI sea sostenible. En áreas donde la precipitación anual es significativa (promedio, superior a 300 mm) y el drenaje es factible, la acumulación de salinidad se controla mediante la precipitación anual por aguas con nivel de calidad de bueno a intermedio. Es posible que el agua de baja calidad requiera lixiviación adicional en años de sequía, dependiendo de los patrones de precipitación. Cuando la precipitación anual es insuficiente para lixiviar las sales, y se practica el micro-riego, las sales se acumularán y permanecerán en los límites de las zonas humedecidas por los emisores, donde podrían ser perjudiciales para el cultivo. La precipitación ligera puede mover estas sales a las zonas radiculares activas, y esta es la razón por la cual en algunas áreas secas se implementan sistemas de riego por goteo cuando se prevé precipitación ligera. En ocasiones, se utilizan sistemas de riego de cobertura completa para lixiviar las sales después de la caída de las hojas en plantaciones de árboles caducifolios. Supervisar la salinidad es esencial para anticipar posibles problemas, particularmente en áreas secas y con aguas de riego de calidad deficiente.

Una consideración importante en el caso de la salinidad es que es un problema gradual que, en la mayoría de los casos, requiere tiempo para acumularse. La experiencia limitada con el DI es que las sales se pueden controlar de manera periódica, incluso en áreas secas, en los años de precipitación intensa o cuando las condiciones de suministro de riego permiten retomar el riego completo una vez cada varios años. No obstante, para sostener las plantaciones durante su ciclo de vida normal bajo el DI, la supervisión de la salinidad y la implementación de una estrategia coherente de manejo para controlar la salinidad son cruciales.

BIBLIOGRAFÍA

Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suárez, L., y Fereres, E. 2009. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47: 722 - 738.

Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F.J. y Fereres, E. 2001. Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards. *Irrigation Science* 20:65-71.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Fereres, E., Martinich, D.A., Aldrich, T.M., Castel, J.R., Holzapfel, E. y Schulbach, H.1982. Drip irrigation saves money in young almond orchards. *California Agriculture* 36:12-13.

Goldhamer, D.A., Viveros, M. y Salinas, M. 2006. Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrigation Science* 24(2):101 -114.

Orgaz, F., Testi, L., Villalobos, F.J. y Fereres, E. 2006. Water requirements of olive orchards II: determination of crop coefficients for irrigation scheduling. *Irrigation Science* 24:77-84.

Sadras, V.O. 2009. Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. *Irrigation Science* 27: 183-190.

Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F. y Fereres, E. 2006. Water requirements of olive orchards: I simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrigation Science* 24:69-76.

Testi, L., Goldhamer, D.A., Iniesta, F. y Salinas, M. 2008. Crop Water Stress Index Is a Sensitive Water Stress Indicator in Pistachio Trees. *Irrigation Science,* 26: 395-405.

LECTURAS ADICIONALES

A continuación se encuentran varias referencias generales sobre riego de árboles frutales y vides, las cuales proporcionan información adicional a esta Sección.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop Water Requirements. *Estudio FAO: Riego y drenaje* n.º 56, Roma, FAO.

Ayers, R.S. y Westcot, D. W. 1985. La calidad del agua en la agricultura. *Estudio FAO: Riego y drenaje* n.º 29, Roma, FAO.

Behboudian, M.H., Girona, J., Marsal, J. y López, G. 2010. Quality and yield responses of deciduous fruit to reduced irrigation. *Horticultural Reviews.* 21: 149-188.

Charlesworth, P. 2005. Soil water monitoring. Irrigation Insights, n.º 1. Segunda edición, 96 págs. Disponible en: http://www.irrigationfutures.org.au/imagesDB/news/soilwatermonitoring2ed.pdf

Doorenbos, J. y Kassam, A.H. 1979. Respuesta del rendimiento al agua. *Estudio FAO: Riego y drenaje* n.º 33, Roma, FAO.

Fereres, E., Goldhamer, D. y Parsons, L.R. 2003. Irrigation water management of horticultural crops. Historical Review Compiled for the American Society of Horticultural Science's Hundredth Anniversary. *Horticultural Science* 38(5):1036-1042.

Fereres, E. y Soriano, M.A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58:147-159.

Fereres, E. y Goldhamer, D.A. 1990. Deciduous fruit and nut trees. En: Stewart, B.A. y Nielsen, D.R., eds. *Irrigation of agricultural crops,* American Society of Agronomy Monograph. n.º 30, Madison, Wisconsin. págs. 987-1017. (Monografía)

Fereres, E. y Evans, R.G. (eds). 2006. Irrigation of Fruit Trees and Vines. Edición especial de *Irrigation Science,* 24:55

Girona, J., del Campo, J., Mata, M., López, G. y Marsal, J. 2011. A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters. *Irrigation Science.* 29:55-63.

Jones, H. G. 2004. Irrigation Scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany,* 55:2427-2436.

Lamm, F.R., Ayars, J.E. y Nakayama, F.S. 2007. *Microirrigation for Crop Production. Volumen 13: Design, Operation and Management.* Elsevier Publications. 642 págs.

Marsal, J., López, G. y Girona, J. 2008. Recent advances in regulated deficit irrigation (RDI) in woody perennials and future perspectives. *Acta Horticulturae* 792:429-439

Naor, A. 2006. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Horticultural Reviews* 32:111-166.

Shaffer, B. y Anderson, P.C. 1994. Handbook of Environmental Physiology of Fruit Crops: Temperate Crops, Volumen I. Boca Ratón, Florida, EE. UU., CRC Press.

White, S. y Raine, S.R. 2008. *A growers guide for plant based sensing for irrigation scheduling.* National Centre for Engineering for Agriculture Publication 1001574/6, USQ, Toowoomba, Australia. 52 págs.

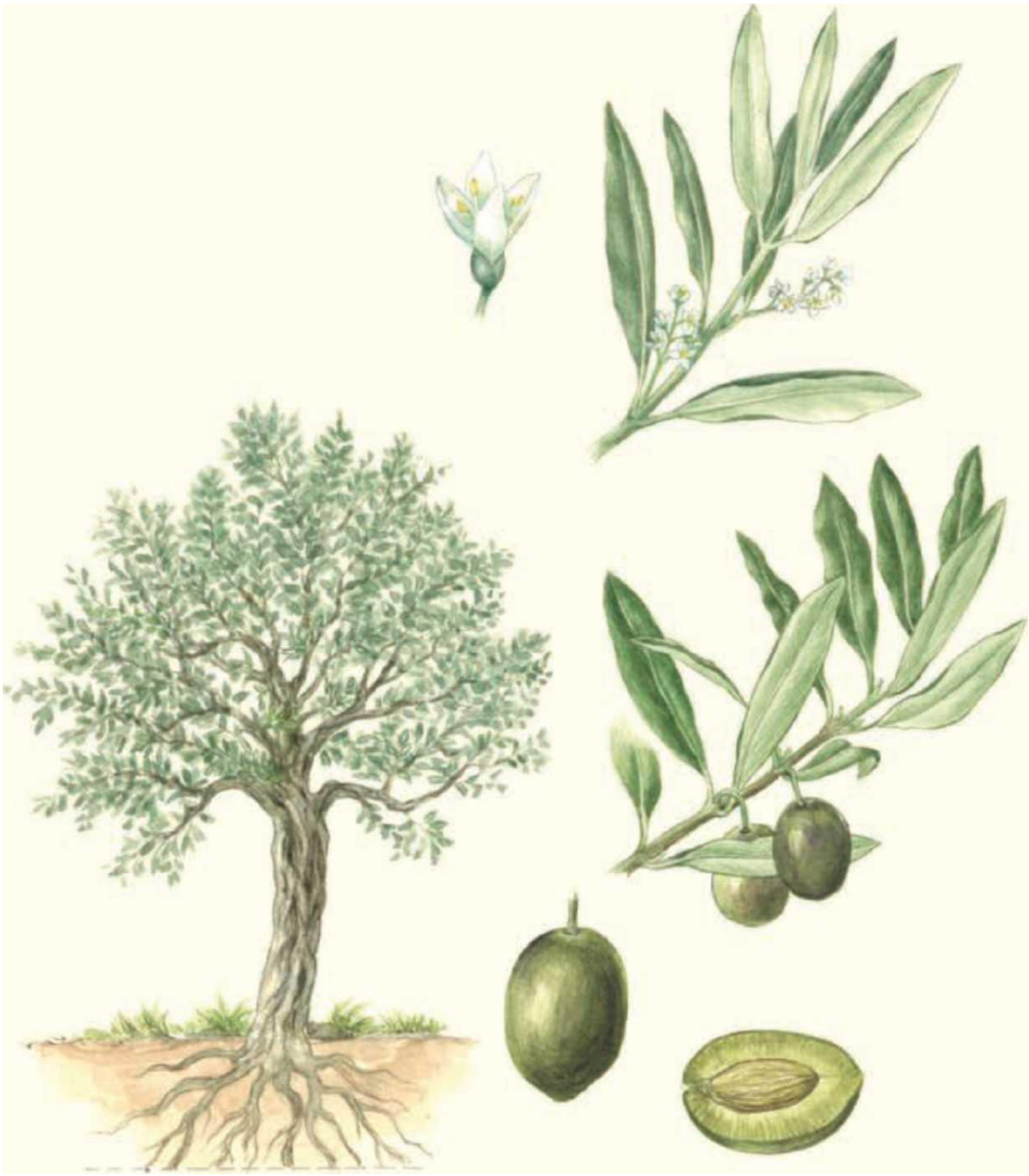
4.1 Árboles frutales y vides

Editor:

Elías Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)

Ilustraciones botánicas:

Margherita Bongiovanni
(Anteriormente catedrática de Diseño e Historia del Arte y Bellas Artes, Ministerio de Educación, Roma, Italia)



Olivo

AUTORES PRINCIPALES
Riccardo Gucci, (Universidad de Pisa, Pisa, Italia), Elías Fereres (Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)

AUTOR COLABORADOR
David A. Goldhamer (anteriormente Universidad de California, Davis, EE. UU.; en la actualidad, Profesor emérito de Extensión Cooperativa)

Olivo

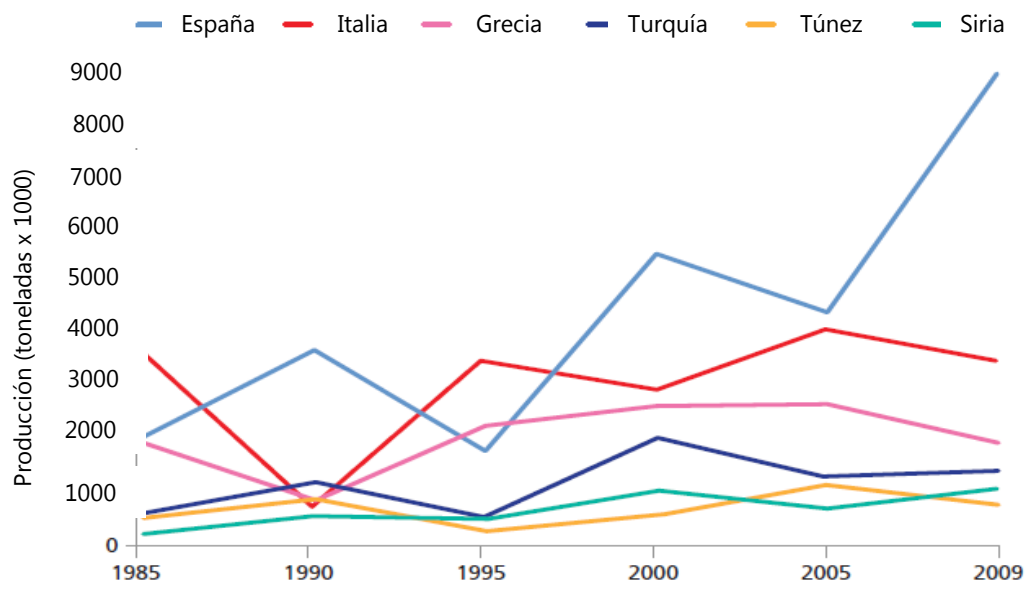
DESCRIPCIÓN GENERAL

El olivo *(Olea europaea L.)* es un árbol perennifolio sembrado principalmente entre los 30 y 45° de latitud en los dos hemisferios. En el año 2008, el área total cosechada superó las 10 500 000 ha, de las cuales el 95.5 % está concentrado en diez países alrededor del mar Mediterráneo (FAO, 2011). España, Italia y Grecia son los principales productores de aceite de oliva virgen, seguidos de Túnez, Siria, Turquía y Marruecos (años 2002-2008). Cerca del 90 % de la producción mundial de olivas/aceitunas es para extracción de aceite, el 10 % restante, para aceitunas de mesa. El área cultivada de olivos en el mundo, en el año 2009, era de más de 9.2 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 2.1 ton/ha (FAO, 2011). La Figura 1 muestra la evolución de la producción de olivas/aceitunas durante las últimas décadas en los principales países. Los países de la Unión Europea producen el 78 % y consumen el 68 % del aceite de oliva del mundo.

Los olivos se han plantado con baja densidad durante siglos, sin riego, en tierras marginales en condiciones del clima mediterráneo, debido a su alta resistencia a la sequía, la caliza y la salinidad. Las densidades típicas de las plantaciones tradicionales están entre 50 y 100 árboles/ha, con árboles severamente podados para estimular el crecimiento vegetativo y la renovación de la superficie de fructificación, y suelo labrado periódicamente. Los rendimientos de fruto son bajos, de menos de 1 hasta 5 ton/ha de olivas o aceitunas. Aunque las plantaciones tradicionales varían en composición de variedades, densidad de árboles, sistema de poda, grado de mecanización y aportes químicos, aún son el principal sistema de producción y el más difundido en el paisaje mediterráneo. Los huertos intensivos tienen una densidad entre 200 y 550 árboles/ha, que se traduce en una fracción mayor de radiación interceptada, lo que a su vez conduce a una mayor productividad por unidad de área de suelo que los sistemas tradicionales, particularmente durante los primeros 10 años de producción. Los árboles se podan dejando solamente un tronco para la cosecha mecanizada y el suelo a menudo se maneja con cobertura temporal o permanente de gramíneas, para reducir la erosión y facilitar el tráfico en los períodos húmedos. En áreas de precipitación anual superior a 600 mm, la producción se puede mantener en condiciones de secano en suelos con buena capacidad de retención de agua. Sin embargo, el riego juega un papel importante en las áreas más secas y/o en suelos con capacidad limitada de almacenamiento de agua. En los demás sitios, el riego juega un papel importante para estabilizar los rendimientos en los años de

baja precipitación. El riego se ha vuelto común en los huertos intensivos, puesto que permite el comienzo temprano de la producción (desde el segundo al cuarto año después de la plantación), altos rendimientos (promedios hasta 10-15 ton/ha) bajo condiciones óptimas y menos variabilidad debida a la producción alternante (becaría).

FIGURA 1 Tendencias en la producción de olivas o aceitunas en los principales países (FAO, 2011).



Consideraciones de calidad

De las varias categorías de aceites de oliva, definidas de acuerdo con la legislación de la Unión Europea (Reg. EEC 2568/91, UE 702/07 y 640/08) y con gran aceptación internacional, el concepto de calidad se refiere solamente al aceite de oliva virgen (AOV), el principal producto de la industria olivarera. Con el fin de calificar como AOV, es necesario que el aceite satisfaga los parámetros analíticos y se le hagan pruebas a sus características organolépticas, y sean aprobadas por un panel de expertos. Así mismo, la percepción actual de calidad principalmente se basa en las propiedades organolépticas y las relacionadas con la salud, las cuales están íntimamente relacionadas con la concentración y la composición de las fracciones fenólicas y volátiles, respectivamente. El ácido oleico es el ácido graso más abundante, seguido del ácido palmítico, el ácido linoleico y otros que no superan el 2 % de la composición de ácidos grasos. La composición de los ácidos grasos depende de la variedad y cambia con las condiciones climáticas y el avance de la maduración. La relación entre los ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados primero aumenta, luego alcanza el máximo y después disminuye en los frutos demasiado maduros. La concentración de los compuestos fenólicos en el fruto, y por consiguiente en el aceite, depende de la variedad y alcanza un máximo al principio de la madurez, cuando la piel (pericarpio) está parcialmente verde, para disminuir abruptamente en los frutos demasiado maduros. Las características cualitativas de las aceitunas de mesa son similares a las de otros frutos de hueso usados para consumo fresco e incluyen tamaño del fruto, relación pulpa-semilla, firmeza de la pulpa, color y concentración de carbohidratos solubles.

La mayoría del área sembrada de olivos en el mundo está compuesta de los dos sistemas descritos anteriormente. Sin embargo, en los últimos 15 años, se han desarrollado huertos de olivos de muy alta densidad, tipo seto, (de 1000 a 2000 árboles por hectárea) que han reducido más los costos de cosecha por el uso de máquinas para cosechar por encima de los árboles. El riego es necesario, debido a la mayor demanda de ET_c de los doseles densos y el bajo volumen de suelo disponible para cada árbol. Los rendimientos promedio pueden ser bastante altos (5-15 ton/ha) en los primeros años de producción (tercero al séptimo año después de la siembra) y pueden promediar 10-14 ton/ha en un período de 10 años, pero se cuestiona la sostenibilidad de estos altos rendimientos a largo plazo, y la adaptación de muchas variedades a este sistema de producción. El área dedicada a estas plantaciones súper intensivas es de 100 000 hectáreas aproximadamente en todo el mundo.

ETAPAS DE DESARROLLO EN RELACIÓN CON LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

El rendimiento es el resultado de tres procesos principales de desarrollo que ocurren entre la floración y la cosecha: el cuajado del fruto, el crecimiento del fruto y la acumulación de aceite en la pulpa del fruto (mesocarpo). El crecimiento vegetativo es crítico en términos de producción de frutos del olivo, porque la floración y el cuajado se originan en las yemas axilares crecidas los años anteriores. El ciclo reproductivo desde la inducción de la yema floral hasta la maduración del fruto tarda 15-18 meses, dependiendo de la variedad y las condiciones de crecimiento, ya que comienza en verano y termina en otoño del siguiente año. Las flores normalmente nacen en inflorescencias en la axila de las hojas nacidas en madera de un año, donde la yema terminal del brote es casi siempre vegetativa (Rapoport, 2008). El crecimiento de los brotes comienza con el desborre de las yemas en primavera y se reanuda cuando la temperatura supera los 12 °C, siempre y cuando no se inhiba por temperaturas por encima de los 35 °C, el déficit hídrico del suelo u otros estreses ambientales. Un segundo crecimiento de brotes es común después del verano. Los olivos son sensibles al encharcamiento y a las temperaturas por debajo de -10 ºC.

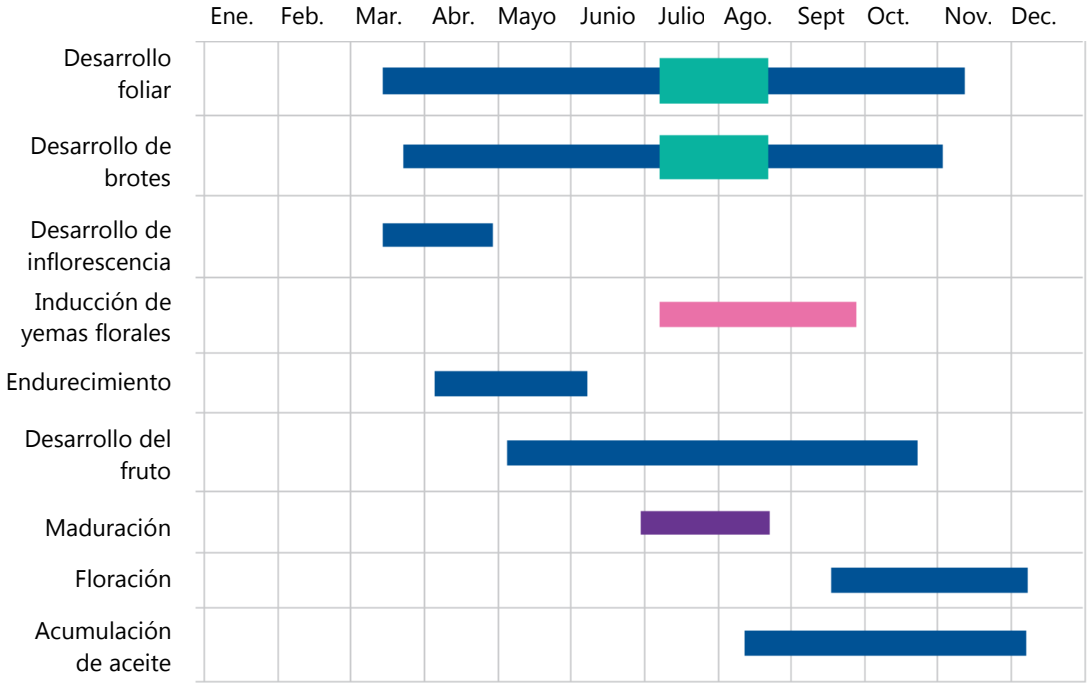
Se necesita una cantidad mínima de horas frío para la diferenciación de las yemas florales. No contar con la cantidad mínima de horas frío puede provocar una formación escasa e irregular de yemas florales. Los requerimientos de horas frío dependen de la variedad, pero se necesitan al menos 10 semanas por debajo de 12 ºC para una floración abundante. Las principales etapas fenológicas de los olivos, descritas según la escala de dos dígitos de Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt y Chemical industry (BBCH), incluyen desborre de las yemas, desarrollo de las yemas, expansión foliar completa, comienzo del desarrollo de los grupos florales, elongación completa de los grupos florales, plena floración, cuajado del fruto, desarrollo del fruto, madurez y senescencia. En la Figura 2 se indica la secuencia temporal de los principales procesos de desarrollo.

Los olivos florecen a finales de primavera, uno o dos meses después de muchos árboles caducifolios; el momento y la duración dependen de la variedad, la temperatura y la disponibilidad de agua en el suelo. El cuajado de frutos generalmente es bajo (menos de 2 % de flores) pero en condiciones subóptimas (temperatura, lluvias, viento) se puede reducir más. El crecimiento del fruto aparentemente sigue el típico patrón doble sigmoidal del fruto de hueso, aunque se cuestiona un poco si este patrón es inherente al desarrollo del fruto del olivo o si es consecuencia de la interacción con las restricciones ambientales de mediados de verano, como la alta temperatura y la baja disponibilidad de agua. El endurecimiento de la semilla del fruto ocurre cerca de dos meses después del cuajado del fruto. La acumulación de aceite en el fruto es proporcional a la radiación solar interceptada y se vuelve considerable al final del verano para la mayoría de variedades, justo después de finalizar la lignificación masiva de la semilla. Al momento de la cosecha, los frutos contienen entre 10 y 25 % de aceite con respecto al peso fresco, dependiendo de la variedad, la carga de producción y las condiciones de crecimiento. Los patrones de acumulación de aceite en el mesocarpo siguen una curva sigmoidal simple, pero pueden variar dependiendo de la variedad y de las condiciones ambientales.

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

Los olivos son muy resistentes a la sequía y muestran una alta capacidad de recuperación después de períodos prolongados de sequía. Los árboles pueden rehidratarse completamente a los tres días siguientes al riego después de un déficit hídrico que alcanzó un potencial hídrico foliar (LWP) de -4.0 MPa. Incluso durante una sequía severa que disminuyó el LWP a -8.0MPa, los árboles se rehidratan en menos de una semana luego del comienzo de las lluvias (Connor y Fereres, 2005). No obstante, al igual que para todas las plantas terrestres, el crecimiento expansivo de las hojas, ramas, fruto y tronco del olivo es sensible a los déficits hídricos. El estrés hídrico también afecta la apertura estomática y a fotosíntesis. Está comprobado que los estomas del olivo se cierran parcialmente durante el día (Fereres, 1984) en respuesta a los incrementos del déficit de presión de vapor, incluso si los árboles están bien regados, con sus correspondientes disminuciones de asimilación de CO_2. La tasa fotosintética de la hoja es relativamente alta, del orden de 12 a 20 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, pero se reduce durante y después del estrés hídrico debido al cierre estomático. Cuando los déficits hídricos son severos (LWP por debajo de -4 a -5 MPa), la tasa fotosintética no supera un tercio de los valores normales, alcanzando un máximo temprano en la mañana y después disminuyendo durante el día (Angelopulos *et al.,* 1996).

FIGURA 2 Ocurrencia y duración de las principales etapas fenológicas de los olivos durante el período de crecimiento (n). La inducción de las yemas florales ocurre durante el verano del año anterior (n-1). El desarrollo de las hojas y de los brotes a menudo se inhibe por altas temperaturas y déficit hídrico durante el verano (sombra vertical). Adaptado de Sans-Cortes *et al.,* (2002).



El sistema radicular del olivo es extenso y vigoroso; por tanto, puede explorar el perfil de suelo completamente después de los primeros años del establecimiento de los árboles. En general, se puede asumir que la mayoría de las raíces absorbentes están en el primer metro de profundidad.

Sin embargo, en suelos aluviales profundos, las raíces pueden llegar a 2-3 m de profundidad o más, mientras que en suelos marginales la profundidad de raíces puede ser inferior a 0.5 m. Dada la capacidad de los olivos de disminuir su LWP a -7 MPa o menos, el contenido de humedad del suelo en partes de la zona radicular fácilmente puede alcanzar valores por debajo del punto de marchitez permanente estándar. Dada la forma de la curva de liberación de humedad de la mayoría de suelos, la cantidad adicional de agua extraída sería pequeña. Sin embargo, estas cantidades pequeñas pueden ser cruciales para sobrevivir en sequías extremas.

Como los olivos florecen tarde, el riesgo de daños por bajas temperaturas es considerablemente bajo; sin embargo, el riesgo de verse afectados por estreses hídricos y/o por temperaturas altas en el clima mediterráneo es mayor, y el crecimiento del fruto también se retrasa en el verano, pues normalmente es un período extendido de escasez de agua. Se ha observado que para los árboles en condiciones de secano en años en que la lluvia de invierno ha sido muy limitada, la floración y el cuajado del fruto son procesos bastante sensibles a los déficits hídricos. Así, el estrés hídrico debería evitarse desde el desarrollo floral hasta el cuajado en primavera. Sin embargo, en climas relativamente húmedos (p. ej., norte y centro de Italia) el estrés rara vez se desarrolla en primavera y el riego normalmente es innecesario. Una vez cuajado el fruto, crece más o menos de manera lineal por división celular y subsiguiente expansión, a menos que los déficits hídricos y las altas temperaturas disminuyan su tasa de crecimiento. El crecimiento inicial rápido del fruto (Etapa I) y el período en que el aceite se acumula activamente en el fruto (Etapa III) también son sensibles al déficit hídrico.

Dado que los déficits hídricos reducen el crecimiento del fruto, el riego que evita los déficits hídricos aumenta el tamaño del fruto –aunque el efecto es mediado por la cantidad de frutos nacidos en el árbol. Una vez ha cuajado el fruto, su tasa de crecimiento puede disminuir debido a los déficits hídricos, pero el crecimiento se reanuda rápidamente cuando se mitiga el estrés a través de la lluvia o riego. La recuperación completa del crecimiento del endocarpio ocurre incluso después de varias semanas de déficit, mientras que la recuperación del crecimiento del mesocarpo es menos segura. La relación pulpa-semilla –una característica importante de la calidad tanto para la aceituna de mesa como para el aceite de oliva– aumenta en condiciones de riego; pero se ha observado que déficits hídricos leves durante el desarrollo del fruto tienen un impacto positivo en dicha relación (Gucci *et al.,* 2007).

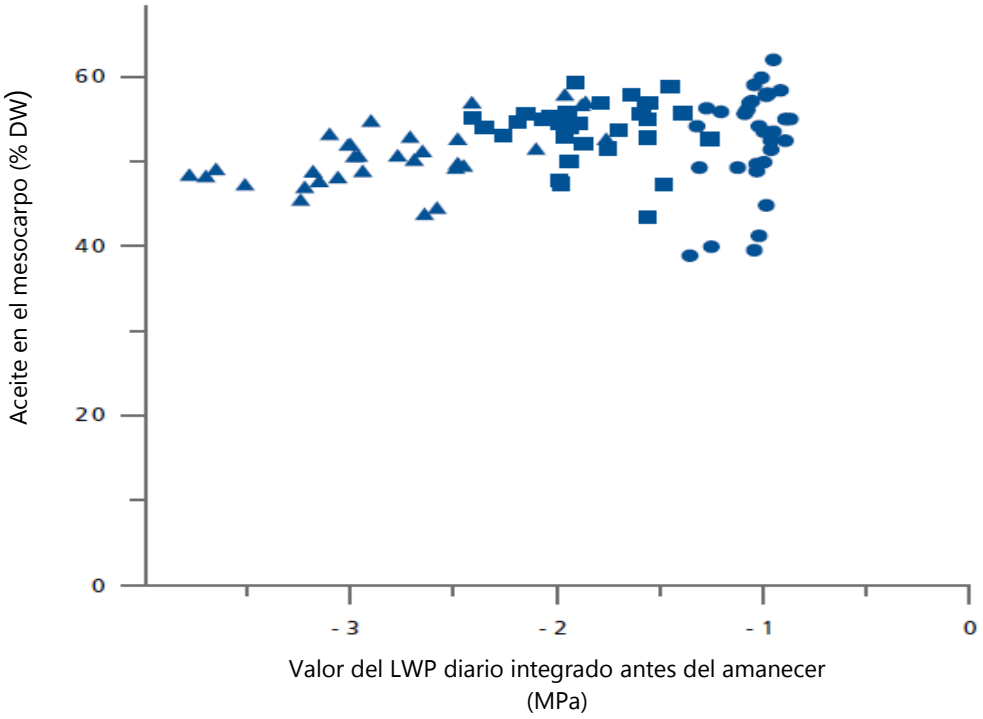
La disponibilidad de agua en el suelo afecta el cambio de color y la maduración del fruto. El efecto del riego en el contenido de aceite aparentemente puede ser contradictorio, puesto que afecta de diferentes maneras el contenido de humedad y el proceso de acumulación de aceite en el fruto. Está comprobado que el estrés severo durante el período de acumulación de aceite (para la mayoría de variedades en el hemisferio norte, desde mediados de agosto hasta fines de octubre) reduce el porcentaje de aceite con respecto al peso seco al momento de la cosecha. A medida que el estrés disminuye su intensidad, el porcentaje de aceite aumenta, aunque a una tasa relativamente baja. En condiciones sin estrés aumenta la variabilidad de los datos sobre la relación entre el LWP antes del amanecer y el contenido de aceite, y la concentración de aceite puede ser incluso menor que para los frutos levemente estresados (Figura 3).

Aunque el riego normalmente no altera la composición de los ácidos grasos o los parámetros básicos empleados para la clasificación de los AOV (p. ej., acidez libre, índice de peróxido, índices de espectrofotometría), el aumento en el volumen del agua aplicada disminuye la concentración de los compuestos fenólicos en el aceite, principalmente, la concentración de los derivativos secoiridoides de los aceites, como 3,4-DHPEA-EDA, 3,4-DHPEA-EA y p-HPEA-EDA (Gómez-Rico *et al.,* 2007 y Servili *et al.,* 2007), que actúan como antioxidantes naturales durante el almacenamiento del aceite y cumplen funciones importantes en la dieta de los seres humanos y en la prevención de enfermedades cardiovasculares. Como resultado, los aceites de huertos regados normalmente son menos amargos y acres que los de secano (Servili *et al.,* 2007).

Valoración del estado hídrico del árbol

El método establecido para medir el estado hídrico del árbol es la medición del potencial hídrico del tallo o del potencial hídrico foliar. Las hojas expuestas se usan para este último, mientras que las hojas cubiertas o sombreadas se usan para el SWP; en algunos casos se han usado las ramas terminales pequeñas para caracterizar el estado hídrico del árbol. El LWP antes del amanecer es un indicador fiable del estado hídrico del árbol en los árboles maduros, pero no es una práctica conveniente porque se deben tomar los datos temprano en la mañana.

FIGURA 3 Relación entre el aceite en el mesocarpo con respecto al peso seco medido al momento de la cosecha y el potencial hídrico foliar (LWP) antes del amanecer para la variedad Leccino de árboles de olivo, bajo tres regímenes de riego durante dos años consecutivos (adaptado de Gucci *et al.*, 2007).



El LWP medido a mediodía en las hojas expuestas depende no solo de la disponibilidad de agua en el suelo sino de las condiciones ambientales que influyen en la conductancia del dosel durante el día. Los valores del potencial hídrico de las hojas expuestas son más variables, puesto que se ven afectados por el grado de apertura estomática. Cuando los estomas están completamente abiertos, el gradiente entre el tallo y el LWP bajo la luz solar es alrededor de 0.5 MPa cuando el suministro de agua es adecuado. Dicho valor puede incrementarse (hasta 1 MPa) a medida que aumenta el estrés hídrico, pero tiende a disminuir de nuevo a medida que se cierran los estomas.

El potencial hídrico del tallo (SWP) se considera un indicador más fiable del estado hídrico del árbol que el LWP a mediodía, por ser menos dependiente de los cambios diurnos de la radiación y la humedad. El SWP a mediodía de los olivos con suministro de agua adecuado, varía entre -0.5 y -1.2 MPa, dependiendo de la demanda evaporativa, con una tendencia a disminuir –incluso a valores menores– a mediados o finales de verano en condiciones de alta demanda de evapotranspiración

(Giménez *et al.,* 1997). Se han medido solamente de manera ocasional valores del SWP para el olivo superiores a -0.5 MPa. Los valores típicos de referencia para el SWP a mediodía para olivos maduros plenamente productivos varían entre -1.0 y -1.2 MPa en días soleados de verano, con ET_o de 5-6 mm/día.

En condiciones de déficit hídrico, el estrés se desarrolla y los valores del SWP disminuyen. Los valores típicos del SWP para árboles moderadamente estresados están entre -1.7 y -2.5 MPa, y se vuelven severos cuando se aproximan a -3.5 y -4.0 MPa. Aunque los olivos son excepcionalmente resistentes a la sequía, y se han medido valores del SWP o del LWP tan bajos como -7.0 a -8.0 MPa en olivos en condiciones de secano durante períodos severos de sequía (Fereres, 1984), estos valores deberían considerarse excepcionales y cercanos al estado de supervivencia, más que valores aceptables para obtener rendimientos satisfactorios.

El uso de sensores de desplazamiento para monitorear las fluctuaciones del diámetro y del crecimiento del tronco del olivo ha arrojado información que confirma la alta sensibilidad del crecimiento expansivo a los déficits hídricos. Estos sensores altamente sensibles podrían usarse en plantaciones jóvenes e intensivas donde el objetivo sea maximizar el crecimiento del dosel y alcanzar una producción plena tan pronto como sea posible. Los sensores de flujo de la savia también se han usado para determinar cambios en la velocidad de la savia, los cuales son indicadores de la tasa de transpiración y de sus cambios en respuesta a los déficits hídricos. Todos estos instrumentos aún están en etapas de investigación y desarrollo, y aún no se usan comercialmente para la programación del riego.

REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

Los olivos soportan períodos prolongados de sequía y pueden sobrevivir en plantaciones con muy baja densidad, en climas con solamente 150-200 mm de precipitación anual. Sin embargo, la producción económica requiere que la precipitación o el riego anual sea mucho mayor. En la Tabla 1a se resumen los valores del coeficiente de cultivo (K_c) desarrollados en distintos ambientes y propuestos por varios autores. El rango de valores del K_c es bastante amplio, variando de menos de 0.5 hasta casi 0.75, con valores promedio entre 0.55 y 0.65, dependiendo de la estación. Al final de la tabla 1b se presenta una síntesis de las estimaciones reales del K_c desarrolladas recientemente (Fereres *et al.,* 2011).

A pesar de la naturaleza perennifolia del olivo, el K_c no es constante durante el año, debido a las respuestas de la transpiración del árbol a factores endógenos y ambientales. Las mediciones han mostrado que la transpiración relativa es más baja en primavera y más alta a principios de otoño. Sin embargo, el K_c debe reflejar la tasa de evaporación de la superficie del suelo, la cual es bastante alta en primavera en muchos ambientes mediterráneos. Entonces, los valores del K_c que reflejan el uso del agua de los huertos de olivos no difieren tanto entre primavera y otoño (véase la Tabla 1). A mediados de verano se encuentran valores relativamente bajos del K_c debidos al cierre estomático parcial en respuesta al alto déficit de presión de vapor.

Si se necesitan estimaciones más precisas del uso del agua, se ha propuesto un método alternativo para calcular la transpiración y la evaporación de manera independiente (Orgaz *et al.,* 2006) (Véase Capítulo 4, Cuadro 5). Para producción de aceitunas de mesa o enlatadas, se recomienda el rango más alto de valores del K_c. Los coeficientes de cultivo deberían incrementarse más (hasta cerca de 0.8 y 1.0 en invierno y comienzos de primavera, dependiendo del tipo de cultivo de cobertura y su densidad) si el piso del huerto tiene cobertura de gramíneas permanente.

TABLA 1a Coeficientes de cultivo (K_c) mensuales empleados para huertos de olivo en diferentes regiones de cultivo y valores promedio recomendados.

Lugar, región	Latitud	ET_o (mm)	Precipitación (mm)	Mar.	Abr.	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.
Bibbona, Toscana	43º 16N	1000	772 (media 30 años)	-	-	-	0.60	0.55	0.65	0.65	-	-
Metaponto, Basilicata	40º 22 N	1270	492	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5	0.5	0.6	0.65	-
Sassari, Cerdeña	40º 22 N	-	-	-	0.55	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.55	-
Córdoba, Andalucía	37º 50 N	1420 (media de 3 años)	639 (media de 3 años)	0.65	0.6	0.55	0.55	0.5	0.5	0.55	0.6	0.65
Fresno, California	36º 44	-	-	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	-
Benevento, Campania	41º 06 N	1240 (media 20 años)	714 (media 20 años)	-	-	-	0.65	0.65	0.65	0.65	-	-
Valores recomendados, cultivados al desnudo	-	-	0.45* a 0.75	0.45 a 0.75	0.5* a 0.65	0.55	0.55	0.5 a 0.55	0.5 a 0.55	0.55 a 0.6	0.6 a 0.65	0.6 a 0.65

* *En invierno y primavera solamente, el K_c bajo aplica para climas secos y fríos, mientras que el K_c alto aplica para áreas humedecidas frecuentemente por la lluvia.*

TABLA 1b Resumen de los valores recomendados del K_c para los olivos.

Clima*	Semiárido	Árido
Primavera	0.56-0.75	0.45-0.55
Verano	0.50-0.55	0.50-0.55
Otoño	0.60-0.70	0.55-0.65
Invierno	0.65-0.75	0.40-0.55

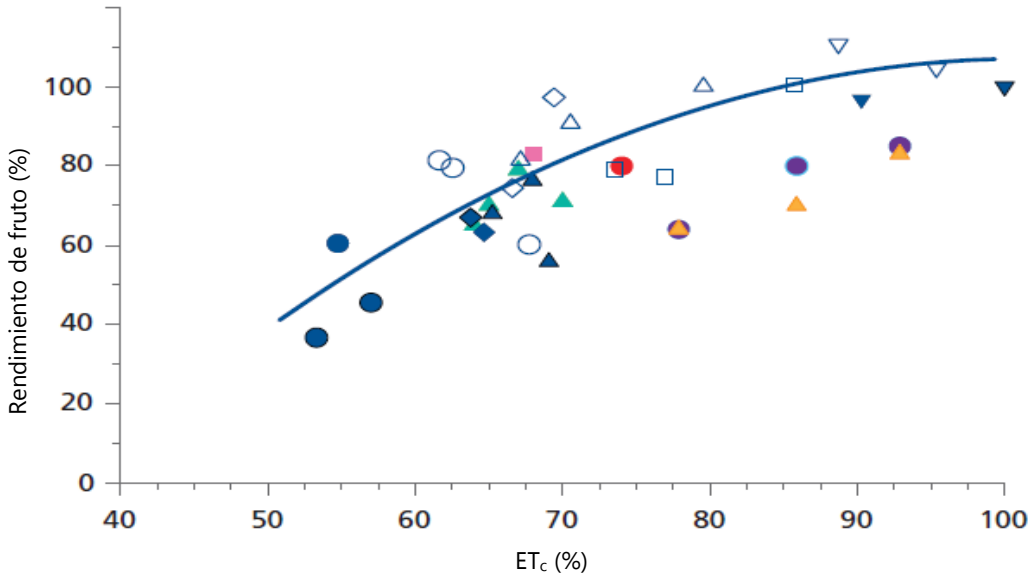
* *Climas tipo mediterráneo; el etiquetado como semiárido tiene valores de precipitación estacional de 500 mm o más, principalmente entre otoño y primavera, mientras que el clima árido tendría menos de 400 mm de precipitación y es más continental, con inviernos relativamente fríos. Los valores más altos del K_c del rango deben ser usados para situaciones de precipitación alta. Valores del K_c para ser usados con la ET_o calculada según el estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 56.*

FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN DEL AGUA

El rendimiento de fruto del olivo disminuye a medida que la ET_c disminuye por debajo de su máximo. Sin embargo, se ha encontrado que la disminución de la producción apenas se detecta

con reducciones pequeñas de la ET_c (Figura 4). Sin embargo, a medida que se reduce más la ET_c, los rendimientos disminuyen más. Por tanto, la curva de respuesta del rendimiento (fruto o aceite) a la ET_c es casi lineal a niveles bajos de consuntivo de agua, pero se nivela cuando el consumo de agua es alto. Como resultado, las curvas de respuesta globales son parabólicas y se pueden describir como ecuaciones de segundo orden, como la presentada en la Figura 4. La forma de la curva implica que la productividad del agua (WP) aumenta a medida que la ET disminuye, y por lo tanto, uno puede encontrar un óptimo económico, en términos de la ET y por tanto de la cantidad de riego, si se tienen en cuenta el precio del aceite y los costes del agua de riego. La curva mostrada en la Figura 4 es la línea que mejor se ajusta al conjunto de datos obtenido de la variedad Picual en Córdoba, España (Moriana *et al.,* 2003). Los datos adicionales publicados para las variedades Arbequina, Morisca, Mulhasan, Frantoio, Leccino y también para la variedad Picual, recopilados en otro lugar, también se representaron en la Figura 4. Parece que los datos de otras variedades o ubicaciones se encuentran dentro de los márgenes de error, en la curva obtenida originalmente en Córdoba, con quizás la variedad Morisca que muestra mayor sensibilidad a déficits leves de ET_c que la variedad Picual. Es necesario investigar más para caracterizar la respuesta de las otras variedades en diferentes ambientes. De los conjuntos de datos y las ecuaciones originales de la Figura 4 para Córdoba, España, se necesitan más de 700 mm de agua consumida en ET_c para alcanzar el máximo rendimiento de frutos de olivo en ese ambiente en particular. Si la precipitación efectiva es de 400 mm, se deberían suministrar por lo menos 300 mm mediante riego para alcanzar los rendimientos máximos en esa ubicación en particular. Sin embargo, debido a la forma de la respuesta del rendimiento a la ET_c, la producción de los olivos responde muy bien cuando se aplican cantidades pequeñas de riego a huertos de secano. En diferentes ubicaciones del sur y noreste de España (entre 350 y 500 mm de precipitación anual), los agricultores están alcanzando valores de WP de hasta 30 kg/ha/mm (fruto fresco) con aplicaciones estacionales de riego de 100 a 150 mm en huertos que anteriormente eran de secano. En la costa y centro de Italia (alrededor de 600 mm de precipitación anual), son suficientes menos de 100 mm de agua de riego para obtener rendimientos superiores al 80 % de aquellos huertos con riego completo (Gucci *et al.,* 2007). Se obtuvieron aumentos significativos del rendimiento en Israel usando un riego único de 75 mm a mediados de verano (Lavee *et al.,* 2007).

FIGURA 4 Relación entre rendimiento relativo del fruto y ET_C relativa para los olivos. La curva se obtuvo para las variedades Picual en Córdoba, España (Moriana *et al.,* 2003), y los datos de los puntos se obtuvieron a partir de estudios adicionales (Lavee *et al.,* 2007; Iniesta *et al.,* 2009; Martin-Vertedor *et al.,* 2011; Gucci *et al.,* 2007 y Caruso *et al.,* 2011) para distintas variedades, como se muestra en el gráfico.



La curva de respuesta del rendimiento al agua de riego aplicada es similar a la Figura 4, pero más plana a niveles altos de riego, porque el olivo es capaz de extraer una cantidad considerable de agua almacenada en el suelo y puede compensar las reducciones del agua aplicada, siempre y cuando haya suficiente agua en la zona radicular. El nivel de ahorro de riego depende de la capacidad de almacenamiento del suelo y de la cantidad de agua lluvia necesaria para el reabastecimiento sostenible del agua almacenada en el suelo. La respuesta de la producción de aceite es similar a la respuesta de la producción de fruto, y a continuación se discuten las respuestas de la calidad del aceite.

En la Tabla 2 se muestra la respuesta del rendimiento de aceitunas de mesa a la reducción del agua aplicada (AW), tomada de un estudio (Goldhamer *et al.*, 1994). Una reducción del AW del 21 % no afectó ni a los ingresos ni al rendimiento de fruto. Una reducción adicional hasta el 62 % del AW aplicada disminuyó el rendimiento relativo de fruto en un 10 % y los ingresos relativos en un 25 %. La reducción más drástica de los ingresos se asoció a un menor precio debido a la reducción del tamaño del fruto.

TABLA 2 Rendimiento relativo e ingresos brutos de las aceitunas de mesa en riego deficitario (Goldhamer *et al.*, 1994).

Régimen de riego deficitario regulado	Uso de consumo (mm)	Rendimiento bruto de fruto (ton/ha)	Ingreso bruto (US$/ha)	ET_c relativa (%)	Rendimiento relativo (%)	Ingreso bruto relativo (%)
Control	881	12.0	6725	100	100	100
T2	759	12.3	6750	83.9	103.1	100.4
T3	693	12.5	6700	75.4	103.1	99.6
T5	546	10.8	5050	56.3	90.0	75.1

REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

A continuación se desarrollan varios casos específicos para distintos ambientes y situaciones de suministro de agua. La Tabla 3 ilustra un ejemplo del enfoque de blance de agua para la programación del riego de un huerto joven de olivos en el centro de Italia. Los valores se reportan mensualmente, pero durante las prácticas normales de riego los balances se calculan semanalmente. Se usan dos niveles de riego; riego completo y riego deficitario de 50 %. Cabe anotar que el déficit hídrico temprano ocurrido en abril fue inusual para esta zona, donde la estación de riego normalmente empieza en junio. En climas más áridos, es normal que el riego empiece en primavera y puede extenderse hasta bien avanzado el otoño. El agua se aplica preferiblemente para satisfacer las necesidades diarias de los árboles a través de micro-riego, pero en suelos mal drenados es preferible reducir la frecuencia de riego a 1-2 veces por semana. El uso de intervalos más largos con micro-riego a menudo es ineficiente porque puede haber pérdidas significativas por percolación profunda. Cuando las agencias de agua suministran agua por intervalos más largos (2-4 semanas), es deseable construir instalaciones de almacenamiento en la finca para regar con la mayor frecuencia posible.

Tres estrategias de RDI han demostrado su efectividad para el riego de los olivos. En la primera, el déficit planificado se distribuye equitativamente durante toda la estación de riego (riego deficitario sostenido o SDI). En la segunda, el déficit se concentra en el período de verano, desde el endurecimiento de la semilla hasta el final del verano (RDI). La tercera estrategia (RDI_2), que es una intermedia de las dos anteriores, alterna ciclos cortos de estrés y recuperación durante el período de riego, manteniendo el SWP o el LWP antes del amanecer a niveles variables, que son moderadamente bajos durante el período del desarrollo del fruto. En la Figura 5 se representa esquemáticamente el curso estacional hipotético del estado hídrico del árbol según las tres diferentes estrategias de DI.

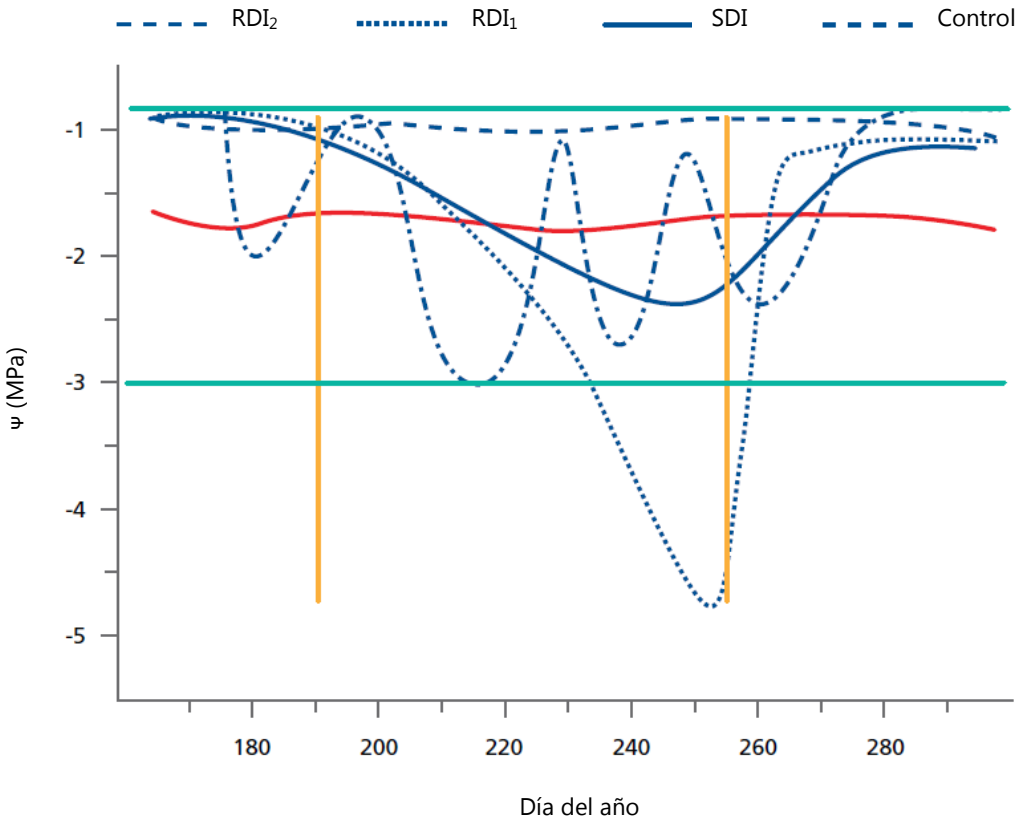
TABLA 3 Ejemplo de cálculo del blance de agua mensual para la programación del riego en un huerto de olivos con alta densidad (510 árboles/ha) de 5 años de edad, en un suelo franco en Venturina (Italia central). Dos niveles de riego (máximo, deficitario) se reportan anualmente, ET_o = 965 mm, precipitación 708 mm. La floración ocurrió el 13 de mayo de 2007. El coeficiente de cultivo fue 0.55, el coeficiente de cobertura vegetal, 0.8. Se reportan las temperaturas mínima y máxima mensuales promedio y la ET_o. La precipitación efectiva (ERain) se calculó como el 70 % del total de la precipitación (Rain), excluyendo las precipitaciones de menos de 4 mm. (Caruso *et al.,* 2011)

Mes	T_{max} (ºC)	T_{min} (ºC)	ET_o (mm/día)	ET_c (mm/mes)	Rain (mm/mes)	ERain (mm/mes)	ET_c – ERain (mm/mes)	Riego completo (mm/mes)	Riego deficitario (mm/mes)
E	14.7	5.5	0.7	9.6	30	21	-11.4		
F	15.6	4.6	1	12.3	96.6	67.62	-55.32		
M	16.4	5.3	1.9	25.9	76.6	53.62	-27.72		
A	22.3	6.9	3.3	43.6	6.8	4.76	38.84	2.8	2.8
M	24.2	10.6	4.3	58.7	130.8	91.56	-32.86	2.8	2.8
J	27	14	4.8	63.4	68.8	48.16	15.24	3.9	3.9
J	30.3	14.6	5.4	73.7	0.6	0.42	73.28	58.9	19.7
A	29.8	12.9	4.3	58.7	36.2	25.34	33.36	36	13
S	26.7	10.2	2.8	37	19	13.3	23.7	30.4	30.4
O	22.5	7.9	1.5	20.5	88	61.6	-41.1		
N	16.8	4.7	0.9	11.9	102.6	71.82	-59.92		
D	18.1	-1.6	0.7	9.24	52.2	36.54	-27.3		

A medida que avanza la estación, los déficits hídricos se establecen, aumentando su severidad a medida que avanza el verano; pero antes de terminarse el verano la ET_o empieza a disminuir y pueden empezar las lluvias. En este momento, el nivel de estrés se reduce o elimina, lo cual es deseable durante el crecimiento del fruto y el período de maduración. Al manipular la frecuencia de riego, el cultivador puede ejecutar el sistema un tiempo fijo (normalmente a su máxima capacidad) y el calendario se vuelve sencillo. El enfoque de RDI_2 permite la instalación de sistemas de riego diseñados para lidiar con situaciones de asignación de agua muy limitada, por ejemplo, en casos donde el agua está restringida drásticamente a mediados de verano (mediados de julio, finales de agosto) para usos urbanos que entran en conflicto (p. ej., turismo en Liguria, Italia). Un factor clave para tener éxito con el enfoque del RDI_2 es empezar el riego con suficiente tiempo como para conservar la reserva de humedad del suelo, para cuando la demanda de ET_o sea alta.

La estrategia de riego deficitario sostenido (SDI) está planificada distribuyendo el déficit hídrico de manera proporcional a los requerimientos mensuales de la ET. En este caso, para la misma cantidad de agua, los déficits hídricos anticipados son de menor magnitud a mediados de verano que en el RDI_1, mientras que el estrés que se desarrolla antes y después en el SDI, debería ser de mayor magnitud que en el RDI_1. La estrategia del RDI_2 puede ser útil en suelos con un porcentaje alto de arcilla, para permitir que el sistema radicular no se exponga a períodos prolongados de alta humedad.

FIGURA 5 Curso estacional hipotético del potencial hídrico foliar o del tallo para los olivos, sujeto a las diferentes estrategias de riego deficitario. Las líneas verdes horizontales delimitan el rango entre los árboles completamente hidratados y el punto de pérdida de turgencia; las líneas anaranjadas verticales delimitan el intervalo del déficit hídrico. Los valores variarán en distintos climas y condiciones de suelo. Convenciones: línea de trazos: línea de referencia con riego completo, línea continua: SDI, línea punteada: RDI1, línea de puntos y rayas: RDI2.



Otras estrategias de RDI que se han buscado incluyen la concentración del déficit hídrico en el año de baja producción, cuando la carga de producción es tan baja que el crecimiento vegetativo no se ve tan afectado por los déficits hídricos. En el año de producción alta, el agua ahorrada en el año anterior se aplica para maximizar la producción de fruto con los mínimos déficits hídricos. La única prueba publicada realizada con esta estrategia (Moriana *et al.,* 2003) no dio resultados tan buenos como las tres estrategias anteriores descritas arriba. Adicionalmente, el manejo del suministro de agua bajo esta estrategia no es fácil, y requerirá compromisos del suministro hídrico que superen la

estación actual y que, por lo tanto, pueden ser difíciles de implementar por muchas agencias del agua.
Como el riego de los olivos es una práctica relativamente nueva, las autoridades de riego a menudo no pueden entregar suficiente agua para suplir todos los requerimientos de los huertos y están promoviendo prácticas de riego deficitario. Las razones incluyen suministro insuficiente de agua, consideraciones de equidad, las limitaciones impuestas por el espaciamiento original de los árboles de los huertos de secano, y la prioridad para usos urbanos. Cuando el suministro se limita a tales niveles, el uso de riego por goteo es crucial, con el mínimo posible de emisores por árbol. También, los productores deberían regar con la mínima frecuencia que sea factible (una o dos veces por semana) para minimizar las pérdidas de E y evitar la exposición prolongada de las raíces de los olivos a los altos niveles de humedad del suelo en suelos arcillosos. Si el suministro es muy limitado y se va a instalar un nuevo sistema de riego, una opción sería usar un goteo subterráneo puesto que las pérdidas de E serían insignificantes.

Los objetivos de ahorrar agua usando RDI en huertos de olivos parecen particularmente interesantes. La mayoría de evidencias documentadas indicas que las estrategias de RDI suministran solamente el 30 a 70 % del volumen necesario para árboles con riego completo. Volúmenes estacionales de agua tan bajos como 50 mm son suficientes para incrementar los rendimientos de manera significativa en climas subhúmedos, mientras que en climas más secos son necesarios 100 mm. Estas cantidades definitivamente son muy inferiores a las empleadas en la mayoría de los demás cultivos.

Hoy en día, un tema importante es el uso del RDI para optimizar la calidad del aceite. Evidencias recientes demuestran que se puede optimizar la concentración de los compuestos fenólicos y volátiles con impacto organoléptico, empleando estrategias de RDI en lugar de aplicar riego completo o bajo condiciones de secano (Gómez-Rico *et al.,* 2007; Motilva *et al.,* 2000 y Servili *et al.,* 2007). Los efectos beneficiosos de los déficits hídricos moderados impuestos por el RDI sobre la composición del aceite de oliva dieron origen al término "riego cualitativo", un aspecto que probablemente será más importante. Hay algunos informes que recomiendan restringir el riego antes de la cosecha para limitar o evitar los daños provocados por al cosecha con el vibrador de tronco y/o problemas de extracción del aceite durante el procesamiento en el molino. El riego deficitario parece ser beneficioso para optimizar la relación pulpa-semilla de las aceitunas de mesa (Gucci *et al.,* 2009).

Consideraciones adicionales

Introducir el riego en olivos de secano en crecimiento presenta algunos efectos secundarios potenciales. Se ha reportado mayor incidencia de la verticilosis *(Verticillium dahliae)*, especialmente en los huertos jóvenes. Hay evidencias documentadas de que la densidad del inóculo del patógeno es mayor en áreas húmedas que en las secas. Aunque la causa de una mayor incidencia de la verticilosis en huertos regados es incierta, es probable que las raíces secundarias susceptibles de los olivos aumenten cerca de los lechos bacterianos, donde el suelo puede estar bastante húmedo, favoreciendo la infección, las malas hierbas sobreviven más tiempo y alojan temporalmente al patógeno, y las hojas infectadas se descomponen más rápido en condiciones de alta humedad (López-Escudero y Blanco-López, 2005). La verticilosis es un factor limitante para los huertos regados en algunas áreas donde el riego localizado de baja frecuencia se recomienda como técnica de manejo.

Adicionalmente, hay un mayor daño por parte de la mosca del olivo *(Bactrocera oleae* Gmel.) en huertos con riego, pero la evidencia que lo justifica no es sólida. La mosca del olivo daña preferentemente los frutos grandes (las variedades de fruto de tamaño grande con alto contenido de agua son más susceptibles que las de tamaño pequeño), así que su efecto puede ser indirecto

porque el riego aumenta el tamaño del fruto. Sin embargo, es probable que las condiciones sean más favorables para la mosca del olivo cuando la humedad es más alta, debido al riego del olivar.

Se han reportado problemas de bajo rendimiento de aceite del fruto de algunas variedades en huertos de muy alta densidad con riego completo, pero parecen estar relacionados con problemas tecnológicos de extracción del aceite cuando el fruto está bastante hidratado, más que con una menor cantidad de aceite en el fruto mismo. Debido a la relativamente alta resistencia a la salinidad, los olivos tienen buen rendimiento cuando se les riega con aguas salinas (Gucci y Tattini, 1997).

BIBLIOGRAFÍA

Angelopulos, K., Dichio, B., y Xiloyannis, C. 1996. Inhibition of photosynthesis in olive trees during water stress and rewatering. *Journal of Experimental Botany* 47: 1093-1100.

Caruso, G., Rapoport, H.F. y Gucci, R. 2011. Long-term evaluation of yield components of young olive trees during the onset of fruit production under different irrigation regimes. *Irrigation Science* (DOI: 10.1007/s00271-011-0286-0)

Connor, D.J. y Fereres, E. 2005. The physiology of adaptation and yield expression in olive. En: Darnell, R., Ferguson, I.B. y Hokanson, S.C., eds. *Horticultural Reviews* (31). EE. UU., Canadá, John Wiley & Sons., págs. 155-229.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Fereres, E. 1984. Variability in adaptive mechanisms to water deficits in annual and perennial crop plants. *Bulletin de la Societé Botanique de France. Actualités Botaniques* 131: 17 32.

Fereres, E., Villalobos, FJ, Orgaz, F. y Testi, L. 2011. Water requirements and irrigation scheduling in olive. *Acta Horticulturae,* (ISHS), 888:31-40.

Giménez, C., Fereres E., Ruz, C. y Orgaz. O. 1997. Water relations and gas exchange of olive trees: diurnal and seasonal patterns of leaf water potential, photosynthesis and stomatal conductance. *Acta Horticulturae,* 449(2):411-415.

Goldhamer, D., Dunai, y Ferguson, L. 1994. Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Horticulturae* 356: 172-176.

Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., La Greca, M. y Fregapane, G. 2006. Phenolic and volatile compounds of extra virgin olive oil *(Olea europaea* L. Cv. Cornicabra) with regard to fruit ripening and irrigation management. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 7130-7136.

Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Moriana, A., Pérez D., Olmedilla, N., Ribas, F. y Fregapane, G. 2007. Influence of different irrigation strategies in a traditional Cornicabra cv. olive orchard on virgin olive oil composition and quality. *Food Chemistry* 100: 568-578.

Gucci, R. y Tattini, M. 1997. Salinity tolerance in olive. *Horticultural Reviews* 21: 177-214.

Gucci, R., Lodolini, E.M. y Rapoport, H.F. 2007. Productivity of olive trees with different water status and crop load. *Journal Horticultural Science Biotechnology,* 82(4): 648-656.

Gucci, R., Lodolini, E.M. y Rapoport, H.F. 2009. Water deficit-induced changes in mesocarp cellular processes and the relationship between mesocarp and endocarp during olive fruit development. *Tree Physiology* 29: 1575-1585

Iniesta, F., Testi L., Orgaz. F., y Villalobos, F.J. 2009. The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy* 30: 258-265.

Lavee, S., Hanoch, E., Wodner, M., y Abramowitch, H. 2007. The effect of predetermined deficit irrigation on the performance of cv. Muhasan olives *(Olea europaea L.)* in the eastern coastal plain of Israel. *Scientia Horticulturae* 112: 156-163.

López-Escudero, F.J. y Blanco-López, M.A. 2005. Effects of drip irrigation on population of *Verticillium dahliae* in olive orchards. *Journal of Phytopathology* 153: 238-9.

Martin-Vertedor, A., Pérez Rodríguez, J., Prieto Losada, H., y Fereres, E. 2011. Interactive responses to water deficits and crop load in olive (olea europaea L., cv. Morisca) II. - Water use, fruit and oil yield. *Agricultural Water Management* 98: 950-958.

Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M. y Fereres, E. 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 128: 425-431.

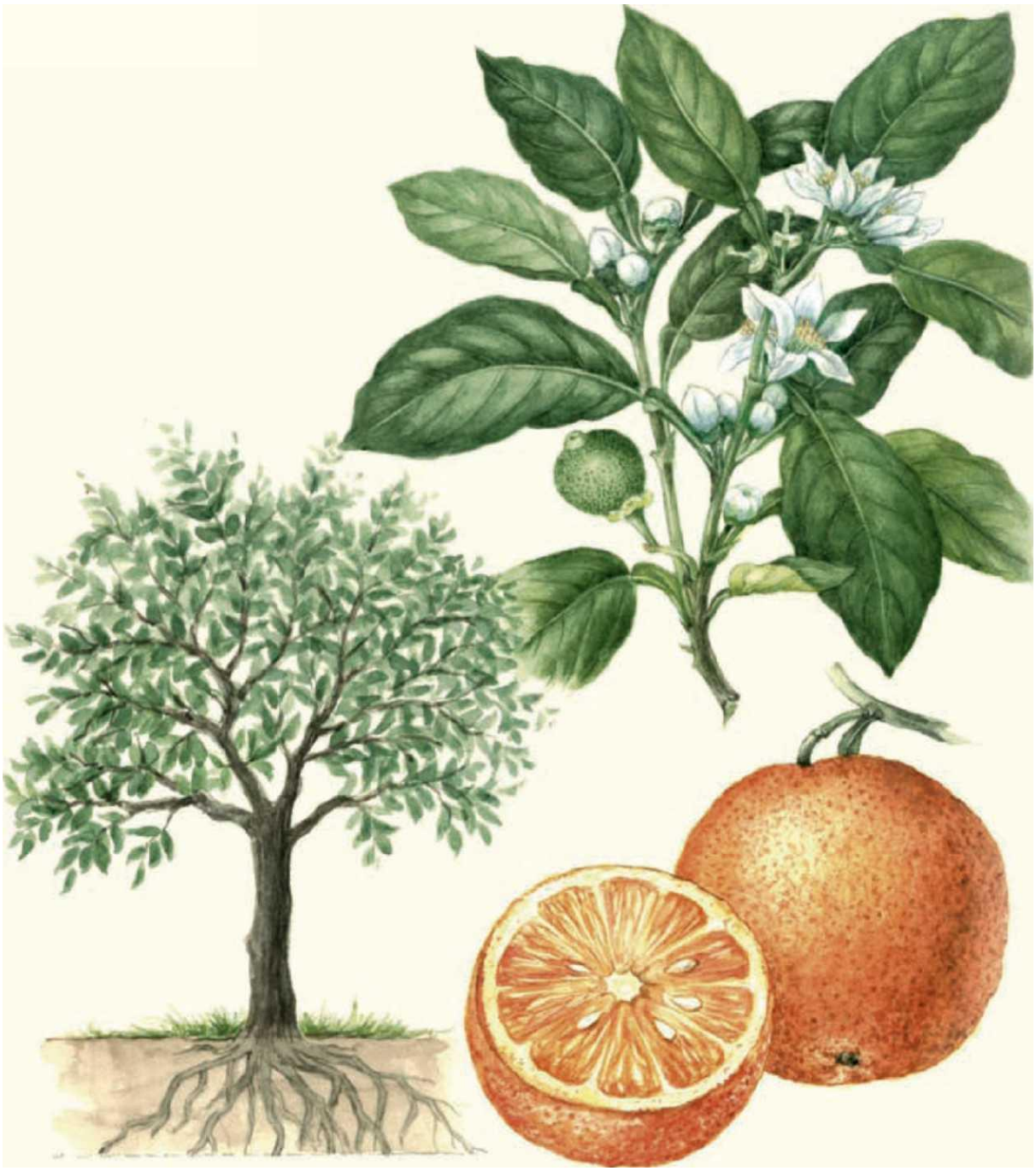
Motilva, M.J., Tovar, M.J., Romero, M.P., Alegre, S. y Girona, J. 2000. Influence of regulated deficit irrigation strategies applied to olive trees (Arbequina cultivar) on oil yield and oil composition during the fruit ripening period. *Journal of Food Science and Agriculture* 80: 2037-2043.

Orgaz, F., Testi, L., Villalobos, FJ y Fereres, E. 2006. Water requirements of olive orchards II: determination of crop coefficients for irrigation scheduling. *Irrigation Science* 24: 77-84.

Rapoport, H.F., 2008. Botánica y morfología. En: Barranco, D., Fernández-Escobar, R., Rallo L., eds. *El Cultivo del Olivo.* Ed. Mundi-Prensa, Madrid, págs. 37-62.

Sanz-Cortés, F., Martínez-Calvo, J., Badenes, M.L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G. y Meier, U. 2002. Phenological growth stages of olive trees (Olea europaea). *Annals Applied Biology* 140: 151-157.

Servili, M., Esposto, S., Lodolini, E., Selvaggini, R., Taticchi, A., Urbani, S. Montedoro, G.F., Serravalle, M. y Gucci, R. 2007. Irrigation effects on quality, phenolic composition and selected volatiles of virgin olive oil cv. Leccino. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55: 6609-6618.



Cítricos

AUTOR PRINCIPAL
David A. Goldhamer
(anteriormente Universidad de California, Davis, EE. UU.; en la actualidad, Profesor emérito de Extensión Cooperativa)

AUTORES COLABORADORES
Diego S. Intrigliolo
(IVIA, Moncada, Valencia, España)
Juan R. Castel
(IVIA, Moncada, Valencia, España)
Elías Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)

Cítricos

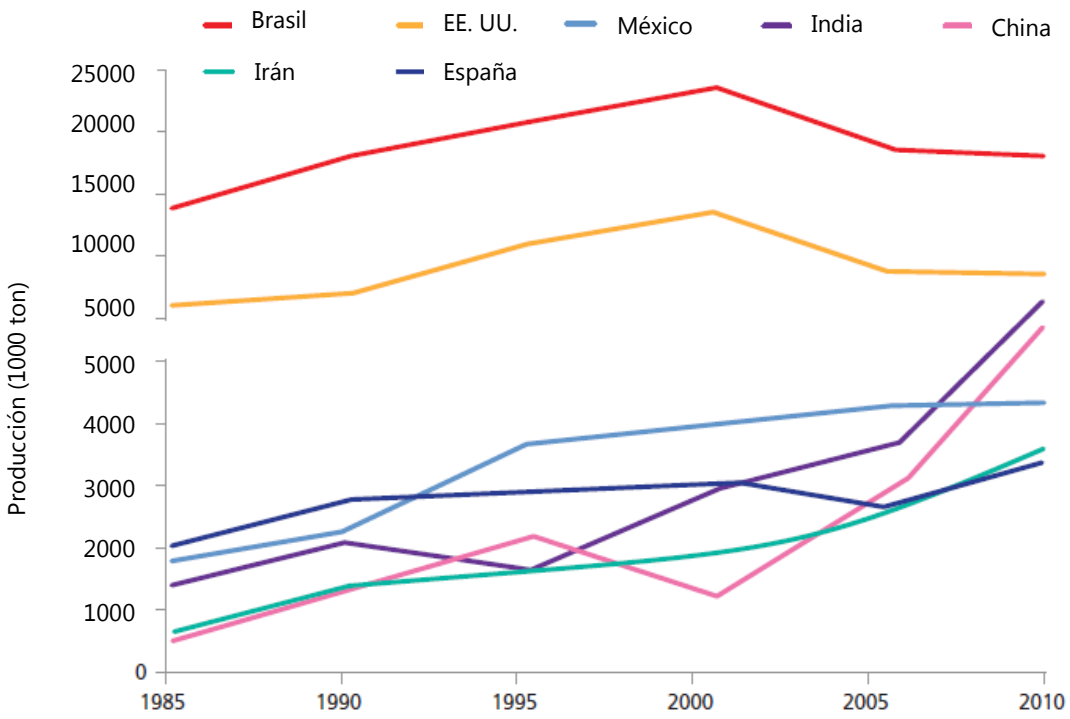
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Entre los cítricos se encuentran la naranja –que da cuenta del 70 % de la producción mundial–, cítricos de fruto pequeño, como mandarinas, tangerinas, tangelos, clementinas, limones, limas y pomelos. Las naranjas son producidas tanto para el mercado de fruta fresca como para jugo/zumo –de concentración natural, o exprimido y concentrado. Hasta mediados del siglo XX, los cítricos se cultivaban casi exclusivamente de manera local. La velocidad y el cuidado cuando se transportaban los frutos perecederos eran grandes preocupaciones. Sin embargo, el desarrollo de los concentrados de cítricos tuvo un impacto duradero en la industria de los cítricos en todo el mundo. Concentrar los frutos permitía el almacenamiento, transporte, y transformación del producto lejos de las plantaciones. Además del fruto fresco y el jugo/zumo, hay subproductos de los cítricos como aditivos alimentarios, pectina, mermelada, pienso (a partir de la cáscara), cosméticos, aceites esenciales, productos químicos y medicinas.

Como los cítricos son un cultivo perennifolio sensible a las bajas temperaturas, las regiones subtropicales producen el grueso de los cítricos del mundo. El cultivo tropical no es tan productivo porque los cambios estacionales de temperatura favorecen los patrones adecuados de floración, el crecimiento del fruto y el desarrollo del color del fruto durante la maduración. De hecho, las altas temperaturas de los trópicos inducen el desarrollo rápido y la producción de frutos grandes que maduran rápidamente, permaneciendo comercializables por muy poco tiempo. En contraste, el crecimiento en las zonas subtropicales es más lento en invierno y el fruto puede permanecer maduro en el árbol por más tiempo antes de que se coseche y comercialice. Las heladas dañan a los cítricos, aunque los árboles pueden soportar períodos cortos de heladas leves. Sin embargo, las heladas fuertes prolongadas matan los árboles y pueden ser devastadoras.

El valor de los cítricos aparece en el primer lugar del comercio internacional de fruta. En 2009, había más de 5.4 millones de hectáreas de cítricos (4.1 millones de hectáreas de naranjos) con un rendimiento promedio de 16.3 ton/ha. La Figura 1 presenta las tendencias de la producción de los principales países productores del mundo desde 1985 (FAO, 2011). Como resultado del libre comercio y los avances tecnológicos en el transporte y almacenamiento de frutas, la industria de los frutos cítricos se está globalizando cada vez más. Durante las últimas décadas, la producción y el comercio de cítricos se han incrementado de manera sostenida, aunque la intensidad del crecimiento varió según el tipo de fruto (ha sido más marcada para frutos pequeños y jugo/zumo). La producción de cítricos está evolucionando en un contexto de mercados globales altamente competitivos. Existe un enfoque aparentemente cada vez mayor en la calidad y el valor agregado de los productos. Los cítricos a menudo son promovidos por sus propiedades nutritivas y saludables, ricos en vitamina C, ácido fólico y fibra.

FIGURA 1 Tendencias de producción de los cítricos en los principales países (FAO, 2011).



Consideraciones de calidad

La meta de la producción de cítricos es que la cosecha sea lo más grande y de la más alta calidad posible. En este caso, la calidad se refiere al tamaño del fruto, color y apariencia de la cáscara, componentes químicos y sabor. El tamaño del fruto normalmente es el principal factor para determinar el valor del fruto. En general, los frutos más grandes valen más que los más pequeños. Sin embargo, las variedades, el momento de la cosecha, las preferencias locales y los factores del mercado pueden influir extremadamente en el valor del fruto. De los factores de calidad, la apariencia de la cáscara normalmente es el más importante, siendo lo más deseable un color de cáscara uniforme e intenso y sin defectos. Un limitante de la producción de cítricos en los trópicos es que el fruto permanece verde y no cambia de color cuando madura. En cuanto al sabor, la gente prefiere un equilibrio entre dulzura y acidez, medido por la relación entre sólidos solubles y ácidos (TSS/TA). El contenido de jugo/zumo es otro factor de calidad, especialmente para los limones y las limas. En general, los cítricos tienen un alto potencial de almacenamiento postcosecha, desde semanas para las mandarinas, hasta seis meses o más para los limones.

CRECIMIENTO Y DESARROLLO CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

El crecimiento de los árboles de cítricos se puede dividir en etapas vegetativas y reproductivas. El crecimiento vegetativo incluye el crecimiento de raíces, tallos, hojas y nuevos rebrotes. El crecimiento reproductivo incluye la brotación de las yemas florales, la diferenciación, floración, cuajado del fruto, desarrollo y madurez del fruto.

Crecimiento reproductivo y vegetativo temprano

En las condiciones de los climas subtropicales en el hemisferio norte (California, por ejemplo), la brotación principal del crecimiento vegetativo ocurre a finales de febrero y en marzo. Normalmente hay rebrotes de crecimiento adicionales en verano y otoño. Las hojas son viables alrededor de dos años. Las hojas se reponen continuamente, aunque la máxima caída de hojas generalmente ocurre en primavera.

La mayoría de variedades de cítricos producen flores en primavera y son autofértiles; pueden ser fertilizadas por su propio polen. En climas costeros fríos, las flores se pueden producir durante todo el año, pero la máxima floración también ocurre en primavera. Las flores se desarrollan en las axilas foliares en brotes más viejos, contrario a los brotes que se desarrollan en rebrotes de crecimiento.

Los árboles de cítricos producen una gran cantidad de flores que producen frutos pequeños. Sin embargo, un gran porcentaje de estos frutos pequeños cae del árbol, aparentemente por una combinación de factores fisiológicos y ambientales. Parece que hay una jerarquía de las flores relacionada con la caída de los frutos; las flores en sitios con mayor proporción de flores con respecto a hojas tienen más probabilidades de caerse. Las flores que abren al final del período de floración tienen más probabilidad de cuajar frutos que sobrevivan hasta la cosecha que las flores tempranas. Asimismo, los frutos que crecen más rápido son más propensos a caerse que los que crecen más lento.

El principal factor que controla de la caída de las flores y frutos jóvenes es la debilidad de los tejidos en una zona de abscisión preformada en el punto de unión de la base del ovario al disco o del pedicelo al tallo. No se conoce bien el mecanismo real del proceso, pero se cree que es activado por los reguladores de crecimiento en respuesta a cambios internos o externos. Los frutos jóvenes que permanecen después del primer período de caída presumiblemente son capaces de desarrollarse hasta la madurez, si el clima es favorable. No obstante, algunas caídas ocurren durante toda la estación. A medida que el clima se calienta en los primeros meses del verano, generalmente hay un período de caída acelerada de frutos, el cual se conoce como período de "caídas de junio". Si el calor es severo y prolongado por varios días, la caída de frutos puede ser considerable, reduciendo demasiado la cosecha. Esto se ha observado en varias variedades de los tipos Valencia y Navel. Algunas variedades, notoriamente la Valencia y las mandarinas, tienen ciclos de alternancia en la producción; años de poca producción seguidos de años de alta producción.

Etapa de desarrollo del fruto

Después de la caída temprana de frutos y de que las hojas de los nuevos rebrotes se hayan expandido completamente, comienzan a desarrollarse los demás frutos, inicialmente por división celular rápida. En este punto, una sección transversal del fruto revela claramente las partes que lo componen:

- **Flavedo** *(pericarpio)* - piel o corteza rugosa, fuerte y de color vivo (de amarillo a anaranjado) que cubre el fruto y lo protege de daños. Sus glándulas contienen los aceites esenciales que dan al fruto su típica fragancia cítrica.

- **Albedo** *(mesocarpo)* - tejido blanco y esponjoso que, junto con el flavedo, forma la cáscara (pericarpio) del fruto.

- **Pulpa** *(endocarpio)* - parte interna compuesta de segmentos individuales o vesículas de jugo/zumo. Esta es la parte comestible del fruto y la fuente del jugo/zumo.

El crecimiento del fruto durante esta etapa depende de la temperatura: una temperatura extremadamente alta o baja puede relentizar el crecimiento. Después de la división celular viene el alargamiento de las células. Es durante este período que la cáscara alcanza el máximo grosor. Luego, a medida que la pulpa se expande, la cáscara se vuelve más delgada. El fruto sigue creciendo siempre y cuando continúe en el árbol, aunque más lento a medida que baja la temperatura.

El tamaño potencial del fruto al momento de la cosecha depende en gran medida de las condiciones ambientales que existan durante la división celular. La creencia popular es que cualquier disminución en la tasa de división celular se traducirá directamente en una reducción del tamaño potencial del fruto al momento de la cosecha. Una vez que pasa el ciclo de crecimiento del fruto de una fase de división celular predominante a una fase principalmente de expansión celular, el tamaño del fruto al momento de la cosecha no es tan susceptible a las condiciones de crecimiento. Al igual que para otros cultivos frutales, en los cítricos hay compensaciones entre el número y tamaño de los frutos; muchos frutos por árbol conducirán a tamaños individuales pequeños. Tanto los frutos muy pequeños como los frutos muy grandes se venden a precios más bajos en la mayoría de mercados de frutos frescos, pero el rango de tamaños aceptables para los cítricos es amplio. Cuando los cítricos se se plantan para jugo/zumo, el tamaño es relativamente poco importante.

Etapa de maduración del fruto

El comienzo de esta etapa normalmente se caracteriza por el comienzo del cambio de color del fruto, desencadenado por las temperaturas más frías durante la noche en las regiones subtropicales. El fruto aún está aumentando su tamaño, pero a una tasa mucho más lenta que antes. Durante la maduración del fruto aumenta el contenido de jugo/zumo de la pulpa. El contenido ácido del fruto disminuye a medida que aumenta el contenido de azúcar. A diferencia de los frutos caducifolios, no hay un punto preciso que indique la madurez en los cítricos. En California, la base para la madurez legal de las naranjas es una proporción de 8:1 del total de sólidos solubles a acidez titulable (TSS/TA); la llamada relación azúcar-ácido. El equilibrio entre azúcares, que da cuenta de alrededor del 75 % del total de sólidos solubles, y el sabor ácido producido por la acidez, son los mejores criterios para correlacionar la calidad del fruto con la aceptación del consumidor.

El color de la cáscara también se usa como índice de madurez, pero este enfoque no es fiable, puesto que el color de la cáscara depende de la temperatura. Además, los precios del mercado y la disponibilidad del procesador influyen mucho en el momento de la cosecha. La pulverización

hormonal, como la del ácido giberélico, se usa para prolongar la viabilidad del fruto en el árbol. Si se deja demasiado tiempo en el árbol, el fruto está expuesto a caídas, daños por insectos o enfermedades, y descomposición de los componentes del sabor y del ácido.

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

Existen bastantes trabajos sobre las respuestas de diferentes procesos fisiológicos de los cítricos al estrés hídrico. Se han estudiado muchas especies, variedades y condiciones de crecimiento. Como las respuestas varían con el momento del estrés durante la estación, el año se dividió en estaciones y a menos que se indique de otra manera, la información se centra en la respuesta de los naranjos.

Estrés de primavera

En términos del posible impacto sobre los rendimientos, el período de cuajado del fruto y floración ha sido identificado en repetidas ocasiones como el más sensible al estrés para los cítricos pequeños, como las clementinas (González-Altozano y Castel, 1999) y las naranjas (Pérez-Pérez *et al.,* 2007). Esto resultó en el aumento del aborto de frutos pequeños (caída de junio). Por otro lado, hay informes que señalan que el estrés del principio de la estación redujo significativamente el arrugado de la cáscara en una variedad de Navel particularmente vulnerable (Frost Nucellar) sin impactos negativos en el tamaño o carga de frutos en la cosecha (Goldhamer y Salinas, 2000).

Estrés de verano

Durante este período de expansión celular en el fruto, el riego deficitario puede reducir la tasa de crecimiento del fruto. De hecho, el estrés severo puede provocar el encogimiento del fruto. Sin embargo, la reintroducción del riego completo puede aumentar la tasa de crecimiento del fruto, de manera que el tamaño del fruto al momento de la cosecha no se vea afectado (Goldhamer y Salinas, 2000). Esto ha sido atribuido al mantenimiento de acumulación de materia seca en el fruto durante el período de estrés y/o rehidratación completa del fruto después del reinicio del riego. En condiciones experimentales en la costa oriental de España (González-Altozano y Castel, 1999), el estrés de verano no tuvo impacto en el rendimiento de la clementina, siempre que el potencial hídrico foliar (LWP) antes del amanecer no disminuyera de -1.3 MPa. Sin embargo, el estrés severo por tiempo prolongado durante el verano puede reducir el tamaño del fruto al momento de la cosecha, el crecimiento del árbol y aumentar los azúcares (Mantell, 1977). La concentración de azúcar al momento de la cosecha puede aumentar por el estrés de verano, posiblemente por la deshidratación del fruto. De los dos componentes principales del rendimiento, el tamaño del fruto es más susceptible de reducirse que la carga de fruto debido al estrés de verano. Al trabajar con la variedad Valencia, se encontró que el estrés moderado en el verano y otoño no redujo los rendimientos en Arizona (Hilgeman y Sharp, 1970).

Cabe anotar que se ha impuesto un estrés severo durante el verano en los limones para inducir una floración fuera de estación y la consiguiente cosecha de verano. Esto se conoce como la técnica Forzatura o el efecto Verdelli. En un estudio que retuvo el riego durante nueve semanas, empezando en junio, el LWP antes del amanecer llegó a - 2.7 MPa (Barbera y Carimi, 1988). Este régimen arrojó un rendimiento de 30 kg/árbol en cada una de las cosechas de verano e invierno. Se encontró que por el estrés insuficiente no se daba la floración fuera de estación, pero que cuando el estrés era demasiado severo, producía la caída excesiva de las hojas, mayor aborto de las flores, caída de los frutos en invierno y menor calidad del fruto cosechado en invierno (Barbera y Carimi, 1988).

Estrés de otoño

A diferencia de las reducciones inducidas por el estrés en el crecimiento del fruto superadas después de la reintroducción del riego completo, reducir el crecimiento del fruto en otoño normalmente produce frutos más pequeños al momento de la cosecha. El riego de las clementinas al 25 y 50 % de la ET_c durante finales de verano y principios de otoño redujo el tamaño del fruto al momento de la cosecha en 11 y 25 %, respectivamente (González-Altozano y Castel, 1999) y produjo más arrugamiento de la cáscara del fruto, igual que en las naranjas Navel (Goldhamer y Salinas, 2000). Los dos estudios encontraron que el estrés de otoño no influye en la carga de fruto.

Además de reducir el tamaño del fruto, numerosos estudios han mostrado que el estrés de otoño puede aumentar tanto el contenido de azúcar como el de ácido del fruto, además de aumentar el grosor de la cáscara.

Estrés de invierno

En la mayoría de áreas productoras de cítricos en el mundo, son poco probables los déficits de agua en el suelo en invierno debido a la lluvia. Sin embargo, en Florida, las restricciones hídricas aplicadas a las naranjas Valencia, durante el verano se usaron para modificar el momento de floración, retrasando las fechas de floración en dos a cuatro semanas (Melgar *et al.,* 2010). Los frutos pudieron superar la reducción del tamaño durante la siguiente primavera, cuando se restauró el riego hasta satisfacer las necesidades hídricas completas. Esto fue porque Valencia es una variedad de final de estación y el fruto tuvo de tres a cuatro semanas para recuperar el tamaño óptimo. En este caso, el estrés de invierno se usó para reducir la caída de frutos inmaduros en la siguiente estación durante la cosecha mecánica con vibradores de tronco.

Estrés durante toda la estación

Varios estudios han impuesto riego deficitario durante toda la estación. Algunos de estos regímenes de riego impuestos se basaron en lecturas de tensiómetro. Se usó un valor de 70 kPa como umbral, lo que causó la floración y apertura de las flores tardía, y disminución del cuajado de frutos con la variedad Valencia (Davies y Bower, 1994). En un estudio con la variedad Shamouti, donde se usaron los tensiómetros, con 35 % menos de agua aplicada que los árboles con riego completo, las flores por árbol se incrementaron en un 52 %, pero la tasa de abscisión de flores fue alta. Esto provocó una disminución del rendimiento en un 20 %, pero más azúcares y ácido (Moreshet *et al.,* 1983). Otro estudio mostró que, permitir que el agotamiento del agua disponible en la profundidad de 1 m llegue al 80 %, en el verano e invierno y 60 % en primavera y otoño, no redujo los rendimientos con Navel (Wiegand y Swanson, 1982). El mismo régimen redujo el peso del fruto en la variedad Valencia. No se especificaron datos del agua aplicada, por lo cual fue difícil juzgar el nivel de estrés que el agotamiento de la humedad del suelo indujo en los árboles. Otro enfoque para producir estrés durante toda la estación es regar a fracciones de la ET_c. Para los pomelos, aplicar el 35 % menos de la ET_c máxima retrazó la madurez y redujo el rendimiento en un 13 %, debido tanto al fruto más pequeño como a la menor carga de fruto. El contenido de azúcar y ácido fue más alto mientras que no hubo impacto en la relación azúcar-ácido (Eliades, 1994). Para las Navel, el riego con 22 y 46 % por debajo de la ET_c máxima redujo los rendimientos en un 7 y 22 % respectivamente (Brych y Luedders, 1988). Finalmente, para las clementinas, la aplicación del 55 % de las necesidades hídricas de los árboles durante toda la estación redujo los rendimientos en solamente el 17 % (González-Altozano y Castel, 1999).

Indicadores del estado hídrico del árbol

El indicador establecido del estado hídrico del árbol es el potencial hídrico del tallo (SWP) medido con la cámara de presión. Un enfoque más sencillo y que consume menos tiempo es medir el potencial hídrico de las hojas sombreadas. Tanto Goldhamer con las Navel, como Castel con las clementinas, encontraron que la pendiente de las líneas de regresión estaba muy cerca de la unidad y altas correlaciones entre esta medida y el SWP (pendientes de 0.97 y 0.98; R2 de 0.95 y 0.96, respectivamente). Los valores del SWP a mediodía por encima de - 1.0 MPa son indicadores de la

ausencia de estrés hídrico para un día típico de verano con ET_o alrededor de 6-7 mm/día. Los valores entre- 1.0 y -1.5 MPA son indicadores de estrés leve. Los cítricos pueden soportar SWP más negativos que otros árboles frutales y vides. Los árboles rara vez muestran síntomas visuales de estrés con SWP entre -2.0 y -2.5 MPa. Los naranjos demasiado estresados con LWP antes del amanecer de cerca de -6.5 MPa recuperaron su estado hídrico en la primera semana de rehidratación, aunque experimentaron defoliación severa y tardaron varias semanas para una recuperación funcional completa (Fereres *et al.,* 1979).

REQUERIMIENTOS DE USO DEL AGUA

La transpiración del huerto, principal componente de la ET_c, depende directamente de la conductancia estomática y los científicos reconocieron desde el principio que el comportamiento de los estomas de los cítricos difiere significativamente de los demás cultivos. Un estudio comparativo anterior encontró que la máxima conductancia estomática (Gl) de la soya/soja, el trigo y la naranja en condiciones de riego completo era de 1.0, 0.60, y 0.48 cm/s, respectivamente, y ocurría cerca de las 09:00 horas. Atribuyeron esto a las diferencias en la abertura estomática y densidades (Meyer y Green, 1981). Una comparación de la GI de los cítricos con la de los almendros y el pistacho en condiciones similares, en el valle de San Joaquín en California, realizada por Goldhamer, encontró que los cítricos alcanzaban la GI máxima, de alrededor de 0.4 cm/s, a las 08:00 horas, y ésta disminuía continuamente a partir de ese momento. En contraste, los almendros alcanzaban su GI máxima de cerca de 1 cm/s a las 12:00 horas, y el pistacho alcanzaba un valor incluso superior de GI de 1.15 cm/s a las 10:00 horas, más del doble que la GI máxima de los cítricos. Tanto el pistacho como los almendros mantuvieron valores altos similares durante la mayor parte del día.

Como los cítricos son plantas perennifolias, muchos estudios sobre el uso del agua reportan un único valor de coeficiente de cultivo (K_c). Estos incluyen 0.62 para la Valencia en Sunraysia (Grieve, 1989), 0.44 para las clementinas en Mazagón, España (Villalobos *et al.,* 2009), y 0.52 para los limones en Ventura, California (Grismer, 2000). Otros han dividido la estación en invierno y verano, y sugerido que el K_c era de 0.70 y 0.65, respectivamente. Sugirieron incrementar estos valores en 0.1 ó 0.2 para regiones húmedas y semihúmedas (Allen *et al.,* 1998).

Muchos estudios señalan que, comparado con el verano, el K_c de los cítricos es ligeramente más alto en invierno y principio de primavera y sensiblemente más alto en otoño. Esto normalmente se atribuye a que la abertura estomática de los cítricos es muy sensible a la demanda evaporativa (el déficit de presión de vapor de agua, VPD), cerrándose en condiciones secas, calientes y con viento, y abriéndose en las condiciones opuestas. Así, el K_c en los climas mediterráneos suaves y los costeros debería ser más alto que en valles más áridos en tierra continental. Además, en los ambientes mediterráneos, los valores del K_c en invierno reflejan tasas altas de evaporación del suelo por lluvias frecuentes durante esa parte de la estación. No todos los estudios encontraron que el K_c fuera el mínimo en verano. Un estudio para la variedad Valencia (Hoffman *et al.,* 1982) y otro para Navel (Chartzoulakis *et al.,* 1999) mostró justo lo opuesto.

En la Tabla 1 se resumen los valores mensuales del K_c publicados en seis estudios. Éstos incluyen las variedades Salustiana y Valencia en diversas condiciones climáticas. El K_c en primavera varió de 0.49 en Valencia, España (Navel) a 0.77 (Valencia) en Kiyu, Uruguay, con una media de 0.63. Para el verano, los valores mínimo y máximo fueron de 0.52 para la variedad Shamouti en Rejovot, Israel y 0.87 para la variedad Valencia en Kiyú, Uruguay, respectivamente, con una media de 0.66. Los valores mínimo y máximo para otoño fueron de 0.58 para la Shamouti en Rejovot, Israel y 0.85 para Navel en Tempe, Arizona, respectivamente, con una media de 0.73.

Trabajando con clementinas regadas por goteo en un lisímetro de pesada preciso en Valencia, España, Castel encontró que el K_c anual tenía una relación lineal con la cobertura vegetal y reportó la siguiente relación:

$$K_c = 0.006 \text{ cobertura vegetal} + 0.272 \quad (R2 = 0.96)$$

Él también hizo énfasis en que el K_c dependerá de la frecuencia de humedecimiento del suelo del huerto; encontró que sin lluvia, la evaporación superficial de árboles jóvenes regados por goteo varió entre 8 y 30 % de la ET_c total, mientras que después de una lluvia, alcanzó de 30 a 50 % del total (Castel, 1997).

Los valores anuales reales de la ET_c, por supuesto, dependerán no solamente del K_c, sino de la demanda evaporativa y, hasta cierto punto, de la frecuencia de riego y el tamaño del área superficial húmeda. El rango de la ET_c reportada en todo el mundo está entre 820-1200 mm en la Florida y 1080-1500 mm en Arizona, Estados Unidos; 1300 mm en Sudáfrica y 800-850 mm en las áreas costeras del este de España e Israel.

TABLA 1 Coeficientes mensuales de cultivo (K_c) publicados para distintas variedades de huertos maduros de naranjos en distintos lugares. Todos los estudios usaron el balance del agua para determinar el uso consuntivo.

Fuente:	**Castel y Buj, 1989**	**Castel *et al.*1987**	**Van Bavel *et al.*, 1967**	**Hoffman *et al*,. 1982**	**Kalma y Stanhill, 1969**	**García-Petillo y Castel 2007**
Variedad:	**Salustiana**	**Navel Washington**	**Navel Washington**	**Valencia**	**Shamouti**	**Valencia**
Ubicación:	**Valencia, España**	**Valencia, España**	**Tempe, Arizona**	**Yuma, Arizona**	**Rejovot, Israel**	**Kiyú, Uruguay**
Enero	0.66	0.54	0.57	0.43	1.08	0.51
Febrero	0.65	0.63	0.46	0.42	1.37	0.62
Marzo	0.66	0.47	0.43	0.66	0.73	0.71
Abril	0.62	0.53	0.55	0.56	0.63	0.78
Mayo	0.55	0.48	0.72	0.69	0.70	0.83
Junio	0.62	0.57	0.74	0.74	0.56	0.86
Julio	0.68	0.59	0.75	0.78	0.56	0.88
Agosto	0.79	0.68	0.76	0.87	0.45	0.87
Septiembre	0.74	0.62	0.76	0.87	0.41	0.85
Octubre	0.84	0.68	0.85	0.79	0.62	0.81
Noviembre	0.73	0.75	0.93	0.45	0.70	0.75
Diciembre	0.63	0.79	0.75	0.34	1.34	0.67

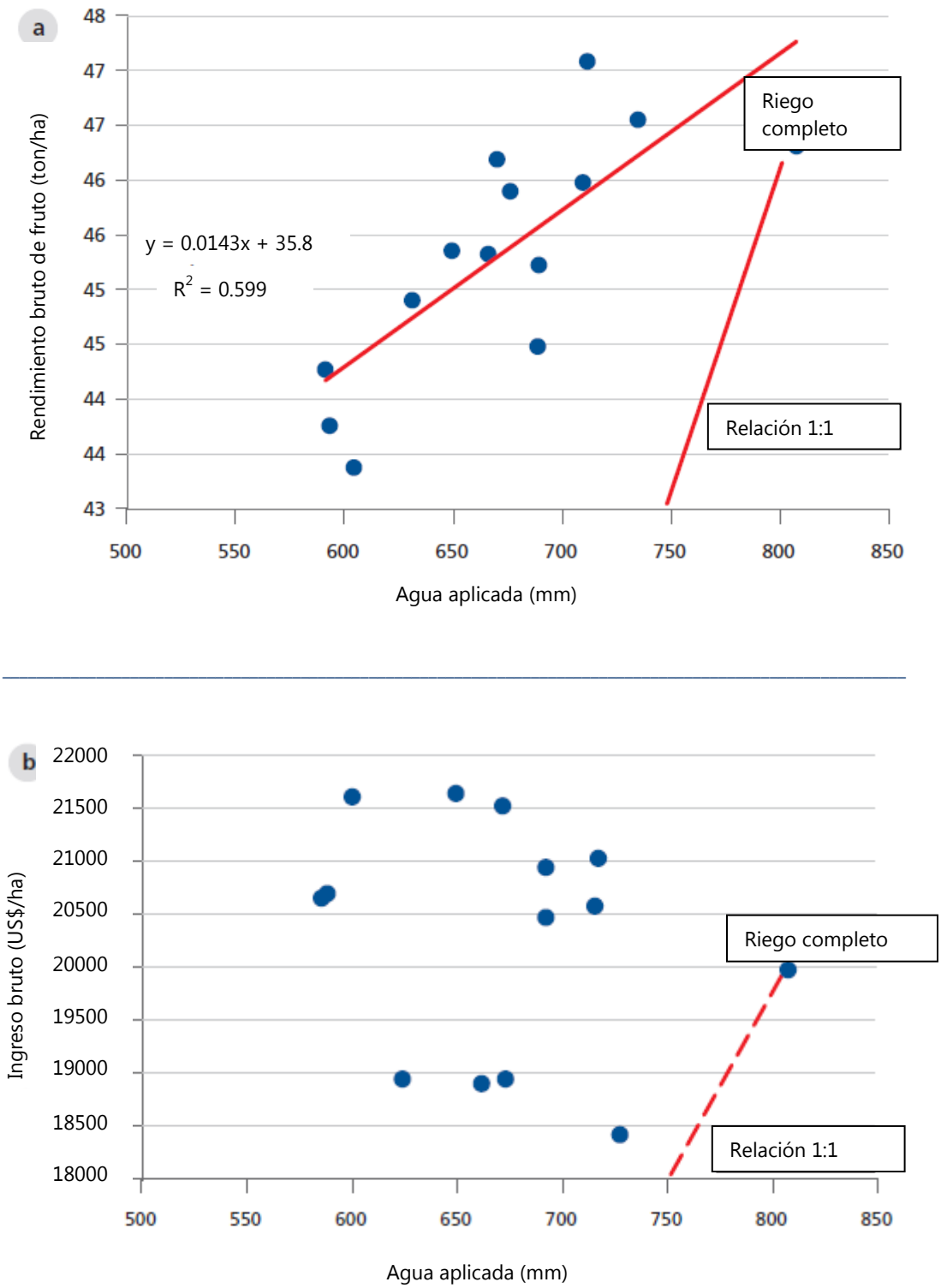
Media	0.68	0.61	0.69	0.63	0.76	0.76
Dic., Ene., Feb.	0.65	0.65	0.59	0.40	1.27*	0.87
Mar., Abril, Mayo	0.61	0.49	0.57	0.64	0.69	0.80
Jun., Jul., Ago.	0.70	0.61	0.75	0.80	0.52	0.60
Sep., Oct., Nov.	0.77	0.68	0.85	0.70	0.58	0.77

* *Los valores altos de K_c en invierno reflejan tasas altas de evaporación del suelo por la lluvia estacional en un ambiente mediterráneo.*

FUNCIONES DE PRODUCCIÓN DEL AGUA

Los dos componentes principales del rendimiento de los cítricos son la carga de frutos y el peso individual del fruto. La apariencia y los valores de mercado de distintos tamaños de fruto inciden en gran medida en el valor neto de un cultivo de cítricos, al igual que en muchos cultivos arbóreos y de vides. Esto se ilustra con dos ejemplos de naranjas Navel en el valle de San Joaquín, California (Goldhamer y Salinas, 2000 y Goldhamer, 2007). En la Figura 2a se muestra el tonelaje bruto medio de los últimos tres años de un experimento de cuatro años, donde se impusieron 13 regímenes diferentes de RDI en distintos momentos y de distinta duración, frente al agua aplicada. Una expresión lineal describe bastante bien la relación (R^2=0.59) con una pendiente de 2:1 en términos de reducción de agua aplicada: reducción de tonelaje bruto. La principal diferencia en el comportamiento del cultivo entre los regímenes de RDI fue que el estrés temprano redujo significativamente el arrugamiento, el principal defecto de la cáscara. Hubo relativamente poco impacto de cualquiera de los regímenes en el tamaño y la carga de fruto. El reducido arrugamiento provocó un mayor porcentaje de fruto calificado como Selecto y así, altamente comercializable en el mercado de frutos frescos, en lugar de ser designado como De primera, que tiene mucho menos valor para el cultivador. Esto causó que el valor del fruto en los regímenes de estrés temprano fuera significativamente más alto que en los árboles con riego completo. Esto cambió sustancialmente la relación entre el ingreso bruto del cultivador y el agua aplicada, como se muestra en la Figura 2b, en comparación con la relación rendimiento-agua aplicada (Figura 2a).

FIGURA 2 (a) Cultivo, y (b) ingreso bruto frente a agua de riego aplicada para naranjas Frost Nucellar navel, cultivadas en el sur del valle de San Joaquín de California, EE. UU. Los datos son medias de los tres últimos años de un estudio de RDI de cuatro años (adaptado de Glodhamer y Salinas, 2000).



El tamaño del fruto juega un papel importante en la determinación del valor del fruto en el mercado de frutos frescos. Normalmente se prefieren los frutos grandes; los frutos de tamaño muy grande o los más pequeños normalmente valen menos. Sin embargo, los precios pagados en el mercado de Estados Unidos para los diferentes tamaños de frutos pueden variar ampliamente durante la estación para las dos clasificaciones de frutos comercializables: Selecto y De primera (Tabla 2). En el caso de los frutos cosechados temprano, en que los tamaños suelen ser menores, el tamaño más deseable es el grande (40 a 48 frutos/caja). Sin embargo, a medida que avanza el período de cosecha y el fruto en el árbol continúa creciendo, los frutos grandes se vuelven el tamaño predominante y el valor de los frutos pequeños más escasos aumenta. Con las variedades de cosecha muy tardía, los frutos pueden ser muy grandes, lo que hace que casi no valgan la pena; en el ejemplo provisto, el valor es de solamente US$ 5.00/caja para el tamaño de 24-36 frutos/caja, comparado con US$ 14/caja para los frutos de tamaño medio de 56-72 frutos/caja (Tabla 2). Por otro lado, esta misma categoría de tamaño muy grande (24-23 frutos/caja) es el doble que con la cosecha temprana. Por el deseo de tener frutos más pequeños para las variedades de cosecha tardía, el RDI puede ser una herramienta efectiva si la distribución de tamaños de fruto se puede inclinar hacia tamaños más pequeños y no hay impacto negativo concomitante en los otros componentes del rendimiento.

La clásica función de productividad del agua relaciona el rendimiento con el uso consuntivo. Hay dos problemas con los cítricos que limitan la utilidad de esta relación. Primero, el ingreso de los cítricos (US$/ha) depende no solamente del rendimiento (kg/ha) sino también del valor del fruto (US$/kg), lo cual, a su vez, es una función del tamaño del fruto, del aspecto de la cáscara y de los precios en el mercado de frutos frescos. Segundo, la mayoría de estudios publicados sobre el impacto del riego en la producción solamente reportan el agua aplicada (muchos ni siquiera reportan eso) y no tratan de cuantificar el uso consuntivo (ET_c), limitando así la aplicabilidad de los informes.

TABLA 2 Valores típicos para el envasador en el mercado de frutos frescos para distintos tamaños de navel de cosecha temprana (Frost Nucellar) y tardía (Lane Late) en el sur del valle de San Joaquín, California. Valores en US$/caja (Goldhamer *et al.*, 1994).

		Categoría de tamaños de fruto			
		88-163	56-72	40-48	24-36
		(frutos/caja)	(frutos/caja)	(frutos/caja)	(frutos/caja)
Cosecha temprana	Selecto	7.50	12.00	12.50	10.00
Frost Nucellar	De primera	6.64	7.87	8.00	5.17
Cosecha tardía	Selecto	12.26	14.15	7.50	5.00
Lane Late	De primera	7.62	8.44	5.72	3.00

En la Figura 3a se muestran cuatro funciones de producción agua-cultivo, cada una para una variedad. Tres son de California y una de España. Cada uno de los conjuntos de datos proviene de experimentos en campo en árboles maduros, realizados hace más de cuatro años por lo menos. Las líneas de ajuste óptimo de primer orden muestran correlaciones bastante fuertes con coeficientes de correlación, que van de 0.68 a 0.98. Las mejores expresiones de la línea de ajuste óptimo para los estudios de las variedades Frost Nucellar y Lane Late en California tienen pendientes menores de 1; el estudio de la variedad Parent Washington en California tiene una pendiente de casi uno exactamente, y el estudio de la Clementina en España tiene una pendiente mayor de 1, lo que sugiere que esta variedad puede ser más sensible a los déficits hídricos que las naranjas navel.

Las funciones generadas de producción agua-ingreso (Figura 3b) de tres de estos estudios (el estudio de la Clementina no incluyó datos de ingresos) tienen un aspecto muy distinto que las funciones compañeras de producción agua-rendimiento. Con excepción del estudio de la Parent Washington, es obvio que las relaciones entre el ingreso bruto y el uso consuntivo no son lineales. El estudio de la variedad Lane Late muestra que los ingresos se pueden incrementar en cerca del 80 % con regímenes de RDI que reducen el uso consuntivo en un 10 % (estrés hacia el final de la estación) o en un 40 % (estrés durante toda la estación). Por otro lado, un régimen de RDI menos exitoso (estrés de mitad de estación) redujo los ingresos en un 15 % con un 23 % de reducción del uso consuntivo. Este rango amplio en los ingresos brutos relativos para distintos regímenes de RDI ilustra claramente la importancia del momento del estrés en algunas variedades de cítricos.

Tanto los estudios de la naranja Lane Late como de la Frost Nucellar muestran que se puede incrementar el ingreso bruto y/o disminuir drásticamente el uso consuntivo con regímenes óptimos de RDI. Los resultados de estas variedades difieren marcadamente de los de la Parent Washington. La razón es que las dos variedades anteriores tenían problemas de producción que se redujeron con los regímenes exitosos de RDI: arrugamiento de la cáscara de la Frost Nucellar y fruto excesivamente grande de la Lane Late. No hubo problemas identificables en cuanto al aspecto de la cáscara y/o tamaño del fruto con la Parent Washington. No obstante, los datos de la Parent Washington muestran que el uso consuntivo se puede reducir en un 7 % sin tener impacto en el ingreso bruto, o 18 % con solo un 6 % de disminución en el ingreso bruto (Figura 3b).

REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

La instrumentación de humedad del suelo se ha usado por muchos años para monitorear el riego e imponer déficits hídricos en los cítricos. Hilgeman y Sharp (1970) usaron tensiómetros en su trabajo sobre RDI con las naranjas Valencia. Ellos recomiendan riego completo desde marzo hasta mediados de julio, luego riegos cuando los tensiómetros alcancen los 75 cbares. Este régimen redujo el riego en 66 % con respecto a los árboles con riego completo. El rendimiento no se redujo, los azúcares aumentaron, y los árboles más pequeños resultantes fueron más fáciles de cosechar. Sin embargo, como el valor del fruto depende de los muchos factores discutidos anteriormente, se debe hacer énfasis en que un enfoque exitoso de RDI en una determinada variedad probablemente no será óptimo para otras situaciones de cultivo. Adicionalmente, es peligroso recomendar umbrales de estrés basados en el suelo debido a las diferencias en los suelos, ubicación de los instrumentos (profundidad y ubicación), métodos de riego y variedades.

El enfoque más fácil para imponer regímenes de RDI es regar a determinados porcentajes de la ET_c máxima en períodos específicos de la estación. Para la variedad Frost Nucellar, se recomienda regar al 50 % de la ET_c, desde mediados de mayo hasta principios de julio (Goldhamer y Salinas, 2000). Goldhamer encontró que un estrés al final del verano o principio del otoño era óptimo para la Lane Late, cambiando la distribución de tamaños del fruto hacia un valor más favorable del fruto y así a un mayor ingreso bruto. Por otro lado, en los cítricos pequeños como la Clementina de Nules, se concluyó que la mejor estrategia de RDI era el riego alrededor del 50 % de la ET_c desde julio

(después de la caída de frutos de junio) hasta comienzos de septiembre, cuando las lluvias de final de verano y principios de otoño ayudaron a recuperar rápidamente a las plantas del estrés hídrico (González-Altozano y Castel, 1999). La utilidad de esta estrategia también ha sido corroborada recientemente en situaciones comerciales (Ballester *et al.,* 2011).

FIGURA 3a Las funciones de producción agua-cultivo para cuatro estudios de distintas variedades de naranja de España (Castel y Buj, 1989), y California, EE. UU. (Goldhamer y Salinas, 2000; y Goldhamer *et al.,* 2007). Cada estudio duró por lo menos cuatro años. En la Tabla 3 se muestran las pendientes, intersecciones y coeficientes de correlación para las líneas de mejor ajuste.

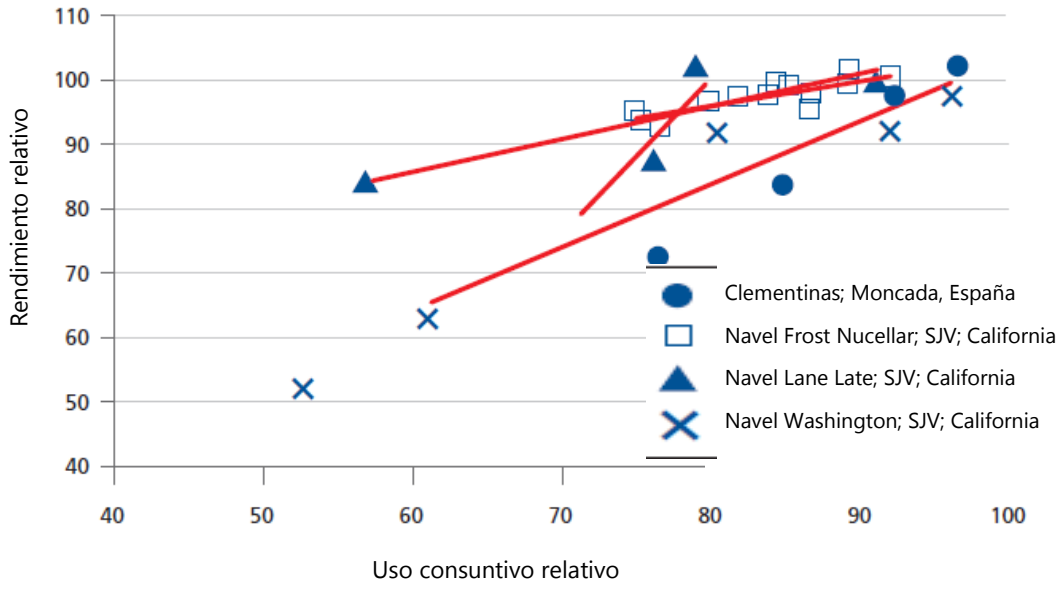
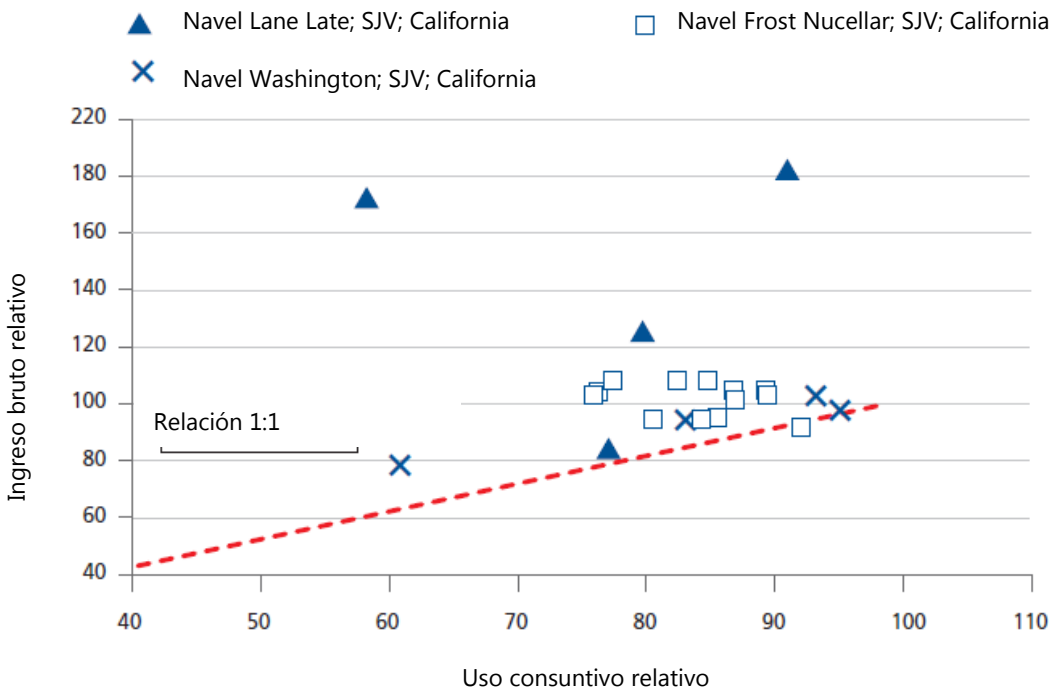


FIGURA 3b Funciones de producción agua-ingreso bruto para tres de los estudios mostrados en la Figura 3a.



Cabe anotar que la utilidad de los regímenes de RDI basados en la ET_c depende, en parte, de las condiciones del suelo y de la cantidad y almacenamiento de las lluvias de invierno en la zona radicular, especialmente al principio de la estación. Por ejemplo, con precipitación relativamente alta en invierno, suelos profundos y sistema de riego de cobertura completa que promueva las raíces en toda la zona radicular potencial, reducir el agua aplicada al principio de la estación puede no inducir déficits hídricos y no tendrá mucho impacto en el estado hídrico del árbol. Por otro lado, en las condiciones opuestas –baja precipitación de invierno, suelos poco profundos y riego localizado (por goteo, micro-aspersión)– más probablemente habrá una disminución rápida del estado hídrico del árbol en respuesta al riego deficitario poco después de que se imponga.

Por esta razón es muy recomendable el uso de indicadores del estado hídrico del árbol basados en la planta, cuando se aplica RDI para validar que se alcanza el nivel de estrés deseado en el árbol. En conclusión dada la diversidad tan amplia de combinaciones de especies, variedades, mercado y condiciones de crecimiento existentes en los cítricos, la necesidad de ajustar a la medida las estrategias de RDI para condiciones específicas es aún más apremiante que para otros árboles frutales y dificulta recomendar programas generalizados de RDI.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., S. Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. 1998. Evapotranspiración del cultivo-Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos En: *Estudio FAO: Riego y drenaje, N.º 56.* Roma, FAO.

Ballester, C., Castel, J., Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2011. Response of Clementina de Nules citrus trees to regulated deficit irrigation. Yield components and fruit composition. *Agricultural Water Management.* 98:1027-1032.

Barbera, G, y Carimi, F. 1988. *Effects of different levels of water stress on yield and quality of lemon trees.* En: *Proceedings of the sixth international citrus congress,* págs. 717-722.

Brych y Luedders. 1988. *Citrus responses to different irrigation levels in South Portugal (Algarve).* Proceedings Sixth International Citrus Congress 1831-1836.

Castel, J.R. 1997. Evapotranspiration of a drip-irrigated Clementine citrus tree in a weighing lysimeter. *Acta Horticulturae,* 449 (1), 91-98.

Castel, J. R., Bautista, I., Ramos, C. y Cruz, G. 1987. Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchards in Valencia (Spain). *Irrigation and Drainage Systems,* 1(3):205-217.

Castel J.R. y Buj, A. 1989. Response of mature 'Salustiana' oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrigation Science* 11:121-127.

Chartzoulakis, K., Michelakis, N. y Stefanoudaki, E. 1999. Water use, growth, yield and fruit quality of 'Bonanza' oranges under different soil water. *Advances in Horticultural Science* 13:6-11.

Davies, F.S. y Bower, J. 1994. Water Stress, gas exchange and fruit set of 'Olinda' Valencia orange trees in Eastern Transvaal area of South Africa. *Acta Horticulturae* 365:121-127.

Eliades, G. 1994. Response of grapefruit to different amounts of water applied by drippers and minisprinklers. *Acta Horticulturae* 365:129-146.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Fereres, E., Cruz-Romero, G., Hoffman, G. L. y Rawlins, S. L. 1979. Recovery of orange trees following severe water stress. *Journal of Applied Ecology* 16:833-842.

García-Petillo, M. y Castel, J. R. 2007. Water balance and crop coefficient estimation of a citrus orchard in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research,* 5(2):232-243.

Goldhamer, D. A. y Salinas, M. 2000. *Evaluation of regulated deficit irrigation on mature orange trees grown under high evaporative demand.* En: *Proceedings of the International Society of Citriculture IX Congress.* Orlando, FL. 3-7 de diciembre de 2000: 227-231.

Goldhamer, D. A. 2007. *Regulated deficit irrigation of trees and vines in Agricultural Water Management.* En: *Proceedings of a Workshop in Tunisia* (Series: Strengthening science-based decision making in developing countries), L. Holliday, ed. National Research Council of The National Academies, Washington, DC, National Academies Press, págs. 70-80.

González-Altozano, P. y Castel, J. R. 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology,* 74(6):706-713.

Grieve, A. M. 1989. Water use efficiency, nutrient uptake and productivity of micro-irrigated citrus. *Australian Journal of Experimental Agriculture,* 29(1):111-118.

Grismer, M. E. 2000. Long-term evapotranspiration from coastal avocado/citrus orchard. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 126(1):1-7.

Hilgeman, R. H. y Sharp F. O. 1970. Response of 'Valencia' orange trees to four soil water schedules during 20 years. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 95(6):739-745.

Hoffman, G. J., Oster, J. D. y Alves, W. J. 1982. Evapotranspiration of mature orange trees under drip irrigation in an arid climate. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers),* 25(4): 992-996.

Kalma, J. D. y Stanhill, G. 1969. Transpiration, evaporation and deep drainage losses from an orange plantation. *Israel Journal of Agricultural Research,* 19(1 -24.

Mantell, A. 1977. *Water use efficiency of citrus: room for improvement?* En: *Proceedings of the International Society Citriculture* 1: 74-79.

Melgar, J.C., Dunlop, J.M., Albrigo, L.G. y Syverstsen, J.P. 2010. Winter Drought Stress Can Delay Flowering and Avoid Immature Fruit Loss during Late-season Mechanical Harvesting of 'Valencia' Oranges. *Horticultural Science,* 45(2) 271-276.

Meyer, W.S. y Green, G.C. 1981. Comparison of stomatal action of orange, soybean, and wheat under field conditions. *Australian Journal of Plant Physiology* 8:65-76

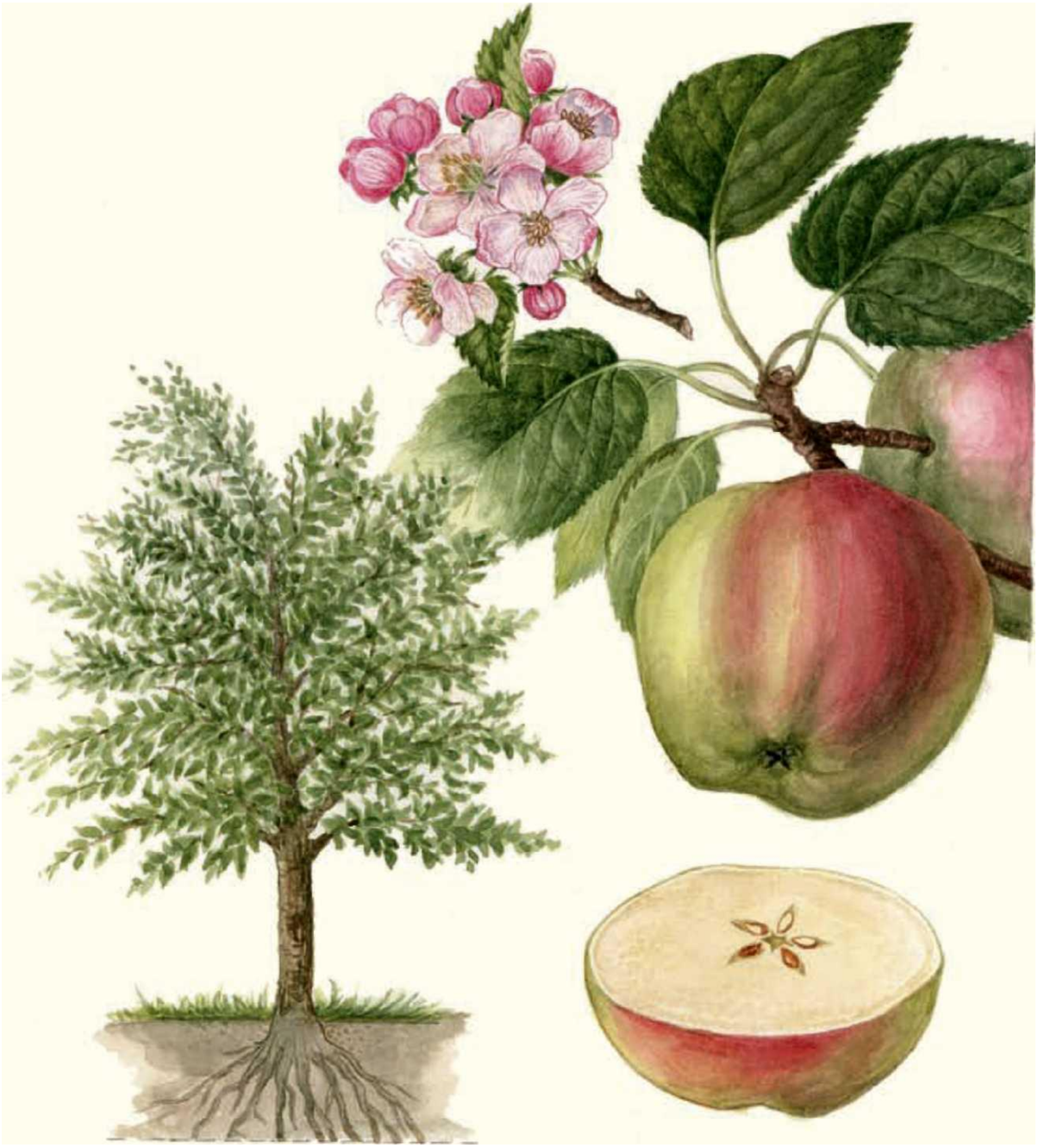
Moreshet, S., Cohen, Y. y Fuchs, M. 1983. Response of mature Shamouti orange trees to irrigation of different soil volumes at similar levels of available water. *Irrigation Science* 3(4): 223-236.

Pérez-Pérez, J.G., Romero, P. Navarro, J.M. y Botia, P. 2007. Response of sweet orange cv. 'Lane late' to deficit-irrigation strategy in two rootstocks. II: Flowering, fruit growth, yield and fruit quality. *Irrigation Science* 26:519-529.

Van Bavel, C. H. M., Newman, J. E. y Hilgeman, R. H. 1967. Climate and estimated water use by an orange orchard. *Agricultural and Forest Meteorology* 4:27-37.

Villalobos, F.J., Testi, L. y Moreno-Pérez, M.F. 2009. Evaporation and canopy conductance of citrus orchards. *Agricultural Water Management,* 96 (4): 565-573.

Wiegand, C.L. y Swanson, W.A. 1982. Citrus responses to irrigation. II. Fruit yield, size, and number. *Journal Rio Grande Valley Horticultural Society* 35: 87-96.



Manzano

AUTORES PRINCIPALES

Amos Naor
(GRI, Universidad de Haifa, y Migal - Centro de Tecnología de Galilea, Israel)

Joan Girona
(IRTA, Lleida, España)

AUTORES COLABORADORES

Hussein Behboudian
(Universidad Massey, Instituto de Recursos Naturales, Palmerston Norte, Nueva Zelanda),

Robert G. Evans
(USDA-ARS, Sidney, Montana, EE. UU.
Jordi Marsal (IRTA, Lleida, España)

Manzano

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El manzano *(Malus domestica* Mill.) es uno de los cultivos frutales más ampliamente cosechados y se produce comercialmente en más de 80 países en todo el mundo (FAO, 2011). En cuanto a producción, ocupa el tercer lugar en el mundo, después del banano y la uva, y en cuanto a área ocupa el segundo lugar, después de la uva. La mayoría de manzanos se cultivan en zonas templadas debido a sus requerimientos de cantidad mínima de horas frío para un desborre apropiado de las yemas en la primavera. El desarrollo de las variedades de manzanos con bajos requerimientos de cantidad mínima de horas frío y el uso de químicos para interrumpir la latencia han permitido la migración de los manzanos hacia regiones más cálidas. Las áreas de producción han aumentado significativamente en las últimas décadas hasta el año 2000, cuando China tomó la delantera en la producción. La producción total de manzanas se estabilizó durante el período 2000-2010, entre 60 y 70 millones de ton/año. En 2009, el área cosechada superó los 4.9 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 14.7 ton/ha (FAO, 2011). La Figura 1 muestra las tendencias de producción de los principales países. China es el mayor productor de manzanas (42 % de la producción mundial) y su producción es seis veces la del segundo país (Estados Unidos, 7 %).

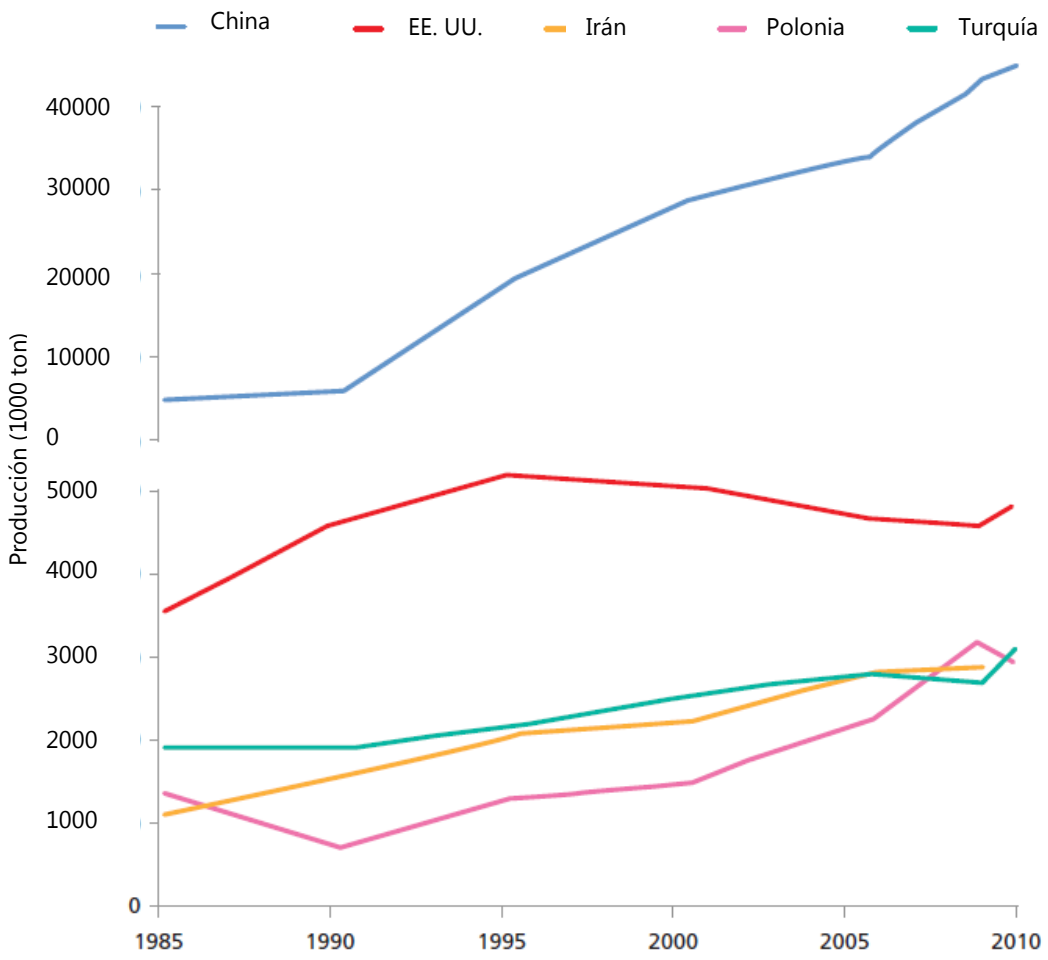
La duración de la estación, desde el desborre de las yemas hasta la cosecha, depende de la variedad, desde 70 días hasta 210 días (Westwood, 1993) y se correlaciona con la duración de la capacidad de almacenamiento.

El manzano es originario de Asia central, donde aún se encuentra su ancestro silvestre. Hay más de 7500 variedades conocidas, que dan cuenta de un amplio rango de características de fruto. Las variedades se diferencian en cuanto a tamaño del fruto, color, sabor y tamaño final del árbol, incluso cuando se planta con el mismo portainjerto. Los manzanos se cultivan en ambientes muy diversos, en muchas regiones de Asia y otros continentes. En Europa, desde los países escandinavos en el norte, hasta Italia en el sur; en Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda; en Estados Unidos y Canadá; y en los países del sur de América del Sur. Los requerimientos climáticos óptimos podrían caracterizarse como inviernos de no tan fríos a fríos, seguidos de un rápido aumento de la temperatura en primavera.

Los manzanos tienen dos tipos de yemas, las vegetativas puras y las mixtas, que contienen una yema floral que tiene varias yemas vegetativas en su base. La yema floral genera una inflorescencia que normalmente tiene cinco flores. Las yemas florales nacen terminalmente en los brotes y brotes de dos años de edad, y hasta cierto punto, en las yemas laterales de los brotes de un año. La mayoría de variedades de manzana tienen autoincompatibilidad (Goldway *et al.*, 2007), de manera que los productores normalmente incluyen más de una variedad en cada parcela, y algunos productores usan manzanos silvestres como polinizadores.

Los manzanos tienden a un patrón bienal de producción en el que el grado de producción bienal depende de la variedad (Lauri *et al.,* 1996) y el rendimiento potencial del cultivo depende en gran medida del momento de aclareo de fruto y de la carga de producción en la estación anterior.

FIGURA 1 Tendencias de producción de los manzanos en los principales países (FAO, 2011).



Consideraciones de calidad

Hay muchas características que afectan a la calidad del fruto de los manzanos para el mercado de frutos frescos. Las características externas como tamaño, color, forma y apariencia son muy importantes. En muchos mercados, a los frutos de menos de 65-70 mm de diámetro se les disminuye el precio. Dependiendo de la variedad, el color de fondo y superficial de la cáscara, ya sea verde, amarillo, rojo o rojo con franjas, tienen un papel importante en el aspecto del fruto, y por lo tanto, en el mercado de frutos frescos. Los defectos de la cáscara como las quemaduras solares, manchas marrones (herrumbre) y otras marcas afectan negativamente la calidad del producto fresco. La textura y firmeza de la pulpa son atributos importantes, y se ven afectados por los factores ambientales, propiedades de la pared celular y el contenido de calcio. La composición del fruto en cuanto a

azúcares, ácidos y diferentes aromas dependen de la variedad e influyen bastante en la calidad y el sabor del fruto. El manejo postcosecha en atmósferas controladas, que ahora es común para este fruto meses después de la cosecha, es crucial en lo que respecta a mantener la calidad del fruto y limitar las numerosas alteraciones fisiológicas que puedan producirse durante el almacenamiento.

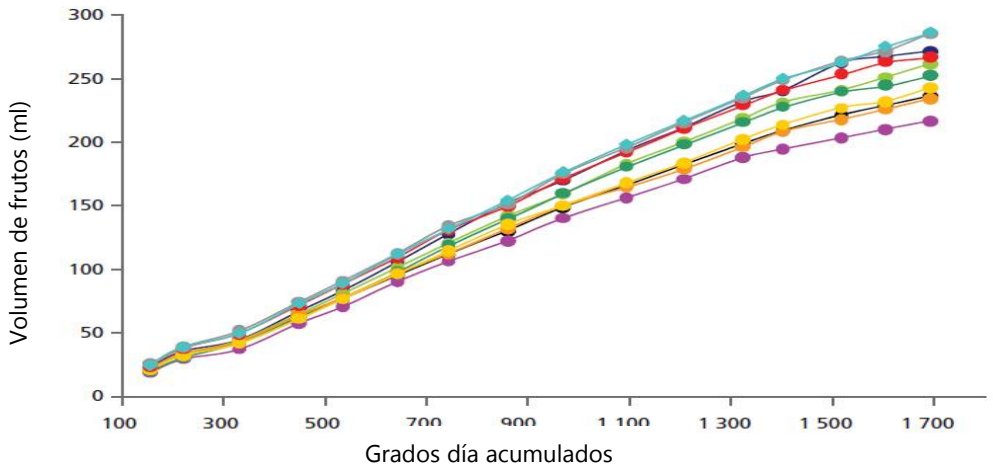
ETAPAS DE DESARROLLO CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

La fecha de la floración varía según la variedad y las regiones climáticas. La mayoría de variedades florecen en abril (hemisferio norte), mientras que las variedades tempranas (requerimientos bajos de cantidad mínima de horas frío) pueden florecer a finales de febrero y principios de marzo. La manzana tiene un patrón de crecimiento expo-lineal en el que gran parte de la acumulación de materia seca ocurre en la fase lineal que comienza aprox. 30 días después de la plena floración, en algunas variedades; mientras que en otras la fase lineal comienza aprox. 60 días después de la plena floración (Goffinet *et al.,* 1995). La Figura 2 muestra los patrones de crecimiento del fruto afectados por diferentes tratamientos de riego. La fase reproductiva de la división celular dura 40-50 días después de la floración (Westwood, 1993).

El tamaño del fruto es un gran determinante de la calidad del fruto fresco y depende en gran medida del estado hídrico del árbol y del riego. Sin embargo, hay muchos otros factores que interactúan entre sí y que afectarán la respuesta del tamaño del fruto al riego, incluidos el número de células en el pericarpio del fruto, la carga de frutos y el número de semillas por fruto.

Las temperaturas inferiores a 25 °C durante la fase reproductiva de división celular reducen el tamaño del fruto (Tromp, 1997 y Warrington *et al.* 1999); por otro lado, se ha encontrado que el número de células en las manzanas disminuyó cuando los árboles se sembraron a 35/15 °C (día/noche) en lugar de 25/15 °C. Esto sugiere que hay una temperatura óptima para la división celular reproductiva, y que la limitación del tamaño potencial del fruto es de esperarse tanto en climas fríos como cálidos. El rendimiento del cultivo del año anterior (Bergh, 1985), el nivel de cosecha del año actual, y el momento del aclareo de frutos afectan la cantidad de células, y por consiguiente, el tamaño potencial del fruto (Goffinet, 1995 y Quinlan y Preston, 1968). La cantidad de semillas por fruto tiene un efecto marcado en el tamaño final del fruto, como se muestra en la Figura 3, en la que, para la variedad Golden Delicious, el diámetro del fruto donde aparentemente no había semillas fue de aprox. 52 mm, mientras que alcanzó aprox. 73 mm cuando aparentemente había diez semillas por fruto. Existe la percepción de que el estrés hídrico afecta a la división celular; sin embargo, estudios en otros árboles frutales (olivos y perales) no mostraron efectos del estrés hídrico en el número de células del fruto, incluso cuando el potencial hídrico foliar (LWP) antes del amanecer llegó a -4.0 MPa en los olivos (Rapoport *et al.,* 2004).

FIGURA 2 Patrones estacionales del crecimiento de las manzanas en respuesta a diversos tratamientos de riego: azul oscuro y azul claro, gris y rojo: 100 % de ET_c estimada para varias distribuciones de riego por goteo; verde oscuro y claro: 100 % de ET_c estimada aplicada después de dos años de restricciones hídricas severas (entre 50 y 70 % de ET_c estimada); anaranjado oscuro y anaranjado claro, negro y violeta: distintos niveles de restricción hídrica (50 a 70 % de ET_c estimada) (Girona et al., 2011 y datos sin publicar).

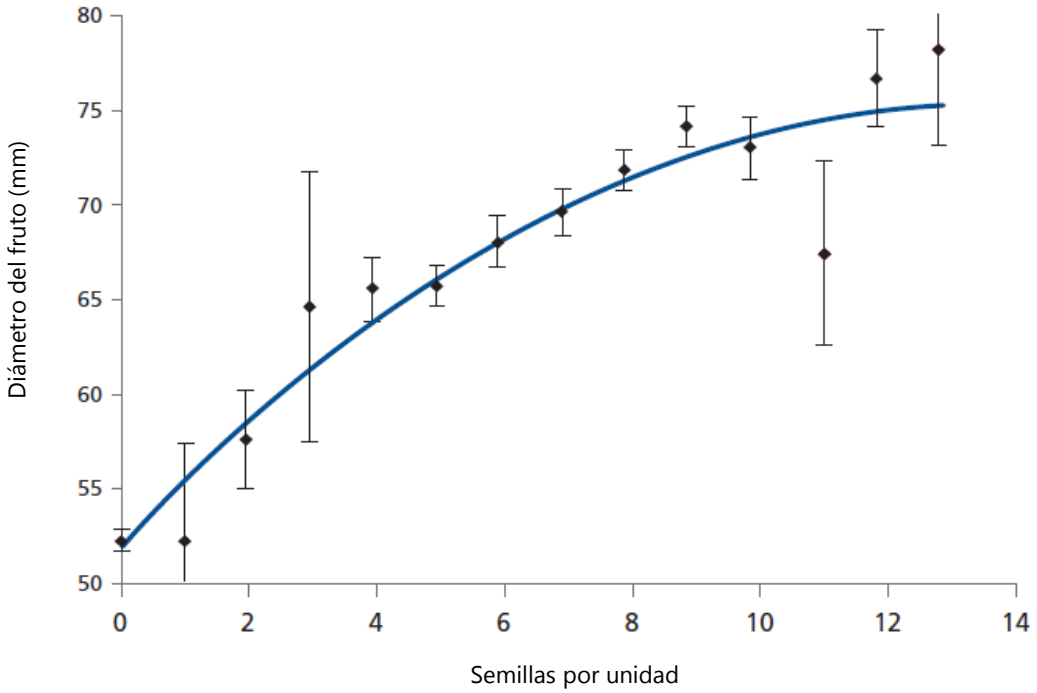


La carga de producción en la estación actual afecta el llenado del tamaño potencial del fruto e interactúa con el riego y el estado hídrico del fruto, lo cual se analizará más adelante. Es limitada la información sobre los efectos positivos o negativos del déficit hídrico postcosecha con respecto a las respuestas del rendimiento y a la calidad de las manzanas en el siguiente período de crecimiento, pero parece que el estrés severo puede tener efectos negativos en la floración.

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

El riego es una actividad hortícola importante y es la operación que se practica de manera más intensiva durante la estación. Su importancia depende del clima y aumenta a medida que uno pasa de zonas templadas a zonas más secas y zonas áridas. Los huertos de manzanos en condiciones de secano pueden sobrevivir y ser productivos en zonas templadas sin riego, mientras que la supervivencia de los huertos de manzanos en zonas áridas y semiáridas depende de la disponibilidad del agua para riego durante la mayor parte del período de crecimiento. El comportamiento de los manzanos en términos de rendimiento del cultivo, tamaño del fruto, calidad del fruto, aptitud para almacenamiento y productividad a largo plazo dependen en gran medida del riego y del manejo del mismo. Se sabe que el nivel de riego y el estado hídrico afectan el rendimiento y sus componentes: el rendimiento del cultivo, el tamaño del fruto y la calidad, el hábito de crecimiento, la precocidad y la productividad a largo plazo. El tamaño de las manzanas es muy sensible y por tanto responde bastante al riego (Naor, 2006; Naor *et al.,* 1995 y Girona *et al.,* 2010). También responde bastante a la carga de producción (Naor *et al.,* 2008). Por tanto, la disponibilidad de asimilados es el factor limitante para el llenado del tamaño potencial del fruto (Naschitz *et al.,* 2010). El estrés hídrico no solo limita la expansión celular y del fruto, sino que reduce la fotosíntesis (la fuente de asimilados), mientras que la carga de producción primordialmente determina la demanda de asimilados y hasta cierto punto la tasa fotosintética.

FIGURA 3 Efecto del número de semillas por fruto en el tamaño del fruto al momento de la cosecha, en el caso de las manzanas Golden Delicious en Israel (Naor, sin publicar).



A diferencia del durazno o melocotonero, el manzano no tiene etapas diferenciadas de crecimiento del fruto y gran parte del crecimiento vegetativo y reproductivo se superpone durante el período de crecimiento. Por esto, los investigadores de riego deficitario normalmente emplean los términos "principio de la estación" o "final de la estación" para describir el momento de la aplicación del tratamiento. Principio de la estación normalmente indica el período de tiempo antes de que se formen las yemas florales para el fruto de la siguiente estación. Para la mayoría de variedades, el principio de la estación será antes de julio en el hemisferio norte y antes de enero en el hemisferio sur.

El estrés hídrico al principio de la estación reduce el tamaño de fruto del manzano (Failla *et al.,* 1992 y Rufat *et al.,* 2003). También reduce drásticamente el cuajado del fruto aumentando la caída de frutos en desarrollo en zonas templadas; en un experimento (Powell, 1974), el cuajado final de fruto disminuyó de 24 % para árboles con riego a 8.7 % para árboles sin riego. En un área semiárida de Israel, el cuajado final de fruto de árboles con riego completo fue de 15 %, que disminuyó a 8 % en árboles severamente estresados. El almacenamiento de agua de la precipitación de invierno evita el desarrollo rápido del estrés hídrico severo en la mayoría de condiciones climáticas templadas, pero para los manzanos en contenedor con zona radicular limitada, el estrés hídrico severo puede causar hasta el 100 % de la caída de frutos en desarrollo. Esto sugiere que los productores deberían ser conscientes del riesgo que implica el estrés hídrico severo al principio de la estación, especialmente durante los años de sequía, y/o en suelos muy superficiales que tengan poca capacidad de retención de agua.

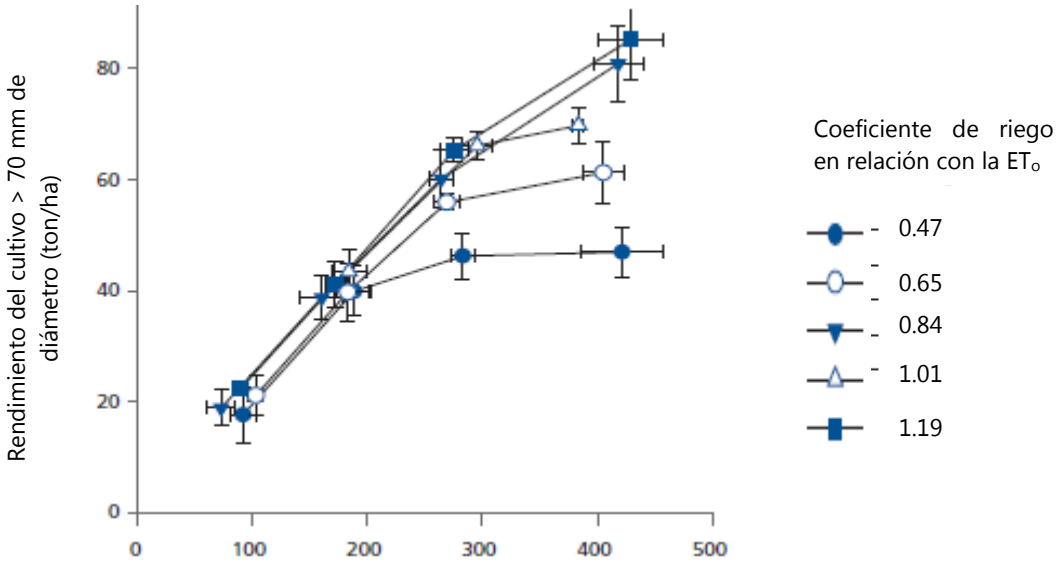
Dependiendo del grado de severidad, el estrés hídrico de final de estación, que ocurre en la etapa de división celular después de la reproducción, afecta a los manzanos. El estrés hídrico moderado de hasta 102 días después de la plena floración redujo el crecimiento del dosel (Behboudian *et al.,*

1998), mientras que el estrés hídrico después de este período no tuvo efectos. Esto indica que el crecimiento de los brotes termina en los tres meses siguientes a la floración (Forshey y Elfving, 1989). Un déficit temprano creó un estrés hídrico moderado y produjo un retorno de floración más bajo, mientras que la no reducción del retorno de floración se hizo evidente en el tratamiento de déficit tardío (Behboudian *et al.,* 1998). Sin embargo, si el estrés hídrico es severo durante estas etapas finales, puede afectar al crecimiento del siguiente año (Ebel, 1991 y Girona, 2010a). En las manzanas se han encontrado reducciones del retorno de floración y de la productividad bajo estrés hídrico severo. La cantidad de frutos en los años siguientes se vio afectada por el estrés severo del año anterior, generado por terminar el riego a principios de verano. Esto es particularmente evidente en las variedades tempranas (Ebel, 1991).

Los otros estudios, mencionados anteriormente, en los que no se redujo el retorno de floración, no tuvieron un nivel de estrés hídrico tan severo (Behboudian *et al.,* 1998). La reducción de la proporción del retorno de floración de los manzanos que estuvieron moderadamente estresados al principio de la estación pudo reducir el tamaño de las bolsas que emergen de las yemas florales del manzano, por debajo del umbral requerido para que su yema terminal produjera una yema floral viable (Lauri *et al.,* 1996). Bien pudo ser que las bolsas ya habían alcanzado la longitud umbral antes de que comenzaran los tratamientos por déficit tardío, de manera que no hubo efectos aparentes del estrés hídrico tardío durante el retorno de floración. Se ha observado que la sombra excesiva debida a un dosel denso también puede afectar negativamente el retorno de floración.

En la mayoría de estudios, el déficit hídrico temprano (2 meses después de la división celular reproductiva) redujo el tamaño de la manzana (Naor, 2006 y Rufat *et al.,* 2003). En general, el rendimiento total del cultivo aumenta tanto con el nivel de riego como con la carga de producción. Sin embargo, como el tamaño del fruto es un atributo importante de la calidad del fruto, los de producción están interesados en frutos más grandes hasta cierto límite, el límite en el cual las manzanas demasiado grandes se venden a precios más bajos. El rendimiento de los frutos grandes se ve afectado tanto por el riego como por la carga de producción (Figura 4). A cargas bajas de cultivo, no hay ventajas al incrementar el riego, puesto que se pudieron obtener rendimientos de cultivo similares en un experimento en el cual los niveles de riego entre junio y la cosecha estuvieron entre 46 y 119 % de la ET_o (Naor *et al.,* 1997).

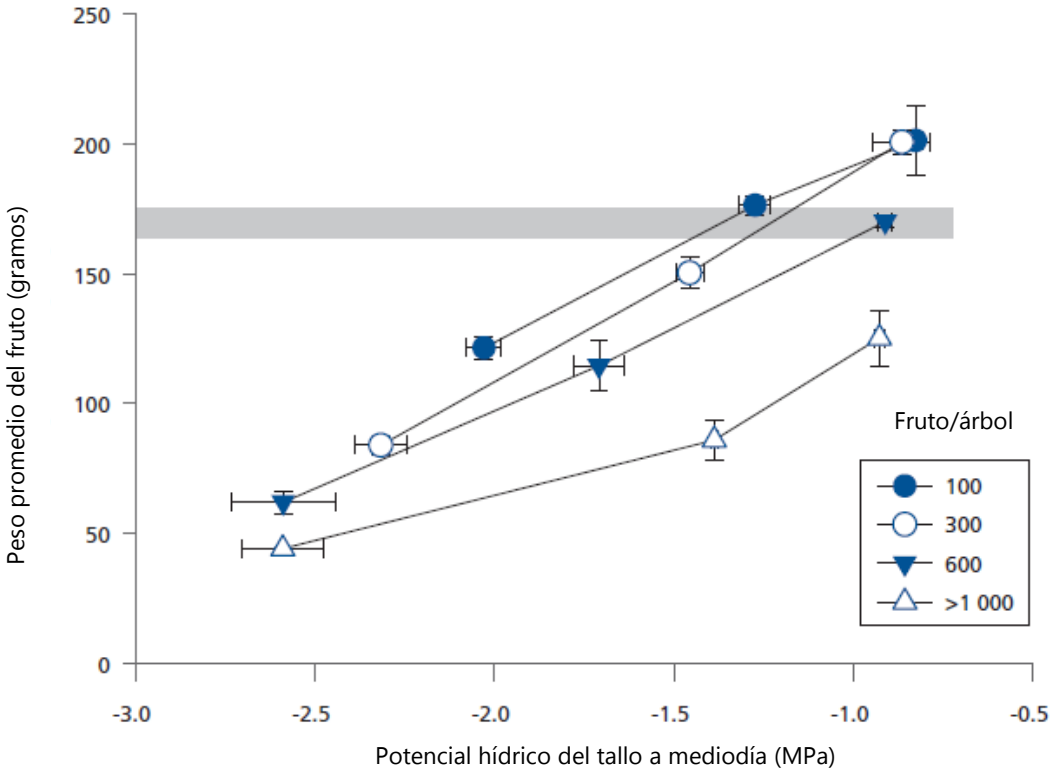
FIGURA 4 Efecto del número de frutos por árbol (1250 árboles/ha) sobre el rendimiento de los manzanos (>70 mm de diámetro) a diferentes niveles de riego (ET_o) desde mediados de junio hasta la cosecha. Las barras muestran el error estándar (Naor *et al.,* 1997).



Los déficits hídricos pueden reducir el tamaño del árbol al año siguiente, pero no afectan negativamente a la cantidad de yemas florales o la carga de frutos (Girona *et al.,* 2008). A medida que aumentaba la carga de frutos (doble cantidad de frutos por árbol), el rendimiento de frutos grandes aumentaba con los niveles de riego. Esto indica una mayor limitación de la disponibilidad de asimilados que no se puede superar suministrando agua adicional por encima de los requerimientos totales. En la máxima carga de producción, el rendimiento de frutos grandes no respondió al nivel de riego estacional por encima del 84 % de la ET_o, lo cual equivale aproximadamente a la ET_c durante el período de riego (ver abajo).

El tamaño del fruto aumentó al aumentar el potencial hídrico del tallo (SWP: Figura 5) donde se observaron diferentes curvas de respuesta para diferentes cargas de cultivo. El umbral del SWP a mediodía para alcanzar el tamaño de fruto comercializable cambió a potenciales hídricos de tallo más altos, con mayor carga de producción. Para cargas de cultivo hasta niveles medios, el tamaño máximo de fruto se puede alcanzar mejorando el estado hídrico del árbol. Sin embargo, a cargas de cultivo extremadamente altas, el tamaño comercializable del fruto no puede ser alcanzado incluso en condiciones sin estrés. Por lo tanto, hay un límite superior de carga de producción que permitiría tamaños grandes de fruto, sugiriendo que se deberían emplear las prácticas tanto de riego como de aclareo de fruto para maximizar el rendimiento de frutos grandes y comercializables. En algunos casos, la poda de verano puede contribuir a lograr tamaños comercializables, como en el caso del durazno o melocotón.

FIGURA 5 Efecto del potencial hídrico del tallo a mediodía en el peso promedio del fruto para varias cargas de cultivo, 1250 árboles/ha, para la manzana Golden Delicious en Israel (Naschitz, sin publicar). El rectángulo gris representa el tamaño óptimo del fruto. Los cuatro potenciales hídricos más bajos representan la tasa baja de riego (1 mm/día) y los cuatro más altos representan la tasa alta de riego (7 mm/día). Los otros puntos representan la tasa media de riego (3 mm/día).



Déficits hídricos y calidad del fruto en los manzanos

En general, los déficits hídricos moderados durante el desarrollo del fruto adelantan la madurez, aumentan el contenido de sólidos solubles totales y la firmeza, y pueden mejorar el color rojo y disminuir el color de fondo. También afectan a los compuestos aromáticos volátiles. Muchos estudios anteriores encontraron mayor firmeza como resultado del riego deficitario. Sin embargo, se argumentó (Behboudian y Mills, 1997) que el aumento de la firmeza del fruto de los árboles estresados podría ser un artefacto, porque el tamaño del fruto disminuye como resultado directo del riego deficitario y la firmeza de las manzanas aumenta al disminuir el peso del fruto (Ebel *et al.,* 1993). En distintos estudios, el estrés hídrico después de la fase de división celular aumentó (Mpelasoka *et al.,* 2001), no afectó (Ebel *et al.,* 1993), o disminuyó (Mills *et al.,* 1994) la firmeza de las manzanas al momento de la cosecha.

La dinámica de la firmeza del fruto en almacenamiento frío, según se ve afectada por los déficits hídricos, se examinó en dos estudios sobre la manzana (Mpelasoka *et al.,* 2001. y Kilili *et al.,* 1996). La diferencia en la firmeza entre frutos por distintos tratamientos de estrés hídrico permaneció igual durante 10 y 12 semanas en almacenamiento frío; disminuyó después de 10 semanas y alcanzó niveles similares cerca de las 17 semanas (Mpelasoka *et al.,* 2001). Durante un estudio del tiempo de conservación (Mpelasoka *et al.,* 2001) la mayor firmeza conferida por el tratamiento de riego deficitario se mantuvo durante seis días, después de los cuales disminuyeron y desaparecieron las diferencias. Los datos recopilados la década pasada sugieren que la firmeza

aumenta en respuesta al estrés hídrico posterior a la división celular, pero el aumento a menudo es temporal, cerca de 10 semanas en algunos estudios.

Muchos estudios encontraron que el riego deficitario aumentó las concentraciones de etileno de la manzana al momento de la cosecha o durante el almacenamiento (Ebel *et al.,* 1993; Kilili *et al.,* 1996; Behboudian *et al.,* 1998; Mpelasoka *et al.,* 2001 y Mpelasoka *et al.,* 2002). El color de fondo es un indicador de madurez en la manzana y se reportó que disminuye o permanece invariable en respuesta al riego deficitario. Estos descubrimientos indican que el riego deficitario adelanta la madurez (y el color rojo correspondiente) en la mayoría de casos. Estudios del efecto del riego deficitario sobre compuestos aromáticos volátiles arrojaron resultados inconsistentes (Behboudian *et al.,* 1998 y Mpelasoka *et al.,* 2002) probablemente por el aumento drástico de estos compuestos en cierto punto, junto con el hecho de que no hay una definición diferenciada de la maduración y el adelanto de la madurez en respuesta al riego deficitario. El riego deficitario aumentó los sólidos solubles totales en la manzana al momento de la cosecha (Ebel *et al.,* 1993; Behboudian *et al.,* 1994; Behboudian *et al.,* 1998; Mills *et al.,* 1994; Kilili *et al.,* 1996; Mpelasoka *et al.,* 2001a y Mpelasoka *et al.,* 2002), y las diferencias se mantuvieron durante el almacenamiento. El aumento del contenido de sólidos solubles totales estuvo acompañado de un aumento en el porcentaje de materia seca, sugiriendo que parte del aumento de sólidos solubles se deriva de las pérdidas de agua del fruto. Sin embargo, el riego deficitario expuso efectos metabólicos específicos que se manifestaron en cambios en las proporciones de azúcares específicos al incrementar el contenido de sorbitol o fructosa (Mills *et al.,* 1994) comparado con los tratamientos sin estrés.

El riego deficitario aumentó el color rojo (Mills *et al.,* 1994 y Kilili *et al.,* 1996) o no lo afectó en la manzana. El aumento del color rojo podría ser un efecto indirecto del riego deficitario, a través de la reducción del crecimiento vegetativo, que afecta el régimen de luz dentro del dosel. También podría estar asociado con el adelanto de la madurez inducido por el déficit hídrico. Recientemente se han publicado más detalles de los efectos del riego reducido y la calidad del fruto para frutales caducifolios importantes, entre ellos la manzana (Behboudian *et al.,* 2011).

REQUERIMIENTOS DE AGUA

Dos factores clave que determinan el consumo de agua de los manzanos son la demanda evaporativa de la atmósfera y la cobertura del dosel, que determina la cantidad de energía interceptada por el dosel. Un estudio reciente con lisímetro (Girona *et al.,* 2011) mostró que el coeficiente de cultivo aumenta desde el desborre de las yemas proporcionalmente al desarrollo de la cobertura del dosel, cuando la cobertura del dosel alcanza un máximo de aprox. 60 días después de la plena floración (Figura 6). Un ligero incremento del K_c se produjo aparente cerca de la cosecha, seguido de una drástica disminución después de la cosecha. Esta disminución probablemente fue primero el resultado de la retirada de la cosecha, que se sabe que afecta a la transpiración; mientras que la disminución adicional a partir de ese momento estaba relacionada con la senescencia foliar. La drástica disminución del K_c inmediatamente después de la cosecha, de 1.0 a 0.6 en 2-3 semanas sin evidencia de senescencia foliar (Figura 6) se repite cada estación (Girona *et al.,* 2011) porque el fruto es un sumidero de nutrientes de carbono muy importante y la retirada de los frutos retroalimenta la asimilación de carbono y reduce la conductancia estomática y la transpiración. Por lo tanto, los árboles con cargas de cultivo muy bajas usan menos agua que los árboles con cargas comerciales, lo que indica que los valores del K_c deberían ajustarse hacia abajo a partir de los valores de la Figura 6 para cargas de cultivo de bajas a insignificantes. En primavera, es de esperarse el crecimiento vegetativo excesivo en los árboles con baja carga de producción, y su supresión es difícil por la ET baja en primavera, por tanto la poda se debe llevar a cabo en verano.

En la Tabla 1 se presentan los valores recomendados del K_c para varios lugares en el mundo. Los valores del K_c para los huertos de manzanos dependen de la radiación interceptada y pueden variar

con las condiciones de huertos diferentes (espaciamiento de filas y de árboles, edad y tamaño de los árboles, sistema de poda, orientación de los surcos, etc.). Para plantaciones intensivas en seto, en la Figura 7 se presenta una relación entre el K_c y la intercepción de luz a mediodía (Girona *et al.*, 2011). Dado que el K_c máximo es alrededor de 1.0 (Figura 6), la relación mostrada en la Figura 7 puede usarse para determinar los valores específicos del K_c para huertos de manzanos que no han alcanzado la madurez.

FIGURA 6 Coeficientes de cultivo de la ET_o de referencia estacionalpara las manzanas. Datos de un estudio con lisímetro de pesada de los árboles de tamaño comercial en un huerto en Mollerusa (Lleida, España) (Girona *et al.*, 2011).

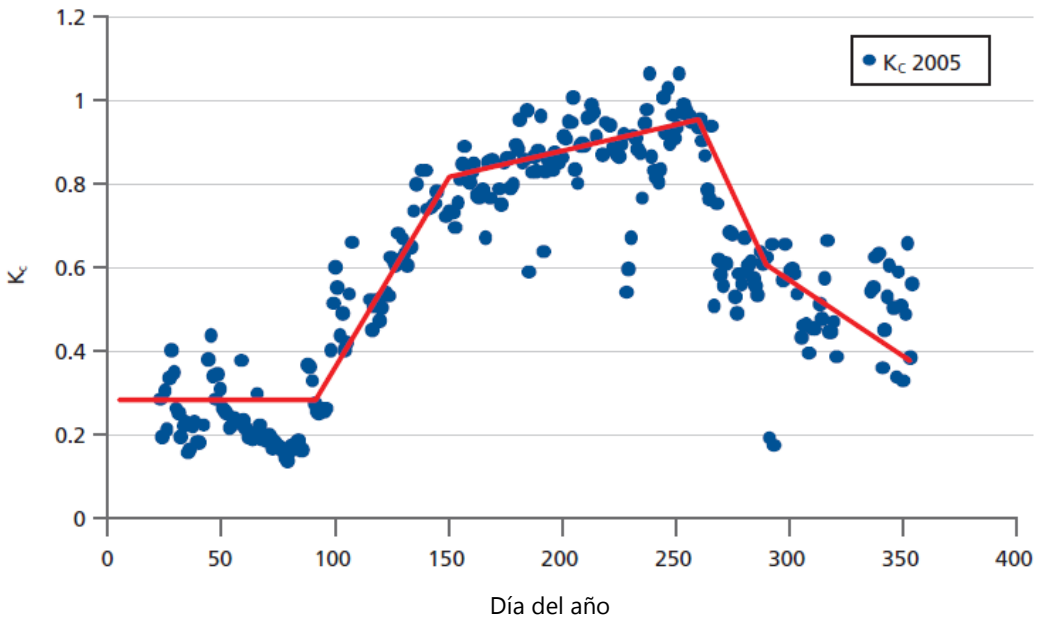
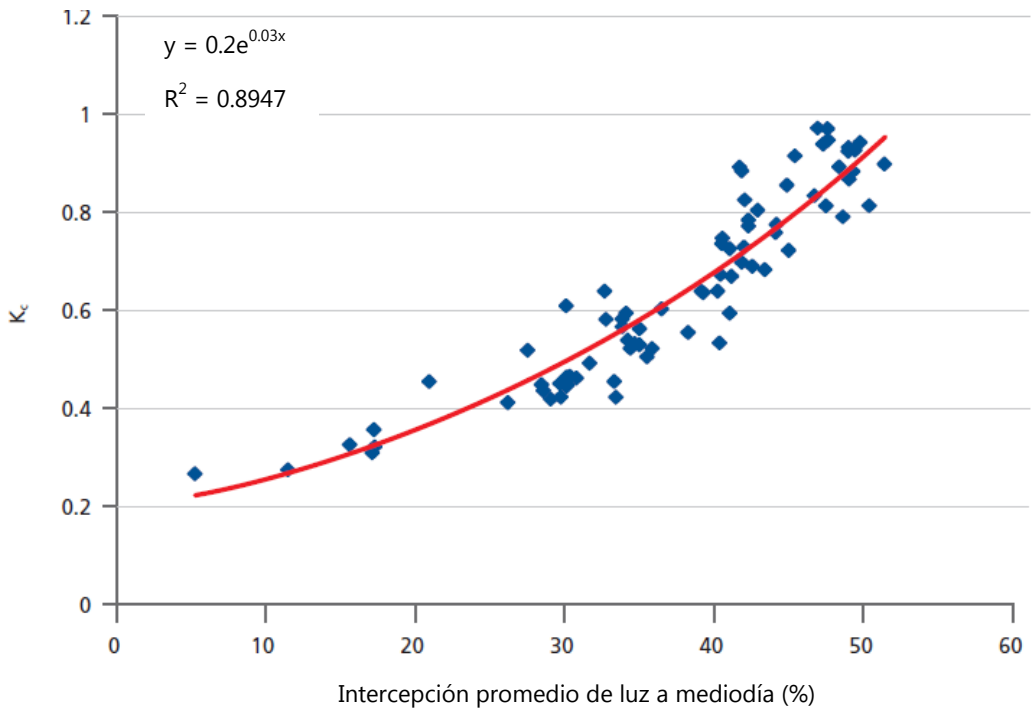


TABLA 1 Conjuntos comunes de coeficientes de cultivo de la ET_o referencia estacional (promedios mensuales) de varios países en todo el mundo (Australia, Israel, y España).

Mes	España (fracción de ET_o)	Israel (fracción de ET_o)	Mes	Australia
Mar.	0.30/0.30		Sep.	
Abr.	0.40/0.45	*	Oct.	0.64
Mayo	0.60/0.75	0.42	Nov.	0.64
Junio	0.82/0.87	0.73	Dic.	0.74
Julio	0.92/0.93	0.98	Ene.	0.95
Ago.	0.93/0.94	1.05	Feb.	0.95
Sep.	0.95/0.75**	1.05/0.48**	Mar.	0.95/0.42**
Oct.	0.60/0.55	0.32	Abr.	0.42

**Riego basado en las mediciones de humedad del suelo*
*** Precosecha/postcosecha*

FIGURA 7 Efecto de la intercepción de luz a mediodía de los manzanos en sus valores de K_c; datos de un estudio con lisímetro de pesada de árboles de tamaño comercial en un huerto en Mollerusa (Lleida, España) (Girona et al., 2011).



FUNCIONES DE PRODUCCIÓN DEL AGUA

Las funciones de producción del agua para las manzanas son difíciles de generalizar porque se ven afectadas por muchos factores como los sistemas de poda, la carga de producción, las prácticas de poda y aclareo, y de si el objetivo es el rendimiento total (como para la producción de jugo/zumo) o el mercado de frutos frescos.

Las Figuras 8 y 9 presentan la respuesta del rendimiento total y comercializable ante la disminución de la ET_c determinada en Lleida, España. En ambos casos, parece que la ET_c relativa se puede reducir en 15- 20 % sin tener un impacto negativo en el rendimiento final. En Israel se encontraron resultados similares, en los que el rendimiento de fruto >70 mm no se vio afectado por el incremento del K_c por encima de 0.84 (Figura 10).

El manejo de la producción de manzanas para el mercado de frutos frescos debería tener en cuenta que: 1) el tamaño del fruto depende en gran medida de la carga de producción; por tanto, se debe optimizar para maximizar el rendimiento de fruto de tamaño comercializable; 2) los manzanos suelen tener un patrón de producción bienal en respuesta a la alta carga de producción; por tanto, la carga del producción se debería optimizar para permitir una producción estable para cada estación. En un experimento específico con Golden Delicious (Figura 10), el rendimiento de cultivo del tamaño comercializable (>70 mm) aumentó tanto con el nivel de riego como con la carga de

producción, y el máximo rendimiento de cultivo se alcanzó a la carga máxima y la ET_c máxima (equivalente a 84 % de la ET_o estacional). Se debe hacer énfasis en que el tamaño del fruto potencial fue alto durante esta estación, y que, aunque el umbral del máximo rendimiento comercial de cultivo podría ser mayor, la carga óptima del cultivo que evita la producción bienal se encuentra entre las dos cargas del cultivo más altas (Figura 10) y puede cambiar con las condiciones climáticas.

FIGURA 8 Función de producción del agua para los manzanos (variedad Golden Smoothee) con base en el rendimiento total obtenido en Lleida, España (Girona, sin publicar).

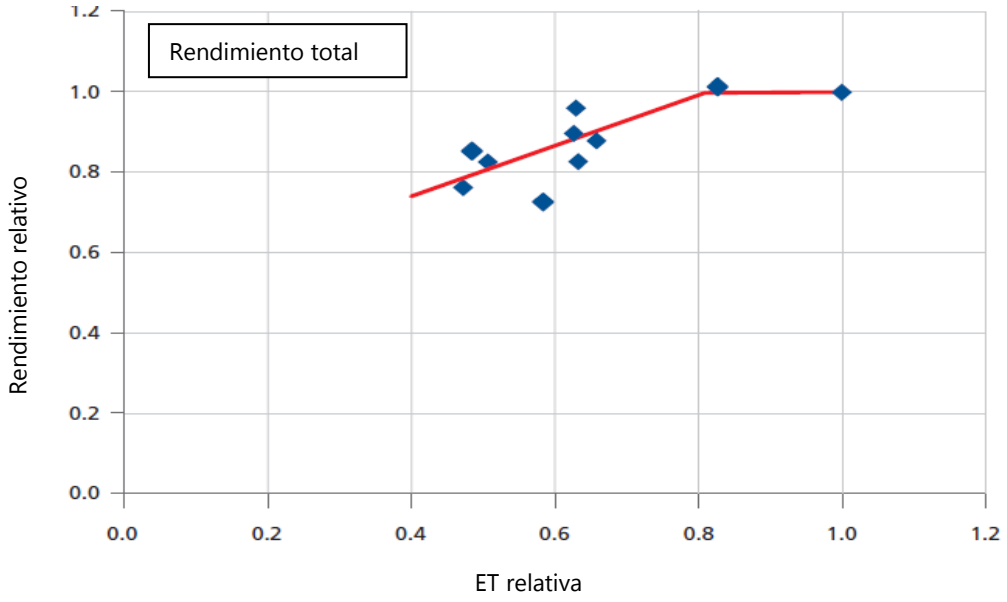


FIGURA 9 Función de producción del agua para los manzanos (variedad Golden Smoothee) con base en el rendimiento comercializable obtenido en Lleida, España (Girona, sin publicar).

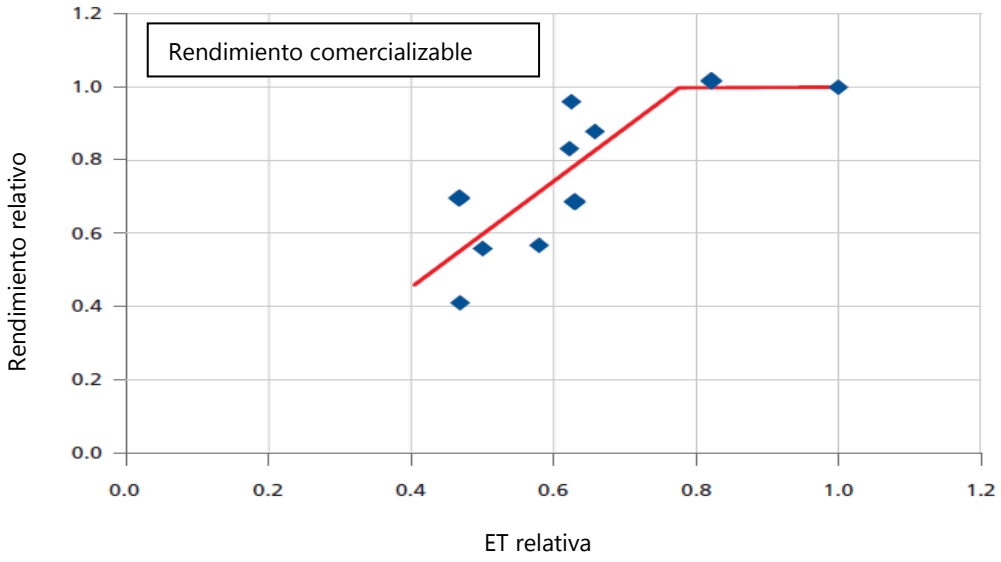
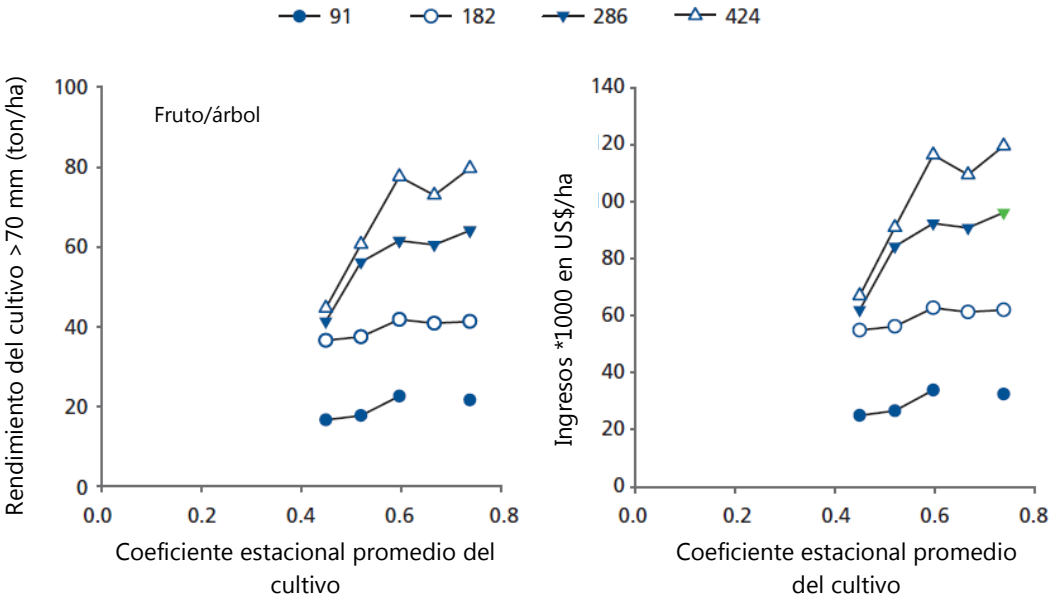


FIGURA 10 Respuesta del rendimiento comercializable del fruto (>70 mm) e ingresos de la variedad Golden Delicious a las tasas de riego (promedio de K_c de la ET_o de referencia estacional) con varios niveles de cultivo (1250 árboles/ha). Se aplicaron tasas diferentes de riego desde mediados de junio hasta la cosecha; los valores del K_c fueron 0.44, 0.65, 0.84, 1.01, y 1.19; la ET_o estacional (1/5-1/11) fue 1172 mm.



REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

Dados los patrones de crecimiento de los manzanos y la sensibilidad del tamaño del fruto a los déficits hídricos, parece que solamente se pueden aplicar déficits hídricos moderados a este cultivo cuando se planta para el mercado de frutos frescos, sin afectar negativamente los ingresos de los agricultores. Sin embargo, los RDI tienen algunos efectos positivos en la calidad que deberían explotarse, en particular en situaciones de escasez de agua. El objetivo del manejo de riego de los manzanos en asignaciones subóptimas de agua sería minimizar los daños y maximizar la productividad del agua de del riego. Si se considera una pequeña reducción del suministro, ésta debería ocurrir preferiblemente durante el período de postcosecha. En las variedades comunes cosechadas en septiembre (hemisferio norte) se deja un período de riego hasta el comienzo de la senescencia foliar, período que es más corto al aumentar la latitud. En condiciones de escasez de agua, uno puede omitir el riego postcosecha para las variedades comunes, pero no se debe hacer en las variedades de maduración temprana que tienen períodos largos de postcosecha. Si la escasez de agua supera el nivel equivalente al monto usado para riego postcosecha, los productores deberían aplicar el déficit de manera continua después del período temprano de crecimiento del fruto (evitar el estrés en los primeros 30 a 60 días siguientes al cuajado del fruto, dependiendo de la variedad), y ajustar la carga de producción mediante aclareo para garantizar que los frutos restantes alcancen el tamaño comercial. En la Tabla 2 se presenta una recomendación sobre el riego para las distintas asignaciones de agua y cargas óptimas del cultivo para la producción en climas cálidos.

Es importante monitorear el suelo o el estado hídrico del árbol cuando se aplica RDI (véase Capítulo 4). El control climático para los manzanos (protección contra heladas y/o enfriamiento para evitar las quemaduras por el sol o para aumentar el color rojo en áreas cálidas) se lleva a cabo usando riego por aspersión y su uso, en caso de heladas, puede interrumpir el programa de RDI. El enfriamiento por evaporación reduce la ET real en el orden de un 20 %, pero los requerimientos hídricos estacionales totales deberían ser mucho más altos que la ET_c, completa para el huerto, como se calculan en el Capítulo 4.

TABLA 2 Requerimientos hídricos del huerto de manzanos, con base en un huerto plantado a 4 x 1.6 m, podado con una guía principal y con cobertura vegetal de aproximadamente 45-50 % y altura de los árboles > 3.5 m, ubicado en Mollerusa (Lleida, España). Los valores de ET_o usados son los datos diarios promedio de los últimos 8 años (2002-2009)

			RIEGO COMPLETO		RDI MODERADO		RDI SEVERO	
		ET_o	K_c	ET_c	K_c	ET_c	K_c	ET_c
		(mm/día)		(mm/día)		(mm/día)		(mm/día)
Marzo	1-15	2.19	0.30	0.66	0.30	0.66	0.30	0.66
Marzo	16-31	2.61	0.30	0.78	0.30	0.78	0.30	0.78
Abril	1-15	2.70	0.40	1.08	0.40	1.08	0.30	0.81
Abril	16-30	3.75	0.45	1.69	0.45	1.69	0.30	1.13
Mayo	1-15	3.95	0.60	2.37	0.60	2.37	0.40	1.58
Mayo	16-31	4.64	0.75	3.48	0.75	3.48	0.40	1.86
Junio	1-15	5.08	0.82	4.17	0.82	4.17	0.50	2.54
Junio	16-30	5.45	0.87	4.74	0.87	4.74	0.50	2.73
Julio	1-15	5.40	0.92	4.97	0.90	4.86	0.50	2.70
Julio	16-31	5.47	0.93	5.09	0.70	2.74	0.45	2.46
Agosto	1-15	4.90	0.93	4.56	0.50	2.45	0.45	2.21
Agosto	16-31	4.45	0.94	4.18	0.50	2.22	0.45	2.00
Septiembre	1-15	3.57	0.95	3.39	0.50	1.78	0.45	1.61
Septiembre	16-30	3.01	0.75	2.26	0.50	1.51	0.45	1.35
Octubre	1-15	2.44	0.60	1.46	0.50	1.22	0.45	1.10
Octubre	16-31	1.60	0.55	0.88	0.55	0.88	0.55	0.88

BIBLIOGRAFÍA

Behboudian, M.H., Lawes, G.S. y Griffiths, K.M. 1994. Influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear *(Pyrusserotina* Rehd.). *Scientia Horticulturae.* 60:89-99.

Behboudian, M.H. y Mills, T.M. 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. *Horticultural Reviews* 21:105-130.

Behboudian, M.H., Dixson, J. y Pothamshetty, K. 1998. Plant and fruit responses of lysimeter-grown 'Braeburn' apple to deficit irrigation. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 73:781-785.

Behboudian, M.H., Marsal, J., Girona, J. y López, G. 2011. Quality and yield responses of deciduous fruit to reduced irrigation. *Horticultural Reviews* 38:149-189.

Bergh, O. 1985. Effect of the previous crop on cortical cell number of *Malus domestica* cv. Starking Delicious apple flower primordial, flowers and fruit. *South African Journal of Plant Soil.* 2:191-196.

Ebel, R.C. 1991. *Apple tree and fruit response to drought.* Pullman, Washington State University (Tesis de Doctorado)

Ebel, R.C., Proebsting, E.L. y Patterson, M.E. 1993. Regulated deficit irrigation may alter apple maturity, quality, and storage life. *Horticultural Science* 28:141-143.

Failla, O., Zocchi, Z., Treccani, C. y Socucci, S. 1992. Growth, development and mineral content of apple fruit in different water status conditions. *Journal of Horticultural Science* 67:265-271.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Forshey, C.G. y Elfving, D.C. 1989. The relationship between vegetative growth and fruiting in apple trees. *Horticultural Reviews* 11:229-288.

Girona, J., Mata, M., Del Campo, J. y Marsal, J. 2008. Manejo del riego del manzano en condiciones de sequia extrema. *Dossier Tecnic DAR* (Geeneralitat de Catalunya) 30:5-8.

Girona, J., Del Campo, J., Bonastre, N., París, C., Mata, M., Arbones, A. y Marsal, J. 2010a. Evaluation of Different Irrigation Strategies on Apple *(Malus domestica).* Physiological and Productive Results. *Acta Horticulturae* (en prensa).

Girona, J., Behboudian, M.H., Mata, M., Del Campo, J., y Marsal, J. 2010. Exploring six reduced irrigation options under water shortage for 'Golden Smoothee' apple: Responses of yield components over three years. *Agricultural Water Management* 98:370-375.

Goffinet, M.C., Robinson, T.L. y Lakso, A.N. 1995. A comparison of Empire apple fruit size and anatomy in unthinned and hand-thinned trees. *Journal of Horticultural Science* 70:375-387.

Goldway, M., Sapir, G. y Stern, R.A. 2007. Molecular basis and horticultural application of the gametophytic self-incompatibility system in rosaceae tree fruit. En: J. Janick (ed.). *Plant Breeding Reviews,* 28: 215-237.

Kilili, A.W., Behboudian, M.H. y Mills, T.M. 1996. Postharvest performance of 'Braeburn' apples in relations to withholding of irrigation at different stages of the growing season. *Journal of Horticultural Science* 71:693-701.

Lauri, P.E., Terouanne, E. y Lespinasse, J.M. 1996. Quantitative analysis of relationships between inflorescence size, bearing-axis size and fruit set - an apple tree case study. *Annals of Botany* 77:277-286.

Mills, T.M., Behboudian, M.H., Tan, P.Y. y Clothier, B.E. 1994. Plant water status and fruit quality in 'Braeburn' apples. *Horticultural Science* 29:1274-1278.

Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H. y Green, S.R. 2001. Water use, yield and fruit quality of lysimeter-grown apple trees: responses to deficit irrigation and crop load. *Irrigation Science* 20:107-113.

Mpelasoka, B.S. y Behboudian, M.H. 2002. Production of aroma volatiles in response to deficit irrigation and crop load in relation to fruit maturity for 'Braeburn' apple. *Postharvest Biological Technology* 24:1-11.

Naor, A., Klein, I. y Doron, I. 1995. Stem-water potential and apple fruit size. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 120:577-582.

Naor, A., Klein, I., Doron, I., Gal, Y., Ben-David, Z. y Bravdo B. 1997. Irrigation and fruit level interactions in relations to yield and fruit size distribution. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 122: 411-414.

Naor, A. 2006. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Horticultural Reviews* 32:111-166.

Naor, A., Naschitz, S., Peres, M., Gal, Y. 2008. Response of apple fruit size to tree water status and crop load. *Tree Physiology* 28:1255-1261.

Naschitz, S., Naor, A., Genish, S., Wolf, S. y Goldschmidt, E. 2010. Internal management of non-structural carbohydrate resources in apple leaves and stems under a broad range of sink and source capacity manipulations. *Tree Physiology* 30:715-27.

Powell, D.B.B. 1974. Some effects of water stress in late spring on apple trees. *Journal of Horticultural Science* 49:257-272.

Quinlan, J.D. y Preston, A.P. 1968. Effect of thinning blossom and fruitlets on growth and cropping of Sunset apple. *Journal of Horticultural Science* 43:373-381.

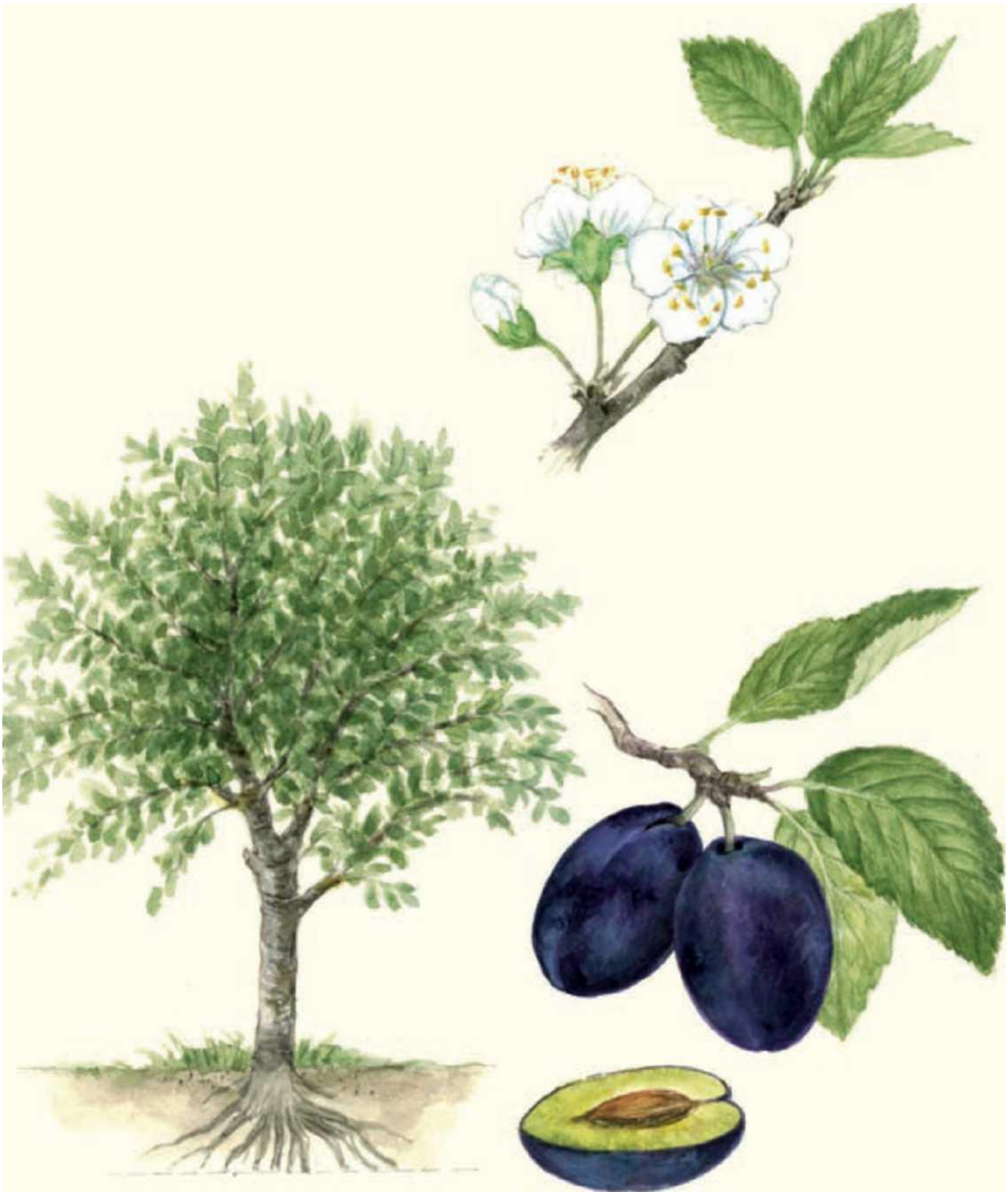
Rapoport H.F., Costagli, F. y Gucci, R. 2004. The effect of water deficit during early fruit development on olive fruit morphogenesis. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 129:121-127.

Rufat, J., Mata, M., Arbones, A., Del Campo, J., Gelly, M., Marsal, J., y Girona, J. 2003. *Fruit development, yield and quality in response to irrigation and nitrogen application on Golden Delicious apples.* Fifth International Conference on integrated fruit production IOBC/WPES Bulletin 24(5):359-365.

Tromp, J. 1997. Maturity of apple cv. Elstar as affected by temperature during a six-week period following bloom. *Journal of Horticultural Science* 72:811-819.

Warrington, I.J., Fulton, T.A., Halligan, E.A. y de Silva, H.N. 1999. Apple fruit growth and maturity are affected by early season temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 124:468-477.

Westwood, M.N. 1993. *Temperate-zone pomology.* Portland, Oregon, EE. UU., Timber Press, Inc.



Ciruelo

AUTORES PRINCIPALES

Diego S. Intrigliolo,
Juan R. Castel
(IVIA, Moncada, Valencia, España)

AUTOR COLABORADOR
Amos Naor
(GRI, Universidad de Haifa, y Migal - Centro de Tecnología de Galilea, Israel)

Ciruelo

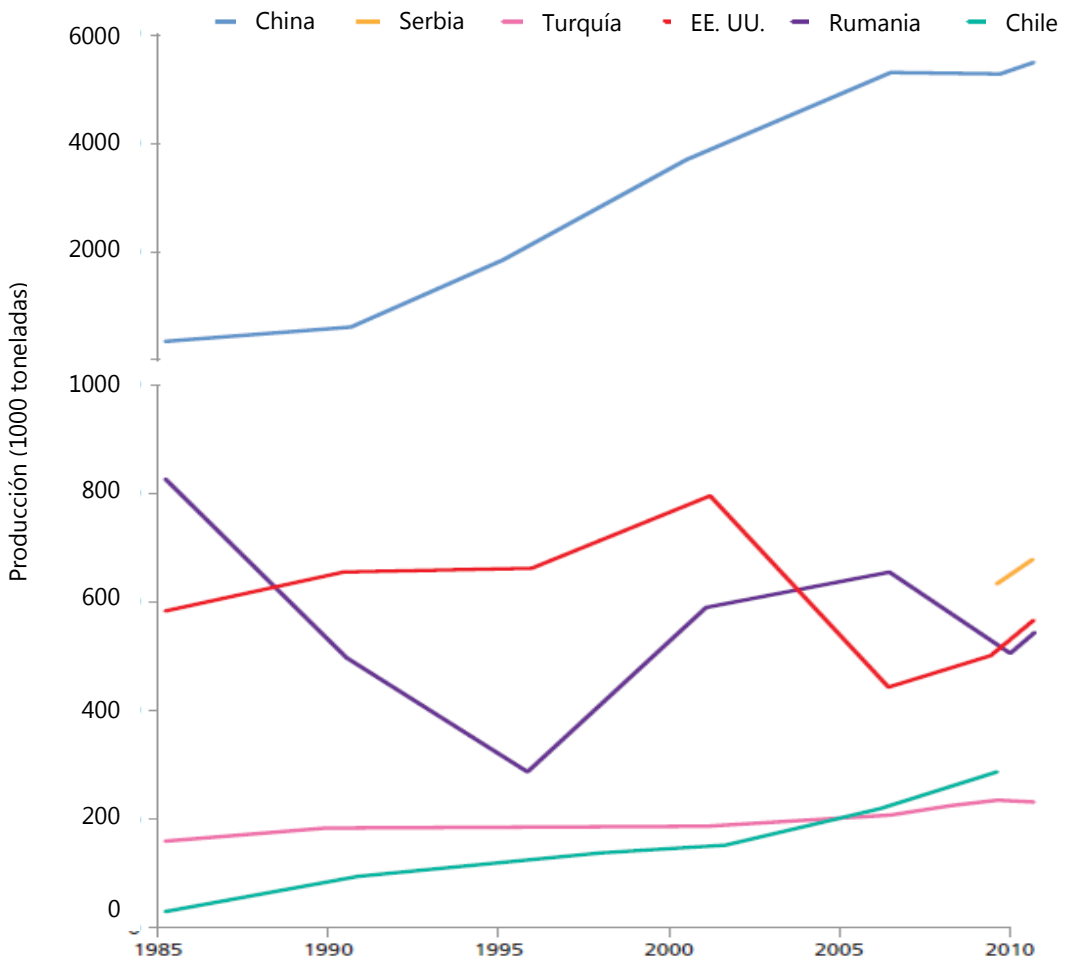
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Las especies importantes de ciruelos comerciales se originaron entre Europa oriental y Asia central. Las ciruelas cultivadas incluyen dos especies principales, la europea *(Prunus domestica* L.) o "ciruelas pasas" y las ciruelas japonesas *(Prunus salicina* L.). Las dos especies son árboles caducifolios de frutos de hueso de tamaño mediano, que difieren notablemente respecto a sus requerimientos climáticos. Las ciruelas europeas se cultivan en climas templados para satisfacer sus requerimientos de cantidad mínima de horas frío y permitir el desborre adecuado de las yemas. Son de floración relativamente tardía, mientras que las ciruelas japonesas crecen mejor en regiones de clima templado-más cálido, puesto que sus requerimientos de cantidad mínima de horas frío son menores. Su uso productivo también difiere, puesto que las ciruelas japonesas se cultivan principalmente para fruto fresco, mientras que el fruto seco (ciruelas pasas) se obtiene principalmente de las variedades europeas. El área mundial de cultivo fue superior a 2.5 millones de hectáreas en 2009, con un rendimiento promedio de 4.3 ton/ha. China y Serbia son los dos principales productores en el mundo, seguidos por los Estados Unidos y Rumania (Figura 1). España ocupa el octavo lugar, con cerca de 191 000 toneladas, en su mayoría de fruto fresco, pero está entre los tres mayores exportadores. Francia es el principal productor europeo de frutos secos y Chile es hoy un productor y exportador importante en el hemisferio sur (FAO, 2011).

Las especies de ciruelas pueden adaptarse a distintos tipos de suelo, aunque son sensibles al encharcamiento, a la clorosis férrica y a la salinidad. Por lo tanto, es común el uso de portainjertos para manejar estas condiciones ambientales adversas. Los ciruelos normalmente producen frutos a edades tempranas y el período de fructificación dura 5-35 años. Las variedades tempranas se pueden sembrar sin riego en climas áridos con precipitaciones tan bajas como 300 mm/estación, y las variedades de mediados de estación requieren por lo menos 400-500 mm/estación. Sin embargo, la productividad y el tamaño del fruto en estas condiciones normalmente son bajos; por lo tanto, la mayoría de plantaciones son regadas, especialmente en climas áridos y semiáridos.

Las características de calidad para el mercado de frutos frescos incluyen tamaño, color y buen balance entre los sólidos solubles y la acidez; mientras que para la producción de fruto seco, los sólidos solubles y el tamaño son los dos parámetros de calidad más importantes.

FIGURA 1 Tendencias de producción de ciruelas en los principales países (FAO, 2011).



ETAPAS DE DESARROLLO CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

Las variedades comerciales de ciruelos interrumpen la latencia y comienzan su floración entre finales de febrero y mediados de abril en el hemisferio norte, dependiendo de las condiciones ambientales y de la variedad. La formación de yemas comienza con la aparición de las primeras hojas basales y continúa hasta junio en los árboles maduros (Westwood, 1993). Las yemas reproductivas están en posición lateral en los brotes terminales o en brotes cortos que son brotes de dos años de edad. Las yemas florales se inician en el período de crecimiento antes de la antesis, y el desarrollo continúa durante la estación de latencia hasta la siguiente primavera, justo antes del desborre de las yemas. La proporción de brotes de dos años de edad y brotes terminales varía en gran medida dependiendo de la variedad y la especie; de igual manera sucede con la proporción de frutos en los brotes de dos años de edad y brotes, los cuales también varían con la edad del árbol. La mayoría de variedades comerciales de ciruelos no se autopolinizan; por tanto, se requiere el uso de polinizadores. Los ciruelos florecen muy profusamente y se requiere raleo/aclareo, ya sea

manual, químico o mecánico, para obtener frutos de tamaños comerciales. Por ejemplo, la variedad Black-Gold en condiciones mediterráneas puede cuajar alrededor de 10-40 % de las flores producidas, pero los buenos rendimientos comerciales se obtienen con solamente 5-10 % de cuajado de fruto (Intrigliolo y Castel, 2005). La floración termina normalmente a finales de abril (hemisferio norte) y sigue un rápido crecimiento expansivo del fruto con un rápido crecimiento concomitante de los brotes.

El fruto con pericarpio carnoso se clasifica como drupa y tiene una semilla. El crecimiento del fruto sigue el típico patrón de doble sigmoide, con rápido crecimiento exponencial durante la fase de división celular (Etapa I, aprox. 30 días de duración), seguida de un período relativamente corto de crecimiento lento durante el endurecimiento del hueso y el desarrollo del embrión (fase de retraso, Etapa II). Finalmente, un segundo período de rápido alargamiento celular y del fruto antes de la cosecha (Etapa III), cuando el fruto puede aumentar de tamaño casi un 40-60 %, aunque esto está vinculado a las unidades de calor acumulado (grados día) después de la floración, de forma parecida a otras especies *Prunus* (DeJong y Goudriaan, 1989). Por lo tanto, la duración de cada etapa depende de la variedad y la ubicación. Durante el período postcosecha, el crecimiento de algunos brotes y el almacenamiento de carbohidratos son los principales suministros de nutrientes para la asimilación del carbono, que continúa hasta la caída de las hojas.

EFECTOS DE LOS DÉFICITS HÍDRICOS

Se debe hace una distinción entre las ciruelas para producción de fruto fresco y aquellas para producción de fruto seco (ciruelas pasas), puesto que la acumulación de materia seca es menos sensible al estrés hídrico que el incremento de peso fresco, especialmente durante las últimas etapas de desarrollo del fruto. Además, las bajas tasas de hidratación del fruto que resultan de los déficits hídricos también puede ser una ventaja para el procesamiento del fruto postcosecha, en el caso de las ciruelas para producción de fruto seco (Lampinen *et al.,* 1995). Por tanto, los ciruelos para pasas se consideran moderadamente resistentes al estrés hídrico, como lo indican experimentos antiguos (Hendrickson y Veihmeyer, 1945) en los suelos profundos del valle de Sacramento, California, donde tardó 4 años sin riego la detección de la disminución del crecimiento del tronco, y 5 años de limitación de agua para detectar una reducción significativa de los rendimientos de frutos. Esto está respaldado también por descubrimientos más recientes (Goldhamer *et al.,* 1994) en los que la suspensión del riego, hasta 37 días antes de la cosecha, no tuvo efectos negativos en los rendimientos de frutos de la ciruela pasa francesa.

Estrés hídrico durante el crecimiento del fruto

En los ciruelos japoneses para el mercado de frutos frescos, el estrés hídrico en las etapas finales de crecimiento del fruto disminuyó significativamente el tamaño del fruto, pero aceleró la maduración y condujo a un incremento de la concentración de azúcar en el fruto (Naor, 2004). Bajo estrés hídrico, el rendimiento y el peso promedio del fruto se vieron afectados por un incremento de la carga de producción de los ciruelos japoneses (Intrigliolo y Castel, 2005; Naor, 2004); pero bajo condiciones mínimas de estrés, la distribución del tamaño del fruto no se vio afectada por la cantidad de frutos por árbol, posiblemente debido a los bajos rendimientos, lo que no introdujo limitaciones significativas de asimilados (Naor, 2004). Se observó que el riego de ciruelos para pasas estresados previamente inducía el agrietamiento en la punta del fruto (Uriu *et al.,* 1962); la formación de grietas estaba acompañada de un aumento de los gradientes de potencial osmótico a lo largo del fruto en árboles rehidratados (Milad y Shackel, 1992).

Estrés hídrico durante la postcosecha

La práctica de reducir o eliminar el riego después de la cosecha de las variedades de ciruelos de maduración temprana *(P. salicina)* regados con nebulizadores fue estudiada en California (Johnson *et al.,* 1994), donde suspender completamente el riego condujo a una defoliación parcial a las pocas semanas y pérdida de rendimiento el año siguiente. El potencial hídrico postcosecha del tallo (SWP) a mediodía alcanzó aprox. -3.3 MPa sin síntomas de defoliación en la variedad Black Amber (Naor, 2004). En el caso de los árboles que fueron regados a diario, pero a la mitad de la tasa de control de riego completo, no se presentó disminución del rendimiento o de la calidad del fruto durante un período de 3 años, posiblemente por la contribución del agua del suelo almacenada. En los huertos jóvenes, las restricciones de agua postcosecha no afectaron al rendimiento a corto plazo (Intrigliolo y Castel, 2005). Sin embargo, tras cuatro estaciones de riego deficitario, hubo una reducción del 10 % en el rendimiento, comparada con los árboles con riego completo, porque los árboles estresados eran más pequeños. Por tanto, el riego deficitario a largo plazo de los árboles jóvenes causa una reducción de la productividad al reducir el tamaño de los árboles. El estrés hídrico postcosecha, a pesar de su efecto perjudicial moderado a largo plazo, debería considerarse para huertos comerciales no sólo en el caso de escasez de agua, sino como una herramienta para controlar el crecimiento vegetativo en áreas donde el crecimiento vigoroso puede ser un problema.

Se sabe que el estrés hídrico de la planta tiene el potencial de afectar el desarrollo de las yemas florales en la siguiente estación, pero solamente hay unos pocos reportes de disminución de los niveles de producción en la siguiente estación debido al daño de las yemas (Johnson *et al.,* 1994). El estrés hídrico durante la postcosecha, medido según el SWP, también se correlacionó con los rendimientos del cultivo de la siguiente estación.

En algunos casos, incluso hubo un incremento del retorno de floración que condujo a un mayor rendimiento de los ciruelos para pasas, en los que el objetivo era un nivel alto de producción (Lampinen *et al.,* 1995). En los ciruelos, el estrés hídrico no pareció estar asociado a la aparición de trastornos del fruto, como la formación de doble fruto o la sutura profunda de fruto, como ocurre en otros frutos de hueso como el durazno o melocotón (Johnson y Handley, 2000).

Indicadores de estrés hídrico de la planta

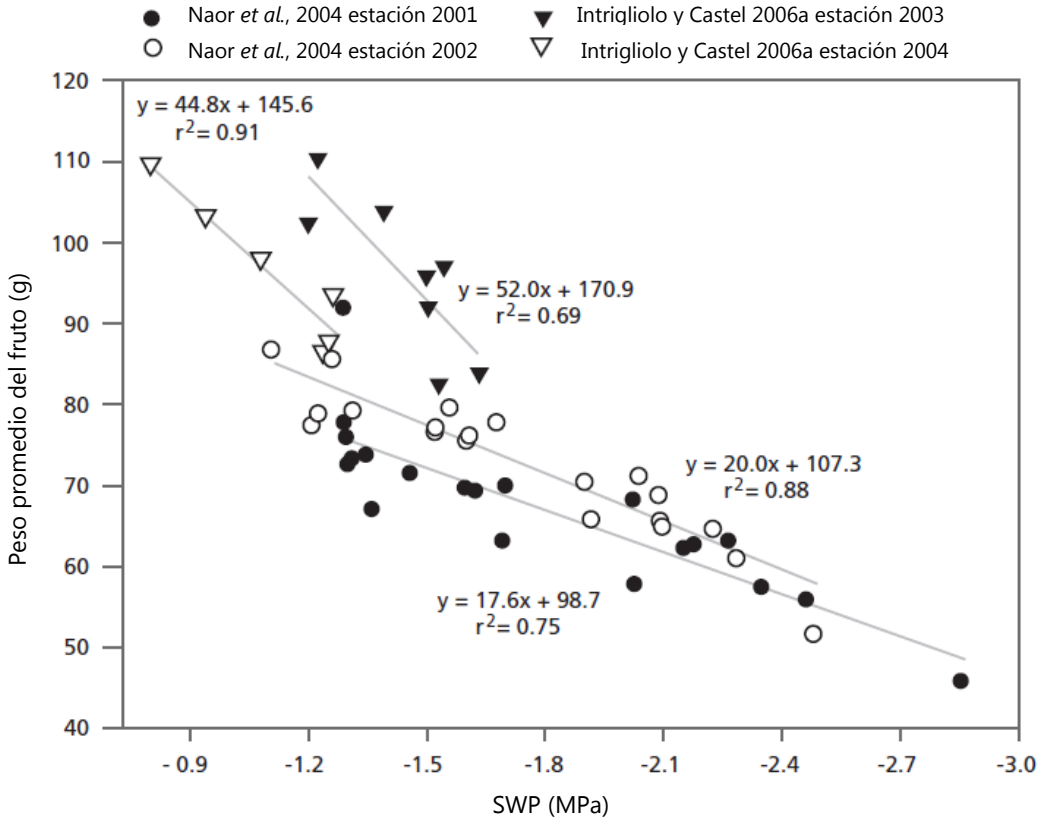
El SWP a mediodía es el indicador más útil de estrés hídrico de la planta en los ciruelos, puesto que antes de la cosecha estaba altamente correlacionado con el comportamiento del árbol (Naor, 2004; Intrigliolo y Castel, 2005; e Intrigliolo y Castel, 2006a). La Figura 2 presenta los resultados de dos estudios en diferentes variedades de ciruelos japoneses: Ciruelas Black-Gold (Intrigliolo y Castel, 2006a) y ciruelas Black Amber (Naor, 2004) en los climas semiáridos de Valencia, España y Alta Galilea, Israel, respectivamente. En cada ubicación y estación, las variaciones árbol a árbol del SWP se correlacionaron con el peso promedio del fruto al momento de la cosecha. Sin embargo, no hubo una relación única que relacionara el SWP con el peso del fruto y que fuera válida para todos los datos en todos los experimentos (Figura 2). Las diferencias en la intersección de las líneas reportadas entre estaciones y ubicaciones indican que el peso del fruto no solamente es función del estado hídrico de la planta. Además, las diferentes pendientes de las relaciones lineales entre ubicaciones sugieren que el efecto del estrés hídrico de la planta en el crecimiento del fruto podría cambiar, de acuerdo con las distintas condiciones ambientales o culturales. En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de realizar experimentos locales cuando se intenta predecir el efecto del estrés hídrico de la planta en el peso del fruto al momento de la cosecha.

Estudios que usan otros indicadores de estado hídrico para los ciruelos también han encontrado que la contracción diaria del tronco, medida continuamente con dendrómetros de tronco (Intrigliolo y Castel, 2006b), está altamente correlacionada con el SWP, pero otros factores como la edad del árbol y la carga de producción también influyen en la relación entre la contracción del tronco y el SWP (Intrigliolo y Castel, 2006b; e Intrigliolo y Castel, 2007).

REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

Solamente unos pocos estudios iniciales cuantificaron el uso del agua consuntivo de los huertos de ciruelos. Los valores recomendados de coeficiente de cultivo para los ciruelos se incluyen en la sección de frutos de hueso, junto con los árboles de durazno o melocotón, en la publicación *FAO: Riego y Drenaje N.º 56* (Allen *et al.,* 1998). Un estudio específico del uso del agua de los ciruelos podados de distintas maneras (Chootummatat *et al.,* 1990) encontró que los árboles maduros podados mediante el sistema Tatura que alcanzaban la cobertura completa, usaron 92 % de la evaporación medida por el método de tanque clase A a mediados de verano. Para los árboles podados mediante el sistema vaso o palmette se encontró un menor uso del agua (82 % de la evaporación por el método de tanque). Como una primera aproximación, los valores del K_c para el durazno o melocotonero (véase Durazno o melocotonero) deberían usarse para los huertos de ciruelos.

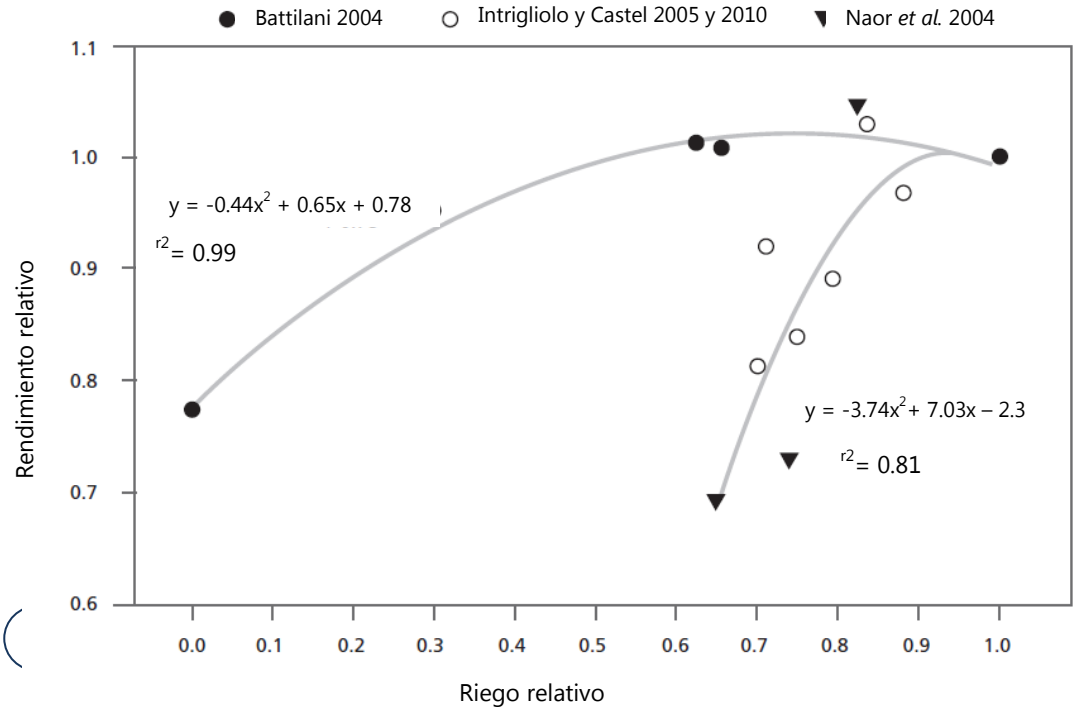
FIGURA 2 Relaciones entre el peso promedio del fruto al momento de la cosecha y el potencial hídrico promedio del tallo (SWP) a mediodía durante la última fase de crecimiento del fruto. Los datos corresponden a experimentos de riego deficitario regulado llevados a cabo con la variedad Black-Gold y la variedad Black-Amber de ciruelo japonés durante diferentes estaciones.



FUNCIÓN DE PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

Parece que no hay ensayos de riego deficitario que investiguen la relación entre el uso del agua de los árboles y el rendimiento, ni para los ciruelos japoneses ni para los ciruelos europeos para pasas. Sin embargo, de los principales resultados reportados en la bibliografía, es posible deducir algunas funciones de productividad del agua en base al agua aplicada por riego. En el análisis se incluyeron tres estudios sobre diferentes variedades de ciruelos japoneses: ciruelas Fortune en los climas húmedos del valle del Po en Italia (Battilani, 2004), ciruelas Black-Gold (Intrigliolo y Castel, 2006a; Intrigliolo y Castel, 2010) y ciruelas Black Amber (Naor, 2004; Naor *et al.,* 2004) en Valencia, España, y Alta Galilea, Israel, respectivamente. En todos los casos las funciones curvilíneas encajan en las relaciones entre el rendimiento relativo y el riego relativo (Figura 3), pero hubo diferencias en los valores de umbrales de riego relativo aplicado sin reducción en el rendimiento. Los datos de España e Israel se ajustaron a una línea de regresión polinómica, que se ajustó a los dos conjuntos de datos. En las variedades Black-Gold y Black-Amber, solamente el 10 % de la reducción del agua aplicada parece ser admisible sin penalización en el rendimiento, mientras que en el estudio en Italia para la variedad Fortune, fue posible reducir el riego en 20-25 % sin reducción en el rendimiento. Además, la respuesta de las variedades Black-Gold y Black-Amber mostró una disminución mucho más drástica del rendimiento relativo con limitación de riego, en comparación con la variedad Fortune. Las diferencias en las relaciones entre el agua aplicada y el rendimiento están relacionadas con la contribución desconocida del agua almacenada en el suelo y de la precipitación durante la estación a la ET_c del cultivo bajo déficits hídricos. La semejanza de la respuesta de dos variedades diferentes en España e Israel probablemente refleje el aporte limitado del almacenamiento del suelo en ambos estudios (por ello la disminución drástica del rendimiento relativo cuando disminuye el riego). Además, las diferencias entre el estudio en Italia y los otros dos podría ser el resultado de las condiciones climáticas, con mayor precipitación en invierno y durante el período de crecimiento en el valle del Po, y la edad de los árboles; árboles maduros en Italia y huertos más jóvenes en los estudios en España e Israel.

FIGURA 3 Relaciones entre el rendimiento relativo y el riego relativo. Los datos corresponden a experimentos de riego deficitario regulado llevados a cabo con las variedades de ciruelo japonés Fortune, Black-Gold y Black-Amber. Los datos de las variedades Black-Gold y Black-Amber se unieron. Todos los valores se calcularon con respecto a las parcelas de control con riego completo.



Los patrones obtenidos en los estudios mencionados anteriormente concuerdan con las respuestas generales de los árboles al suministro hídrico, en las que el rendimiento aumenta al incrementar la aplicación del agua, pero hasta un punto en el que los incrementos de aplicación del agua no producían ningún incremento en el rendimiento. Puesto que no hay estudios que relacionen el rendimiento con la ET_c en los ciruelos, los datos generales reportados en la Figura 3 muestran que en el riego deficitario de los ciruelos se podría ahorrar hasta 10-20 % del agua aplicada, con una pérdida de rendimiento mínima o nula.

ESTRATEGIAS SUGERIDAS DE RIEGO DEFICITARIO

La estrategia sugerida de riego deficitario puede variar ampliamente dependiendo del producto final para el mercado, fruto seco o fruto fresco, y de los aspectos fenológicos específicos de cada variedad, que afectan los niveles de cuajado de fruto y la intensidad de floración, y especialmente, la precocidad estacional. La estrategia general empleada para imponer los déficits hídricos a los ciruelos franceses para pasas fue limitar el déficit hídrico durante las etapas tempranas del desarrollo del árbol y la producción, imponiendo un estrés más severo a mediados y finales de la estación. En este sentido, en un suelo franco arcilloso en California, permitir una disminución progresiva del SWP a mediodía hasta aproximadamente -1.5 MPa por cosecha –por ejemplo, riego al 50-60 % de la ET_c desde primavera– resultó una forma efectiva de reducir el riego y mantener una rentabilidad económica en un período de 3 años (Lampinen *et al.,* 2001a).

Para las variedades para el mercado de frutos frescos de principio de estación, se puede concluir que se debería considerar el estrés hídrico después de la cosecha que limita la disminución del SWP por debajo de -2.0 MPa, a pesar de algún efecto ligeramente perjudicial a largo plazo, en huertos comerciales, no solamente por la escasez de agua, sino como herramienta para controlar el crecimiento vegetativo. En huertos jóvenes, el riego deficitario postcosecha se puede combinar con menor espaciamiento de los árboles, una característica muy común en las plantaciones frutales modernas, en las que las variedades nuevas y los huertos tienen una vida corta.

Si se aplica durante el crecimiento del fruto, el estrés hídrico de las variedades para mercado de frutos frescos debería concentrarse durante el endurecimiento del hueso. La duración de esta fase depende de la fecha de la cosecha. Por lo tanto, en las variedades tempranas e incluso de mediados de estación, hay riesgo de extender el estrés hídrico hacia la etapa final de crecimiento del fruto, con efectos perjudiciales en el tamaño del fruto. Resultados recientes (Intrigliolo y Castel, 2010) sugieren que se puede aplicar cierto grado de estrés hídrico durante la etapa inicial del crecimiento del fruto, siempre que el estrés agua-planta sea moderado (SWP > -1.4 MPa) y los árboles retornen al estado hídrico óptimo por lo menos un mes antes de la cosecha. De hecho, la conveniencia del estrés hídrico aplicado durante el crecimiento del fruto dependería de los valores del precio de las diferentes categorías de tamaño de fruto en el mercado y los efectos de las restricciones de agua en la calidad del fruto. En este sentido se debería considerar que el riego deficitario durante el crecimiento del fruto adelanta la madurez, aumenta el contenido de sólidos solubles totales y la firmeza, y puede mejorar el color del fruto. Los efectos de las restricciones de agua en los compuestos aromáticos volátiles y particularmente la fibra y otros componentes de la calidad del fruto, relacionados con la salud de los seres humanos no han sido estudiados ampliamente y podrían ser de gran importancia para los productores de ciruelos si se promueve su consumo.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.* Estudio FAO: Riego y drenaje, N.º 56. Roma, FAO; págs. 15-27.

Battilani, A. 2004. Regulated deficit irrigation. Effects on growth and yield of plum trees. *Acta Horticulturae.* 664:55-62.

Chootummatat, V., Turner, D.W. y Cripps, J.V.E. 1990. Water use of plum trees *(Prunus salicina)* trained to four canopy arrangements. *Scientia Horticulturae,* 43:255-271.

DeJong, T.M. y Goudriaan, J. 1989. Modelling peach fruit growth and carbohydrate requirements: reevaluation of the double-sigmoid pattern. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 114:800-804.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Goldhamer, D.A., Sibbett, D.S., Phene, R.C. y Katayama, D.G. 1994. Early irrigation cutoff has little effect on French prune production. *California Agriculture,* 48:13-17.

Hendrickson, A.H. y Veihmeyer, F.J. 1945. Some effects of irrigation on the interrelations of growth, yields and drying ratios of French prunes. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 46:187-190.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2005. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield in young Japanese plum. *Journal Horticultural Science & Biotechnology,* 80:177-182.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2006a. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management,* 83:173-180.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2006b. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator in plum trees. *Tree Physiology,* 26:303-311.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2007. Crop load affects maximum daily trunk shrinkage of plum trees. *Tree Physiology,* 27:89-96.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2010. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels. Tree growth, yield and fruit quality. *Irrigation Science,* 28:525-534.

Johnson, R.S, Handley, D.F. y Day, K.R. 1994. Postharvest water stress of an early maturing plum. *Journal Horticultural Science,* 69:1035-1041.

Johnson, R.S. y Handley, D.F. 2000. Using water stress to control vegetative growth and productivity of temperate fruit trees. *Horticultural Science,* 69:1048-1050.

Lampinen, B.D., Shackel, K.A., Southwick, S.M., Olson, B. y Yeager, J.T. 1995. Sensitivity of yield and fruit quality of French prune to water deprivation at different fruit growth stages. *Journal of the American Society for Horticultura l Science,* 120:139-147.

Lampinen, B.D., Shackel, K.A., Southwick, S.M. y Olson, B. 2001. Deficit irrigation strategies using midday stem-water potential in prune. *Irrigation Science,* 20:47-54.

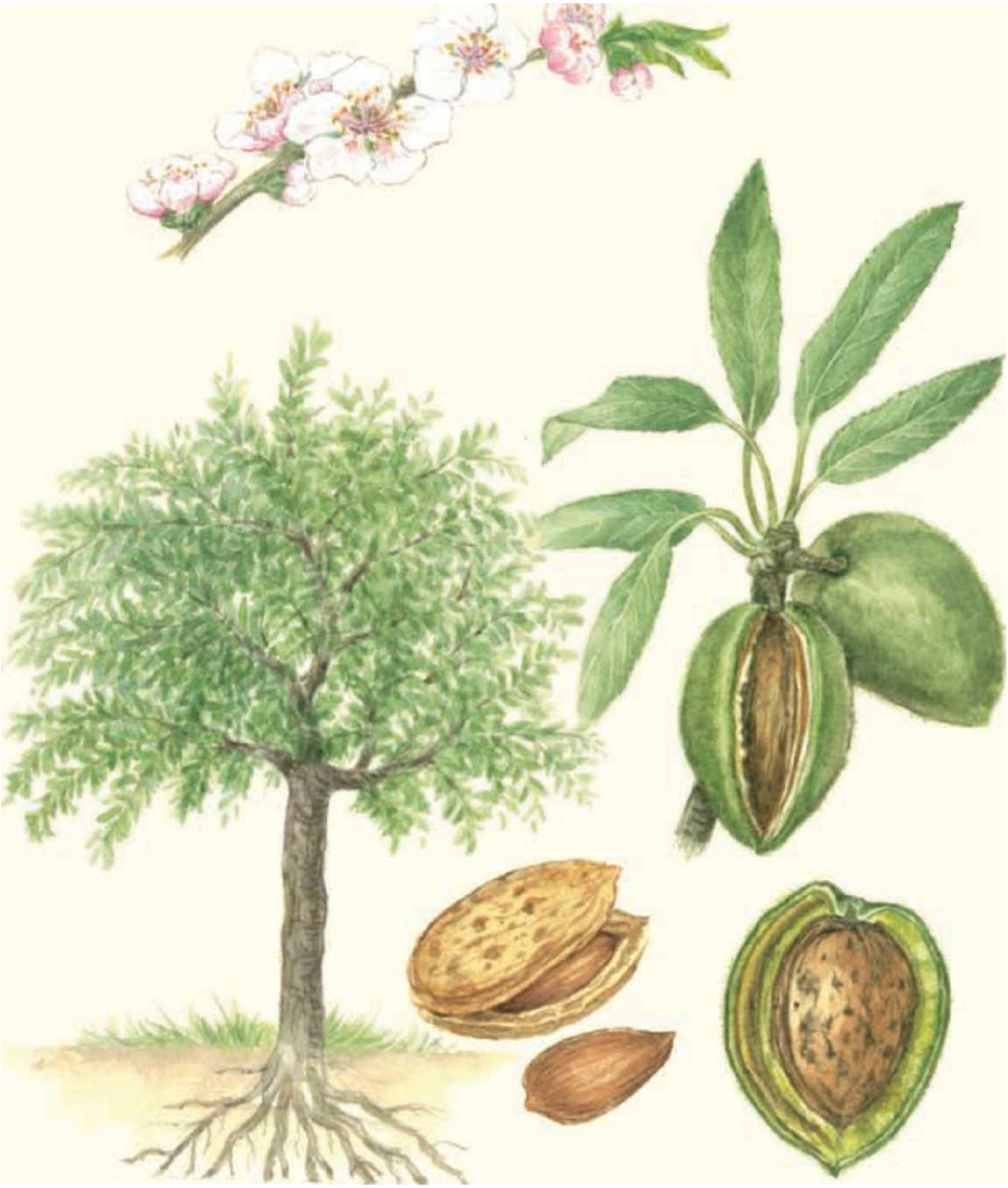
Milad, R.E. y Shackel, K.A. 1992. Water relations of fruit end cracking in French prune. *Journal of the American Society for Horticultural Science,117:824-828.*

Naor, A. 2004. The interactions of soil- and stem-water potentials with crop level, fruit size and stomatal conductance of field-grown 'Black Amber' Japanese plum. *Journal Horticultural Science & Biotechnology,* 79:273-280.

Naor, A., Peres, M., Greenblat, Y., Gal, Y. y Ben Arie, R. 2004. Effects of preharvest irrigation regime and crop level on yield, fruit size distribution and fruit quality of field-grown 'Black Amber' Japanese plum. *Journal Horticultural Science & Biotechnology,* 79:281-288.

Uriu, K., Hansen, C.J. y Smith, J.J. 1962. The cracking of prunes in relation to irrigation. Proceedings of the American Society for *Horticultural Science,* 80:211-219.

Westwood, M.N. 1993. *Temperate-zone pomology: physiology and culture.* Tercera edición. EE. UU., Portland, Oregon, Timber Press, pág. 523.



Almendro

AUTOR PRINCIPAL
David A. Goldhamer (anteriormente Universidad de California, Davis, EE. UU.; en la actualidad, Profesor emérito de Extensión Cooperativa)

AUTOR COLABORADOR
Joan Girona (IRTA, Lleida, España)

Almendro

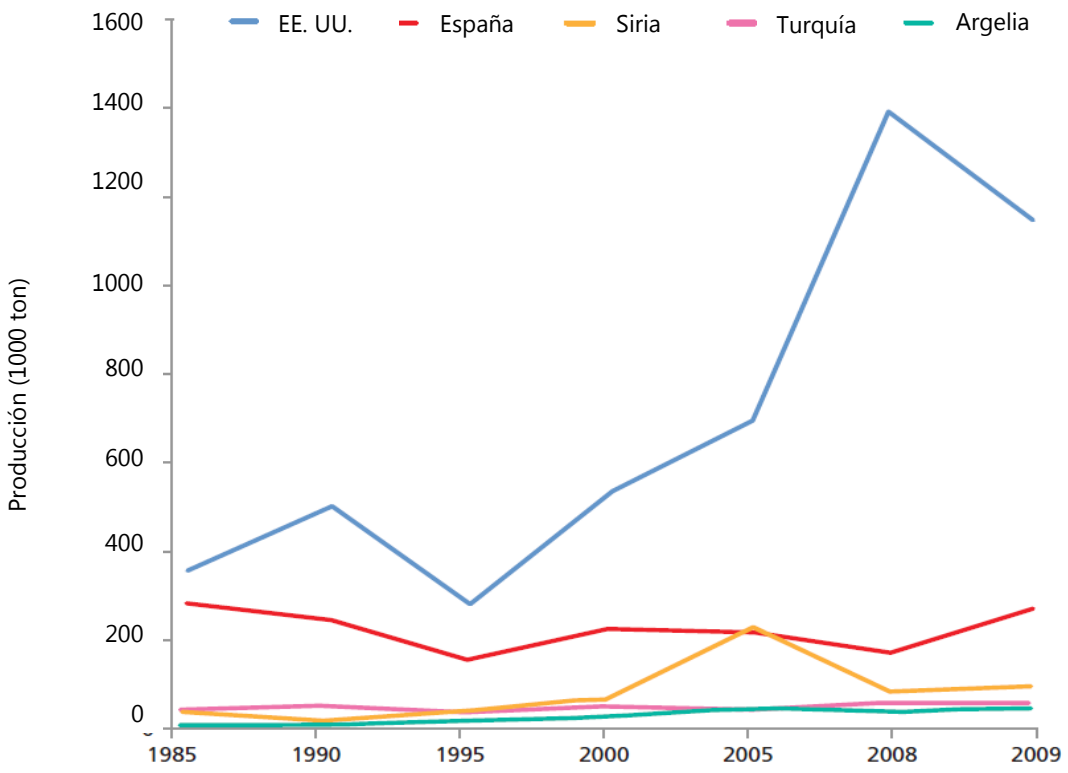
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los almendros se cultivan tanto en condiciones de secano como de riego. La producción en zonas semiáridas, como el oeste de Estados Unidos y España, refleja la tolerancia del árbol a la sequía. En muchas áreas de la cuenca del Mediterráneo, los almendros se plantan en suelos marginales en áreas donde la precipitación anual es inferior a 300 mm, lo cual es importante para el control de la erosión y para prevenir la desertificación. Como consecuencia del suministro limitado de agua y las deficientes condiciones del suelo en las áreas de secano, la densidad de los árboles es bastante baja y los rendimientos también son bajos y variables de un año a otro. Sin embargo, pueden llegar a ser más altos cuando se satisfacen por completo los requerimientos de uso del agua de los árboles, para lo cual es necesario el riego en la mayoría de las áreas del mundo. En las últimas décadas, nuevas plantaciones de almendros de regadío han proliferado en muchas áreas, y son altamente productivas. No obstante, los almendros son un cultivo importante en diversos sistemas agrícolas, desde muy marginales hasta altamente intensivos. En 2009, el área cultivada a nivel mundial ascendió a 1.8 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio (con cáscara) de 1.3 ton/ha (FAO, 2011). La Figura 1 muestra las recientes tendencias de producción de los principales países productores.

El cultivo moderno de almendros plantea desafíos únicos para el riego en general y para el riego deficitario regulado (RDI) en particular. Dentro de estos desafíos se incluyen el manejo de muchas variedades en cada huerto, un largo período entre la floración y la madurez del fruto, la necesidad de secar el suelo antes de la cosecha a fin de sacudir los árboles y desprender mecánicamente las almendras, y un período relativamente tardío de morfogénesis de yemas reproductivas. Por otro lado, debido a que el fruto se vende seco, desaparecen muchos de los problemas asociados con la producción de frutos frescos, incluidos apariencia física, manejo y almacenamiento.

La flor del almendro en la mayoría de las variedades es autoinfértil, es decir que no puede autopolinizarse. Incluso en variedades que son autofértiles, la producción se incrementa mediante polinización cruzada. Por lo tanto, cada huerto normalmente contiene al menos dos variedades diferentes con períodos de floración que se superponen para contribuir al proceso de polinización cruzada; es decir, la transferencia de polen de las anteras de la flor de una variedad al estigma de la flor de la otra variedad. Con el fin de facilitar esta transferencia, se introducen abejas en el huerto durante la floración. Para maximizar el intercambio de polen, una forma de distribución común es la alternación de hileras individuales de cada variedad. La coexistencia de dos o más variedades en un campo complica el manejo del riego debido a que los diferentes períodos de cosecha generalmente traen como consecuencia la limitación de agua relacionada con la cosecha en una variedad, mientras que el llenado de la semilla está teniendo lugar en la otra variedad. Además, existe evidencia de que diferentes variedades presentan diferentes grados de sensibilidad al estrés.

FIGURA 1 Tendencias de producción de almendras en los principales países (FAO, 2011).



Consideraciones de calidad

Los daños ocasionados por los insectos, el resecamiento, el color y el agrietamiento de las semillas son criterios de calidad a nivel mundial. Además, las diferencias de los mercados redundan en valores de la producción dependientes de la variedad. Algunos mercados, como el de Estados unidos, también conceden gran valor a las almendras más grandes.

DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE DESARROLLO EN RELACIÓN CON LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

Los almendros requieren una cantidad mínima de horas frío muy baja y, por consiguiente, el crecimiento vegetativo y la floración inician en una etapa muy temprana de la estación en comparación con otras especies de árboles caducifolios, aunque los fitogenetistas tienen como objetivo desarrollar variedades que florezcan de manera tardía para evitar daños por heladas. La precocidad del cultivo se relaciona con la evolución de las almendras en climas templados subtropicales, con sequías prolongadas en verano. El período desde la floración hasta la maduración de las almendras es relativamente largo, dependiendo del clima y la variedad, desde finales de enero-marzo hasta agosto-septiembre en el hemisferio norte. Se debe tener en cuenta la sensibilidad a los déficits hídricos de cada uno de los procesos fisiológicos durante este intervalo de tiempo, para evaluar el impacto del estrés sobre el rendimiento y la calidad del fruto en el

momento de la cosecha. No sólo se deben tener en cuenta los impactos en la estación actual, sino también en las estaciones posteriores.

CRECIMIENTO VEGETATIVO Y REPRODUCTIVO TEMPRANO

La floración y el desarrollo foliar inicial ocurren casi de manera simultánea desde finales de enero en el hemisferio norte para las variedades de floración más precoz, hasta finales de marzo para aquellas de florecón tardía. La polinización de la flor está seguida por el crecimiento del tubo polínico dentro del ovario, el cual se convertirá en una semilla comercializable. La producción potencial de frutos máxima se determina durante esta etapa temprana. Se establece con base en la cantidad de flores producidas (formación de flores) y el porcentaje de éstas que se poliniza con éxito (cuajado del fruto). El desarrollo temprano del fruto es, en gran medida, resultado de la división celular. Las etapas tempranas de crecimiento del fruto ocurren al mismo tiempo que la mayor parte de la expansión foliar y el crecimiento de los brotes. Esto conduce a una competencia considerable por los recursos del árbol, principalmente carbohidratos. En consecuencia, si la floración y el cuajado de frutos son altos, es posible que el crecimiento de los brotes sea más bajo. Debido a que el fruto se da en brotes de dos años de edad, esto puede disminuir la producción de nuevas yemas reproductivas y a su vez, reducir el potencial de producción para el año siguiente. Además de su incidencia en las posiciones de fructificación, esta competencia por los carbohidratos puede influir en el cuajado de los frutos. Si las reservas de carbohidratos del año anterior son bajas, es posible que la cuaja del año actual se reduzca (Esparza *et al.,* 2001). Incrementar la alternancia de la producción en las almendros, especialmente bajo condiciones de secano.

Etapas del crecimiento del fruto

La Figura 2 muestra el patrón de crecimiento del fruto, donde se pueden diferenciar tres etapas:

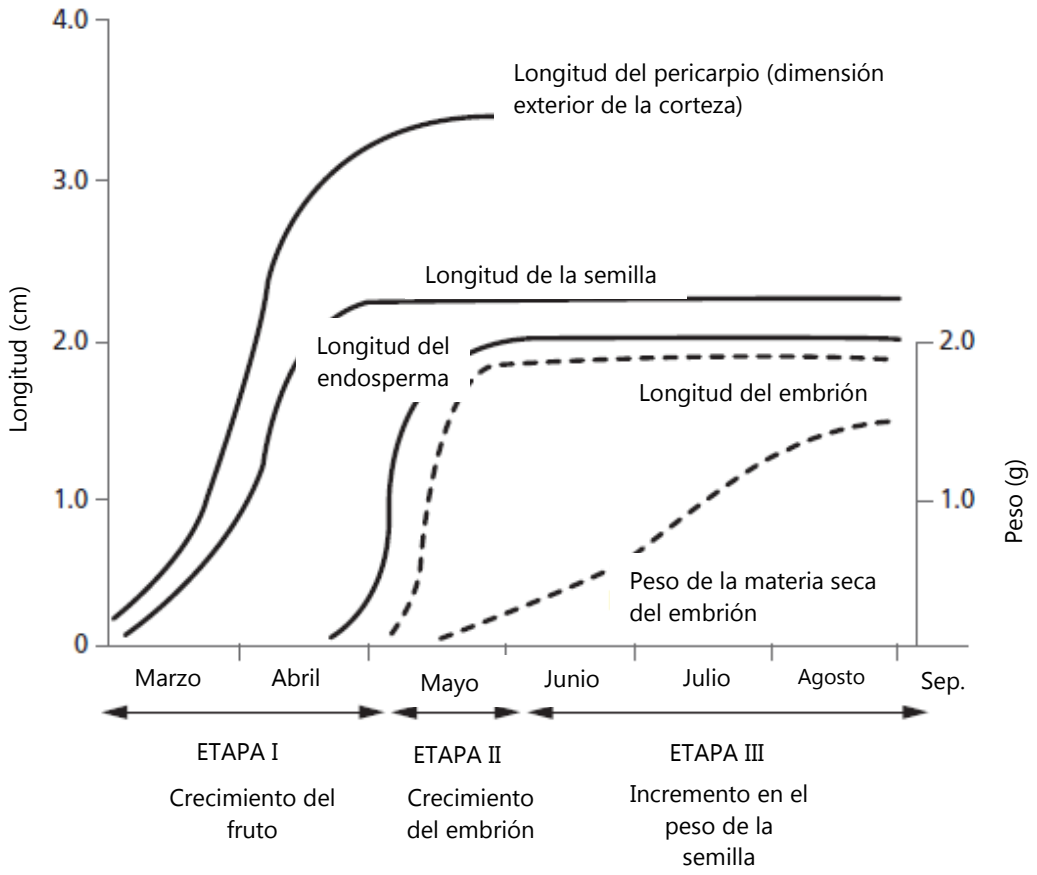
Etapa I: caracterizada por el rápido crecimiento de la corteza (mesocarpio), la cáscara (endocarpio) y los tegumentos. El fruto entero se conserva blando y alcanza su tamaño máximo. La división celular se completa en unas semanas; la mayor fase de crecimiento posterior es la expansión. En este punto, la semilla es una estructura blanca llena de tejido acuoso y traslúcido. El intervalo desde la polinización de la flor hasta la culminación del desarrollo del fruto es de aproximadamente dos meses. La finalización de la Etapa I ocurre cuando la corteza, la cáscara y la semilla alcanzan sus dimensiones exteriores máximas.

Etapa II: se caracteriza por el endurecimiento de la cáscara y la expansión de la semilla. Existen dos clases de variedades de almendras: de cáscara dura y cáscara blanda. Las de cáscara dura, grupo al cual pertenecen muchas de las variedades que se cultivan en el Mediterráneo, tienen porcentajes de descascarillado de 25- 35 %, mientras que las almendras de cáscara blanda tienen el 70 %. Estas almendras se endurecen completamente en la Etapa II, mientras que las de cáscara blanda permanecen blandas. El crecimiento del embrión implica que el tejido acuoso transparente se vuelve traslúcido, desde el extremo apical. Este embrión blanco y opaco se expande rápidamente durante este período. Hacia el final de la Etapa II, el peso de la materia seca de la semilla empieza a aumentar.

En la Etapa III, el evento principal es la acumulación continua de materia seca en la semilla. Se completa la diferenciación morfológica de la corteza, la cáscara y la semilla. La acumulación de materia seca de asimilados continúa a un ritmo constante hasta la madurez, siempre que las conexiones vasculares se mantengan intactas. Dos sucesos indican la proximidad de la madurez: la apertura de la corteza (dehiscencia del endocarpio) y la formación de una capa de abscisión en la conexión entre la almendra y el pedúnculo. La dehiscencia completa requiere un estado hídrico adecuado del árbol, porque los lados de la corteza deben estar abultados para que puedan separarse correctamente. El exceso de estrés puede ocasionar que la corteza se adhiera a la cáscara

(hermetismo de la cáscara), lo cual complica el procesamiento. La madurez también se caracteriza por una marcada reducción de la tasa de acumulación de materia seca en la semilla. En algunas áreas, las cosechas para fines comerciales ocurren antes de la maduración de la semilla para evitar los daños ocasionados por insectos o gusanos de la naranja navel (NOW).

FIGURA 2 Las tres etapas de desarrollo del fruto del almendro y la longitud y el peso típicos del fruto en cada etapa. Adaptado de UC Almond Production Manual, 1996.



Desarrollo de las yemas

Las yemas reproductivas nacen en brotes de dos años de edad y empiezan a brotar en primavera a medida que los brotes de dos años de edad se desarrollan. Existen tres etapas posteriores de desarrollo de las yemas florales. La primera es la inducción, donde cambia la fisiología interna del punto de crecimiento. Esto ocurre a mediados de agosto, y las yemas vegetativas y reproductivas son indistinguibles. La segunda etapa comprende los cambios morfológicos y anatómicos en la estructura interna, los cuales son fácilmente observables en septiembre. La tercera etapa se caracteriza por el crecimiento gradual de las partes reproductivas durante el otoño y el invierno; es decir, el desarrollo de los sépalos, pétalos, estambres y ovarios.

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

Al igual que en la mayoría de los cultivos, el crecimiento vegetativo de los almendros es muy sensible a los déficits hídricos. La prevención de los déficits hídricos en árboles jóvenes a lo largo de la estación es crucial para lograr una producción plena en el período de tiempo más corto (Fereres *et al.,* 1981). En las plantaciones maduras, las respuestas a los déficits hídricos dependen del momento en que se presente el estrés.

En áreas que reciben una cantidad considerable de precipitación en el invierno, los procesos del árbol que ocurren al inicio de la estación, como el desarrollo foliar, la floración, la polinización y el cuajado del fruto, tendrán lugar bajo niveles ilimitados de humedad del suelo. No obstante, a medida que la estación avanza y la demanda evaporativa aumenta, el crecimiento de brotes, brotes de dos años de edad y frutos estará sujeto a déficits hídricos sin riego ni precipitación estacional. Varios informes aseguran que el crecimiento vegetativo de los almendros es muy sensible a los déficits hídricos del árbol y se ve directamente afectado por ellos.

Los resultados de las investigaciones sobre la incidencia del estrés previo a la cosecha en el llenado de la semilla son aparentemente contradictorios y pueden reflejar la importancia del momento en que se presenta el estrés y las diferencias entre variedades. Un estudio realizado en España (Girona *et al.,* 2005), con la variedad Ferragnes reportó que la acumulación de peso de materia seca en las semillas no se vio influenciada durante las dos primeras estaciones de un régimen de RDI, en el que se aplicó riego al 20 % de la ET_c durante finales de junio hasta la cosecha de mediados de septiembre (potencial hídrico foliar mínimo antes del amanecer de -1.7 MPa en agosto), pero disminuyó durante las últimas dos estaciones del estudio, lo cual se atribuyó a los impactos acumulados del estrés que redujeron las reservas de carbohidratos disponibles para el llenado de los granos y a los niveles relativamente bajos de humedad del suelo durante esos años. Sin embargo, un estudio realizado en California (Goldhamer y Viveros, 2000), con una demanda de evaporación más alta (potencial hídrico foliar mínimo antes del amanecer de -3.5 MPa) y presencia de estrés en una etapa más temprana, reportó reducciones significativas en la acumulación de materia seca en las semillas con la variedad Non Pareil en todos los años del experimento. La acumulación de materia seca en la corteza y la cáscara, después de someter el cultivo a estrés previo a la cosecha durante tres años consecutivos, contrastó con la aplicación de riego completo a finales de abril, mucho antes de que hubiera diferencias en el estrés del árbol, como se muestra en la Figura 3. Esto obedeció probablemente a la competencia por carbohidratos al inicio de la estación. Un estudio (Romero *et al.,* 2004) con la variedad "Cartagenera" –en el cual se impuso un régimen de RDI que resultó en un potencial hídrico foliar mínimo antes del amanecer de -2.5 MPa a finales de julio– no reveló ninguna reducción en el peso de la materia seca de la semilla en la cosecha de mediados de agosto.

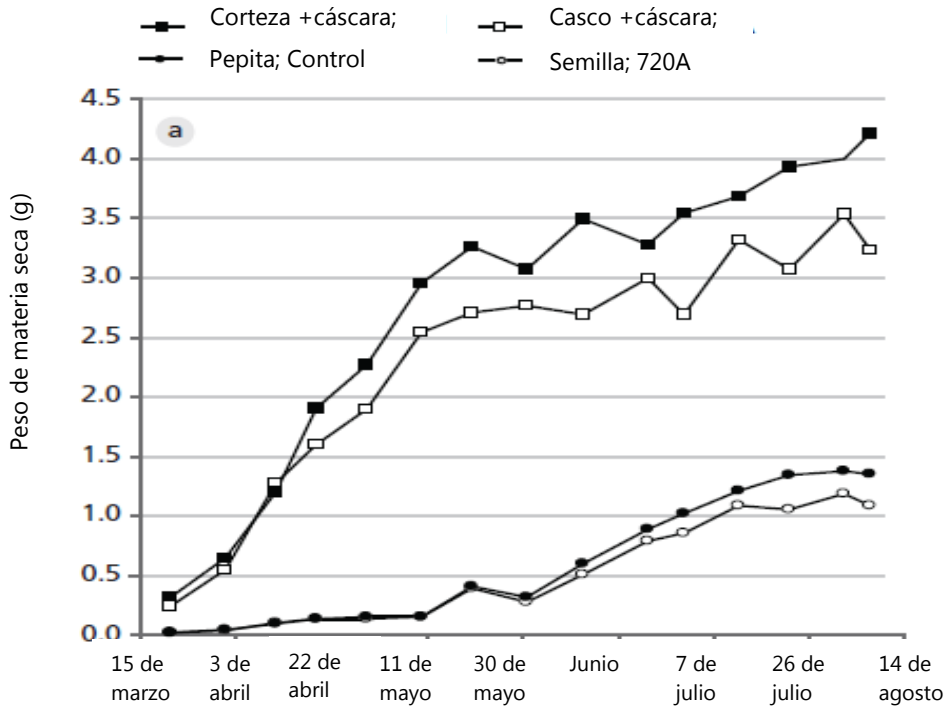
Un estudio reciente con la variedad Non Pareil en California mostró que imponer déficits hídricos principalmente desde inicios de julio hasta la cosecha de inicios de septiembre, por un período de cuatro años, no redujo el peso de la smilla o la carga de almendras (Stewart *et al.,* 2011). En este trabajo se intentó mantener un potencial hídrico del tallo al mediodía entre -1.4 y -1.8 MPa durante este período. El objetivo era la reducción de la pudrición de la corteza, una enfermedad que daña el fruto (Teviotdale *et al.,* 2001), al tiempo que reduce el uso consuntivo. Otros trabajos en los que se aplica esta misma filosofía han arrojado resultados positivos, de modo que los productores de almendras de California ahora están utilizando ampliamente esta práctica en los árboles afectados por pudrición severa de la corteza. No obstante, cabe señalar que el análisis detallado de los componentes del fruto (corteza, cáscara y semilla) sugiere que el impacto del estrés pre-cosecha sobre la apertura de la corteza puede incidir en el peso de las semillas. En numerosos estudios, investigadores de California encontraron que ligeras reducciones en la acumulación de materia seca en las semillas ocurrían de manera concomitante con el inicio de la apertura de la corteza, mientras que al mismo tiempo se presentaban leves incrementos en la tasa de acumulación de materia seca

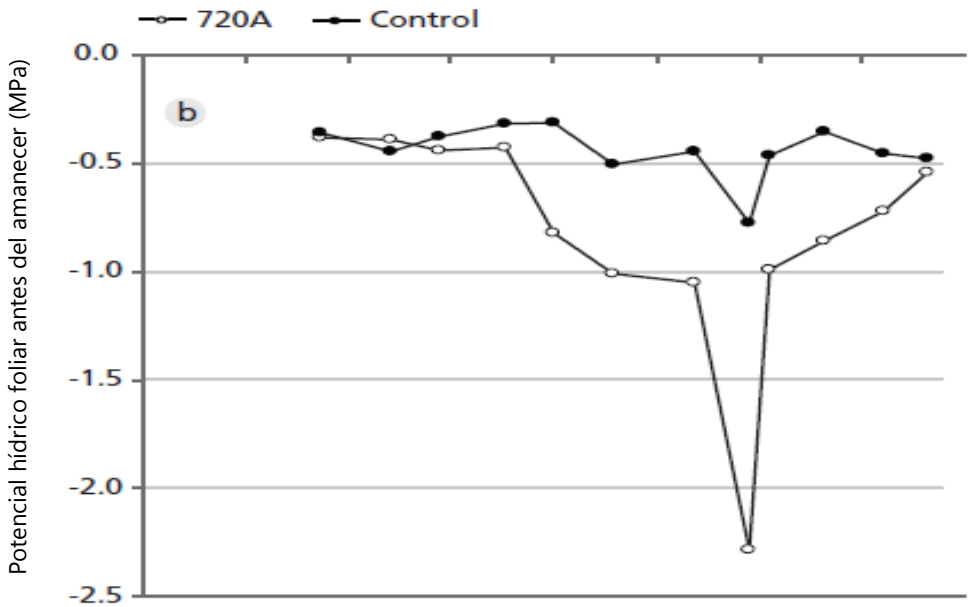
en las cortezas. Como resultado final, las semillas mostraron un peso ligeramente menor (por lo general, 2-3 % en comparación con el riego completo), pero no se presentó ninguna diferencia en el peso de materia seca de la almendra entera. La hipótesis que plantearon fue que la apertura de la cáscara condujo a algún tipo de alteración física en el transporte de asimilados durante el proceso que conduce a la formación de la semilla.

Al parecer hay dos factores vinculados con la presencia de estrés al inicio de la estación que pueden contribuir a la reducción del tamaño de la semilla: menor división y/o expansión celular, la cual se refuerza con la competencia por carbohidratos; y la alteración en el transporte de asimilados hacia las semillas a causa de la apertura acelerada de las cortezas. Es muy probable que estos impactos del estrés dependan de la variedad, aunque hacen falta estudios de investigación comparativa.

De los dos componentes principales del rendimiento de almendras, la carga de fruto parece ser la más sensible en términos de impactos del estrés hídrico sobre el rendimiento. Un estudio realizado en España mostró la reducción de las cargas de frutos en los dos últimos de un tratamiento de RDI de cuatro años, la cual se atribuyó a los impactos acumulados del estrés en las superficies productivas del árbol y, por consiguiente en las posiciones de fructificación. Otro estudio en California también reportó que las reducciones del rendimiento asociadas a la limitación de agua en agosto y septiembre (potencial hídrico mínimo del tallo al mediodía de -2.5 MPa) fueron el resultado de la reducción de la superficie de producción, ocasionada por un menor crecimiento de los brotes y brotes de dos años de edad. Este estudio reveló que los rendimientos únicamente se redujeron después de dos años de estrés. Otros estudios han encontrado un impacto reducido del estrés en la carga de frutos previo a la cosecha.

FIGURA 3 Diferencias entre los árboles de la variedad Non Pareil sometidos a déficits hídricos previos a la cosecha (720A) y aquellos con riego completo (Control) en: **(a)** acumulación de materia seca en las cortezas +cáscaras y semillas con el tiempo durante el tercer año de los tratamientos de estrés; y **(b)** correspondientes potenciales hídricos foliares antes del amanecer. Adaptado de Goldhamer *et al.* (2006).

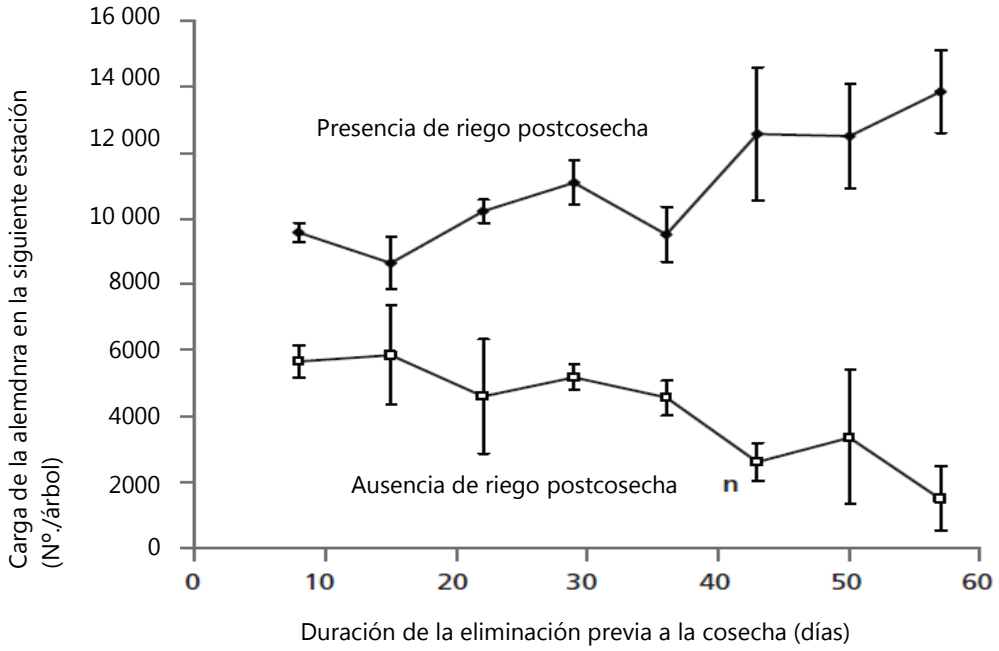




Se han realizado muchos menos estudios sobre los impactos del estrés postcosecha en la producción de las almendras, en parte debido a que en muchas partes del mundo las lluvias de otoño eliminan esta posibilidad. Sin embargo, se ha detectado un impacto drástico de la presencia o ausencia del riego postcosecha en la carga de frutos de la siguiente estación (Goldhamer y Viveros, 2000) (Figura 4). Aunque los árboles recibieron un riego casi completo antes de la cosecha, la limitación de agua postcosecha condujo a una reducción del 40 % en la carga de frutos de la siguiente estación, en comparación con árboles que recibieron riego postcosecha. Cabe recalcar que esta situación se presentó con una cosecha de mediados de agosto bajo alta demanda evaporativa; el potencial hídrico foliar antes del amanecer estaba por debajo de -4.0 MPa a mediados de septiembre. Para este mismo nivel de estrés antes de la cosecha, hubo defoliación casi completa , pero después de la reintroducción del riego completo postcosecha, se produjo desborre de yemas vegetativas y crecimiento de nuevas hojas, mitigación del estrés y ninguna reducción en la carga de frutos en la siguiente estación (Goldhamer y Viveros, 2000).

El drástico impacto de la privación de agua postcosecha en la carga de fruto se atribuyó a los impactos del estrés en el desarrollo de las yemas reproductivas. Estudios iniciales (Tufts y Morrow, 1925) mostraron que la diferenciación de yemas en los almendros ocurría desde finales de agosto hasta inicios de septiembre, lo cual se ha confirmado en estudios más recientes. El momento en que se presenta el desarrollo de las yemas no mostró un patrón claro entre diferentes variedades o zonas de cultivo en California, abarcando una distancia de más de 500 km (Lamp *et al.,* 2001). Por consiguiente, el desarrollo de las yemas puede ocurrir tanto antes como después de la cosecha, dependiendo de la variedad y la ubicación geográfica. Además, el desarrollo de las yemas no está relacionado con la apertura de la corteza: ocurrió tres semanas después de la apertura en Non Pareil, pero antes de la apertura de la corteza en las variedades "Butte" y "Carmel". Es probable que los estreses que ocurran durante el desarrollo de las flores incidan de manera adversa en la calidad de las flores, hasta el punto de que se reduzca la carga de producción en la siguiente estación y por ende, el rendimiento.

FIGURA 4 Relaciones entre la carga de fruto en la estación después de la imposición de diferentes regímenes de eliminación de riego previo a la cosecha, en condiciones de presencia o ausencia de riego postcosecha. Las líneas verticales son más y menos el error estándar. Adaptado de Goldhamer y Viveros (2000).



Indicadores del estado hídrico del árbol

A fin de establecer un calendario de riego de manera precisa, es posible que se requiera supervisar un parámetro dado del suelo y/o la planta, y tomar decisiones de acuerdo con algunos criterios preestablecidos. Asimismo, la implementación de un régimen de RDI tal vez deba basarse en estimaciones del estado hídrico del árbol, como el potencial hídrico del tallo (SWP). Los valores de SWP de almendros con riego adecuado a mediados del verano varían de -0.5 a -1.0 MPa al mediodía, dependiendo de la demanda evaporativa y la época del año. En un estudio, se presentó una disminución de 0.2 MPa en el SWP de árboles con riego completo en diferentes días (de -0.7 a -0.9 MPa) cuando la temperatura del aire aumentó de 25 a 40 °C. Los valores de SWP decrecen a medida que el estrés se incrementa, pero en los almendros, rara vez exceden -4.0 MPa, incluso bajo estrés muy severo (Castel y Fereres, 1982). El árbol dejará caer sus hojas antes de alcanzar niveles extremos de deshidratación, que conducirían a un menor potencial hídrico, según las mediciones en otras especies de árboles frutales.

REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

La mayoría de las estimaciones del uso del agua de los almendros en la bibliografía se desarrollaron utilizando enfoques basados en el balance de agua del suelo y no en lisímetros de pesada más precisos. La tabla 1 muestra los valores mensuales de coeficientes de cultivo (K_c) para condiciones de una plantación limpia, sin malas hierbas y con una demanda evaporativa alta, publicados por varios autores. Debido a que la ET de las almendras a menudo se agrupa con el durazno o melocotonero, el albaricoque y la ciruelo, los datos del K_c en un lisímetro de pesada para el durazno o melocotonero, obtenidos en California, también se muestran en la Tabla 1 para efectos

comparativos (Ayars, 2003). Los valores de K_c al inicio de la estación para el durazno o melocotonero, utilizados en su trabajo, son relativamente bajos, debido principalmente al desarrollo lento del dosel de esta variedad. Los valores máximos de K_c (julio-agosto) de todos los datos presentados varían de 0.95 a 1.08. Datos recientes de California sugieren que los valores máximos de K_c de los almendros en un huerto intensivo y maduro, que recibe riego con micro-aspersores, pueden alcanzar incluso 1.17 (Goldhamer, sin publicar), lo cual es considerablemente más alto que los valores reportados previamente. Valores altos similares de K_c se han reportado recientemente en Australia (Stevens *et al.,* 2011). Cabe señalar que cuando se registraron los primeros datos de ET, el riego por superficie (a manta) era el principal método de riego, mientras que en los estudios más recientes se utilizaron los métodos de goteo o micro-aspersores. El aumento de los valores de K_c probablemente obedezca al incremento en las densidades de los árboles en las plantaciones recientes, a los doseles más frondosos de los árboles (ahora se realiza menos poda anual que anteriormente) y a mayores cargas de frutos. Asimismo, el humedecimiento más frecuente del suelo del huerto con micro-riego y, por tanto, la mayor evaporación en la superficie, pueden ser otro factor que influye en los altos valores de K_c.

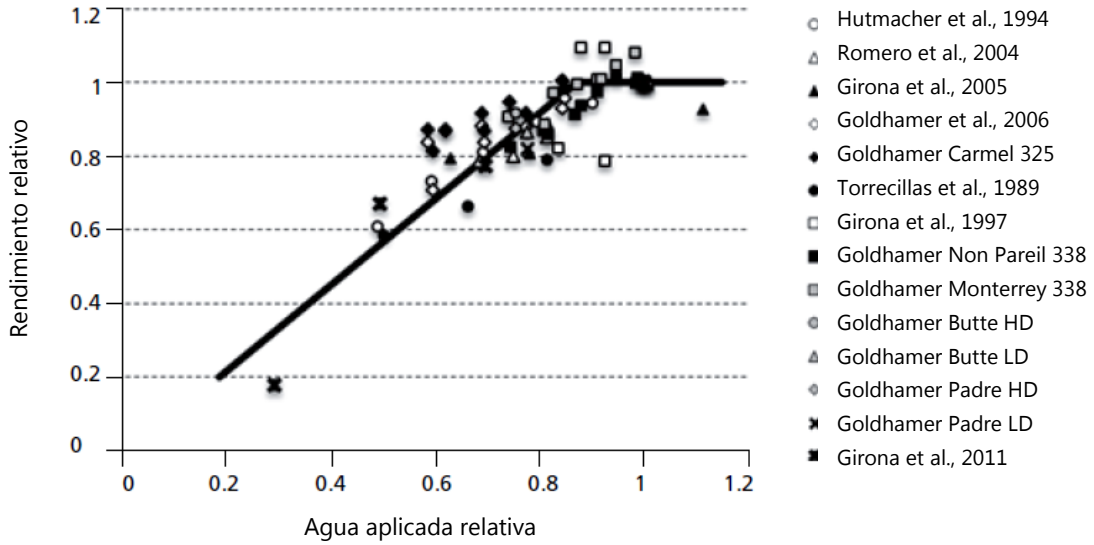
FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN DEL AGUA

La Figura 5 presenta datos de rendimiento relativo en comparación con agua aplicada relativa, derivados de catorce estudios de riego. No fue posible calcular la ET_c en muchos de los estudios, y por consiguiente, no se pudo extraer la función de producción real con base en el uso consuntivo. Estos estudios se realizaron bajo una amplia gama de demandas evaporativas, variedades y suelos sometidos a diversos regímenes de riego deficitario y diferentes momentos y magnitudes de estrés. Los coeficientes de correlación de las regresiones lineales en estos estudios variaron de 0.87 a 0.98, lo cual indica una fuerte relación funcional entre el rendimiento y el agua aplicada. Algunos de estos estudios mostraron pendientes similares que varían entre 0.7 y 0.9, mientras que otros presentaron pendientes menos pronunciadas, por encima de 0.3. La baja sensibilidad del rendimiento en estos estudios quizá se daba a una combinación de suelos profundos, cargas de producción relativamente bajas y una distancia relativamente grande entre los árboles. De este modo, la alta tasa potencial de suministro hídrico a los árboles atenuó el impacto de los estreses instantáneos. Cabe señalar que estos estudios generalmente manejaron tasas de uso consuntivo que privaban a los árboles hasta del 30-50 % de la ET_c máxima. Una observación más detallada de la Figura 5 muestra que con un riego deficitario moderado que reduciría la ET_c relativa sólo en un 10-15 %, el impacto en la producción es insignificante.

TABLA 1 Estimaciones de los valores del coeficiente de cultivo mensual (K_c) para árboles caducifolios maduros (primera columna), almendros (columnas dos a cinco) y árboles de durazno o melocotón (última columna).

	Doorenbos y Pruitt (1977)	Fereres y Puech (1981)	Sanden (2007)	Goldhamer (sin publicar)	Girona (2006)	Ayars *et al.* (2003)
Marzo	0.50	0.60	0.59	0.20	0.40	0.28
Abril	0.75	0.71	0.78	0.67	0.65	0.48
Mayo	0.90	0.84	0.92	0.95	0.80	0.68
Junio	0.95	0.92	1.01	1.09	0.92	0.88
Julio	0.95	0.96	1.08	1.15	0.96	1.06
Ago.	0.95	0.96	1.08	1.17	1.05	1.06
Sep.	0.85	0.91	1.02	1.12	0.85(*)	1.06
Oct.	0.80	0.79	0.89	0.85	0.60	0.90
Nov.	0.70		0.69		0.40	

FIGURA 5 Relaciones entre el rendimiento relativo y el agua aplicada relativa para 14 estudios de riego deficitario en almendros, con una amplia gama de variedades, ubicaciones, suelos, precipitación, patrones de momentos de estrés y demanda evaporativa.



REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

Los productores con suministros limitados de agua deben tomar la decisión sobre cuándo someter los árboles a estrés. Con base en los resultados de las investigaciones, consideramos que los dos períodos más sensibles al estrés son la primavera, cuando las almendras están experimentando una expansión rápida, y finales del verano/otoño, cuando ocurre la morfogénesis de las yemas. Este segundo período de sensibilidad al estrés se presenta usualmente postcosecha en las variedades de cosecha temprana, pero antes de la cosecha en las variedades de maduración más tardía. Los resultados de un experimento (Goldhamer *et al.,* 2006) suministran información útil sobre la sensibilidad relativa del estrés previo y posterior a la cosecha como ayuda para la toma de decisiones sobre RDI. Se encontró que cuanto mayor fue el grado de privación de agua antes de la cosecha, mayor fue la reducción del peso de la materia seca en la semilla al momento de la cosecha (Figura 6a). No obstante, minimizar el estrés previo a la cosecha a costa del riego postcosecha resultó en una reducción significativa de las cargas de frutos en estaciones posteriores (Figura 6b). El rendimiento, el cual integra el peso del fruto y la carga de frutos, fue el menos afectado al minimizar el estrés después de la cosecha (Figura 6c). Estos regímenes también dieron lugar a la productividad del agua de riego más alta (Figura 6d).

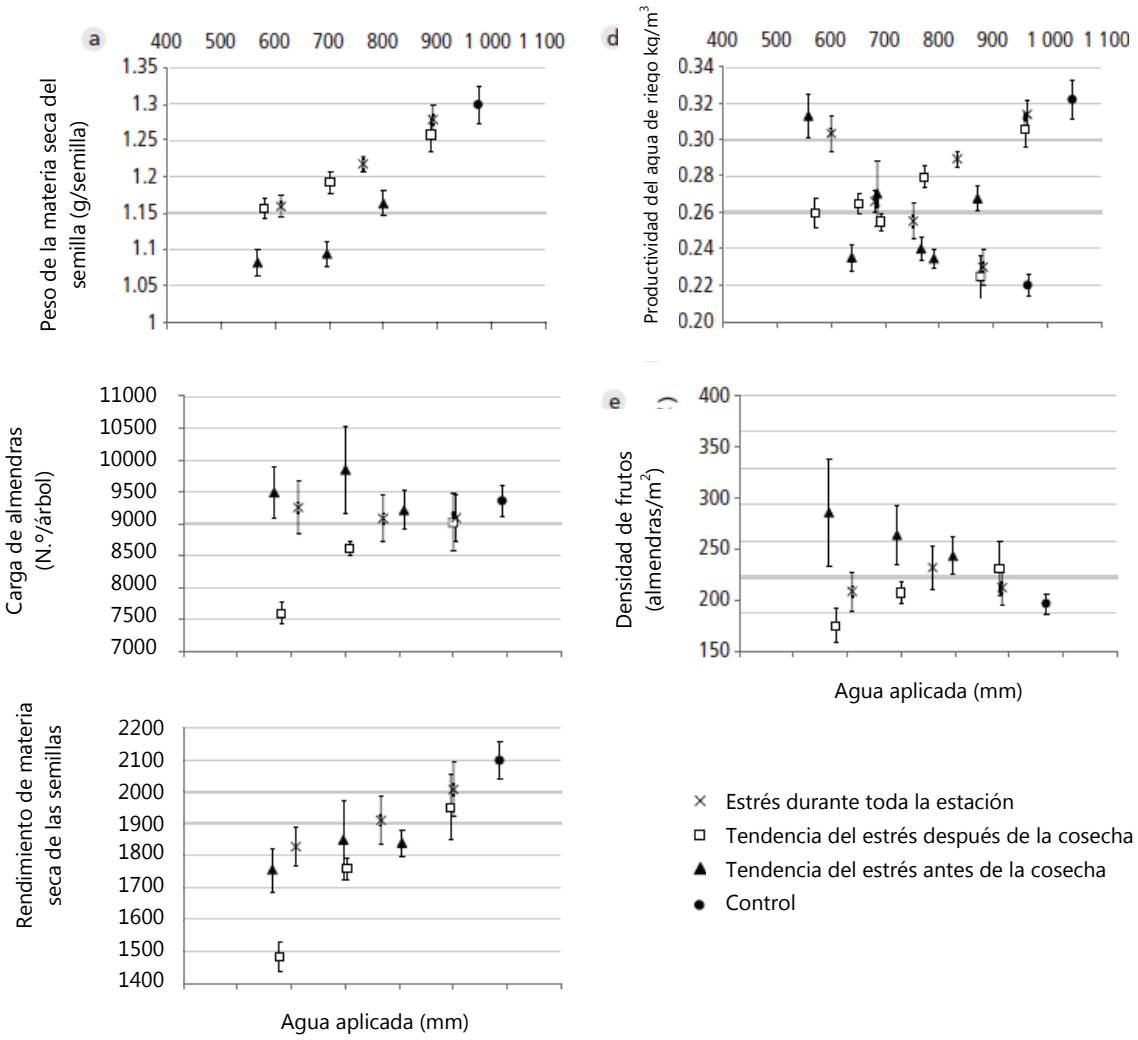
Es posible que las limitaciones del suministro hídrico sean temporales, como resultado de la sequía de un año. Las estrategias para RDI con sequía de una sola estación se pusieron a prueba (Goldhamer y Smith, 1995), donde se aplicó menos del 40 % (400 mm) de la ET_c potencial estacional con diferentes regímenes de tiempo: riego a ET_c de 100 %, 75 % y 50 %, hasta que se agotaron los 400 mm, lo que ocurrió a inicios de junio, mediados de julio y finales de agosto, respectivamente. Ellos observaron que el riego completo al comienzo de la estación limitó las reducciones en el tamaño del fruto, pero ocasionó reducciones drásticas en la carga de frutos de las estaciones posteriores (Tabla 2) (Goldhamer y Smith, 1995). Atribuyeron estos resultados al impacto negativo del estrés en la diferenciación de las yemas reproductivas. El tratamiento en el que se aplicó riego a una ET_c del 50 %, y en el cual se aplicó agua por un intervalo de tiempo más prolongado (hasta agosto; dos semanas después de la cosecha), no sufrió ninguna disminución significativa de la carga de frutos en la siguiente estación. Cuando calcularon el promedio del año de sequía y de los dos años siguientes de recuperación con riego completo, encontraron que el tratamiento con ET_c del 50 % produjo rendimientos más altos en comparación con los otros dos regímenes de RDI, los cuales aplicaron su suministro de agua disponible durante toda la etapa previa a la cosecha. No obstante, ninguno de los regímenes de RDI logró la recuperación completa de la producción incluso después de dos estaciones de riego completo después de un solo año de sequía, lo cual sugiere que posiblemente los impactos de la reducción de brotes y el crecimiento de los brotes de dos años de edad también pudieron influir en los resultados (Goldhamer y Smith, 1995).

La Tabla 3 presenta regímenes de RDI sugeridos para cinco niveles diferentes de suministro de agua disponible (300, 450, 600, 750 y 900 mm, donde la ET_c máxima es 1250 mm), expresando las tasas de riego como porcentajes de la ET_c. A fin de mostrar cómo estos regímenes afectarían al agua aplicada, utilizamos como ejemplo los valores a largo plazo de ET_o obtenidos en el oeste del condado de Fresno, California y los coeficientes de cultivo (K_c) bimestrales de Goldhamer (sin publicar) para almendros de la variedad "Non Pareil". Cuando el suministro hídrico es relativamente alto, el estrés se desvía al período previo a la cosecha, ahorrando tanta agua como sea posible para el período más sensible al estrés; de mediados de agosto hasta finales de septiembre. Ante la fuerte restricción del suministro de agua, la preocupación principal es garantizar la supervivencia y estado general de los árboles, además de minimizar los impactos del estrés en los rendimientos promedio en el tiempo. Cabe recalcar que cuando se aplican cantidades muy bajas del suministro de agua estacional potencial, se debe minimizar la evaporación de la superficie y por ende, el número de riegos. Por tanto, la duración (cantidad de agua aplicada) de cada riego se debe mantener como de normal, pero la frecuencia de riego se debe modificar. Por ejemplo, si normalmente se aplica riego con micro-aspersores cada tres días, una estrategia de RDI en la que se aplique ET_c del 25 %

prolongaría la frecuencia a períodos de cada 12 días.

Dado que el RDI reduce el crecimiento vegetativo, no debe aplicarse en árboles jóvenes, donde el objetivo es hacer crecer el dosel a su tamaño completo y por consiguiente, lograr rendimientos máximos tan pronto como sea posible. Se ha confirmado (Girona *et al.,* 2005) que la imposición de RDI en una etapa demasiado temprana del ciclo del huerto puede reducir los rendimientos potenciales.

FIGURA 6 Relaciones entre el agua aplicada y a) peso de la materia seca de la semilla, b) carga de frutos, c) rendimiento de semilla, d) productividad del agua de del riego y e) densidad de fruto. Las líneas verticales son más y menos el error estándar. Los datos corresponden a valores medios de cuatro años experimentales con Non Pareil. Adaptado de Goldhamer *et al.* (2006).



Consideraciones adicionales

Se sabe que el estrés hídrico en los almendros aumenta los niveles de araña roja (Youngman y Barnes, 1986) y gusanos de la naranja navel (Goldhamer, datos sin publicar). Este último representa un mayor problema cuando se acelera el inicio de la apertura de la cortea mediante el estrés previo a la cosecha y/o cuando las almendrass permanecen más tiempo en el árbol antes de ser sacudidas. La pudrición de la corteza se puede reducir drásticamente imponiendo déficits hídricos durante las dos primeras semanas de julio (Teviotdale *et al.,* 2001). Su valor objetivo de potencial hídrico foliar antes del amanecer fue de -1.6 MPa.

BIBLIOGRAFÍA

Ayars, J.E., Johnson, R. S., Phene, C.J., Clark, D.A. y Mead, R.M. 2003. Water use by drip irrigated late season peaches. *Irrigation Science* 22: 187-194.

Castel, J.R. y Fereres, E. 1982. Responses of young almond trees to two drought periods in the field. *Journal of Horticultural Science,* 57:175-187.

Esparza, G., DeJong, T.M., Weinbaum, S.A. y Klein, I. 2001. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on yield determinants in almond trees. *Tree Physiology,* 21: 1073-1079.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Fereres, E., Aldrich, T.M., Schulbach, H. y Martinich, D. A. 1981. Responses of almond trees to late season drought. *California Agriculture,* 42: 10-13.

Girona, J., Mata, M. y Marsal, J. 2005. Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. *Agricultural Water Management,* 75(2):152-167.

Goldhamer, D.A. y Smith, T. 1995. Single season drought irrigation strategies influence almond production. *California Agriculture,* 49(1):19-22.

Goldhamer, D.A. y Viveros, M. 2000. Effects of preharvest irrigation cutoff durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. *Irrigation Science,* 19:125-131.

Goldhamer, D.A., Viveros, M. y Salinas, M. 2006. Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrigation Science,* 24(2):101 -114.

Lamp, T.M., Connell, J.H., Duncan, R.A., Viveros, M. y Polito, V.S. 2001. Almond flower development: Floral initiation and organogenesis. *Journal of the American Society of Horticultural Science,* 126(6): 698-696.

Romero, P., Navarro, J.M., García, F. y Ordaz, P.B. 2004. Effects of regulated deficit irrigation during pre-harvest period on gas exchange, leaf development and crop yield of mature almond trees. *Tree Physiology,* 24:303-312.

Stevens, Rob M., Caecilia M. Ewenz, Gary Grigson, Samantha M. Conner. 2011. Water use by an irrigated almond orchard. *Irrigation Science.* DOI 10.1007/s00271-011-0270-8.

Stewart, W., Fulton, A, Krueger, W.H., Lampinen, B. D. y Shackel, K. A. 2011. Regulated deficit irrigation reduces water use of almonds without affecting yield. *California Agriculture,* 65(2)90-95.

Tevlotdale, B.L., Goldhamer, D.A. y Viveros, M. 2001. The effects of deficit irrigation on hull rot disease of almond trees caused by *Monilinia fructicola* and *Rhizopus stolonifer. Plant Disease,* 85(4):399-403.

Tufts, W.P. y E.B., Morrow. 1925. Fruit-bud differentiation in deciduous fruit. Hilgardia. *California Agriculture Exp Sta,* 1(1). 26 págs.

Youngman, R.R. y Barnes, M.M. 1986. Interaction of spider mites (Acari: Tetranychidae) and water stress on gas-exchange rates and water potential of almond leaves. *Environmental Entomology,* 15: 594-600.

TABLA 2 Datos de manejo de riego, rendimiento y calidad de la almendra en un estudio de riego con un solo año de sequía, realizado en el oeste del condado de Fresno, California.

Año	Tratamiento	Agua aplicada en	Asignación del agua aplicada ** (mm)	Rendimiento total de la semilla (lbs/acre)	Peso individual de la semilla (gramos)	Carga de almendras del árbol (N.º/árbol)	Apertura de la corteza		
							Apertura completa de la corteza	Apertura parcial de la corteza	Hermetismo de la corteza
							(% de carga de almendras del árbol)		
Sequía	Control de riego completo	Estación completa	1024	1653 a***	1.24 a	7100 a	98.9 a	0.4 a	0.7 a
Año	100%DY ET_c*	19 de junio	409	1362 b	0.97 b	8160 a	38.2 b	48.1 b	13.7 b
	75%DY ET_c*	11 de julio	411	1236 b	1.10 bc	6340 a	85.3 a	11.4a	3.3 a
	50%DY ET_c*	28 de agosto	414	1448 ab	1.03 bc	7000 a	99.0 a	0.6 a	0.4 a
Recuperación	Control de riego completo	Estación completa	843	2730 a	1.04 a	12 850 a	99.7 a	0.0 a	0.3 a
Año 1	100%DY ET_c*	Estación completa	836	911 b	1.03 a	4770 b	99.7 a	0.1 a	0.2 a
	75%DY ET_c*	Estación completa	836	1493 c	0.99 ab	8250 c	99.9 a	0.0 a	0.1 a
	50%DY ET_c*	Estación completa	846	2010 d	0.89 b	11 690 ad	99.6 a	0.0 a	0.4 a
Recuperación	Control de riego completo	Estación completa	838	2358 a	0.97 a	9890 a	98.3 a	1.3 a	0.4 a

TABLA 2 (CONTINUACIÓN)

Año	Tratamiento	Agua aplicada en	Asignación del agua aplicada ** (mm)	Rendimiento total de la semilla (lbs/acre)	Peso individual de la semilla (gramos)	Carga de almendras del árbol (N.º/árbol)	Apertura de la corteza		
							Apertura completa de la corteza	Apertura parcial de la corteza	Hermetismo de la corteza
							(% de carga de almendras del árbol)		
Año 2	100%DY ET_c*	Estación completa	838	2327 a	1.02 a	9200 a	98.9 a	0.7 a	0.5 ab
	75%DY ET_c*	Estación completa	838	1975 b	1.02 a	7900 b	97.9 a	1.2 a	0.9 b
	50% DY ET_c	Estación completa	838	1949 b	1.13 b	7050 b	98.5 a	1.0 a	0.5 ab
Año 3	Control de riego completo		902	2247 a	1.08 a	9948 a	99.0 a	0.5 a	0.5 a
	100% DY ET_c		693	1534 b	1.01 a	7378 b	78.9 b	16.3 b	4.8 b
	75% DY ET_c		696	1568 b	1.04 a	7498 b	94.4 a	4.2 a	1.5 a
	50% DY ET_c		699	1802 c	1.02 a	8581 b	99.0 a	0.5 a	0.5 a

* Tasa de riego hasta que se aplica la asignación o dostribución. No se presenta riego adicional durante el resto de la estación.

** No incluye el riego de 100 mm previo a la estación aplicado cada año.

*** Los números para cada año seguidos de una letra distinta son significativamente diferentes al nivel de confianza del 5%, utilizando el nuevo test de rango múltiple de Duncan.

TABLA 3 Estrategias de RDI sugeridas para diferentes escenarios de suministro de agua disponible, desde 900 hasta 300 mm, cuando la ETc potencial es 1250 mm.

	ET_c	caso de 900 mm disponibles		caso de 750 mm disponibles		caso de 600 mm disponibles		caso de 450 mm disponibles		caso de 300 mm disponibles	
	potencial en	Tasa de	Cantidad	Tasa de	Cantidad	Tasa de	Cantidad	Tasa de	Cantidad	Tasa de	Cantidad
Fecha	período	riego	aplicada	riego	aplicada	riego	aplicada	riego	aplicada	riego	aplicada
	(mm)	(% ET_c)	(mm)	(% ET_c)	(mm)	(% ET_c)	(mm)	(% ET_c)	(mm)	(% ET_c)	(mm)
16-31 de marzo	12	75	9	70	9	60	7	40	5	25	3
1-15 de abril	35	75	27	70	25	60	21	40	14	25	9
16-30 de abril	57	75	43	70	40	60	34	40	23	25	14
1-15 de mayo	82	75	61	50	41	30	25	25	20	25	20
16-31 de mayo	106	75	80	50	53	30	32	25	27	25	27
1-15 de junio	114	75	86	50	57	30	34	25	29	25	29
16-30 de junio	120	75	90	50	60	30	36	25	30	25	30
1-15 de julio	121	50	60	25	30	25	30	25	30	20	24
16-31 de julio	125	100	125	100	125	90	112	75	93	25	31

TABLA 3 (CONTINUACIÓN)

	ET_c	caso de 900 mm disponibles		caso de 750 mm disponibles		caso de 600 mm disponibles		caso de 450 mm disponibles		caso de 300 mm disponibles	
Fecha	potencial en período (mm)	Tasa de riego (% ET_c)	Cantidad aplicada (mm)	Tasa de riego (% ET_c)	Cantidad aplicada (mm)	Tasa de riego (% ET_c)	Cantidad aplicada (mm)	Tasa de riego (% ET_c)	Cantidad aplicada (mm)	Tasa de riego (% ET_c)	Cantidad aplicada (mm)
1-15 de agosto	111	100	111	100	111	90	100	60	67	25	28
16-31 de agosto	109	75	82	60	65	50	54	60	65	50	54
1-15 de sept.	90	75	67	60	54	50	45	25	22	25	22
16-30 de sept.	72	75	54	60	43	50	36	25	18	25	18
1-15 de oct.	55	25	14	60	33	50	27	25	14	0	0
16-31 de oct.	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1242		909		746		595		458		298
Riegos	33*		24		20		16		12		8

*El cultivador haría seguimiento a las cantidades acumuladas que se aplicarán en los escenarios de RDI. Cuando alcanzan un total de 37 mm (cantidad aplicada por los micro-aspersores en 24 horas para este ejemplo), el cultivador aplica el riego. Por consiguiente, se aplicaría un riego en la primera semana de abril con suministro hídrico completo; pero en el caso de 300 mm disponibles, el primer riego no se realizaría hasta la primera semana de mayo.

Peral

AUTOR PRINCIPAL
Jordi Marsal
(IRTA, Lleida, España)

AUTORES COLABORADORES
Joan Girona
(IRTA, Lleida, España),
Amos Naor
(GRI, Universidad de Haifa, y Migal; Centro de Tecnología de Galilea, Israel)

Peral

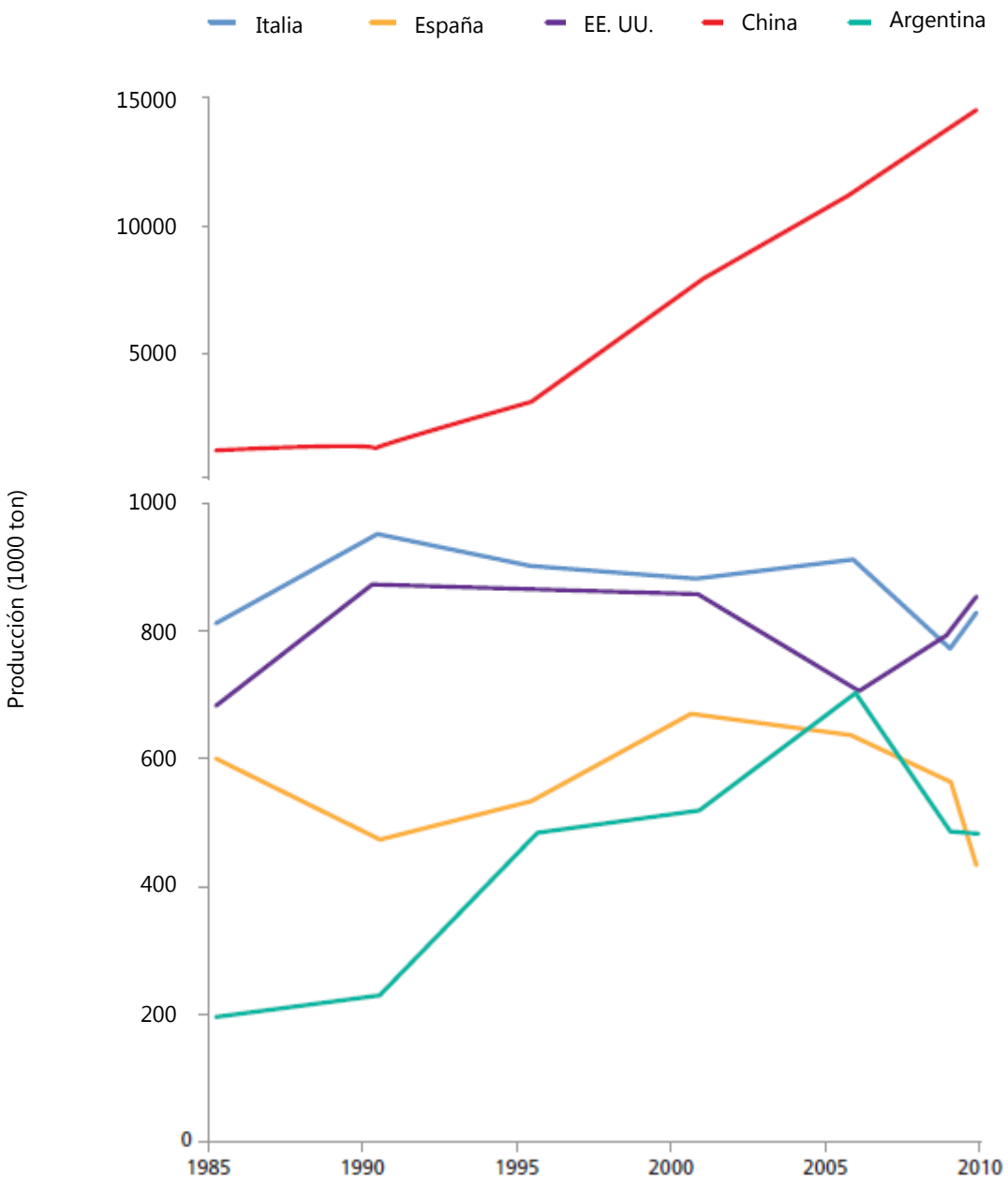
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los perales, junto con los duraznos o melocotoneros, son la segunda especie de árbol frutal caducifolio en importancia económica después de las manzanas. El género *Pyrus* incluye aproximadamente 20 especies silvestres y su principal centro de origen son Europa y las regiones en zonas templadas de Asia. Se cultivan dos especies principales. Los perales europeos *(Pyrus communis* L.) se cultiva en Europa, Estados Unidos, Sudáfrica y Oceanía; y el peral asiático o Nashi *(Pyrus pyrifolia* Burm.) (syn. *Pyrus serotina)* se cultiva tradicionalmente en Asia. Otras especies del género se han utilizado como portainjertos, entre ellas *Pyrus calleryana* Dcne. Hoy en día, el patrón más común es el membrillo clonal *(Cydonia oblonga* L.), aunque su compatibilidad para injerto no es satisfactoria en todas las variedades.

El peral es autoincompatible y se requiere polinización cruzada con otras variedades para lograr una producción óptima de frutos, a excepción de algunas variedades como Bartlett y en cierta medida, Conference. Los perales generalmente dan fruto en brotes de dos años de edad en las yemas terminales. Las yemas florales brotan cuando finaliza el desarrollo de los brotes durante la estación anterior, y la formación de estas flores depende de la luz que reciban los brotes de dos años de edad en la estación previa. Por ende, se requiere una copa abierta para garantizar la fertilidad completa por medio de una poda de formación y poda en formas específicas.

Otros factores que influyen en la iniciación de las yemas florales son la carga de producción y el estrés hídrico en la estación anterior. Hasta cierto punto, el estrés hídrico puede ser un estímulo positivo para la iniciación de las yemas, pero una alta carga de producción incide de manera negativa en la estación posterior. Por este motivo, los perales usualmente presentan alterancia en la producción cada dos años. Otro factor clave en los huertos de perales es el control del crecimiento, para evitar la disminución de la penetración de la luz en el dosel. El estrés hídrico, los portainjertos de control del vigor y los reguladores de crecimiento son medios disponibles para reducir el vigor en los perales. Los perales se cultivan en una amplia gama de climas, en áreas de frías a cálidas y de húmedas a áridas. En 2009, había 1.58 millones de hectáreas de huertos de pera a nivel mundial, con un rendimiento promedio de 14.2 ton/ha (FAO, 2011). La Figura 1 presenta las tendencias de producción de los principales países productores. Los principales factores que limitan la expansión de la producción de pera en regiones cálidas son la carencia de cantidad mínima de horas frío durante el invierno y la aparición de enfermedades como el fuego bacteriano. Los perales no son una especie resistente a la sequía y su producción comercial en áreas con estaciones secas depende por completo del riego. En lo que respecta al riego, es posible que los huertos de perales se beneficien del uso racional del riego deficitario, ya que puede tener efectos positivos al controlar el vigor del árbol durante la estación actual y en la floración de la siguiente estación.

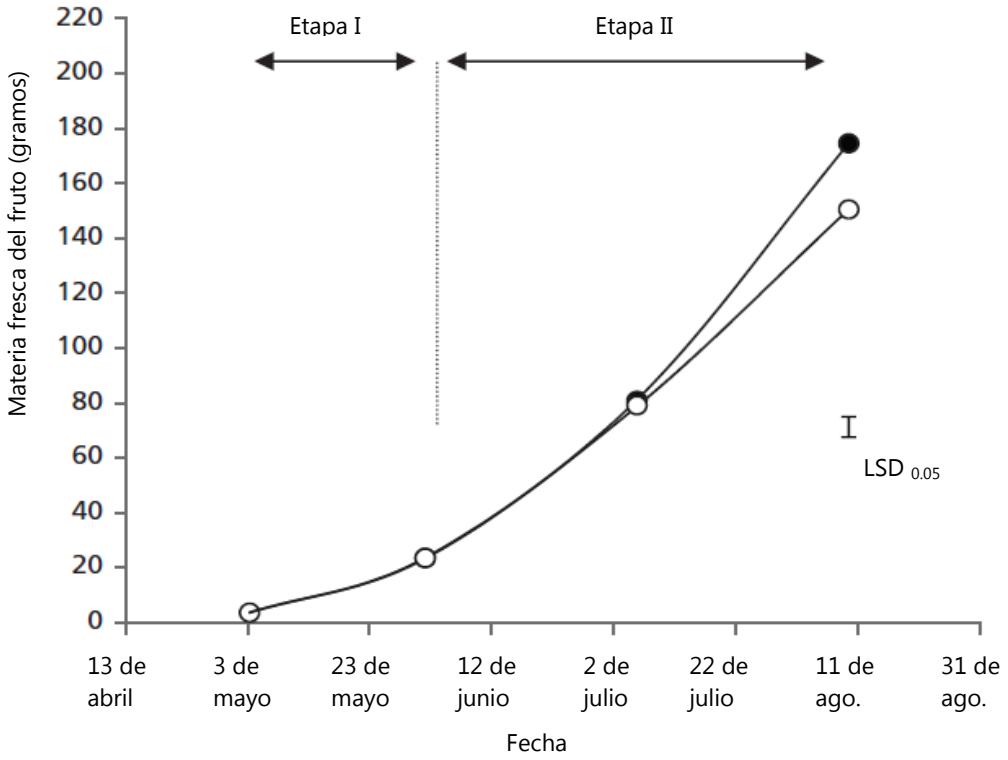
FIGURA 1 Tendencias de producción de peras en los principales países (FAO, 2011).



DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL DESARROLLO EN RELACIÓN CON LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

El crecimiento reproductivo de los perales se puede dividir en dos etapas, en base a la tasa de crecimiento del fruto (Figura 2). La Etapa I del desarrollo del fruto del peral corresponde a la fase inicial de crecimiento lento, y la Etapa II corresponde a la fase de crecimiento rápido (Mitchell *et al.,* 1989). En la variedad Bartlett, la segunda etapa se podría marcar cuando el crecimiento (incremento del volumen) supera la tasa de 1.5 $cm^3 día^{-1}$.

FIGURA 2 Crecimiento reproductivo de los perales.



Inicio del crecimiento vegetativo y reproductivo: etapa I de crecimiento

La apertura de las flores del peral comúnmente se produce de manera casi sincronizada con la aparición de las hojas. El crecimiento de los brotes se inicia después de la aparición de la primera hoja y ocurre de forma concomitante con el crecimiento reproductivo de la estación actual. Las condiciones de vigor determinarán el alcance y el momento en que ocurre alargamiento de los brotes. En árboles injertados con portainjertos controladores del vigor como el membrillo, el desarrollo de los rebrotes ocurre en uno o dos brotes durante la primavera (abril y mayo en el hemisferio norte). Bajo condiciones de mayor vigor, el crecimiento de los brotes se extiende hasta inicios del verano a lo largo de la Etapa I. En este momento, el crecimiento vegetativo del injerto es un sumidero de nutrientes más fuerte que el fruto, y el crecimiento del fruto es bastante lento en términos de acumulación de materia seca. El crecimiento de las raíces en primavera también es relevante y ocurre de manera simultánea con el desarrollo de los brotes y termina cerca de finales de mayo. No obstante, el crecimiento de las raíces depende de la competencia entre órganos y la

disponibilidad de carbohidratos. La finalización del crecimiento rápido de los brotes está marcada por la aparición de una yema terminal.

El crecimiento del fruto inicia justo después de la fertilización del ovario, la cual se puede medir en el campo aproximadamente un mes después de la plena floración. Sin embargo, la caída fisiológica de los frutos dura más y se puede prolongar hasta el final de la Etapa I o el inicio de la Etapa II (en variedades de mediados de estación). La Etapa I corresponde al período principal de división celular del fruto y tiene lugar durante las primeras 7 a 8 semanas después de la floración (Bain, 1961). ERl resto del desarrollo del fruto constituye la Etapa II, cuando ocurre el mayor incremento en el volumen celular (Bain, 1961). Sin embargo, la expansión celular también está activa durante la Etapa I, pero su efecto se camufla con la aparición simultánea de la división celular.

Crecimiento del fruto durante la Etapa II

El crecimiento expansivo del fruto es el principal evento de crecimiento para el árbol durante la Etapa II, la cual corresponde al período de crecimiento rápido de las células del fruto. No obstante, el desarrollo de los brotes también cobra importancia después de que cesa el crecimiento de los brotes. La diferenciación de las yemas en yemas florales usualmente ocurre al comienzo de la Etapa II en las variedades de mediados de estación (de inicios a mediados de junio) (Elkins *et al.,* 2007). La aparición de las estructuras de la flor tiene lugar durante la Etapa II. Sin embargo, este proceso se ve influenciado y modificado por las condiciones climáticas y una serie de factores que aún no se comprenden con claridad. Aunque el crecimiento en extensión de los brotes es mínimo en este punto, el grosor de las ramas puede aumentar si la carga de frutos es baja y el estado hídrico es óptimo.

Postcosecha

Los brotes continuarán desarrollándose durante la postcosecha, y a un ritmo más lento en todo el invierno. Durante este período, el tamaño de los brotes aumentará en un 25 %, lo cual corresponde principalmente a la elongación de los carpelos. Durante el período de postcosecha, hay un segundo pico de actividad de crecimiento radicular, el cual también es importante para la acumulación de reservas en las raíces y los tallos antes del comienzo de la defoliación. Este pico tiende a ocurrir un poco más temprano en los manzanos y otras especies caducifolias, y se acelera con las temperaturas bajas. Puede ocurrir una floración anómala de postcosecha en otoño después de un período de estrés hídrico severo de postcosecha, si este estrés se contrarresta con riego o precipitación un mes antes de la senescencia de las hojas (Naor *et al.,* 2006).

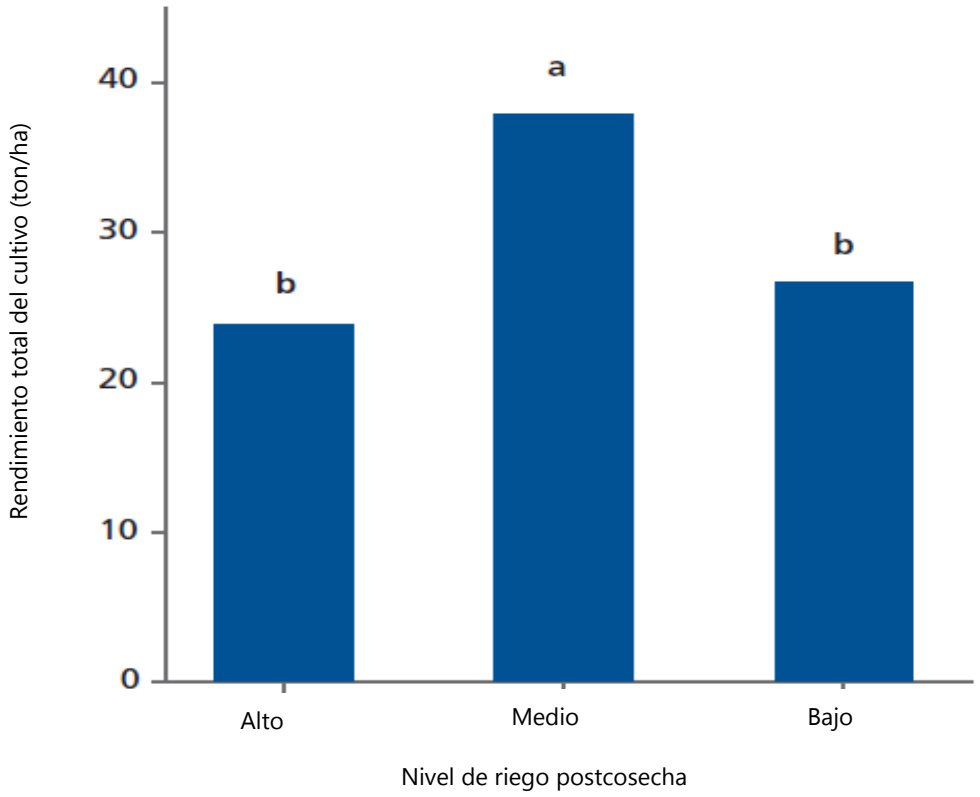
RESPUESTAS AL ESTRÉS HÍDRICO

Aunque el peral no se considera resistente a la sequía, sus órganos y tejidos pueden soportar cierto grado de deshidratación, el cual supera la capacidad de otros árboles frutales caducifolios, como el durazno o melocotonero, el ciruelo o el manzano. Durante el verano, la variedad "Barlett" presenta pérdida de turgencia foliar en valores de potencial hídrico del tallo (SWP) a mediodía cercanos a -3.1 MPa (Marsal y Girona, 1997), los cuales son bastante bajos en comparación con otros árboles frutales caducifolios. También se han reportado retrasos en la recuperación de los déficits hídricos si el SWP alcanza valores inferiores a -3.5 MPa, lo que sugiere este umbral como el límite para la aparición del embolismo vascular (Marsal *et al.,* 2002b). La conductancia estomática y la fotosíntesis de las hojas disminuye de forma lineal con el SWP al mediodía, en respuesta a las reducciones en el riego. En el caso del peral europeo, se han reportado valores cercanos a cero en la conductancia estomática y en la fotosíntesis foliar cuando los valores de SWP son -2.5 MPa (Naor *et al.,* 2000; y Marsal *et al.,* 2002b). El crecimiento del tronco se detiene cuando el SWP es inferior a -2.2 MPa, pero el crecimiento de extensión de los brotes se suspende antes, aproximadamente en -1.7 MPa, en el caso de condiciones de vigor moderadamente bajas. En condiciones de mayor vigor (es decir, árboles jóvenes, sin frutos), el crecimiento de extensión precede hasta -2.0 MPa de SWP. El

crecimiento del fruto (peso de materia fresca) es ligeramente menos sensible a los déficits hídricos y se detiene en cerca de -2.5 MPa, ya sea durante la Etapa I o la Etapa II (Marsal *et al.,* 2002b). Los valores de SWP que se mencionan anteriormente son indicadores de limitación completa, pero los procesos de crecimiento de fruto o vegetativo se ven afectados por déficits hídricos mucho más leves. Por ejemplo, se encontró que para que la variedad "Conference" alcance los estándares de tamaño de fruto establecidos para el mercado de frutos frescos en al menos el 50 % de los frutos cosechados, se deben evitar los valores de SWP inferiores a -1.1 MPa durante la Etapa II del período de crecimiento del fruto.

En términos de floración, un nivel moderado de estrés hídrico durante el período de crecimiento del fruto (Marsal *et al.,* 2002a) o el período postcosecha (Naor *et al.,* 2006) aumenta la floración en la siguiente estación, en comparación con los árboles regados completamente. Este comportamiento se atribuye al hecho de que los niveles moderados de estrés hídrico aceleran el desarrollo de los órganos de las flores (Forshey y Elfving, 1989). Sin embargo, el estrés hídrico severo (valores de SWP inferiores a-2.8 MPa) pueden provocar deficiencias en el cultivo de la siguiente estación (Naor *et al.,* 2006). Los datos de la Figura 3 muestran que el estrés hídrico moderado fue la mejor estrategia postcosecha en términos de mejora de la productividad en la estación posterior (Naor *et al.,* 2006). En contraposición al peral europeo, parece ser que el peral asiático muestra una respuesta diferencial de floración ante el déficit hídrico en el año anterior. En general, el estrés hídrico redujo la floración de retorno en los perales asiáticos (Caspari *et al.,* 1994).

FIGURA 3 Efectos de los niveles de riego postcosecha en el rendimiento del cultivo de la siguiente estación (acumulado de dos años). El potencial hídrico del tallo a mediodía fue de -2.8 MPa, -2.4 MPa y -1.5 MPa en los niveles de riego bajo, medio y alto, respectivamente (Fuente: Naor *et al.,* 2006).



En términos generales, puede afirmarse que para asegurar condiciones de crecimiento favorables, los valores de SWP de referencia a mediodía para perales no sometidos a estrés oscilan entre -0.65 y -0.95 MPa, dependiendo de la demanda evaporativa; valores inferiores a -1.1 MPa son indicadores de condiciones de estrés hídrico. Por otro lado, es difícil diagnosticar los efectos tempranos del encharcamiento a partir de los valores de SWP.

Respuestas al estrés hídrico durante la Etapa I

Los perales son altamente sensibles al estrés hídrico estacional. La presencia de estrés hídrico durante la Etapa I disminuye el crecimiento de brotes, el crecimiento de frutos, el tamaño final del fruto al momento de la cosecha, y puede llegar a aumentar la caída de los frutos (Marsal *et al.,* 2000; y Naor *et al.,* 2000). El estrés hídrico durante la Etapa I puede afectar potencialmente a la división celular del fruto, el agrandamiento de las células, o ambos procesos (Marsal *et al.,* 2000). Solamente en pocos casos y bajo condiciones moderadas de estrés hídrico (LWP superior a -2.5 MPa), el tamaño final del fruto no resulta limitado ni favorecido por la aplicación de estrés hídrico en una etapa temprana (Behboudian *et al.,* 1994; y Mitchell *et al.,* 1989). Estos autores afirmaron que tales respuestas se lograron debido a la aparición del ajuste osmótico del fruto, el cual aumentó el crecimiento del fruto después del estrés hídrico temprano. No obstante, también son posibles otras interpretaciones de estos efectos positivos, como las diferentes condiciones en el momento y la duración del estrés hídrico aplicado (Naor *et al.,* 2006). Otros factores como el vigor y las condiciones de sombra de árbol a árbol también se pueden sumar a esta controversia. La bibliografía inicial proveniente de Australia describió la aplicación de déficits hídricos a los perales de la variedad "Barlett" en huertos de alta densidad (de 2500 a 5000 plantas/ha) que fueron cultivados en portainjertos ampliamente vigorosos *(Pyrus calleriana)*. En esos experimentos, el fruto bajo RDI durante la Etapa I alcanzó un mayor tamaño que el fruto de control al momento de la cosecha, y el estrés hídrico durante la Etapa I ayudó a reducir el crecimiento vegetativo que se consideraba excesivo. Las condiciones de crecimiento en estos estudios fueron específicas del lugar y no representan las condiciones típicas de crecimiento de los perales alrededor del mundo, donde la sombra del dosel se optimiza mediante la introducción de nuevos portainjertos controladores del vigor. Los experimentos realizados en España bajo condiciones de crecimiento más comunes, en los que se incluyeron huertos de densidad moderada (1100-1600 plantas/ha) y se utilizaron portainjertos reductores del vigor como el membrillo clonal (BA-29 o M-C), no indicaron un efecto significativo en el tamaño del fruto al momento de la cosecha en respuesta a la Etapa I de RDI, en comparación con los árboles de control a los que se aplicó riego (Marsal *et al.,* 2002a; y Asin *et al.,* 2007). En un caso donde los árboles crecieron en contenedores grandes y aislados de 120 litros, el riego deficitario durante la Etapa I efectivamente redujo el tamaño final del fruto al momento de la cosecha (Marsal *et al.,* 2000). Adicionalmente, algunos intentos realizados en España durante la década de los noventa para utilizar RDI durante la Etapa I, en huertos con fines comerciales encaminados a aumentar el tamaño del fruto por encima del que presentaban los árboles sometidos a riego completo, no tuvieron éxito.

Respuestas al estrés hídrico durante la Etapa II

El estrés hídrico durante la Etapa II del desarrollo del fruto disminuyó su peso final y redujo su diámetro (Behboudian *et al.,* 1994; Marsal *et al.,* 2000; Naor, 2001; Marsal *et al.,* 2002a; y O'Connel y Goodwin, 2007). El estrés hídrico en este punto reduce principalmente el tamaño de las células del fruto (Marsal *et al.,* 2000) y en consecuencia, el tamaño final del fruto al momento de la cosecha.

Respuestas al estrés hídrico durante el período postcosecha

Existen pocos estudios disponibles sobre este tema. Un estudio intentó utilizar RDI en el período postcosecha para la pera europea Spadona, donde el tiempo transcurrido para el riego deficitario fue de tres meses (desde agosto hasta finales de octubre) (Naor *et al.,* 2006). Los resultados del experimento indicaron que se podría ahorrar agua, siempre que el SWP al mediodía no excediera el umbral de -2.2 MPa. Un efecto positivo relacionado con el estrés hídrico moderado postcosecha (es decir, SWP >-2.2 MPa) fue que, durante la siguiente estación, la floración de retorno y el

rendimiento de fruto aumentaron considerablemente en comparación con los árboles sometidos a riego completo o a estrés severo (Naor *et al.,* 2006).

En España, Marsal encontró resultados similares con respecto al incremento de la floración de retorno para la variedad Conference. Sin embargo, en su estudio el cuajado de fruto fue inferior para estos árboles con un nivel más alto de floración, y esto finalmente redujo el rendimiento, pero aumentó el tamaño del fruto.

REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

Existe poca información disponible sobre la ET_c de los perales. Un estudio utilizó lisímetros de drenaje con capacidad de 105 litros y condiciones cercanas a la hidroponía con la superficie del suelo cubierta para evitar la evaporación del suelo (Buwalda y Lenz, 1995). El estudio consideró tres variedades diferentes, dos sistemas de poda y la presencia o ausencia de fruto. El efecto de las variedades y el sistema de poda en el consumo de agua por parte del árbol fue considerable, aunque las diferencias pueden obedecer a diferencias en el área foliar. No obstante, la presencia de fruto incrementó el consumo de agua del árbol en un 36 %, en comparación con los árboles sin fruto, independientemente del área foliar (Buwalda y Lenz, 1995). Estas diferencias estuvieron probablemente relacionadas con incrementos en la conductancia estomática y por tanto, en la fotosíntesis foliar y la transpiración que normalmente se observan bajo condiciones más altas de producción de pera (Marsal *et al.,* 2008).

Los coeficientes de cultivo obtenidos en el estudio con lisímetro (Buwalda y Lenz, 1995) se refirieron a la ecuación de ET_o de Priestley y Taylor, y no se tuvo en cuenta el componente de evaporación del suelo. No obstante, los valores reportados fueron bastante bajos, con valores máximos de 0.38 para la variedad Conference con un índice de área foliar (LAI) de 2.0. El uso del agua en este estudio debió haber estado restringido debido al tamaño de los contenedores, porque en un estudio de campo se encontró un K_c de 0.9 a mediados del verano para un huerto de perales de la variedad Blanquilla, con árboles podados según un sistema de palmeta (Marsal *et al.,* 2002a). Este valor de K_c es ligeramente más bajo que el valor de 0.95-1.0 que tradicionalmente se recomienda (Allen *et al.,* 1998). Un estudio con lisímetro de pesada dentro de un huerto de perales midió la ET_c de tres perales, variedad Conference, podados con el sistema de guía central (Girona *et al.,* 2010). Los valores de los coeficientes de cultivo (ET_o calculada según la ecuación de Penman-Monteith del Estudio FAO: *Riego y Desarrollo N.º 56*) a mediados del verano fueron de cerca de 0.9 con un LAI de 1.4. La Tabla 1 presenta los cambios estacionales en los valores de K_c para árboles de la variedad Conference.

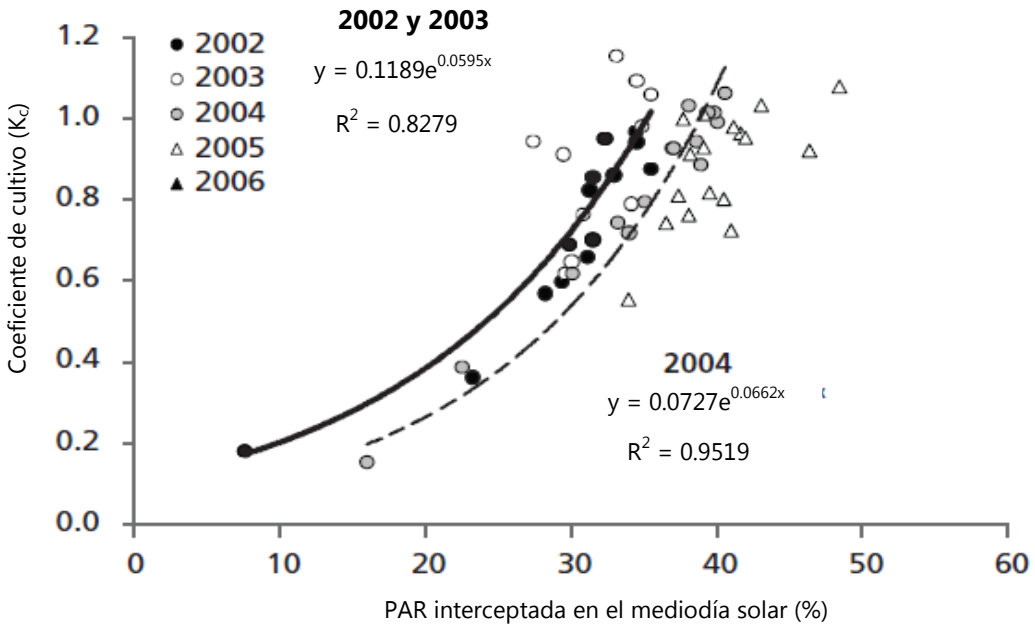
TABLA 1 Coeficientes de cultivo comparados con un cultivo de referencia de gramíneas (ET_o) para perales maduros (Conference en membrillo) sembrados en un sistema de poda de guía principal y medidos utilizando un lisímetro ubicado en un huerto experimental en Lleida, EEL (España) por Girona *et al.* (sin publicar).

Fecha	Coeficiente de cultivo (K_c)	Cobertura vegetal (%)
1-15 de abril	0.30	23
16-30 de abril	0.48	30
1-15 de mayo	0.70	36
16-31 de mayo	0.80	39

1-15 de junio	0.85	40
16-30 de junio	0.90	40
1-15 de julio	0.90	40
16-31 de julio	0.90	40
1-15 de agosto	0.90	40
16-31 de agosto	0.70	40
1-15 de sept.	0.60	40
16-30 de sept.	0.50	40
1-15 de oct.	0.40	40
16-31 de oct.	0.35	36
1-15 de nov.	0.35	25

Cabe resaltar que los valores de K_c que se presentan en la Tabla 1 son únicamente indicativos, y es posible que se requiera realizar ajustes según el sistema específico de poda y las condiciones de crecimiento. De hecho, en el estudio con el lisímetro, (Girona *et al.,* 2010), el K_c mostró amplia variación con el paso de los años (véase la Figura 4), e incluso se presentaron variaciones dentro de la misma estación después del desarrollo completo del dosel. Parece ser que, al menos para la variedad Conference en un clima semiárido, el K_c del peral aumenta bajo altos déficits de presión de vapor de agua (Girona *et al.,* 2010), lo que sugiere que la transpiración (Tr) en los perales se incrementa relativamente más que la Tr de las gramíneas, el cual es el cultivo de referencia para la ET_o. Este efecto hace que el uso de una relación entre el K_c y la fracción de radiación interceptada al mediodía por el cultivo sea menos útil en el peral que en el durazno o melocotonero, o en el manzano (véanse las dos Secciones correspondientes). No obstante, el uso de la fracción de radiación interceptada por el cultivo al mediodía (o, si no están disponibles los datos de la radiación interceptada al mediodía, se puede utilizar el porcentaje de cobertura vegetal como sustituto; véase el Capítulo 4) brinda una primera aproximación para ajustar los valores de K_c para los perales.

FIGURA 4 Relaciones entre el porcentaje de radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada al mediodía y los coeficientes de cultivo diarios (K_c) para árboles de peras y manzanas, plantados en un lisímetro, desde el desborre de las yemas hasta la cosecha. Las relaciones entre el porcentaje de PAR interceptada y el K_c diario se ajustaron a ecuaciones exponenciales. Cada valor de K_c representa el K_c promedio calculado tres días antes y después de las mediciones de PAR *(Fuente: Girona et al., 2010).*



Un estudio del uso del agua del pera del ponal midió el consumo del agua de los árboles plantados en 12 lisímetros de drenaje medianos-grandes (9100 litros) y con la superficie del suelo cubierta con una malla reflectante (Chalmers *et al.,* 1992). Los árboles se podaron según el sistema Tatura de espaldera y la ET se determinó mediante evaporación de tanque. Este y otro estudio de peras asiáticas (Caspari *et al.,* 1993; y Caspari *et al.,* 1994), reportaron sus valores de K_c según el área de follaje por árbol en lugar del área del terreno y por tanto, no se puede comparar con los valores de K_c estándar. No obstante, la conclusión de los estudios con peras asiáticas es que sus requerimientos hídricos son ligeramente más bajos que los valores recomendados en el Estudio FAO: *Riego y Denaje Nº. 56* para este cultivo.

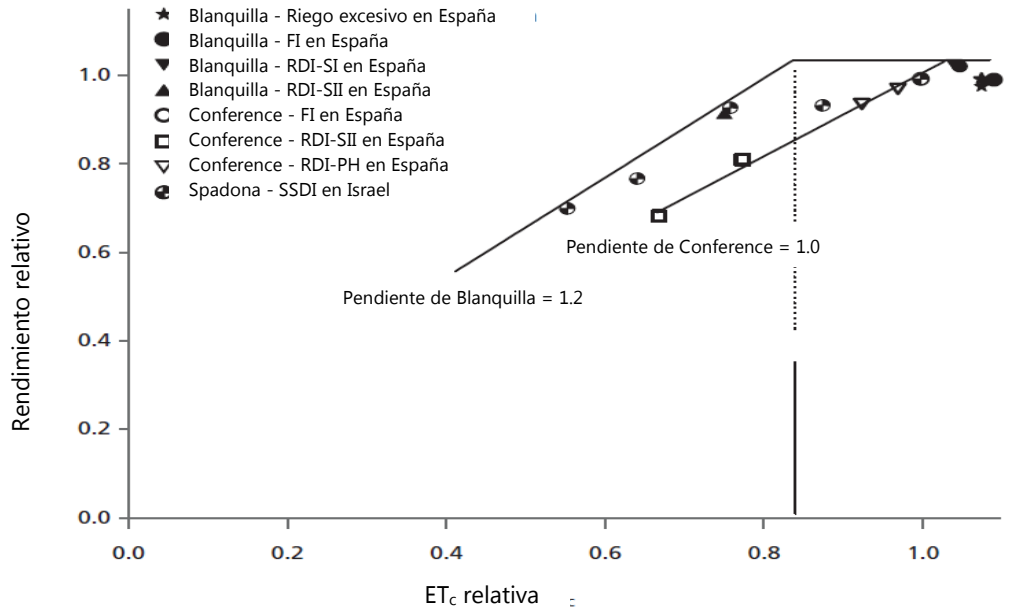
Un riesgo inherente del cálculo de los requerimientos hídricos del huerto es la sobreestimación del riego. En el caso de los perales, el riego excesivo puede tener una incidencia considerablemente negativa en la floración durante las estaciones posteriores (Marsal *et al.,* 2002a). Para evitar este impacto negativo, la determinación precisa de los requerimientos hídricos del cultivo es esencial en el a de riego de los perales. Una estrategia útil podría ser aplicar un programa de riego deficitario leve y super vonocer isar el nivel de estrés con mediciones del suelo o de la planta.

FUNCIONES DE PRODUCCIÓN DEL AGUA

Las funciones de productividad del agua se derivaron de cuatro estudios: Dos de ellos para las variedades Blanquilla y Spadona (Spadona y Blanquilla son denominaciones correspondientes a la misma variedad, pero se utilizan en Italia y España, respectivamente); (Naor et *al.,* 2000; y Marsal et *al.,* 2002a), y los otros dos estudios en la variedad Conference; esta última involucra el riego deficitario postcosecha (Marsal *et al.,* 2008; y Marsal *et al.,* 2010). En estos cuatro estudios se consideró que: i) se conocían la ET_o y la precipitación efectiva, ii) la ET_c se estimó a partir de la variación en el contenido de humedad del suelo y el agua aplicada, y iii) los efectos del riego en el rendimiento fueron considerados durante dos años consecutivos. La Figura 5 muestra la relación entre el rendimiento relativo de fruto y la ET_c relativa. El rendimiento relativo no se ve afectado por déficits de ET_c de 15-20 %, y luego disminuye de manera más o menos lineal a medida que se incrementa la severidad de los déficits de ET_c.

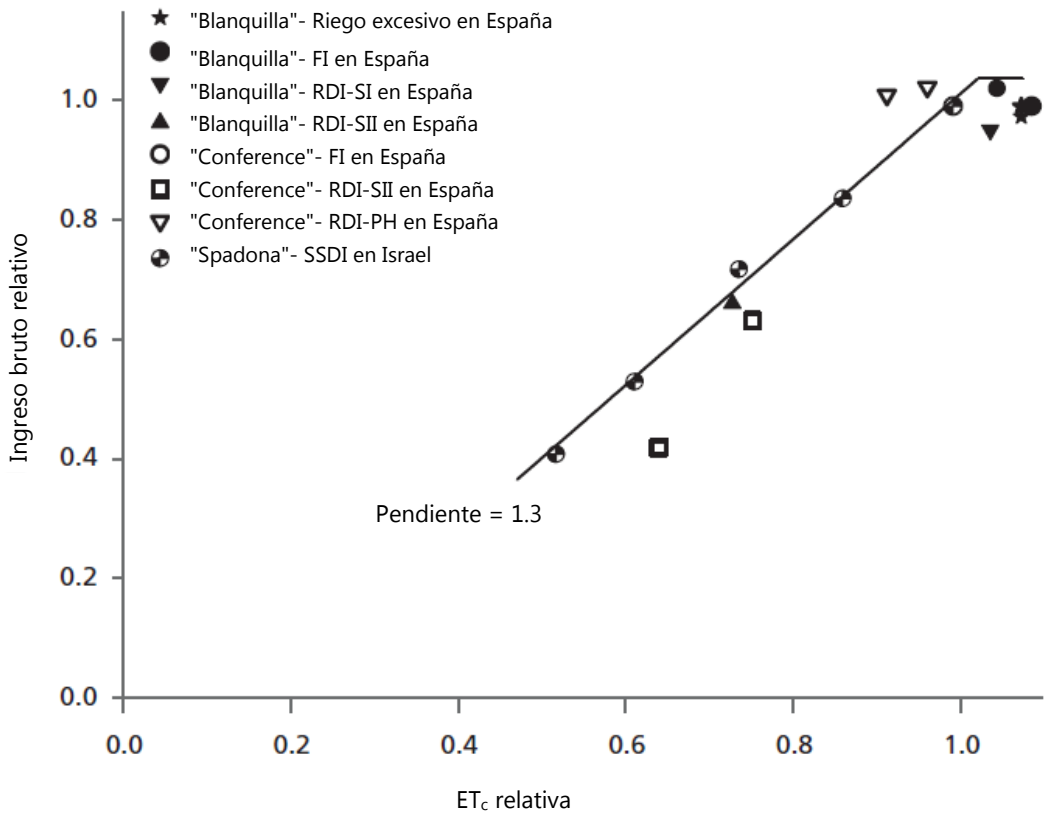
La Figura 6 muestra la función de productividad del agua, teniendo en cuenta el ingreso bruto relativo en lugar del rendimiento como parámetro de producción. El ingreso bruto relativo penaliza el fruto con bulbos de diámetros inferiores a 65 mm. Las condiciones imperantes en el mercado son muy diferentes entre estas dos variedades, dado que las peras Conference comúnmente reciben un mejor precio que las peras Blanquilla. Los precios pueden cambiar de país a país. Para efectos de una comparación justa entre variedades y para evitar la especificidad de los efectos del mercado de cada país en los ingresos brutos, los criterios de fijación de precios de la pera Conference en España fueron aplicados a todos los experimentos reportados.

FIGURA 5 Función de producción desarrollada para estrategias de RDI que impusieron estrés durante las Etapas I y II. Los puntos se obtuvieron a partir de datos de estudios de dos años de duración, como mínimo. Tres estudios de España y uno de Israel se utilizaron para la relación (Fuente: Marsal *et al.,* 2002a en Blanquilla; Marsal *et al.,* 2008 en Conference; Marsal *et al.,* sin publicar en Conference; y Naor *et al.,* 2000 en Spadona). Las marcas limítrofes lineales consideran el ajuste de variedades por separado a través de regresión lineal, a partir de las observaciones que definen un límite superior. FI, RDI-SI, RDI-SII, RDI-PH y SSDI significan riego completo, RDI durante la Etapa I del crecimiento de fruto, RDI durante la etapa II del crecimiento del fruto, RDI durante el período de postcosecha, y Riego deficitario sostenido estacional, respectivamente.



Los datos en la Figura 5 sugieren que hay diferencias entre las variedades con respecto a la respuesta a los déficits de ET_c, donde la variedad Conference es más sensible que la variedad Blanquilla (o Spadona). Una reducción del 30 % en la ET_c ocasionó una reducción de sólo el 12 % del rendimiento en Blanquilla-Spadona, pero una disminución del 22 % en Conference. No obstante, la sensibilidad del rendimiento de la variedad a los déficits de ET_c fue similar una vez que mostraron una respuesta a la disminución de la ET_c relativa; su sensibilidad permaneció similar con una pendiente de respuesta del rendimiento a la ET_c de 1.2 y 1.0 para Blanquilla y Conference, respectivamente (Figura 5).

FIGURA 6 Función de ingreso relativo desarrollada para estrategias de RDI que impusieron estrés durante las Etapas I y II. Puntos de datos se obtuvieron a partir de estudios de dos años de duración, como mínimo. Tres estudios de España y uno de Israel se utilizaron para la relación (Fuente: Marsal et al., 2002a en Blanquilla; Marsal et al., 2008 en Conference; Marsal et al., sin publicar en Conference; y Naor et al., 2000 en Spadona). Las marcas limítrofes lineales no consideraron diferencias en la respuesta de la variedad, y el ajuste se realiza a través de regresión lineal, a partir de las observaciones que definen un límite superior. Obsérvese la mayor sensibilidad a los déficits de ET en términos de ingresos que en términos de rendimiento. FI, RDI-SI, RDI-SII, RDI-PH y SSDI significan riego completo, RDI durante la Etapa I de crecimiento del fruto, RDI durante la etapa II de crecimiento del fruto, RDI durante el período de postcosecha, y Riego deficitario sostenido estacional, respectivamente.



Una explicación de las diferencias entre variedades con respecto al umbral de respuesta del rendimiento a la reducción de ET_c puede estar relacionada con una compleja interacción entre tres factores: i) el efecto positivo del estrés hídrico moderado en el aumento de la floración de retorno

en la siguiente estación, ii) el uso limitado del aclareo de fruto como práctica comercial para el peral, y iii) la posible respuesta del cuajado del fruto al estrés hídrico en la estación previa. En otras palabras, los cambios en la floración de retorno como consecuencia de las reducciones incipientes de ET_c en la estación anterior pueden redundar en un cultivo de mayor productividad en la siguiente estación, siempre que el cuajado del fruto no se vea afectado. Bajo estas circunstancias, los incrementos en la carga de producción conducen a la producción de frutos más pequeños, pero la disminución del tamaño del fruto en la cosecha es a menudo más que compensada por el impacto positivo de la mayor cantidad de frutos en el rendimiento. Es interesante observar que este fue el caso en Blanquilla para RDI-SII en España y también para las reducciones leves de riego en el experimento de Spadona en Israel (Figura 3). Sin embargo, no se presentó esta situación en la variedad Conference, porque el RDI-SII, además de aumentar el retorno de la floración, también redujo el cuajado de frutos en la siguiente estación, de modo que se redujo la competencia entre los frutos. La especificidad de la respuesta del rendimiento de la variedad a los déficits de ET se explicaría por la diferencia en la sensibilidad del cuajado de frutos a la densidad de floración actual y al historial pasado de estrés hídrico. Por otro lado, la ventaja en la respuesta del rendimiento observada en Blanquilla se perdió cuando se analizó en términos del ingreso relativo (Figura 6). Esto obedeció a la sanción en el precio relacionada con la producción de frutos más pequeños bajo déficit con condiciones de alta producción (Figura 6). Por tanto, solo una línea limítrofe se aproximó a las respuestas de ingresos de Conference y Blanquilla, la cual correspondía a las condiciones de riego deficitario aplicadas durante el período de crecimiento del fruto (Figura 6).

En el caso del riego deficitario postcosecha para Conference, se encontró que los ingresos relativos aumentaron por encima de la línea limítrofe (Figura 6). Curiosamente, el déficit hídrico postcosecha produjo reducciones del rendimiento que estuvieron acompañadas por reducciones en el cuajado del fruto asociadas con el aumento del tamaño del fruto. Por consiguiente, el fruto postcosecha de RDI recibió un precio más alto y el ingreso bruto relativo no se redujo por las leves reducciones de ET_c alcanzadas en el experimento arriba mencionado (Figuras 5 y 6). Sin embargo, bajo un estrés más significativo durante la Etapa II, el cual ocasionó una reducción del 30 % en la ET_c, la disminución en el ingreso bruto de la variedad Conference alcanzó el 60 % (Figura 6), una respuesta que es considerablemente más negativa que lo que se pudo predecir a partir de la relación rendimiento-ET_c (Figura 5).

REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

La consistencia de los resultados en los diferentes experimentos de RDI sugiere que esta técnica puede utilizarse de manera segura para la producción de peras. Sin embargo, el gran número de posibles combinaciones en las condiciones del peral (variedad x portainjerto x densidad de plantación x carga de frutos x tipo de suelo x clima) ofrece un amplio espectro de posibilidades que no se ha investigado plenamente en relación con el RDI. No obstante, no cabe duda de que, en climas con baja precipitación durante la estación cálida, debe evitarse la reducción del riego durante la Etapa II para garantizar el máximo tamaño del fruto en la cosecha (Figura 6). También se debe evitar el estrés hídrico al inicio de la estación en la mayoría de los casos, salvo en huertos de alta densidad que se cultivan bajo condiciones vigorosas. El período en el que el RDI se podría aplicar para ahorrar agua es después de la cosecha, siempre que no alcance el exceso de estrés hídrico. El riesgo de aplicar demasiado estrés hídrico durante postcosecha depende de cada situación específica. Los riesgos aumentan cuando las condiciones de crecimiento no son óptimas. Las malas condiciones climáticas pueden afectar la polinización y el cuajo de futo; y la caída de los frutos puede ocurrir especialmente al final de la primavera. Se ha planteado la hipótesis de que el estrés hídrico postcosecha reduce las reservas invernales del árbol (no hay datos disponibles sobre el proal)| y, en consecuencia, limita la cuaja y el rendimiento en la siguiente estación.

Los datos disponibles sobre las respuestas al RDI hacen difícil proponer una estrategia que se

pueda aplicar a todas las combinaciones posibles de prácticas de manejo. No obstante, el período postcosecha es el más seguro para aplicar el RDI, pero el ahorro de agua puede ser poco si se utiliza una variedad de madurez tardía. Por lo tanto, si los recortes de agua tienen que ser más severos, el RDI se podría aplicar en combinación con otros períodos. La Tabla 2 presenta varias estrategias de RDI para diferentes asignaciones de agua que se simulan en condiciones experimentales y ambientales específicas (Marsal *et al.,* 2008; y Marsal *et al.,* 2010). El déficit hídrico en la Etapa I (RDI-SI) solamente permite una reducción del 6 % del agua anual aplicada. Al utilizar el RDI en la Etapa II (RDI-SII), se puede ahorrar el 33 % del agua aplicada, pero esto ocasiona una reducción de los ingresos brutos de los productores (Tabla 2). Un enfoque más prudente sería utilizar una combinación de riego deficitario durante la Etapa I y postcosecha, en combinación con una ligera reducción durante la primera parte de la Etapa II del crecimiento del fruto (Tabla 2). La última estrategia reduciría el uso anual del agua en un 33 % (de 600 mm a 400 mm) y probablemente tendría un impacto menos negativo en el crecimiento del fruto que una estrategia de RDI-SII.

TABLA 2 Estrategias de RDI sugeridas para diferentes escenarios de suministro de agua disponible, de 600 a 400 mm cuando la ET_c potencial es 600 mm. Los datos meteorológicos corresponden al valle del Ebro en el noreste de España y los K_c corresponden a los presentados en la Tabla 1.

Fecha	ET_c potencial (mm)	Requerimientos hídricos (mm)	RDI-SI (560 mm)		RDI-SII (400 mm)		RDI-Postcosecha (460 mm)		RDI-Combinado (400 mm)	
			Tasa de riego (%)	(mm)	Tasa de riego (%)	(mm)	Tasa de riego (%)	(mm)	Tasa de riego (%)	(mm)
15-30 de marzo	9	10	100	10	100	10	100	10	100	10
1-15 de abril	13	14	100	14	100	14	100	14	100	14
16-30 de abril	15	10	100	10	100	10	100	10	100	10
1-15 de mayo	28	17	40	7	100	17	100	17	40	7
16-31 de mayo	37	28	40	11	100	28	100	28	40	11
1-15 de junio	56	62	100	62	50	31	100	62	80	49
16-30 de junio	71	79	100	79	50	39	100	79	80	63
1-15 de julio	72	74	100	74	50	37	100	74	80	59
16-31 de julio	77	84	100	84	50	42	100	84	100	84
1-15 de agosto	67	73	100	73	50	37	100	73	100	73
16-31 de agosto	65	71	100	71	100	71	10	7	10	7
1-15 de sept.	36	39	100	39	100	39	10	4	10	4
16-30 de sept.	27	30	100	30	100	30	10	3	10	3
1-15 de oct.	16	1	100	1	100	1	10	0	10	0
16-31 de oct.	9	0	100	0	100	0	10	0	10	0
1-15 de nov.	5	0	100	0	100	0	10	0	10	0
Total	602	591	-	564	-	405	-	464	-	395

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO: Riego y drenaje, N.º 56.* Roma, FAO.

Asin, L., Alegre, S. y Montserrat, R. 2007. Effect of paclobutrazol, prohexadione-Ca, deficit irrigation, summer pruning and root pruning on shoot growth, yield, and return bloom, in a 'Blanquilla' pear orchard. *Scientia Horticulturae,* 113:142-148.

Bain, J.M. 1961. Some morphological, anatomical, and physiological changes in the pear fruit *(Pyrus communis* var. Williams Bon Chretien) during development and following harvest. *Australian Journal Botany,* 9(2):99-123.

Behboudian, M.H., Lawes, G.S. y Griffiths, K.M. 1994. The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (Pyrus serotina Rehd). *Scientia Horticulturae,* 60:89-99.

Buwalda, J.G. y Lenz, E. 1995. Water use by European pear trees growing in drainage lysimeters. *Journal of Horticultural Science,* 70:531-540.

Caspari, H.W., Behboudian, M.H., Chalmers, D.J. y Renquist, A.R. 1993. Pattern of seasonal water use of asian pears determined by lysimeters and the heat pulse technique. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 118(5):562-569.

Caspari, H.W., Behboudian, M.H. y Chalmers, D.J. 1994. Water use, growth and fruit yield of 'Hossui' asian pear under deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 119:383-388.

Caspari, H.W., Behboudian, M.H. y Chalmers, D.J. 1994. Water use, growth and fruit yield of 'Hossui' asian pear under deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 119:383-388.

Chalmers, D.J., Andrews, P.K., Harris, K.M., Cameron, E.A., y Caspari, H.W. 1992. Performance of drainage lysimeters for the evaluation of water use by Asian pears. *Horticultural Science,* 27: 263-265.

Elkins, R.B., Van den End, B. y Beutel, J. 2007. Vegetative growth and development. En: Mitcham, E.J. y Elkins, R.B., eds. *Pear Production and Handling Manual.* University of California Agriculture and Natural Resources, Publicación 3483. 199 págs.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Forshey, C.G. y Elfving, D.C., 1989. The relationship between vegetative growth and fruiting in apple trees. *Horticultural Reviews,* 11:229-288.

Girona, J., del Campo, J., Mata, M., López, G. y Marsal, J. 2010. A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters. *Irrigation Science.* DOI de publicación en línea 10.1007/s00271-010-02175-5.

Marsal, J. y Girona, J. 1997. Effects of water stress cycles on turgor maintenance process in pear leaves *(Pyrus communis* L.). *Tree Physiology,* 17:327-333.

Marsal, J., Rapoport, H.F., Manrique, T. y Girona, J. 2000. Pear fruit growth under regulated deficit irrigation in container-grown trees. *Scientia Horticulturae,* 85: 243-259.

Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J. y Girona, J. 2002a. Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response. *European Journal of Agronomy,* 17: 111-122.

Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J. y J. Girona. 2002b. Water stress limits for vegetative and reproductive growth of 'Barlett' pears. *Acta Hortaculturae,* 596:659-663.

Marsal, J., Arbones, A., Mata, M., del Campo, J., Girona, J. y López, G. 2008. Factors involved in alleviating water stress by partial crop removal in pear trees. *Tree Physiology,* 28:1375-1382.

Marsal, J., Behboudian, M.H., Mata, M., del Campo, J., Basile, B., Girona, J. y López, G. 2010. Fruit thinning in 'Conference' pear grown under deficit irrigation to optimize yield and to improve tree water status. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology,* 85:125-130.

Mitchell, P.D., Van Den Ende, B., Jerie, P.H. y Chalmers, D.J. 1989. Responses of 'Barlett' pear irrigation to witholding irrigation, regulated deficit irrigation and tree spacing. *Journal of the American Society for Horticultural Science,*109:604-606.

Naor, A., Péres, M., Greenblat, Y., Doron, Y., Gal, Y. y Stern, R.A. 2000. Irrigation and crop load interactions in relation to pear yield and fruit-size distribution. *Horticultural Science & Biotechnology,* 75:555-561.

Naor A., 2001. Irrigation and crop load influence fruit size and water relations in field-grown 'Spadona' pear. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 126:252-255.

Naor, A., Stern, R., Flaishman, M., Gal, Y. y Péres, M. 2006. Effects of postharvest water stress on autumnal bloom and subsequent-season productivity in midseason 'Spadona' pear. *Horticultural Science & Biotechnology,* 81:365-370.

O'Connell, M. y Goodwin, I. 2007. Water stress and reduced fruit size in micro-irrigated pear trees under deficit partial rootzone drying. *Australian Journal of Agricultural Research,* 58:670-679.

Durazno o melocotonero

AUTORES PRINCIPALES
Joan Girona
(IRTA, Lleida, España),
Elías Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)

AUTORES COLABORADORES
Jordi Marsal
(IRTA, Lleida, España),
David A. Goldhame
(anteriormente Universidad de California, Davis, EE. UU.; en la actualidad emérito de Extensión Cooperativa),
Amos Naor
(GRI, Universidad de Haifa, y Migal; Centro de Tecnología de Galilea, Israel),
M. Auxiliadora Soriano (Universidad de Córdoba, Córdoba, España)

Durazno o melocotonero

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

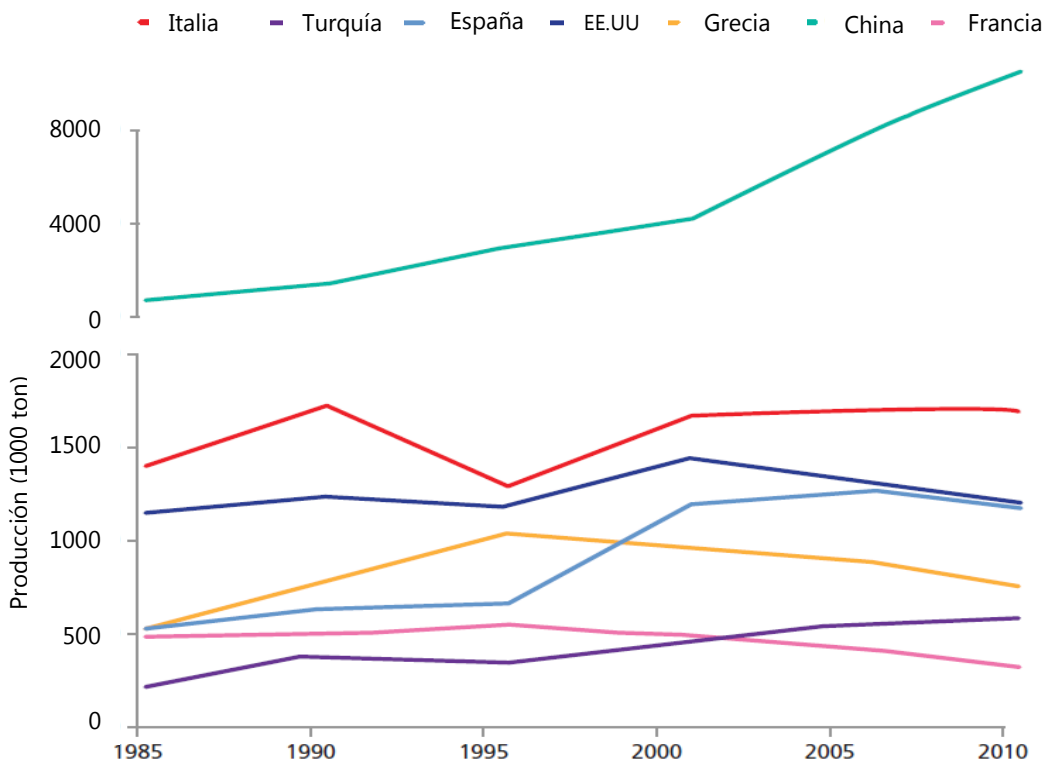
El durazno o melocotonero *(Prunus Persica L.),* era originario de China, pero en la antigua Grecia y Roma se creyó que provenía de Persia. Es un árbol de fruto de hueso de una amplia diversidad en cuanto a tipos de frutos: freestone o cling; de forma redonda o plana ; de piel peluda o suave; carne firme o suave y blanca o amarilla. De igual manera, el durazno o melocotonero tiene un rango amplio de fechas de madurez, desde muy tempranas en donde el fruto madura a finales de la primavera, hasta muy tardías en donde alcanza la madurez al final del verano, hasta cuatro meses después de la llegada al mercado de las primeras variedades. El árbol es vigoroso y puede alcanzar más de 5 m de altura, pero la producción de durazno o melocotón está limitada a nivel mundial debido a su rango relativamente estrecho de adaptación climática. Por una parte, florece tempranamente y es muy sensible a las heladas, especialmente durante la floración; pero por otra, tiene unos requerimientos de cantidad mínima de horas de frío que no se cumplen en algunas de las áreas libres de heladas de las zonas templadas y subtropicales.

La Figura 1 muestra la evolución de la producción de durazno o melocotón en algunos países en los últimos diez años. En 2009 había más de 1.5 millones de hectáreas de durazno o melocotonero y nectarina a nivel mundial, con un rendimiento promedio de 13.0 ton/ha (FAO, 2011). El principal país productor es China, que representa el 50 % de la producción mundial de durazno o melocotón. La producción de China aumentó espectacularmente en las últimas décadas de 380 000 toneladas en 1970 y un rendimiento promedio de 3.6 ton/ha a más de 10 millones de toneladas en 2009, con un rendimiento promedio de 14.4 ton/ha, seguida por Italia (FAO, 2011). Hay otras áreas importantes de producción comercial que están ubicadas en el sur de Europa (España, Grecia y Francia), Estados Unidos (California, Georgia), Chile y Australia. Los mayores rendimientos se obtienen en los Estados Unidos, con casi 20 ton/ha.

El fruto generalmente se consume fresco y se cultiva principalmente bajo riego incluso en muchas zonas subhúmedas, porque los consumidores en muchos lugares del mundo prefieren el fruto de gran tamaño. Allí, el rol más importante del riego es estabilizar la producción en años de precipitaciones inferiores a lo normal, y garantizar una humedad del suelo adecuada durante el período crítico de alargamiento del fruto, justo antes de la cosecha. El riego es esencial para la producción comercial en las zonas más áridas, donde las precipitaciones son sólo una fracción de la ET_c, ya que el período de crecimiento del fruto puede abarcar todo el verano en las variedades de maduración tardía. La mayoría de los sistemas de producción de durazno o melocotonero son muy intensivos, con huertos plantados en altas densidades (de 400 a 1000 árboles/ha); las mayores densidades son normalmente para la producción de duraznos o melocotones utilizados en

la industria (enlatado y procesamiento de alimentos). Se utiliza una amplia variedad de sistemas de poda, diseñados para maximizar la distribución de la radiación solar a todas las partes del árbol, con el fin de lograr un buen color del fruto, y para promover las ramas fructíferas en toda la copa del árbol. A veces se utilizan espalderas con los árboles en forma de un plano horizontal o de V. En plantaciones muy intensivas, se busca un vigor menor en el árbol para reducir el sombreado mutuo y los costes de cosecha. En el pasado se cultivaron algunas variedades de árboles enanos, pero tuvieron poco éxito comercial.

FIGURA 1 Tendencias en la producción de durazno o melocotón en los principales países (FAO, 2011).



Calidad del fruto

Hay muchos factores que determinan la calidad del durazno o melocotón, y algunos de ellos tienen una influencia significativa en el valor de la producción, particularmente el tamaño del fruto. Los duraznos o melocotones son valorados por su tamaño en el mercado de frutos frescos y los de gran tamaño alcanzan precios superiores en muchos mercados. El tamaño del fruto depende de la cantidad de árboles frutales y se ve afectado por factores ambientales tales como los déficits hídricos. El color y la ausencia de defectos visuales son también aspectos importantes de calidad; el color está determinado por la exposición a la luz durante el crecimiento del fruto, que a su vez depende de la configuración del árbol, el grado de crecimiento vegetativo y la posición del fruto en el árbol. Otros factores de calidad son la firmeza, concentraciones de sólidos solubles totales (TSS), azúcares solubles, acidez titulable (TA), proporción entre azúcares y ácidos, compuestos aromáticos volátiles, madurez acelerada y mejor capacidad de almacenamiento (tiempo de conservación). Todos estos parámetros responden a variaciones en el suministro de agua del árbol que afectan su estado hídrico.

DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE DESARROLLO EN RELACIÓN CON LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

Crecimiento vegetativo y reproductivo

Al igual que en otras frutas de hueso, inmediatamente después de la floración del durazno o melocotonero sigue un crecimiento vegetativo a comienzos de la primavera. Los requerimientos de cantidad mínima de horas frío del durazno o melocotonero, calculados por lo general durante la latencia en términos de horas por encima de 7 °C, varían ampliamente entre variedades, aunque en algunas pueden ser significativos. Durante el período de desarrollo de la copa, el cuajado del fruto y el crecimiento inicial del fruto tendrán lugar al mismo tiempo. La Figura 2a muestra los patrones de crecimiento del fruto para tres variedades que difieren en maduración y la tasa relativa de crecimiento vegetativo de la variedad de maduración tardía. Aunque las variedades de maduración temprana florecen antes, el crecimiento inicial del fruto es muy similar en los tres tipos. En la variedad temprana, dicho crecimiento inicial es directamente seguido por una fase de rápido crecimiento del fruto (Figura 2a) que termina con su maduración. En las otras variedades hay una desaceleración en la tasa de crecimiento del fruto, coincidiendo con la aceleración del crecimiento vegetativo (Figura 2a). El crecimiento vegetativo, medido como la longitud estacional del brote o el aumento en el diámetro del tronco, tiene tendencias similares para las diferentes variedades. Se produce primero la extensión de los brotes primarios, seguida por el crecimiento de los brotes secundarios. En las variedades tempranas hay dos picos de crecimiento rápido de extensión; el segundo ocurre después de la cosecha de los frutos. Normalmente hay sólo un pico de rápido crecimiento de los brotes en las variedades de maduración media y tardía, pero puede haber otro después de la cosecha en algunas variedades y ambientes. En algún momento de la estación, se ralentiza el crecimiento de los brotes y empieza un período con una tasa rápida de expansión de frutos (Figura 2b). Esta última fase de crecimiento del fruto se extiende hasta que el fruto madura antes de la cosecha, y cuanto más tiempo dure este período, mayor es la acumulación de materia seca en el fruto y más grande es el tamaño potencial del fruto final (Figuras 2a y 2b).

Son poco comunes los déficits hídricos que afectten a las primeras etapas del crecimiento del fruto y de la copa, debido a que la emergencia de las yemas ocurre generalmente con un perfil de suelo completamente cargado. Cuando se producen, se reducirá el área foliar del árbol y el tamaño del fruto final, debido a que el crecimiento inicial se produce principalmente en la etapa de división celular que determina el número final de células que tendrá un fruto. Mientras que los brotes florales son bastante resistentes a las temperaturas de congelamiento por encima de -7 a -10 °C durante la latencia, las flores y frutos recién formados son muy sensibles a las heladas leves, con temperaturas mínimas por debajo de -2 a -3 °C. Por lo tanto, los duraznos o melocotoneros son muy sensibles a las heladas de primavera que pueden acabar completamente con la producción de frutos.

FIGURA 2a Evolución del peso fresco del fruto de variedades de durazno o melocotonero de maduración precoz (A), media (B) y tardía (C). Etapas I, II, y III de crecimiento del fruto y variedades de durazno o melocotonero de maduración postcosecha (PH). Se muestran las etapas I, II, y III de crecimiento del fruto y postcosecha (PH) de una variedad media cultivada en el hemisferio norte.

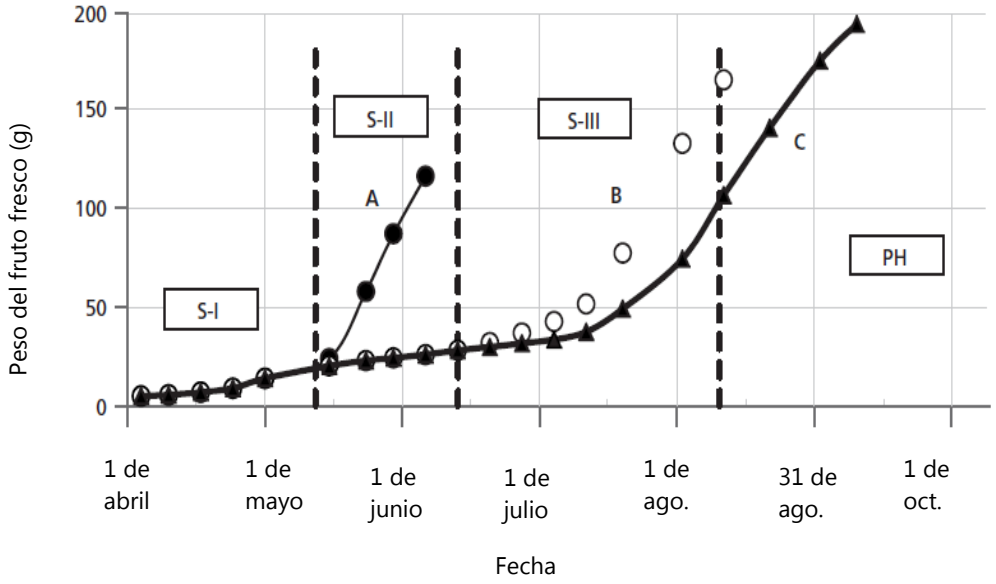
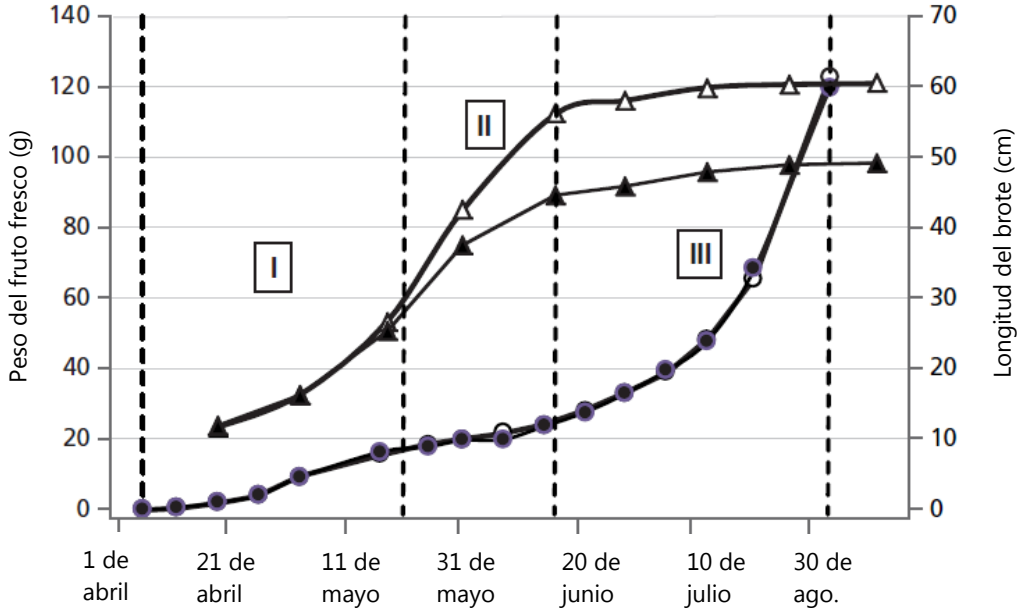


FIGURA 2b Evolución del crecimiento (brote) vegetativo (triángulos) y del crecimiento del fruto (círculos) en árboles de durazno o melocotón bajo RDI (símbolos cerrados) y bajo un control de riego completo (símbolos abiertos) en Lleida, España.

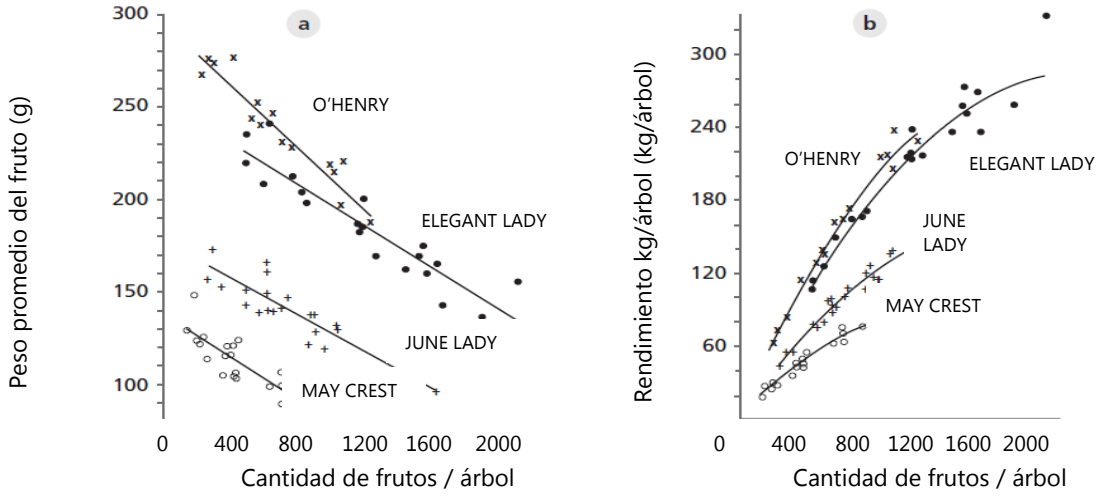


Etapas del crecimiento del fruto

Como se analizó anteriormente, el crecimiento del durazno o melocotón, medido por el incremento en el volumen o peso seco del fruto, sigue una curva doble sigmoide. En la Figura 2 se puede observar que hay aparentemente tres etapas de crecimiento del fruto, aunque es difícil detectar más de dos a partir de las mediciones periódicas del volumen del fruto en las variedades tempranas. La primera etapa, definida como Etapa I, inicia poco después de la polinización y es un periodo de división celular activa que termina cerca del endurecimiento de la pepita, cuando el fruto ha alcanzado aproximadamente 20 a 25 por % de su tamaño final. El crecimiento del fruto disminuye en la segunda etapa y esto coincide con un período de extensión activa de brotes y desarrollo foliar (Figura 2b). La duración de esta segunda fase (Etapa II) varía; es difícilmente detectable en las variedades tempranas, mientras que en variedades muy tardías puede durar más de 40 días. Después de la Etapa II, se reanuda el crecimiento del fruto a un ritmo muy elevado en lo que se denomina Etapa III, y se comporta más o menos de forma exponencial hasta la cosecha (Figura 2b). La acumulación de materia seca en el fruto se retrasa en relación con su agrandamiento, aunque también sigue un patrón doble sigmoide –menos marcado que en la acumulación de peso fresco– que es más evidente en variedades tardías, pero difícilmente detectable en las variedades medias y tempranas. La duración de la Etapa II es la diferencia más relevante entre variedades que difieren en la duración de la estación, desde la maduración temprana a la tardía (Figura 2a).

La carga de frutos es el principal determinante del tamaño final del fruto (cantidad de frutos por árbol), pero hay factores que también son importantes, como el tamaño del árbol, configuración de la copa y la poda, así como el estado hídrico y de nutrientes. La relación entre el tamaño final del fruto y la carga de frutos depende de la variedad, como se muestra en la Figura 3 (Johnson y Handley, 1989) en donde se observan estas relaciones en diferentes variedades tempranas y de mediados de estación. El tamaño final del fruto (Figura 3a) y el rendimiento total por árbol (Figura 3b) dependen de la carga de frutos. El tamaño del fruto aumenta a medida que disminuye la carga de frutos (Figura 3a), mientras que el rendimiento final aumenta con el aumento de la carga de frutos (Figura 3b). Se debe elegir la cantidad total de frutos por árbol que se dejan después del aclareo para cada variedad, en función de los precios de mercado, a fin de optimizar las ganancias al obtener un rendimiento máximo con una carga mínima de frutos. El tamaño final del fruto depende también del momento del aclareo manual. Un raleo manual temprano reduce la competencia entre frutos y permite un fruto más grande.

FIGURA 3 (a): relación entre el peso promedio del fruto y la cantidad de frutos por árbol, en cuatro variedades de durazno o melocotonero.
(b): relación entre el rendimiento por árbol y la cantidad de frutos por árbol, en cuatro variedades de durazno o melocotonero (Johnson y Handley, 1989).



Desarrollo de la yema

La yema terminal del durazno o melocotonero en el extremo de un brote siempre es vegetativa y produce un brote frondoso. La yemas auxiliares se desarrollan durante el verano en la base de las hojas sobre los brotes de la estación actual y pueden ser yemas foliares o florales. Las yemas florales producen una única flor que puede cuajar un fruto. Cada nodo en un brote vegetativo puede tener desde cero hasta tres yemas. Los brotes que generan crecimiento vegetativo son pequeños y en punta, mientras que las yemas florales son más grandes, más redondas y más peludas. Muchos de los nudos en los dos tercios inferiores de un brote tienen dos o tres yemas dispuestas una al lado de la otra. Con frecuencia, un brote foliar está rodeado por yemas florales. La cantidad y distribución de las yemas florales en un brote varía con el vigor del árbol, la variedad, y la radiación ambiental que recibe el brote. Por lo general, los brotes cortos tienen la mayoría de los brotes frutctíferos por unidad de longitud. Los brotes moderadamente vigorosos tienen una alta proporción de nudos con dos brotes florales. Los brotes foliares en la mayoría de los nudos se convierten en brotes laterales, que pueden ser fructíferos en años posteriores. Una cantidad de yemas auxiliares produce brotes secundarios en los brotes muy vigorosos de la estación actual, los cuales no son deseables porque no se desarrollan yemas frutales en muchos de sus nudos. Los brotes ideales (entre 30 y 50 cm de largo) tienen un crecimiento suficiente para producir suficientes brotes fructíferos para la siguiente estación, pero no tienen brotes secundarios.

El período postcosecha es importante para los árboles de durazno o melocotnero, ya que es durante este período que brotan las yemas florares de la próxima estación (por lo general alrededor de agosto) y que estas yemas se diferencian claramente de las yemas vegetativas, en la medida que empiezan a desarrollar órganos florales (Handley y Johnson, 2000). Otra característica importante del período entre la cosecha y la caída de las hojas es la acumulación de reservas de carbohidratos, necesarias para los procesos de desarrollo continuo de las yemas hasta la floración. Es también importante porque el cuajado del fruto depende en gran medida de la disponibilidad de carbohidratos (Arbeloa y Herrero, 1991). El calor y el estrés hídrico durante la postcosecha promueven la formación de frutos anormales (Naor *et al.,* 2005).

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

Las relaciones hídricas del durazno o melocotonero han sido estudiadas con más detalle que en la mayoría de las otras especies caducifolias de árboles frutales. Como sucede en la mayoría de las plantas, el crecimiento vegetativo es extremadamente sensible a los déficits hídricos y varios estudios han mostrado que el crecimiento expansivo de las hojas y brotes jóvenes se ralentiza debido a déficits hídricos leves que son difíciles de detectar.

Los árboles de durazno o melocotón se cultivan en su mayor parte para producir frutos frescos; en ellos es importante el tamaño y algunas características de calidad. Sin embargo, si bien se paga un buen precio por un fruto grande en la mayoría de los mercados (o existe una reducción en el precio para los tamaños pequeños), otras características de calidad –además del tamaño– por lo general no influyen en los ingresos de los prouctores, aunque muchos consumidores conocen bien las diferencias importantes en cuanto a calidad entre y dentro de las variedades de durazno o melocotón y nectarina.

El tamaño final del fruto depende directamente de la cantidad de células y el tamaño medio de las células del mesocarpio. La cantidad de células se determina principalmente durante la Etapa I, y varios experimentos (algunos en árboles cultivados en contenedores) han demostrado que este es un periodo muy sensible a los déficits hídricos en términos de rendimiento e ingresos finales. Un estudio de campo (Girona *et al.,* 2004) con estrés leve a moderado en la Etapa I demostró que las altas cargas de frutos afectan al contenido de materia seca del fruto, pero que el peso del fruto fresco podría recuperarse si se tiene un suministro de agua adecuado durante las Etapas II y III. No obstante, los riesgos de inducción de niveles dañinos de estrés en la Etapa I son bajos debido a que el perfil inicial del suelo está generalmente lleno, la demanda evaporativa es baja y no se ha completado el proceso de desarrollo de la copa (y por lo tanto el coeficiente de cultivo, K_c, es inferior al máximo que se logrará cuando el crecimiento de la copa esté cerca de terminar). Por lo tanto, la transpiración del durazno o melocotonero (Tr) es relativamente baja en este momento, lo que también coincide con las lluvias estacionales de primavera en muchas regiones cultivadoras de durazno o melocotón. Por esto, no es difícil evitar los déficits hídricos en la Etapa I, incluso inadvertidamente. No obstante, en suelos poco profundos, en ambientes muy secos o en los años de sequía en los que el perfil del suelo es seco, es posible inducir niveles significativos de estrés hídrico que tendrán un impacto negativo en el tamaño del fruto y rendimiento (Girona *et al.,* 2004).

La tasa de crecimiento vegetativo se acelera y el crecimiento del fruto se ralentiza a medida que el fruto continúa creciendo y la pepita empieza a endurecerse, al inicio de la Etapa II. La duración de esta fase varía de unos pocos días en variedades tempranas (y por lo tanto es casi imposible de detectar) a alrededor de 60 días en las variedades muy tardías. Los déficits hídricos durante la Etapa II afectan principalmente a la expansión de los brotes laterales y el crecimiento del tronco, mientras que el impacto sobre el crecimiento del fruto es mínimo o nulo. La Figura 2b muestra el impacto del déficit hídrico en el crecimiento extensivo de los brotes y la influencia insignificante que tiene en el crecimiento y tamaño final del fruto (Girona *et al.,* 2003). Esta sensibilidad diferencial entre el crecimiento vegetativo y del fruto sirvió de base para la aplicación exitosa del estrés hídrico en la Etapa II, en duraznos o melocotones, descrita por primera vez por Mitchell y Chalmers *(1982*). Desde entonces, estos autores y varios otros han descubierto que la Etapa II no es sensible a los déficits hídricos en términos de un impacto negativo sobre el rendimiento. Se ha demostrado (Girona *et al.,* 2003) que déficits hídricos significativos aplicados durante la Etapa II pueden inducir algún grado de deshidratación de los frutos, pero posterormente que su crecimiento se recupera por lo general de manera completa, después de que se alivia el estrés hídrico al inicio de la Etapa III; y que los déficits hídricos en la Etapa II no tienen ningún impacto sobre el rendimiento final.

A pesar de que existe un informe inicial que muestra (Chalmers *et al.,* 1981) un aumento en el tamaño del fruto –relativo al control con riego completo– ningún otro estudio publicado reportó

tales resultados al aplicar RDI en la Etapa II, con una excepción (Girona *et al.,* 2003) para una única estación en un estudio de tres años de duración, en el cual las bajas temperaturas durante el tiempo de floración dañaron muchos frutos y la carga final de frutos fue muy baja. Un análisis integral de los efectos de la carga de frutos en la respuesta al RDI en la Etapa II (Girona *et al.,* 2004) detectó frutos más grandes en el tratamiento de RDI, comparado con un control sin estrés solamente con cargas bajas de frutos, y a medida que aumentó la carga de frutos, no se detectaron efectos, y en algunos casos, se observó incluso una reducción en el tamaño del fruto. Supuestamente, el RDI en la Etapa II aumenta el crecimiento del fruto en relación a los controles sin estrés, dirigiendo más carbohidratos hacia el crecimiento del fruto; pero este fenómeno aparentemente ocurre únicamente con bajas cargas de frutos (Girona *et al.,* 2004). Existen informes de una menor caída de frutos antes de la cosecha bajo RDI (Girona *et al.,* 2003), lo que podría explicar las pocas observaciones en las que los déficits hídricos durante la Etapa II tuvieron efectos positivos sobre el rendimiento, en relación con los tratamientos de riego completo.

La expansión vigorosa del fruto tiene lugar durante la Etapa III, cuando la tasa de expansión del fruto es la más alta y sensible a los déficits hídricos. Durante este período, el contenido de agua del fruto es más sensible a los déficits hídricos que el peso seco del fruto. En una variedad media de durazno o melocotonero ocurrió una reducción del 25 % en el contenido de agua del fruto, con déficits hídricos, durante la Etapa III (Girona *et al.,* 2004). Los déficits hídricos que afectan la acumulación de materia seca del fruto deben ser muy severos, ya que no sólo deben reducir la fotosíntesis, sino también deben contrarrestar la tendencia de muchos árboles frutales, incluido el durazno o melocotonero, en la que la asignación de asimilados al fruto tiene mayor prioridad con respecto a su distribución hacia otras partes del árbol (DeJong *et al.,* 1987). La fotosíntesis foliar y la transpiración del árbol de durazno o melocotonero no son afectadas por los déficits hídricos hasta que se agota más del 50 % del agua disponible en la zona radicular (Girona *et al.,* 2002). Cuando ocurren déficits hídricos bajo estas condiciones, el pico de la Tr diaria se mueve desde la meseta estable entre el mediodía y las 14:00 horas hacia las horas de la mañana; y para el momento en que la Tr se redujo en 70 %, la tasa de Tr máxima ocurrió a las 9:00 a. m. (Girona *et al.,* 2002)

Se utilizan indicadores del estado hídrico del árbol de durazno o melocotón para cuantificar los niveles de estrés hídrico. Un estudio comparativo entre diferentes indicadores (Goldhamer *et al.,* 1999) encontró que los índices derivados de las mediciones micrométricas de las fluctuaciones del diámetro del tronco fueron las más sensibles en la detección de estrés hídrico, seguidas del potencial hídrico del tallo. Otros indicadores, como la conductancia estomática, fotosíntesis foliar y temperatura foliar fueron menos sensibles (Goldhamer *et al.,*1999).

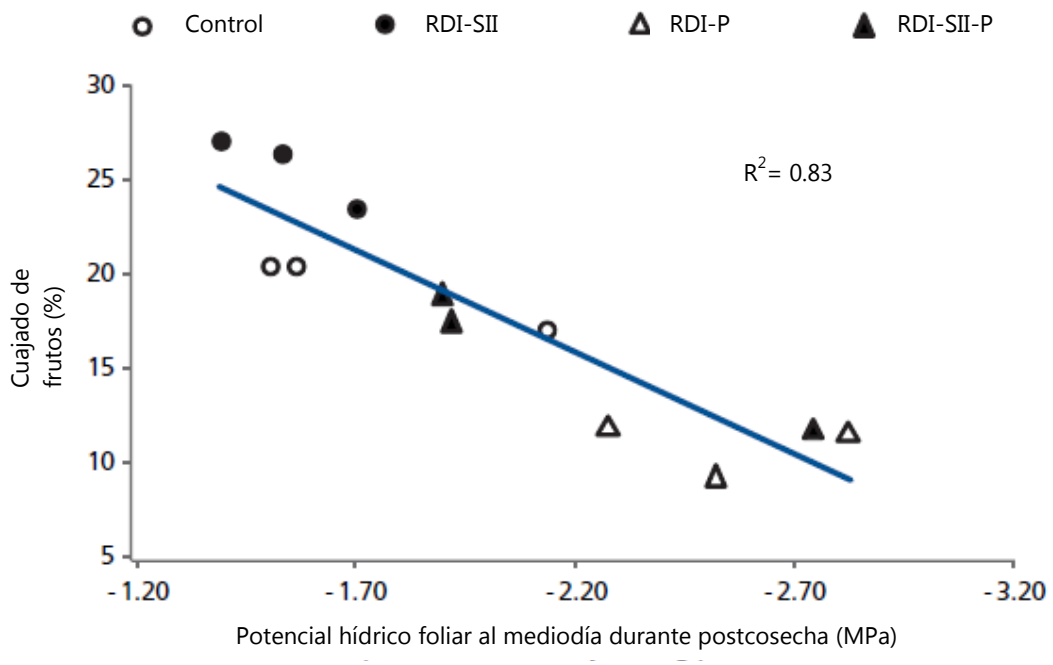
Los déficits hídricos pueden tener un impacto negativo en la apariencia del fruto en la siguiente estación. Se observó el aumento de la frecuencia de frutos dobles y suturas profundas en los árboles de durazno o melocotón con estrés hídrico (Johnson y Phene, 2008). Estos problemas se han superados al aliviar el estrés hídrico poco antes y durante la diferenciación del carpelo (Johnson *et al.,* 1992). En variedades de tempranas este periodo sensible al estrés se da en agosto y septiembre y requiere la prevención de los déficits hídricos durante estos meses (Johnson y Phene, 2008). En variedades de mediados de estación, el aumento en la incidencia de frutos dobles y con sutura profunda está altamente correlacionada con el potencial hídrico del tallo al mediodía en agosto del año anterior; es decir, durante las etapas iniciales del desarrollo de yemas florales (Naor *et al.,* 2005). Se observó un aumento considerable en la incidencia de frutos dobles cuando los potenciales hídricos del tallo al mediodía cayeron por debajo de -2.0 MPa, lo que sugiere que un potencial hídrico del tallo al mediodía de -2.0 MPa podría servir como umbral para el calendario de riego postcosecha (Naor *et al.,* 2005).

El estrés postcosecha también puede influir en el cuajado del fruto. En variedades tempranas (Johnson y Phene, 2008) y de media estación (Goodwin y Bruce, 2011), se encontró que el cuajado del fruto fue moderadamente sensible al grado de estrés hídrico durante el período de postcosecha

de la estación anterior. En variedades de finales de estación, el nivel de estrés hídrico postcosecha afectó al cuajado de los frutos en gran medida, como lo demuestra la fuerte correlación entre el potencial hídrico foliar promedio durante el período de postcosecha y el cuajado de los frutos (Girona *et al.,* 2004) (Figura 4). El impacto negativo de los déficits hídricos en el cuajado de los frutos del año siguiente puede no ser importante, ya que el raleo es una práctica común en el durazno o melocotonero; pero el aclareo no puede corregir los impactos severos sobre el cuajado del fruto (Goodwin y Bruce, 2011).

La aplicación de déficits hídricos moderados durante la Etapa II mejora la calidad del fruto (firmeza, color, mejor TSS) sin afectar al rendimiento (Gelly *et al.,* 2003 *y* Gelly *et al.,* 2004). Un estrés hídrico moderado en la Etapa III también mejora la calidad del fruto, pero es muy probable que haya un impacto negativo en el tamaño del fruto y rendimiento. Se deben resolver los conflictos entre calidad y tamaño, teniendo en cuenta el mercado en donde se venderá el producto.

FIGURA 4 Relación entre el cuajado de los frutos 2 meses después de la plena floración en 1996 y el potencial hídrico foliar a mediodía, experimentado bajo varios tratamientos de riego durante el año anterior, en postcosecha (Girona et al., 2004).

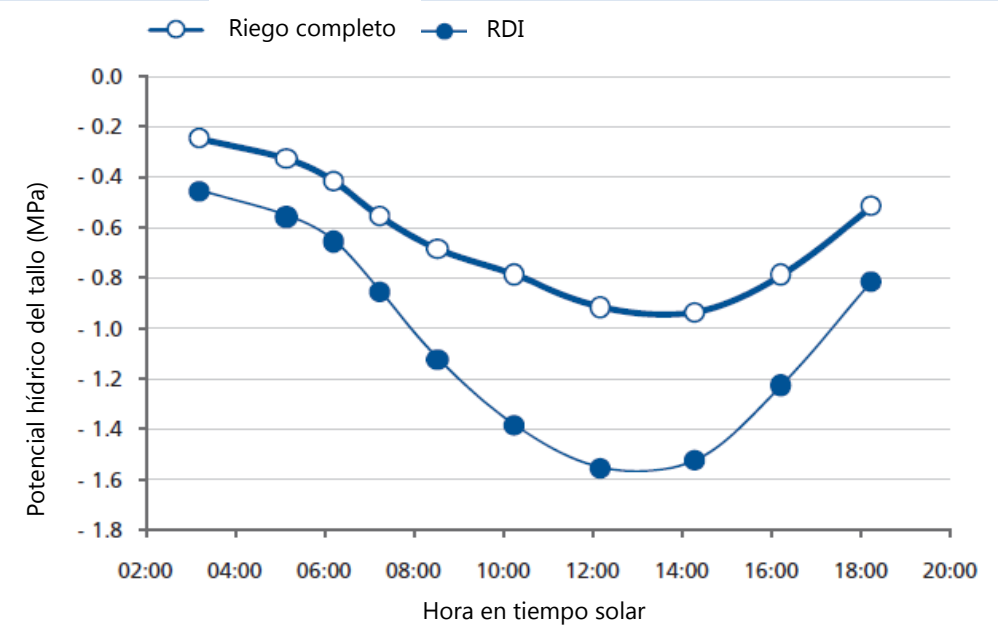


CUADRO Detección del estrés hídrico en el durazno o melocotonero.

Aunque el método establecido para detectar el estrés hídrico del árbol de durazno o melocotón es el potencial hídrico foliar o del tallo (Goldhamer *et al.,* 1999), se pueden utilizar indicadores visuales para estimar el potencial hídrico del tallo cuando no es posible tomar mediciones reales de SWP.

En la siguiente figura se muestran los patrones típicos del potencial hídrico del tallo en un día normal de verano.

FIGURA Patrones diurnos del potencial hídrico del tallo para riego completo (control) y RDI de durazno o melocotonero, Lleida, España. En ambos casos, los valores del potencial hídrico del tallo al mediodía son los más bajos y los valores antes del amanecer son los menos negativos, para árboles de durazno o melocotón con buen riego y RDI.



A simple vista es posible diferenciar una hoja que tiene un potencial hídrico de -0.9 MPa de una que tiene un valor de -1.9 MPa. La primera está totalmente expandida y generalmente orientada hacia el sol (Foto D), mientras que la segunda está parcialmente enrollada y cuelga (Foto A).

Para el régimen RDI óptimo que aplica estrés en la Etapa II, es una buena práctica llegar a valores SWP cercanos a -1.5 MPa al mediodía. A ese nivel de SWP, se pueden observar algunos síntomas de enrollamiento foliar, pero sin caída de hojas o amarillamiento, lo que indicaría un estrés hídrico excesivo. Por la mañana, los productores deben observar las hojas expandidas. Un síntoma de enrollamiento por estrés hídrico en la mañana indicará un estrés excesivo; mientras que la ausencia de síntomas al mediodía indicará la falta del nivel deseado de estrés durante la Etapa II.

FOTO Apariencia de las hojas del durazno o melocotonero bajo tres niveles diferentes del estado hídrico de la planta.

A: Estrés severo (potencial hídrico del tallo (SWP) = -1.9 MPa), **B:** Estrés muy leve (SWP = -0.9 MPa);

C: Estrés moderado (SWP = -1.1 MPa) ; **D:** Con buen riego (-0.8 MPa).

REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

Las tasas de uso del agua de los árboles de durazno o melocotón son similares a otras especies *Prunus*, como los nectarinos o ciruelos. La Tabla 1 enumera los coeficientes de cultivo de árboles maduros de durazno o melocotón y una estimación del uso del agua en Lleida, España. Los coeficientes de cultivo se obtuvieron a partir de estudios con lisímetros (Ayars *et al.,* 2003). En un estudio, se le hizo seguimiento a la ET_c de un árbol de durazno o melocotón en un lisímetro de pesada durante varios años, desde su plantación hasta que alcanzó la madurez. Este estudio ha proporcionado datos sobre la evolución de K_c en un huerto de duraznos o melocotoneros a medida que se expande el dosel (Ayars *et al.,* 2003) y los resultados se muestran en la Figura 5. Los estudios con lisímetro han demostrado que los valores pico de la Tr en duraznos o melocotoneros no se reducen mucho hasta poco antes de la caída de hojas, a menos de que los déficits hídricos impuestos por restricciones de riego en el período postcosecha induzcan el control estomático de la Tr y la senescencia prematura de las hojas.

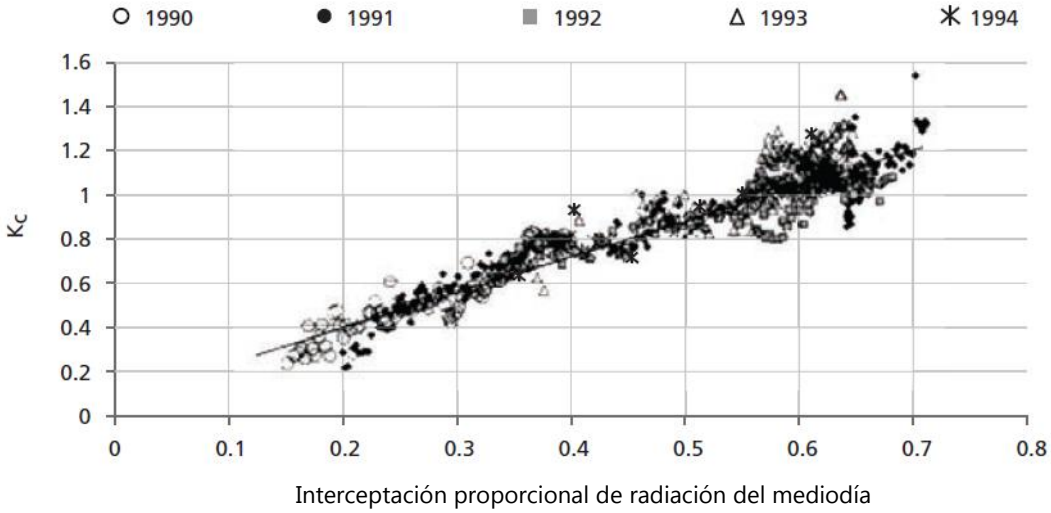
TABLA 1 Coeficientes de cultivo en relación con un cultivo de referencia de gramíneas (ET_o) para árboles maduros de durazno o melocotón (Etapas fenológicas para una variedad de mediados de estación en Lleida, España).

Fecha	Coeficiente de cultivo (K_c)	Etapa de crecimiento
1-15 de marzo	0.25	
16-31 de marzo	0.30	Floración
1-15 de abril	0.45	
16-30 de abril	0.60	
1-15 de mayo	0.70	
16-31 de mayo	0.80	Fin de FGS I *
1-15 de junio	0.90	
16-30 de junio	0.95	Inicio de FGS III *
1-15 de julio	1.05	
16-31 de julio	1.05	
1-15 de agosto	1.05	Cosecha
16-31 de agosto	1.00**	
1-15 de sept.	1.00**	
16-30 de sept.	1.00**	
1-15 de oct.	0.75	
16-31 de oct.	0.55	
1-15 de nov.	0.45	

* FGS = Etapa de crecimiento del fruto

** Las reducciones del manejo en riego postcosecha pueden disminuir estos valores de K_c.

FIGURA 5 Relación entre el coeficiente de cultivo (K_c) de árboles de durazno o melocotonero con riego por goteo, medido en un lisímetro de pesada en el centro de California, y la proporción de intercepción de radiación por parte de los árboles. La aproximación de la ecuación lineal para calcular K_c es: K_c = 0.082 +1.59 (PMLI) (Ayars *et al.,* 2003)



FUNCIONES DE PRODUCCIÓN DEL AGUA

La conclusión de una serie de experimentos realizados para cuantificar la relación entre el rendimiento y el riego aplicado fue que el agua aplicada se puede reducir en 10- 20 % por debajo del los requerimientos máximos, sin que haya un impacto negativo sobre el rendimiento. Sin embargo, los análisis rara vez incluyeron consideraciones sobre los ingresos, con relación al diferencial de precio que los frutos de durazno o melocotón de diferentes tamaños alcanzan en el mercado. La respuesta al agua aplicada depende de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y por lo tanto no se puede generalizar. La Figura 6 muestra la relación entre el rendimiento y la ET_c, en términos relativos para diferentes estrategias de riego, riego completo (Control), RDI y DI sostenido (SDI). Es posible reducir la ET_c un 15-20 % sin impactar perjudicialmente el rendimiento en el régimen RDI óptimo. Sin embargo, cuando se impusieron déficits hídricos en etapas sensibles o durante toda la estación (SDI), se presentó una reducción en la ET_c, acompañada de una reducción en el rendimiento (Figura 6). Las diferencias en las respuestas a los diversos regímenes de DI ilustran los beneficios del manejo del estrés en la planificación de los programas de riego deficitario.

REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

Con base en los resultados mostrados anteriormente, se puede concluir que las estrategias de RDI aplicadas durante la Etapa II en el durazno o melocotonero –especialmente cuando se puede conseguir una recuperación rápida al inicio de la Etapa III– han demostrado ser muy eficaces para controlar el crecimiento vegetativo excesivo y mejorar la calidad del fruto sin una penalización en el rendimiento. Un RDI que concentra los déficits hídricos en el período postcosecha es una estrategia efectiva en las variedades de tempranas, siempre y cuando se evite el estrés hídrico severo (Tablas 2

y 3). Dado el impacto que tienen diferentes capacidades de almacenamiento de agua en la zona radicular en la respuesta al RDI, las Tablas 2 y 3 presentan diferentes calendarios de RDI para dos tipos de suelos (superficial y profundo); también se dan indicaciones del potencial hídrico mínimo del tallo que los árboles pueden soportar sin que haya un efecto perjudicial en el rendimiento.

FIGURA 6 Relación entre el rendimiento relativo y la ET_c relativa del durazno o melocotones. La línea continua negra representa la función de producción bajo estrategias inefectivas de riego RDI y la línea negra punteada representa la posible función de producción bajo RDI efectivo (datos de Girona *et al.,* 2002; Girona *et al.,* 2005; Fereres, no publicado, y Rufat y Villar, no publicado).

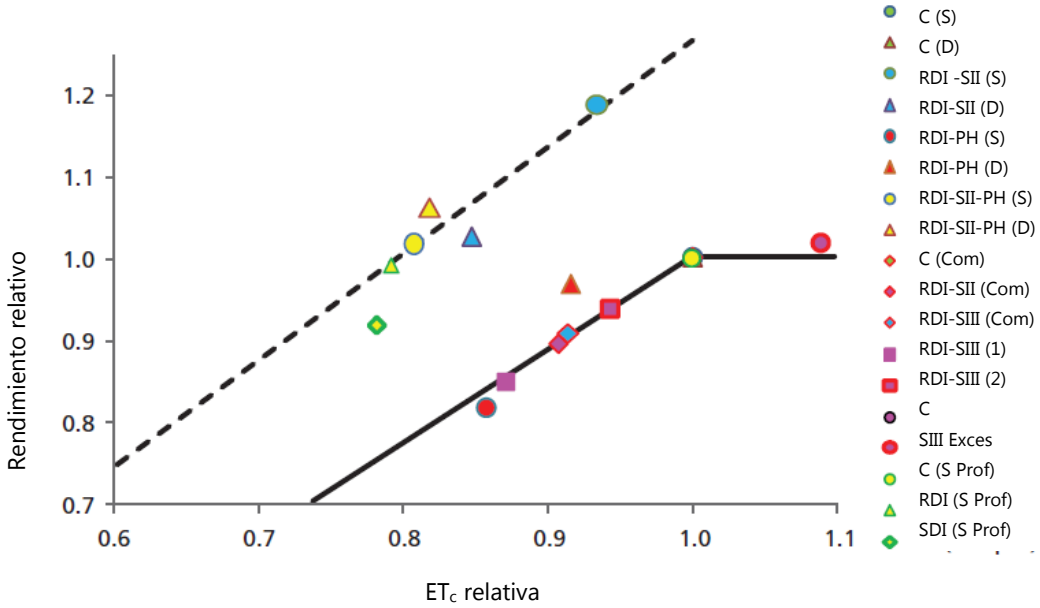


TABLA 2 Límites sugeridos de potencial hídrico del tallo al mediodía, en variedades tardías.

Etapa de crecimiento del fruto	Variedad tardías		
	% de ETc		Límites sugeridos del potencial hídrico del tallo al mediodía
	Suelos poco profundos (%)	Suelos profundos (%)	
I	100	100	-0.9 MPa
II	65	35	-1.8 MPa
III	100	100	-1.1 MPa
Ph	80	50	-1.8 MPa

TABLA 3 Límites sugeridos de potencial hídrico del tallo a mediodía para variedades de principios de estación (PH: etapa postcosecha).

Etapa de crecimiento del fruto	Variedad temprana		
	% de ET_c		Límites sugeridos del potencial hídrico del tallo al mediodía
	Suelos poco profundos (%)	Suelos profundos (%)	
I	100	100	-0.9 MPa
III	100	100	-1.0 MPa
Ph temprano	50	35	-1.8 MPa
Ph tardío	80	50	-1.2 MPa *

* Para evitar la pérdida de las cosechas del año próximo

La carga de frutos es un factor importante en la aplicación de estrategias de RDI y para manejar el grado de estrés hídrico de la planta, de acuerdo con la cantidad de frutos por árbol. Como se ha analizado previamente, la carga de frutos *per se* influye en gran medida en el tamaño final del fruto (Naor *et al.,* 1999). Si hay gran cantidad de frutos y el agua es limitada, existe el riesgo de inducir una reducción en el tamaño del fruto ante la imposición de un régimen RDI. En ese caso, sería mejor reducir la carga de frutos a través de un aclareo para lograr una distribución del tamaño del fruto de la producción, que económicamente le proporcione al cultivador la utilidad neta más alta. Si la carga de frutos es baja, el RDI puede incluso aumentar el tamaño del fruto por encima del riego completo y disminuirá el crecimiento vegetativo y los costes de poda en verano. En la mayoría de los casos, el RDI óptimo que reduce la ET_c en 15-20 % no tendría un impacto negativo sobre el rendimiento con cargas medianas de fruto.

BIBLIOGRAFÍA

Arbeloa, A. y Herrero, M. 1991. Development of the ovular structures in peach *(Prunus persica* (L.) Batsch). *New Phytologist* 118: 527-534.

Ayars, J.E., Johnson, R.S., Phene, C.J., Trout, T.J., Clark, D.A. y Mead, R.M. 2003. Water use by drip-irrigated late-season peaches. *Irrigation Science* 22:187-194.

Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. y Van Heek, L. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 106:307-312.

DeJong, T.M., Doyle, J.F., y Day, K.R. 1987. Seasonal patterns of reproductive and vegetative sink activity in early and late maturing peach *(Prunus persica)* cultivars. *Physiologia Plantarum* 71:83-88.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Gelly, M., Recasens, I., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Girona, J. y Marsal, J. 2003. Effects of water deficit during stage Ⅱ of peach fruit development and postharvest on fruit quality and ethylene production. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 78:324-330.

Gelly, M., Recasens, I., Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J. y Marsal, J. 2004. Effects of stage Ⅱ and postharvest deficit irrigation peach quality during maturation and after cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84:561-568.

Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Goldhamer, D.A. y Cohen, M. 2002. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach tres under water deficits. *Agricultural Water Management* 54:107-122.

Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Alegre, S., Rufat, J. y Marsal, J. 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 128:432-440.

Girona, J., Marsal, J., Mata, J., Arbones, J. y DeJong, T.M. 2004. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 79:308-315.

Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J. y Marsal, J. 2005. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agricultural Water Management* 72:97-108.

Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J. y Cohen, M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 124:437-444.

Goodwin, I. y Bruce, R. 2011. Postharvest deficit irrigation decreases subsequent fruit number in T204 peach. *Acta Horticulturae* 889: 205-212.

Handley, D.F. y Johnson, R.S. 2000. Late summer irrigation of water-stressed peach trees reduces fruit doubles and deep sutures. *Horticultural Science,* 35(4):771.

Johnson, R.S. y Handley, D.F. 1989. Thinning response of early, mid-, and late-season peaches. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 114(6):5-12.

Johnson, R.S., Handley, D.F. y DeJong, T.M. 1992. Long-term response of early maturing peach trees to postharvest water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 117(6): 881-886.

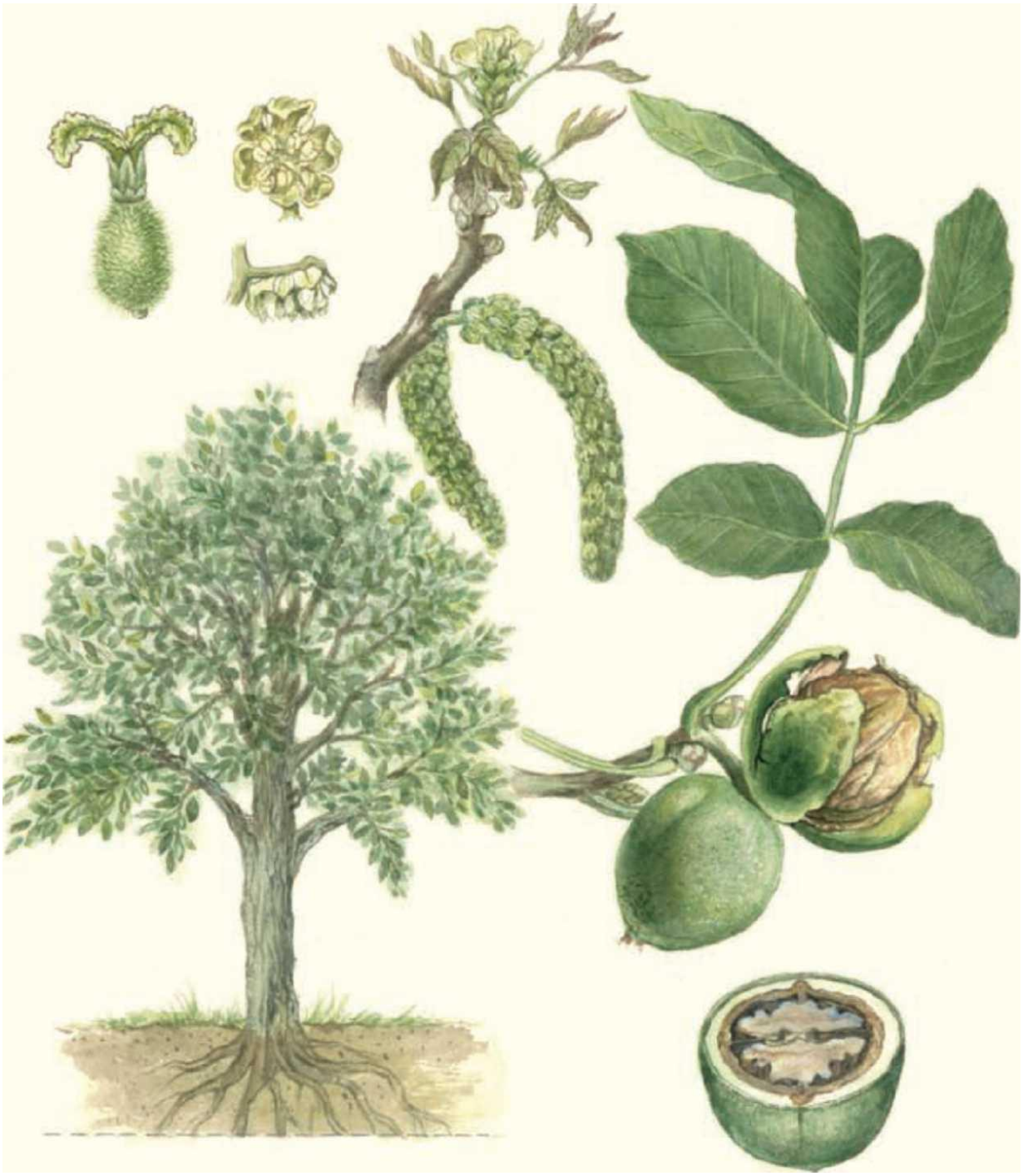
Johnson, R.S. y Handley, D.F. 2000. Using water stress to control vegetative growth and productivity of temperate fruit trees. *Horticultural Science,* 35(6):1048-1050.

Johnson, R.S. y Phene, B.C. 2008. Fruit quality disorders in an early maturing peach cultivar caused by postharvest water stress. *Acta Horticulturae* 792:385-390.

Mitchell, P.D. y Chalmers, D.J. 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 107:853-856.

Naor, A., Klein, I., Hupert, H., Grinblat, Y., Peres M. y Kaufman, A. 1999. Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution, and water potentials. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 124:189-193.

Naor, A., Stern R., Peres M., Greenblat Y., Gal, Y. y Flaishman, M.A. 2005. Timing and severity of postharvest water stress affect following-year productivity and fruit quality of field-grown Snow Queen nectarine. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 130: 806-812.



Nogal

AUTOR PRINCIPAL
David A. Goldhamer
(anteriormente Universidad de California, Davis, EE. UU.; en la actualidad, Profesor emérito de Extensión Cooperativa)

Nogal

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

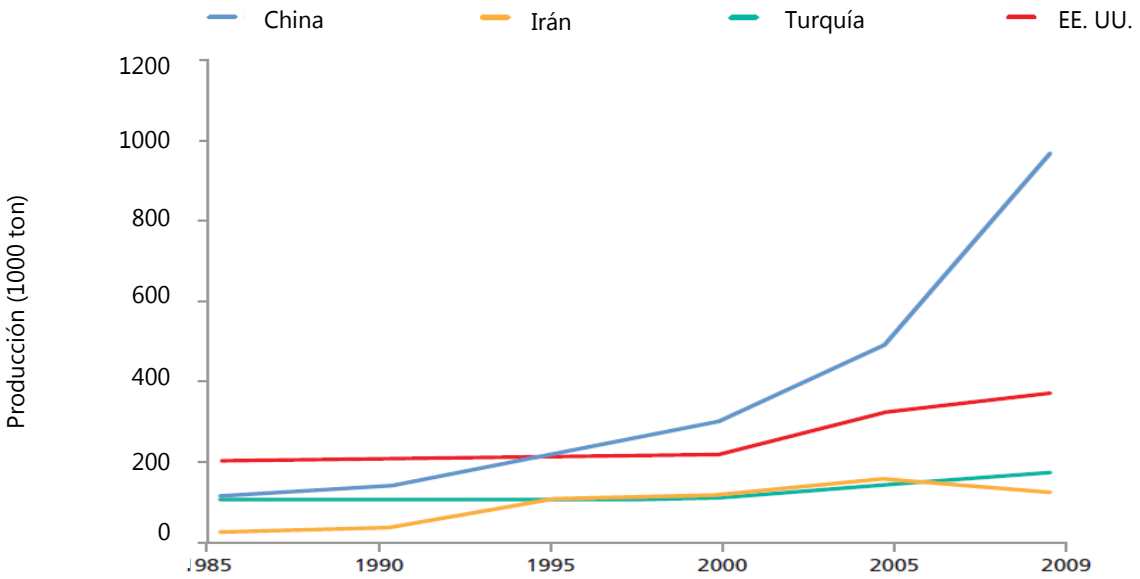
Los nogales (*Juglans regia* L.) son árboles grandes que se cultivan en climas templados por sus nueces, ricas en aceite, y por su madera. Las plantaciones están relativamente espaciadas, ya que esta especie no tolera bien el sombreado mutuo. El espaciamiento común de las variedades vigorosas varía entre 8 x 8 y 10 x 10 m, mientras que se pueden plantar las variedades menos vigorosas con 7 x 7 m de separación. Los experimentos que han aumentado la densidad de los árboles por encima de la separación mencionada han dado como resultado rendimientos más altos durante los primeros años del huerto, pero a expensas de una longevidad reducida del huerto. En 2009, la superficie mundial de cultivo fue de 843 000 ha y el rendimiento promedio mundial (con cáscara) fue de 2.7 ton/ha (FAO, 2011). La Figura 1 presenta las tendencias de producción de los principales países productores. China y Estados Unidos son los dos principales productores mundiales, seguidos por Irán, Turquía y Ucrania. Francia es el principal productor europeo y Chile es hoy un productor importante en el hemisferio sur.

DESARROLLO VEGETATIVO Y REPRODUCTIVO

Las variedades comerciales de nogales rompen la latencia y comienzan su desarrollo foliar entre mediados de marzo y mediados de abril en el hemisferio norte, dependiendo de las condiciones ambientales y de la variedad. Posteriormente viene la floración, con la emergencia de flores masculinas productoras de polen y flores femeninas que se convierten en la nuez después de la polinización. La floración se completa normalmente a finales de abril y la sigue un rápido crecimiento expansivo del fruto, con un rápido crecimiento concomitante de brotes. La formación de yemas se produce desde que empieza el desarrollo foliar a través de junio en los árboles maduros. A principios de junio, el fruto ha alcanzado su tamaño máximo, e inmediatamente continúa el desarrollo interno de la nuez. En este momento se ralentiza el crecimiento de los brotes. La secuencia de desarrollo interno de la nuez comienza con la expansión y el endurecimiento de la cáscara, y la acumulación de materia seca en la semilla, que continúa hasta la cosecha. El indicador de madurez fisiológica es el desarrollo del "tejido de empaque marrón", que se produce antes de la división de la corteza. Este se puede identificar rompiendo y abriendo las nueces y observando el color del tejido que rodea la semilla dentro de la cáscara. Si este tejido es blanco, las nueces no han alcanzado la madurez y es probable que la acumulación de materia seca continúe en la semilla. Un color marrón indica que las nueces han madurado y el desarrollo de la semilla ha cesado. La división de la corteza transcurre generalmente poco después de que las nueces han

alcanzado la madurez fisiológica. Después de la división, las cortezas se descomponen rápidamente. Durante el período de postcosecha, el crecimiento de algunos brotes y el almacenamiento de carbohidratos son los principales sumideros de nutrientes de los productos de la fotosíntesis.

FIGURA 1 Tendencias de la producción de nueces en los países principales (FAO, 2011).



EFECTOS DE LOS DÉFICITS HÍDRICOS

El estrés hídrico puede disminuir el tamaño y la calidad de la nuez (color y secado de la semilla). Las reducciones en el crecimiento de los brotes relacionadas con el estrés pueden reducir la madera fructífera de la(s) siguiente(s) estación (estaciones). Hay alguna evidencia de que no solamente se reduce la cantidad de yemas reproductivas debido al menor crecimiento vegetativo, sino que algunos brotes florales no son viables, lo que resulta en una menor cantidad de flores y en resumen menos frutos. Además, la reducción del crecimiento del brote causa mayores temperaturas del fruto como resultado de una mayor penetración de la luz solar en la copa y por tanto, radiación solar más directa sobre un porcentaje mayor de los frutos y temperaturas más altas de la copa debido a una menor transpiración, lo que puede oscurecer el color de la semilla, reduciendo el valor de la producción. Este efecto de la temperatura depende mucho de la variedad.

Ya que la carga de nueces depende en gran medida del crecimiento de los brotes del año anterior, el impacto de los déficits hídricos es mucho más severo en la estación posterior a la imposición de los déficits hídricos. El principal impacto en el año en que se impone el estrés se da en el tamaño y calidad del fruto, mientras que en la estación siguiente, el impacto se da sobre la carga de frutos, independientemente del régimen de riego utilizado en la siguiente estación. Un estudio en California encontró que las nueces hedgerow (variedad Chico) bajo riego con ET_c del 33 y 66 % sufrieron reducciones comerciales en el rendimiento de 32 y 50 % respectivamente, después de tres años, a causa de un tamaño reducido de la nuez, una menor carga de frutos y menor calidad de la producción (Goldhamer, 1997). El crecimiento y el intercambio de gases del árbol se recuperaron inmediatamente cuando estos árboles regresaron a riego completo, aunque se registraron cambios

leves en los rendimientos durante el primer año de recuperación, incluso aunque el crecimiento de brotes aumentó dramáticamente. No fue sino hasta el segundo año de recuperación que se recuperaron completamente los rendimientos, como resultado de las posiciones de fructificación creadas por el crecimiento de brotes del primer año de recuperación. Otros estudios han obtenido impactos del estrés y resultados de recuperación similares en California (variedad Chandler) (Lampinen *et al.,* 2004). La rápida recuperación de la producción ante un estrés hídrico severo fue posible debido a la ausencia de enfermedades inducidas por el estrés o por insectos. En estos estudios no se evidenciaron enfermedades como el cancro profundo de la corteza, que ocurren a menudo en huertos con estrés hídrico.

USO DEL AGUA

Los huertos de nogales tienen altos índices de uso del agua debido a una gran área foliar, alta estatura de árbol, y una cobertura vegetal casi completa cuando los árboles son plenamente maduros. La Tabla 1 presenta los coeficientes de cultivo de huertos maduros de nogales, obtenidos a partir de estudios en California (Goldhamer, 1997).

TABLA 1 Coeficientes de cultivo de nogales maduros (Goldhamer, 1997).

Fecha	Coeficiente de cultivo (K_c)
16-31 de marzo	0.12
1-15 de abril	0.53
16-30 de abril	0.68
1-15 de mayo	0.79
16-31 de mayo	0.86
1-15 de junio	0.93
16-30 de junio	1.00
1-15 de julio	1.14
16-31 de julio	1.14
1-15 de agosto	1.14
16-31 de agosto	1.14
1-15 de sept.	1.08
16-30 de sept.	0.97
1-15 de oct.	0.88
16-31 de oct.	0.51
1-15 de nov.	0.28

ESTRATEGIAS DE RIEGO DEFICITARIO

La estrategia general seguida experimentalmente para reducir el riego de los huertos de nogales ha sido limitar los déficits hídricos durante las primeras etapas de desarrollo de los árboles y del cultivo, a favor de imponerlos a mediados y finales de la estación. Un estudio en el norte de California utilizó el potencial hídrico del tallo al mediodía para imponer los tratamientos de estrés "bajo" y "moderado". Los valores objetivo del potencial hídrico del tallo al mediodía fueron -0.5 a -0.7 MPa y -1.2 a -1.4 MPa durante la mayor parte de la estación para estos dos regímenes, con las correspondientes reducciones en el agua aplicada del 30 y 50 % de la ET_c potencial, respectivamente (Fulton *et al.,* 2002). Cabe señalar que los valores del potencial hídrico de nogales con riego completo son mucho menos negativos que los dos cultivos principales de nogal, almendros y pistachos. Los valores del potencial hídrico foliar antes de la madrugada, para nogales con riego completo, oscilan entre -0.15 y -0.2 MPa; y el potencial hídrico del tallo al mediodía entre -0.40 y -0.60 MPa. Después de tres estaciones, los rendimientos en estos tratamientos de estrés habían disminuido en un 26 y 40 %, respectivamente, en comparación con los árboles con riego completo (Lampinen *et al.,* 2004). La recuperación completa se logró después de dos años de riego completo. Se llevó a cabo un estudio complementario en suelos más profundos con árboles más viejos y una densidad de árboles más baja. Las reducciones del rendimiento fueron apreciablemente más bajas en este sitio, lo que se atribuyó a un desarrollo relativamente lento del estrés debido a un mayor depósito de humedad del suelo y posiblemente a las reservas más grandes de carbohidratos de los árboles más grandes.

Para simular una sequía de un año con un suministro de agua de 400 mm –en donde la ET_c potencial fue 1100 mm– un equipo en California le aplicó el 85 % de la ET_c hasta abril, a árboles de la variedad Chico y después porcentajes de ET_c cada vez más bajos, conforme avanzó la estación (el 25 % fue el mínimo desde inicios de julio hasta la cosecha temprana de principios de septiembre) sin riego postcosecha (Goldhamer *et al.,* 1989). Los rendimientos de fruto en el año de sequía fueron un 10 % más bajos que en el control con riego completo (no tiene significancia estadística). Sin embargo, durante el siguiente año de recuperación, cuando se aplicó riego completo a todos los árboles, los árboles del año de sequía tuvieron rendimientos 80 % inferiores aproximadamente casi en su totalidad, como resultado de una menor carga de frutos. Los rendimientos retornaron a niveles casi completos durante el segundo año de recuperación (Goldhamer *et al.,* 1990).

Parece que los nogales no responden bien a los déficits hídricos, en términos de rendimiento de nueces, independientemente de la estrategia de riego deficitario. Esto ocurre probablemente debido a la alta sensibilidad del crecimiento de los brotes a los déficits hídricos y a su vez, a la fuerte dependencia de la carga de frutos en el crecimiento de los brotes de los nogales durante el año anterior.

BIBLIOGRAFÍA

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

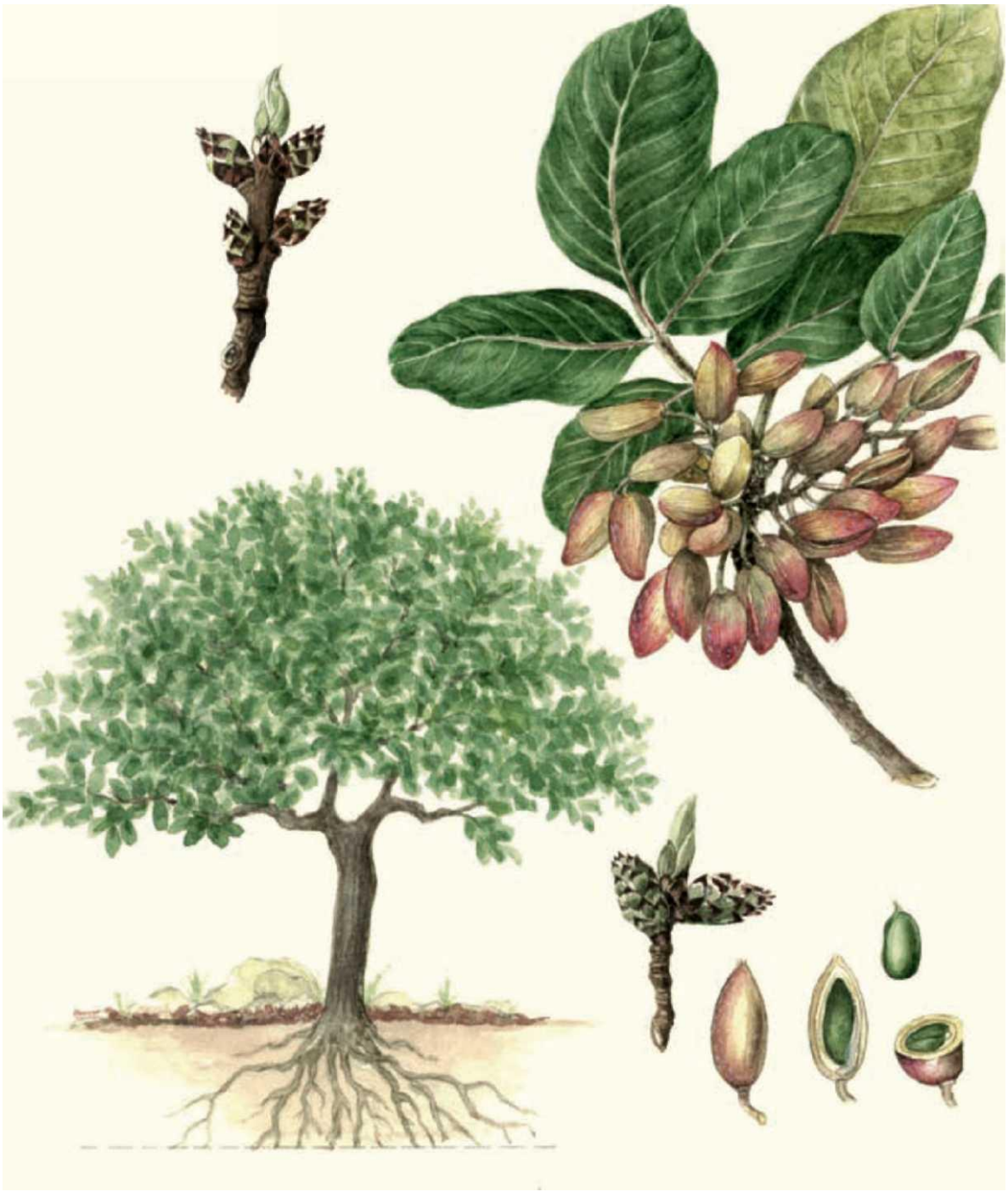
Fulton, A., Buchner, R., Little, C., Gilles, C., Grant, J., Lampinen, B., Schackel, K., Schwankl, L., Prichard, T. y Rivers, D. 2002. *Relationships between midday stem-water potential, soil moisture measurements, and walnut shoot growth.* En: *Walnut Research Reports.* Sacramento, California, EE. UU., Walnut Marketing Board, págs. 135-143.

Goldhamer, D.A., Beede, R., Sibbett, S., Fereres, E., DeJong, T.M., Ramos, D., Katayama, D., Doyle, J. y Day, K. 1989. *First year effects of controlled deficit irrigation on walnut tree performance.* En: *Walnut Research Reports.* Sacramento, California, EE. UU., Walnut Marketing Board, págs. 91-100.

Goldhamer, D. A., Beede, R., Sibbett, S., Ramos, D. y Van Brocklin, F. 1990. *First year recovery following a simulated drought in walnut.* En: *Walnut Research Reports.* Sacramento, California, EE. UU., Walnut Marketing Board, págs. 66-72.

Goldhamer, D. A. 1997. Irrigation scheduling for walnut orchards. En: *Walnut Orchard Management.* D. E. Ramos, ed., Publicación de la Universidad de California N.º 3373, Oakland, California, págs. 159-166; pág. 328.

Lampinen, B., Buchner, R., Fulton, A., Frant, J., Mills, N., Prichard, T., Schwankl, L., Shackel, K., Gilles, C., Little, C., Metcalf, S., Rivers, D. y Gamble, V. 2004. *Irrigation management in walnut using evapotranspiration, soil and plant based data.* En: *Walnut Research Reports.* Sacramento, California, EE. UU., Walnut Marketing Board, págs. 113-136.



Pistacho

AUTOR PRINCIPAL
David A. Goldhamer (anteriormente Universidad de California, Davis, EE. UU.; en la actualidad Profesor emérito de Extensión Cooperativa)

AUTOR COLABORADOR
Riza Kanber (Universidad de Cukurova, Adana, Turquía)

Pistacho

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

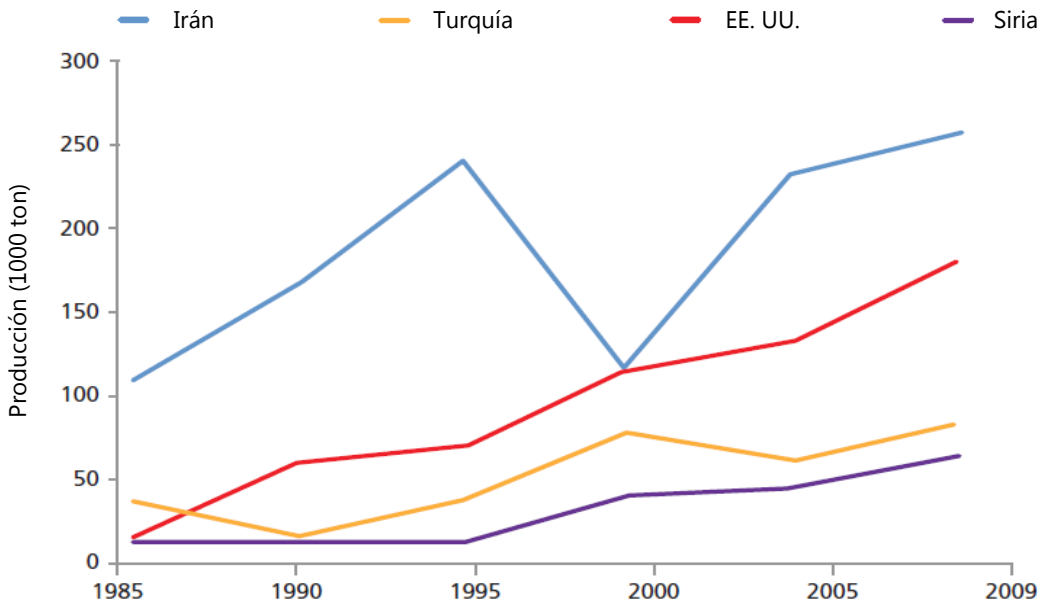
El pistacho *(Pistacia vera* L.) es originario del Cercano Oriente, principalmente Siria e Irán; y recientemente se han cultivado amplias áreas en Estados Unidos. En 2009, había 586 000 hectáreas de cultivos a nivel mundial, con un rendimiento promedio de 1.1 ton/ha (FAO, 2011). La Figura 1 presenta las tendencias de producción de los principales países productores desde 1985. El grueso de la producción en el Cercano Oriente tiene lugar en terrenos áridos, dado que el árbol de pistacho es muy tolerante a la sequía. La mayor parte de la producción en Estados Unidos se da en California, área donde se aplica riego. Existe una enorme diferencia en productividad entre los árboles plantados en terrenos áridos y los árboles en regadío. Por ejemplo, el rendimiento promedio en terrenos áridos en Turquía es de solo 1.4 kg por árbol, en comparación con 16-18 kg por árbol en terrenos bajo riego en California (Tekin *et al.,* 1990). Si bien actualmente la importancia del riego para la producción de pistacho es indiscutible, todavía hay algunos productores en áreas de secano que tienen la concepción errónea de que el riego es perjudicial (Kanber *et al.,* 1993). La mayor parte de la producción del Cercano Oriente tiene lugar en suelos marginales porque se considera que el árbol es tolerante a la sequía y además porque los suelos de buena calidad son escasos. Este no es el caso en California, donde se han plantado huertos de riego en suelos productivos del valle.

El árbol de pistacho es dioico; es decir que las flores masculinas nacen en un árbol y las flores femeninas en otro. Los árboles masculinos no producen nogl. A sin embargo, cierto porcentaje del huerto, generalmente cerca del 4 % en huertos comerciales, se debe sembrar con árboles masculinos para garantizar una polinización adecuada.

Entre los árboles de frutos y frutos secos, el pistacho tiene uno de los grados más altos de alternancia en la prcucción. Los rendimientos del cultivo pueden presentar una reducción de hasta 90 % de un año a otro. No se tiene un conocimiento claro sobre los mecanismos fisiológicos de la producciónalternante en el pistacho. Es probable que involucre niveles de carbohidratos, o que la competencia con la actividad hormonal también sea un factor. La producción alternante se manifiesta por primera vez durante el llenado de las nueces a inicios de julio, cuando las yemas del fruto (para el siguiente año) mueren y se desprenden. Cuanto más pesada es la producción, mayor es la abscisión de las yemas. El ciclo de alternancia se expresa no sólo para árboles individuales sino también para regiones completas de cultivo. Se cree que la baja producción derivada de malas condiciones climáticas en un año dado pone a toda la región en el mismo ciclo de alternancia. La cuando cuando acabe alternancia excesiva en una región puede ocasionar un problema de comercialización para la industria. El método más reciente y moderno para controlar la alternancia es la poda, la cual se intensifica antes de un año de descarga y se minimiza cuando se acerca un año de carga. El hecho de que el fruto del pistacho nazca en madera de un año determina la ubicación

y la intensidad de las prácticas de poda diseñadas para mitigar la alternancia. Además, el crecimiento de los brotes de pistacho se puede caracterizar como preformado o neoformado, dependiendo de cuándo ocurra la diferenciación del tejido. Prácticamente todo el cultivo emerge en el crecimiento preformado y esta situación tiene implicaciones para el manejo del riego.

FIGURA 1 Tendencias de producción de pistacho en los principales países (FAO, 2011).



Consideraciones de calidad

El pistacho se destaca por tener más componentes de calidad que otros cultivos de nueces. Dentro de ellos se incluyen no sólo la característica de la alternancia en la producción variable que no solo incide en el tamaño del pistacho, sino también el aborto de embriones; nueces cuyas cortallos y cáscaras alcanzaron su tamaño completo, pero donde los granos murieron de manera prematura o no se llenaron en lo absoluto. Asimismo, la dehiscencia del endocarpio (apertura de la cáscara) es necesaria para producir nueces del más alto valor. Las nueces cerradas al momento de la cosecha no se pueden comercializar como tentempié, el cual es el mercado más grande para los pistachos. Otros frutos que no son comercialmente viables son aquellos de apertura temprana; es decir, nueces que se abren antes del inicio del período normal de apertura de la cáscara. Estas nueces no sólo carecen de valor sino que también son propensas a desarrollar infecciones por enfermedades micóticas, que pueden conducir a la formación de Aflatoxinas. Por último, el porcentaje de recolección de nueces llenas mediante vibración mecánica también incide en los rendimientos de la cosecha.

Aunque los pistachos se han cultivado por siglos en países del Cercano Oriente y Asia occidental, la industria en California es relativamente joven, en comparación con otros cultivos de nueces que se plantan allí. En la industria de pistachos de California predomina la variedad Kerman, y una gran cantidad de productores y procesadores han adoptado fácilmente prácticas avanzadas, incluidos el riego por goteo o por micro-aspersores. En los principales países productores del Cercano Oriente existe una amplia gama de variedades y se ha incorporado el riego, aunque la mayor parte de la

producción es aún de secano. Los prouctores de pistacho de California incorporaron con mucha rapidez los resultados de las investigaciones sobre los requerimientos hídricos y el impacto del estrés hídrico en el rendimiento y la calidad del cultivo, en parte porque una gran porción del terreno de cultivo está ubicado en áreas donde los costes del agua son altos o la disponibilidad es baja.

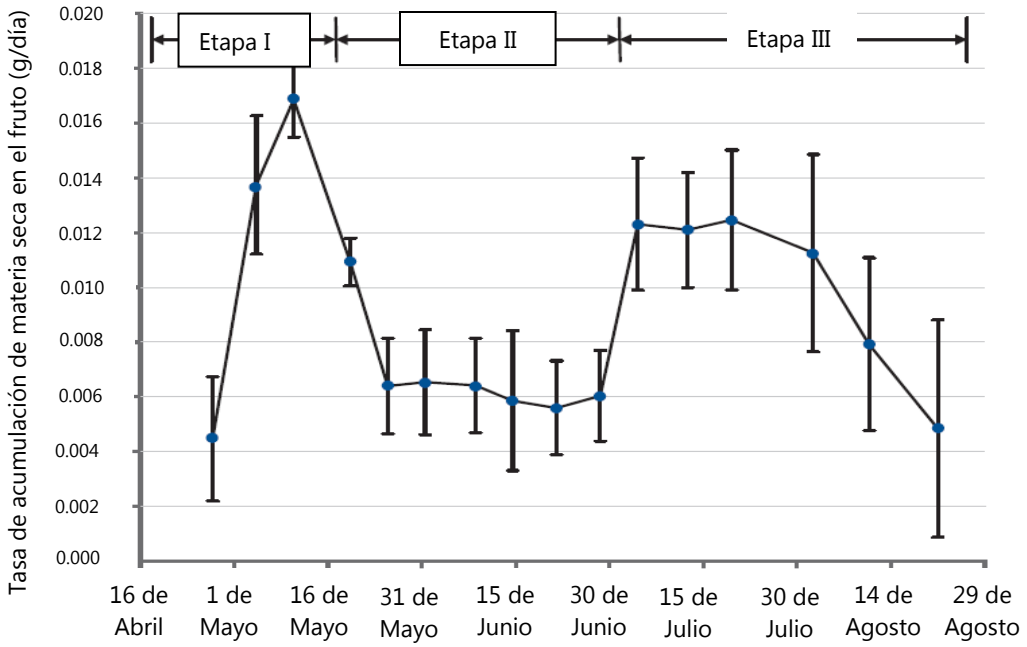
DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE DESARROLLO EN RELACIÓN CON LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

El crecimiento reproductivo de los árboles de pistacho se puede dividir en tres etapas según el desarrollo de las partes que componen el pistacho: La corteza, la cáscara y la semilla. La Figura 2 muestra los patrones de desarrollo de los componentes del pistacho. La corteza y la cáscara crecen rápidamente desde finales de abril hasta mediados de mayo (hemisferio norte), período después del cual se alcanza el tamaño pleno. Este período se denomina Etapa I. Sin embargo, el funículo (embrión), el cual eventualmente se convertirá en la semilla, normalmente no empieza a crecer sino hasta inicios de julio. Desde mediados de mayo hasta comienzos de julio, la principal actividad de crecimiento del pistacho es el aumento del grosor de la cáscara. Este período se conoce como Etapa II y está caracterizado por una tasa relativamente baja de acumulación de materia seca en el pistacho. El crecimiento rápido del grano inicia a principios de julio y se mantiene hasta la proximidad de la cosecha. La biofijación para este período, conocido como Etapa III, es la aparición de un marcado color verde en el funículo. Una investigación (Spann *et al.,* 2009) identificó el crecimiento vegetativo concomitante asociado a estas etapas y su importancia posterior como ubicaciones para posiciones del fruto.

Inicio del crecimiento temprano vegetativo y reproductivo; Etapa de crecimiento I

La germinación de los brotes ocurre de manera simultánea con el crecimiento reproductivo en la estación actual (inflamación de las yemas que formarán el marga), así como con el desarrollo embrionario de las yemas (primordios de las inflorescencias) en el cultivo de la siguiente estación, desde finales de abril hasta mediados de mayo. Las inflorescencias laterales en las axilas foliares nacen en los brotes generalmente con una sola yema vegetativa apical. Las yemas se diferencian en abril, mayo y junio, permanecen quiescentes de julio a septiembre y reanudan la diferenciación en octubre.

FIGURA 2 Cronología del desarrollo de la acumulación de materia seca en las nueces de pistacho, en la que se ilustran las tres etapas de crecimiento. Las líneas verticales son más y menos el error estándar de la media.



Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de crecimiento de los brotes: preformado o neoformado. Todos los componentes de un brote preformado se diferencian en la yema dormante, mientras que en el crecimiento neoformado, parte de la diferenciación de sus partes constitutivas puede ocurrir durante el período de crecimiento. La mayoría de las yemas que se encontraron en crecimiento preformado son reproductivas; hay muy pocas yemas laterales vegetativas en los brotes preformados. La mayor parte del crecimiento vegetativo ocurre a partir de las yemas terminales. Los brotes preformados tienden a ser más cortos, en comparación con los brotes neoformados que son más largos. Esta longitud en el crecimiento de los brotes no es conveniente, porque tienden a ser débiles y colgar de las hileras del huerto, lo cual dificulta el manejo y la cosecha. Por estas razones, los productores generalmente retiran estos brotes en los árboles maduros mediante poda durante la estación de latencia. Sin embargo, es posible que el crecimiento de brotes largos sea conveniente en árboles jóvenes en desarrollo, para garantizar un desarrollo más rápido de su copa.

El hinchado de las yemas reproductivas inicia en marzo y, para mediados de abril, hay 100-300 flores por raquis. La polinización y el cuajado de los frutos ocurren en este momento. Por lo general, hay 20-25 frutos en desarrollo por raquis, los cuales crecen con rapidez, de modo que la corteza y la cáscara alcanzan su tamaño completo cerca de mediados de mayo. Este evento también coincide con el endurecimiento de la cáscara.

Fase de retraso del crecimiento reproductivo: Etapa de crecimiento II

Desde mediados de mayo hasta inicios de julio, la principal actividad en el pistacho es el engrosamiento y endurecimiento de las cáscaras, proceso que se denomina lignificación. Sin embargo, la acumulación de materia seca en el fruto durante esta fase de crecimiento es baja, en comparación con los períodos precedente (Etapa I) y subsiguiente (Etapa III). Es posible que también se presente un crecimiento adicional de brotes a finales de mayo. Las yemas reproductivas que formarán el fruto de la siguiente estación continuarán su proceso de diferenciación hasta junio. En ocasiones, hay una brotación vegetativa adicional de crecimiento a finales de junio.

Desarrollo rápido de la semilla: Etapa de crecimiento III

Esta fase se caracteriza por la reanudación de una alta tasa de acumulación de materia seca en el pistacho, la cual obedece casi por completo al crecimiento rápido de la semilla. En cuestión de unas pocas semanas, la semilla llenará completamente la cavidad del pistacho y empezará a ejercer presión sobre la cáscara. La apertura de la cáscara se debe principalmente a esta expansión de la semilla (Polito y Pinney, 1999) e inicia generalmente a principios de agosto. En este punto, la corteza se empieza a degradar y cambia de ser un tejido abultado que se adhiere fuertemente a la cáscara, a ser un revestimiento holgado parecido al papel que se puede pelar fácilmente de la cáscara. Durante la Etapa III, las hojas que están en el mismo brote que el fruto en desarrollo algunas veces se vuelven amarillas y se caen. Se cree que esto es consecuencia de la traslocación de recursos de las hojas al fruto.

Un porcentaje dado de las nueces no se llena, generalmente del 10 al 30 %. Estas nueces reciben el nombre de nueces "en blanco" o "abortadas". Al utilizar el primer término, se indica que no hay evidencia del desarrollo de un embrión; mientras que con el último término se indica que el desarrollo del embrión se abortó. El término "vaciado" se utiliza en ocasiones para describir los dos fenómenos. Las cortezas de estas nueces no se degradan, tal como es el caso de las nueces llenas. Además, son mucho más difíciles de desprender del árbol con vibración mecánica en el momento de la cosecha, por lo cual un alto porcentaje permanece en el árbol.

Por lo general, la cosecha se realiza desde finales de agosto hasta mediados de septiembre, de forma mecánica con máquinas vibradoras que desprenden las nueces, similares a las utilizadas para

las almendras. Además de la vibradora, hay una máquina complementaria recolectora, ubicada al extremo opuesto del árbol, que se utiliza para recolectar las nueces que no pueden caer al suelo. El secado se logra en la planta de procesamiento en lugar del suelo, como en el caso de las almendras. Una razón importante para ello es que las nueces de pistacho se deben secar rápidamente; de lo contrario, la cáscara se puede manchar, lo que hará que las nueces sean menos atractivas para los compradores.

Postcosecha

Desde la cosecha hasta el inicio de la defoliación se presenta muy poca actividad evidente en el exterior del árbol. Luego de la recolección de los frutos, la diferenciación de las yemas reproductivas se reanuda y continúa hasta octubre. Los árboles generalmente sufren defoliación entre mediados y finales de noviembre debido a la senescencia foliar, la cual se acelera con las bajas temperaturas.

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

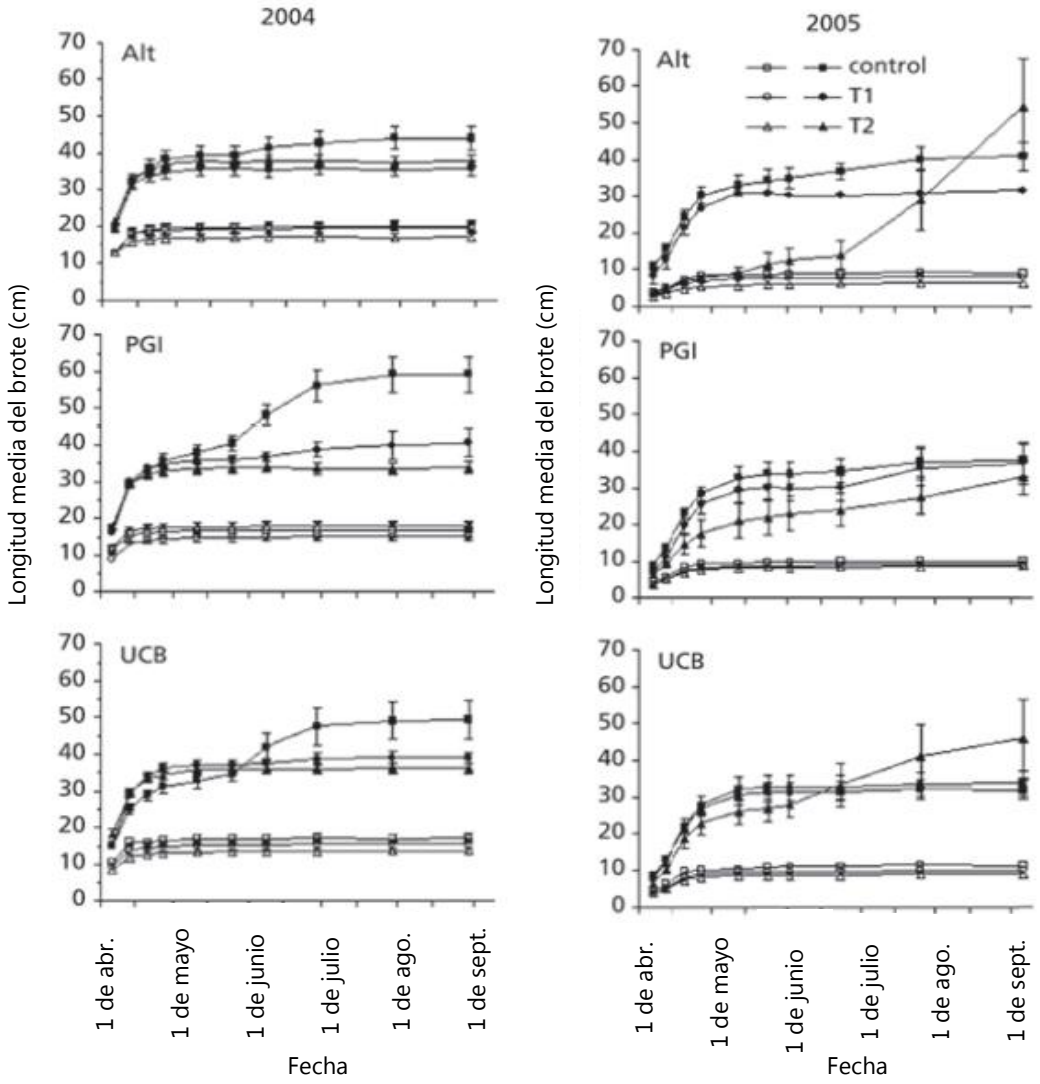
El pistacho goza de la reputación bien merecida de ser tolerante a la sequía. Fue posible medir la actividad fotosintética en la hoja incluso cuando el potencial hídrico foliar (LWP) superaba -5 MPa (Behboudian *et al.,* 1986). Esto se atribuyó al hecho de que los árboles de pistacho presentaron una presión de turgencia aproximadamente de 3 MPa, aún cuando el LWP era de -6 MPa; un valor más alto que incluso para las plantas xerófilas. El pistacho puede mantener alta turgencia incluso bajo altos niveles de salinidad del suelo (Walter *et al.,* 1988). Asimismo, se encontraron altas tasas de fotosíntesis y conductancia estomática en diferentes especies de pistacho bajo estrés severo (Steduto *et al.,* 2002). Los investigadores atribuyeron estos hallazgos principalmente al amplio sistema radicular, en lugar de las características morfológicas de las xerófilas. Los árboles de *P. atlantica*, a los cuales no se les aplicó riego, mostraron tasas de transpiración aproximadamente tres veces más altas que *P. terebinthus* (Germana, 1997). Esto sugiere que los árboles de pistacho pueden transpirar a tasas mucho más altas que las que normalmente se encuentran en las mesófitas y que la asimilación de carbono con suministros limitados de agua puede ser mucho más alta que en otros cultivos frutales, como el manzanano, el durazno o melocotonero, el ciruelo, el cerezo, los cítricos y los almendros. El pistacho mostró una fuerte respuesta fotosintética a los altos niveles de N y suministro hídrico, aunque las tasas de árboles sin riego también fueron bastante altas (Steduto *et al.,* 2002 y Ayd n, 2004). Con respecto al agua, el pistacho es algo paradójico; transpira a una tasa extremadamente rápida, en parte debido al hecho de que sus hojas son isolaterales –es decir, que los lados superior e inferior tienen una estructura similar con densidad y conductancia estomática casi idéntica– pero al mismo tiempo, también es extremadamente tolerante a la sequía.

Efectos durante la Etapa I

Spann y otros investigadores ensayaron regímenes de RDI en los que se impusieron déficits hídricos de cerca de -1.6 MPa de LWP a la sombra al mediodía, en árboles maduros de Kerman con portainjertos PG1, Atlantica y UCB durante la Etapa I; y la Etapa I y la Etapa II combinadas. Encontraron que especialmente para los brotes "cortos" –aquellos que se caracterizan como de crecimiento preformado– la elongación completa ocurría aproximadamente en la tercera semana de abril, mucho antes del inicio de la Etapa II. En general, no hubo reducciones en la longitud de este brote corto debido a estos déficits hídricos tempranos en la estación (Figura 3). Sin embargo, el estrés durante las Etapas I y II redujo significativamente el crecimiento de los brotes "largos"; el crecimiento neoformado (Figura 3). Esta situación no disminuyó la cantidad de posiciones fructiferas, ya que están ubicados, en su mayoría, en los brotes cortos. De hecho, no encontraron diferencias en la carga de frutos, el tamaño del fruto y el rendimiento entre estos regímenes de RDI

y los árboles de control con riego completo. Esto se atribuyó al hecho de que la mayor parte del fruto nació en el crecimiento preformado, y a que la reducción del crecimiento neoformado fue realmente beneficiosa en la producción comercial, dado que se debe podar. Los costes del agua y la poda constituyen cerca del 30 % del total para los productores de pistacho de California y por tanto, las reducciones del uso consuntivo y la poda, atribuidas al estrés al inicio de la estación, probablemente incrementarían los beneficios de los productores (Beede *et al.,* 2004). Una investigación reciente con el portainjerto UCB encontró cierta reducción en la cantidad total de brotes en crecimiento por árbol con estrés en la Etapa I y la Etapa II, estrés que podría reducir el rendimiento futuro si continuara por varios años. Este hallazgo confirmó un trabajo anterior (Goldhamer *et al.,* 1987), el cual reveló que las reducciones de la carga de frutos relacionadas con el estrés obedecieron principalmente a la reducción en la iniciación de los brotes cortos, en lugar de la cantidad potencial o real de nueces por raquis.

FIGURA 3 Cronología del desarrollo de la longitud de brotes cortos (símbolos abiertos) y largos (símbolos sólidos) de diferentes variedades para regímenes de riego completo (control) y dos regímenes de RDI en los que se impuso estrés en la Etapa I (T1) y en la Etapa I y la Etapa II combinadas (T2). Las líneas verticales son más y menos el error estándar de la media.



Goldhamer y Beede impusieron condiciones de terreno árido durante la Etapa I con la variedad Kerman en el portainjerto Atlantica. Encontraron que el tamaño del pistacho se redujo en un 6.1 %, en comparación con los árboles en los que se aplicó riego completo, pero la apertura de la cáscara se incrementó en un 14.0 %. Estos investigadores plantearon la teoría de que el estrés incidió en el crecimiento de la cáscara más que en el crecimiento de la semilla, lo cual trajo como consecuencia un porcentaje de apertura más alto. Debido a que ningún otro componente del rendimiento se vio afectado significativamente, reportaron una ligera mejoría en el rendimiento total de la semilla del producto comercializable (nueces abiertas) con estrés en la Etapa I (Goldhamer y Beede, 2004). Una investigación más reciente confirmó que el porcentaje de apertura de la cáscara se puede incrementar con estrés en la Etapa I, pero a costa del tamaño del pistacho (Goldhamer *et al.,* 2005). Por consiguiente, la decisión de utilizar esta estrategia dependería de si el cultivador tuvo un problema grave con la producción de nueces con cáscaras cerradas. El porcentaje de nueces con cáscaras cerradas puede llegar a ser el 5 % de la carga de nueces cosechadas hasta el 60 %. Además, el estrés en la Etapa I no sólo aumentó la partición de la cáscara, sino también la apertura de la misma; es decir, la distancia entre las mitades de la cáscara en el extremo distal del pistacho. Esto puede ocasionar que la cáscara se desprenda de la semilla durante el procesamiento comercial del pistacho, y las semillas sueltos pueden disminuir el valor de la cosecha.

Efectos durante la Etapa II

Goldhamer y Beede evaluaron una serie de tratamientos de RDI en los que se impusieron condiciones de terreno árido, se aplicó agua a ET_c del 25 % o se aplicó agua a ET_c del 50 % durante la Etapa II en árboles maduros de la variedad Kerman en el portainjerto Atlantica, bajo las condiciones de alta demanda evaporativa del oeste del valle de San Joaquín en California (Goldhamer y Beede, 2004). Estos tratamientos de riego deficitario en la Etapa II se combinaron con diferentes regímenes hídricos postcosecha. Los investigadores encontraron que ninguno de los estreses aplicados durante la Etapa II redujeron considerablemente el peso individual del pistacho, aunque se presentó una tendencia hacia nueces más ligeras cuando el riego de la Etapa II se eliminó por completo. Uno de estos tratamientos de terreno árido en la Etapa II, cuando se combinó con riego del 25 % de la ET_c en el período posterior en la cosecha, disminuyó significativamente el rendimiento de las nueces partidas. Los investigadores concluyeron que la Etapa II era realmente un período tolerante al estrés, como se ha demostrado en otros cultivos de fruto de crecimiento doble sigmoidal, como el durazno o melocotón, la ciruela y la nectarina. Por tanto, recomendaron un régimen de RDI en el que se aplicó riego del 50% de la ET_c durante la Etapa II (Goldhamer y Beede, 2004).

Un calendario de riego deficitario en junio de 20 % menos que el riego completo duplicó las particiones tempranas, mientras que un déficit del 35 % en julio incrementó las particiones tempranas en un 30 % (Sedaghati y Alipour, 2006). Las particiones tempranas son nueces que se abren mucho antes del inicio del período normal de partición de la cáscara. Estas nueces no son comercialmente viables, además de ser susceptibles a enfermedades micóticas que eventualmente pueden redundar en contaminación por aflatoxinas. Doster y Michailides (1995) recomendaron que se evitara el estrés hídrico a mediados de mayo para disminuir la incidencia de particiones tempranas.

Efectos durante la Etapa III

La imposición de estrés durante la Etapa III puede tener un impacto drásticamente negativo en prácticamente todos los componentes del rendimiento del pistacho. Al imponer un tratamiento de terreno árido durante la Etapa III, se observó que redujo el peso individual de la semilla en 10.6 %, incrementó la suma de vaciado y aborto de semillas en la carga total de nueces del árbol en 22.7 % y aumentó la producción de nueces con cáscara cerrada en 175 %. Cabe resaltar que el tratamiento

de terreno árido en la Etapa III no tuvo ningún efecto en la carga total de nueces del árbol. Sin embargo, el rendimiento de las nueces partidas se redujo en 62.6 % (Goldhamer y Beede, 2004).
Un estudio anterior indicó que suspender el riego durante la primera mitad de la Etapa III –lo cual redujo el uso consuntivo en 320 mm– no tuvo un impacto significativo en la apertura de la cáscara, pero incrementó en 119 % la cantidad de nueces llenas que quedaron en los árboles después de la vibración mecánica. Por otro lado, las condiciones de terreno árido durante la segunda mitad de la Etapa III (una reducción de 200 mm en el uso consuntivo) aumentaron en 31.6 % la producción de nueces con cáscara cerrada en la cosecha e incrementaron en 50 % la cantidad de nueces llenas que permanecieron en el árbol después de la vibración mecánica. De este modo, se concluyó que la Etapa III es el período más sensible al estrés del pistacho (Goldhamer *et al.,* 1991).

De los numerosos componentes del rendimiento del pistacho, resulta notable que la carga de nueces del árbol no se viera afectada por ninguno de los nueve tratamientos de riego deficitario impuestos, incluidas las condiciones de terreno árido durante la Etapa I, Etapa II y Etapa III, postcosecha y las distintas combinaciones de la Etapa II y el estrés postcosecha (Goldhamer y Beede, 2004). Al calcular el promedio de los dos últimos años de su estudio de cuatro años, la carga de nueces del árbol se situó dentro del rango de 10 900 y 12 300, donde el promedio de los árboles en los que se aplicó riego completo fue de 11 500 nueces por árbol (Goldhamer y Beede, 2004). Esto sugiere que hubo suficiente crecimiento preformado de brotes en el período inicial de la estación, incluso bajo condiciones de terreno árido en la Etapa I, para producir la cantidad de nudos (posiciones fructíferas) necesaria para soportar una cosecha máxima, y que la precipitación almacenada en invierno (200 mm por año) fue suficiente para permitir este crecimiento. Esta habilidad del árbol de pistacho para producir cargas de frutos iguales bajo una variedad de regímenes de estrés resalta la importancia del crecimiento preformado de los brotes desde mediados de abril hasta mediados de mayo; período durante el cual los árboles normalmente dependerían de la precipitación almacenada durante el invierno, en lugar del riego. De hecho, los primeros estudios de Spiegel-Roy *et al.* (1977) revelaron que una precipitación anual de 54 a 163 mm fue suficiente para que los árboles en terreno árido diferenciaran suficientes yemas florales para obtener rendimientos considerables.

Efectos sobre la alternancia en la producción

Kanber y otros investigadores observaron que la larga duración del estrés hídrico exacerbaba la alternancia en la producción y sugirieron que el riego podría alterar la periodicidad, presuntamente al aumentar la disponibilidad de carbohidratos durante los períodos de máxima demanda de carbono (Kermani y Salehi, 2006). Goldhamer encontró que el estrés en la Etapa I durante un año de carga (véase 2004 en la Figura 4) resultó en un aumento superior al triple en la carga de frutos de la siguiente estación (año subsiguiente de descarga), en comparación con los árboles sometidos a riego completo. No se conocen los mecanismos que explican este resultado y cabe recalcar que el estrés al inicio de la estación fue posible únicamente debido a que la precipitación en invierno fue inusualmente baja. En la estación siguiente, la precipitación de invierno eliminó cualquier estrés en la Etapa I, pero las cargas de frutos de este régimen de RDI fueron 25 % más bajas que en los árboles sometidos a riego completo (Figura 4). Este patrón se mantuvo en la estación posterior cuando este régimen de RDI produjo una carga de frutos 25 % más alta que en los árboles de riego completo. Parece ser que, independientemente de los motivos por los cuales se dan rendimientos altos en un año normalmente de descarga, los rendimientos altos que se presentaron una sola vez pueden alterar el patrón de alterancia en los años posteriores.

La carga de producción también incide en el impacto del riego deficitario en los diversos componentes del rendimiento del pistacho. Esta situación se observó cuando se impusieron condiciones de terreno árido con la variedad Kerman en el portainjerto Atlantica, de carga y descarga (Figura 5). Todos los componentes del rendimiento, a excepción de la cosechabilidad, se vieron negativamente afectados en el año de carga. La cosechabilidad fue mayor en el año de carga porque ráquises completas, en lugar de nueces individuales, se desprendieron del árbol por

vibración mecánica. Por lo tanto, los productores pueden prever mayores efectos negativos de las sequías intensas durante los años de carga que durante los años de carga. De hecho, una posible estrategia de manejo, con suministros hídricos muy limitados bajo micro-riego, sería la suspensión del riego en los árboles con bajas cargas de frutos (aquellos en el año de descarga), de modo que esta agua esté disponible para los árboles del huerto con altas cargas de frutos.

Indicadores del estado hídrico del árbol

El método establecido para determinar el estrés hídrico del pistacho es medir el potencial hídrico con una cámara de presión. Aunque el método estándar es medir el potencial hídrico del tallo (véase el Capítulo 4), al igual que en otras especies hay una correlación favorable entre el LWP en la sombra al mediodía (medición más rápida) y el potencial hídrico del tallo (Goldhamer *et al.,* 2005).

Un factor que complica la medición del LWP en las hojas del pistacho es que, al iniciar la inyección de gas dentro de la cámara, aparecen exudados en el extremo cortado del peciolo, presuntamente provenientes del floema. Estos puede interferir en la identificación del instante en que aparecen los fluidos del xilema. Una estrategia para eliminar este problema es utilizar un bastoncillo de algodón para absorber estos exudados antes de la aparición del fluido del xilema. Otra estrategia para eliminar este problema es el uso de papel secante en el extremo cortado del peciolo para que absorba únicamente el fluido del xilema y excluya los otros fluidos. Una tercera estrategia es no utilizar hojas individuales sino brotes de dos años de edad pequeños e interiores que estén sombreados y que tengan de una a cuatro hojas. El procedimiento implica cubrir el brote de dos años de edad con un paño húmedo justo antes de arrancarlo. Unos pocos milímetros de la corteza se desprenden en el extremo del corte, sea con un cuchillo pequeño o con la uña del pulgar. El brote completo de dos años de edad se coloca en la cámara después de que se retire el paño y se tome la lectura. Es bastante fácil identificar la aparición del xilema debido a que no hay interferencia de los exudados del floema y el área transversal de visión es más grande que el peciolo de la hoja. Goldhamer también encontró una buena correlación entre el potencial hídrico del brote de dos años de edad y el LWP en la sombra al mediodía. La pendiente de la relación fue alrededor de la unidad, pero la interceptación indicó que el potencial hídrico del brote de dos años de edad difiere de la lectura del LWP en la sombra en cerca de -0.7 MPa.

FIGURA 4 Carga total de nueces en árboles sometidos a un régimen de RDI en el que se impuso estrés en la Etapa I, en comparación con los árboles de control con riego completo. Obsérvese el impacto del RDI en el patrón de alternancia en la producción. Las barras verticales son más y menos el error estándar.

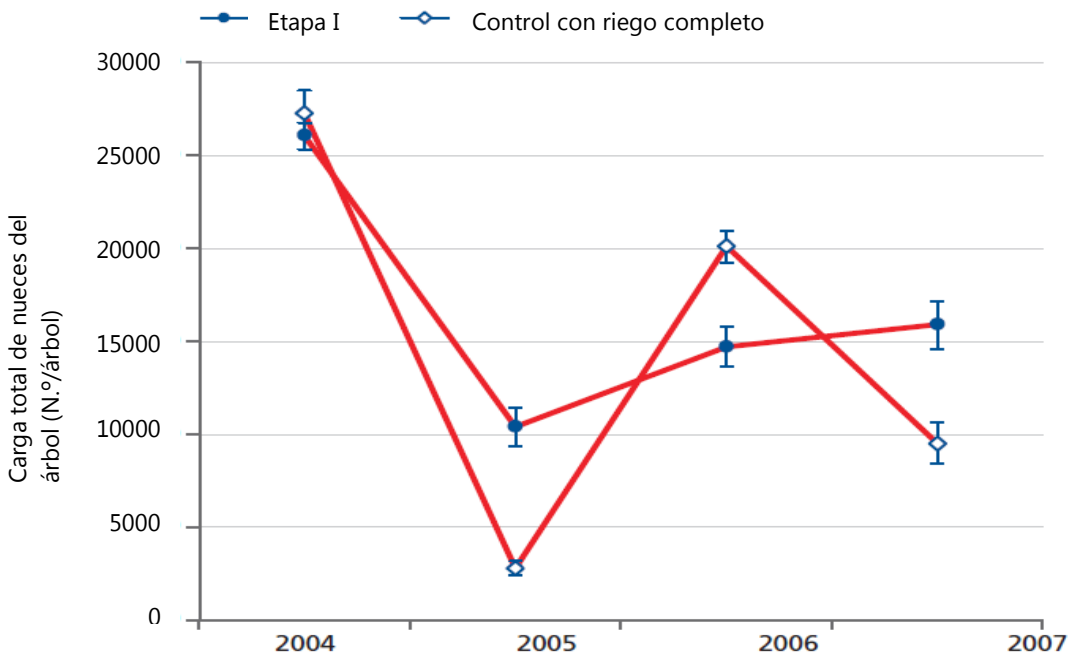
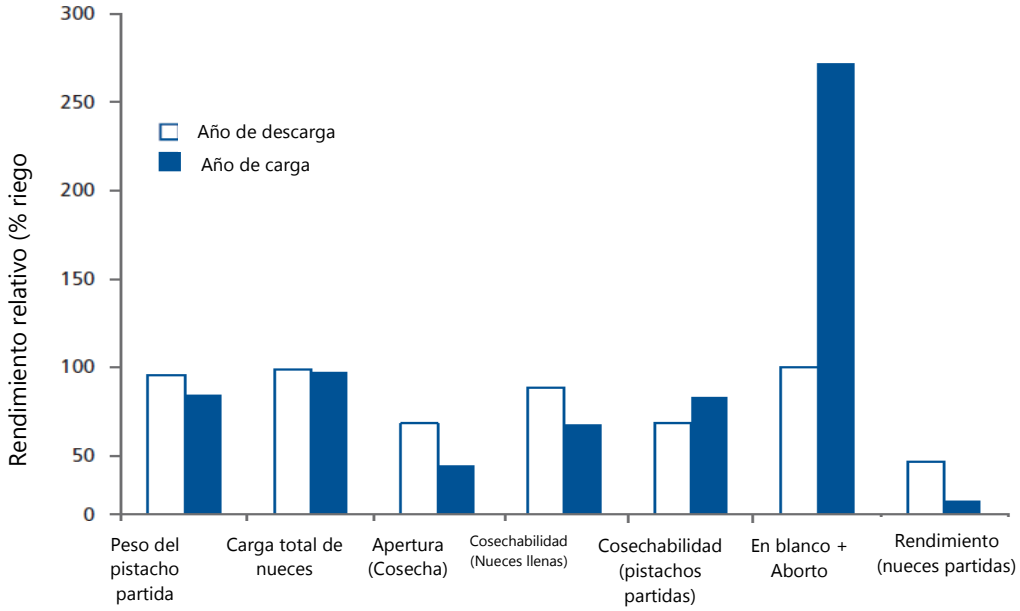


FIGURA 5 Impacto del primer año de condiciones de terreno árido, durante años de carga y descarga, en el rendimiento y los componentes del rendimiento de árboles de pistacho sometidos previamente a riego completo.



REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

Relativamente pocos estudios han cuantificado la ET_c del pistacho. Una investigación realizada en Irán con la variedad Ohadi en el portainjerto Badami Zarand (Kermani y Salehi, 2006) concluyó que se deben aplicar 600 y 1200 mm por estación con riego por goteo o por inundación, respectivamente; aunque se reportó 910 mm como una cantidad de riego "determinada previamente" para los árboles maduros de pistacho (Kermani y Salehi, 2006). Estudios anteriores encontraron que la producción de los árboles bajo riego con un valor de K_p (evaporación por el método de tanque) de 0.50 fue tan favorable como la de los árboles bajo riego con K_p de 0.75 para la variedad Larnaka en el portainjerto P. integerrima (Monstra *et al.,* 1995). En el sudeste de Turquía, los valores de K_c para las variedades Antep y Uzun aumentaron de 0.49 en mayo a 0.80 en agosto y se mantuvieron en esta magnitud hasta la primera semana de septiembre, cuando disminuyeron a 0.32 durante octubre, debido a la senescencia foliar (Kanber *et al.,* 1993). No obstante, se observó que si bien todos los regímenes de riego empezaron la estación con un perfil del suelo casi lleno de agua, todos terminaron con este perfil casi agotado. Los investigadores sospecharon que no hubo suficiente riego para suplir la ET_c en los árboles sometidos a riego más intenso (Kanber *et al.,* 1993).

Se usó un enfoque de balance de agua del suelo con conjuntos de tubos de acceso de la sonda de neutrones a una profundidad de 3 m y estimaciones de ET_o obtenidas de una estación meteorológica cercana, para calcular los valores de K_c bimestrales para la variedad Kerman en árboles maduros en el portainjerto Atlantica (Tabla 1) (Goldhamer *et al.,* 1985). Un aspecto único de este enfoque fue recurrir a los datos de conductividad hidráulica del suelo –obtenidos en un experimento aparte– a fin de eliminar una de las deficiencias del enfoque de balance de agua para determinar la ET_c: percolación profunda por debajo de la máxima profundidad supervisada.

TABLA 1 Coeficientes de cultivo en relación con el cultivo gramíneo de referencia (ET_o) para árboles maduros de pistacho ("Kerman" en *P. atlantica),* medidos utilizando el enfoque de balance de agua del suelo en el oeste del condado de Kings, California (Goldhamer *et al.,* 1985).

Fecha	Coeficiente de cultivo (K_c)
1-15 de abril	0.07
16-30 de abril	0.43
1-15 de mayo	0.68
16-31 de mayo	0.93
1-15 de junio	1.09
16-30 de junio	1.17
1-15 de julio	1.19
16-31 de julio	1.19
1-15 de ago.	1.19
16-31 de ago.	1.12
1-15 de sept.	0.99
16-30 de sept.	0.87
1-15 de oct.	0.67
16-31 de oct.	0.50
1-15 de nov.	0.35
16-30 de nov.	0.28

FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN DEL AGUA

El régimen óptimo de RDI recomendado actualmente aplica estrés durante la Etapa II y después de la cosecha para lograr la misma producción que en los árboles con riego completo, al tiempo que se reduce el uso consuntivo de agua (Goldhamer y Beede, 2004). Estos autores pusieron a prueba este enfoque en numerosas ensayos de campo (Goldhamer *et al.,* 1984) en el valle de San Joaquín de California. Los resultados de estos experimentos se resumen en la función de producción que se muestra en la Figura 6. Aunque los datos están bastante dispersos, sugieren que se alcanzó un nivel estable en el rendimiento de producto comercializable con del 10 al 20 % menos uso consuntivo que la ET_c potencial. Por lo tanto, generalmente se puede lograr la reducción del uso consuntivo hasta un 20 %, sin que esto redunde en un impacto negativo en el rendimiento de producto comercializable. Esto ocurrió en los portainjertos Atlantica y PG1.

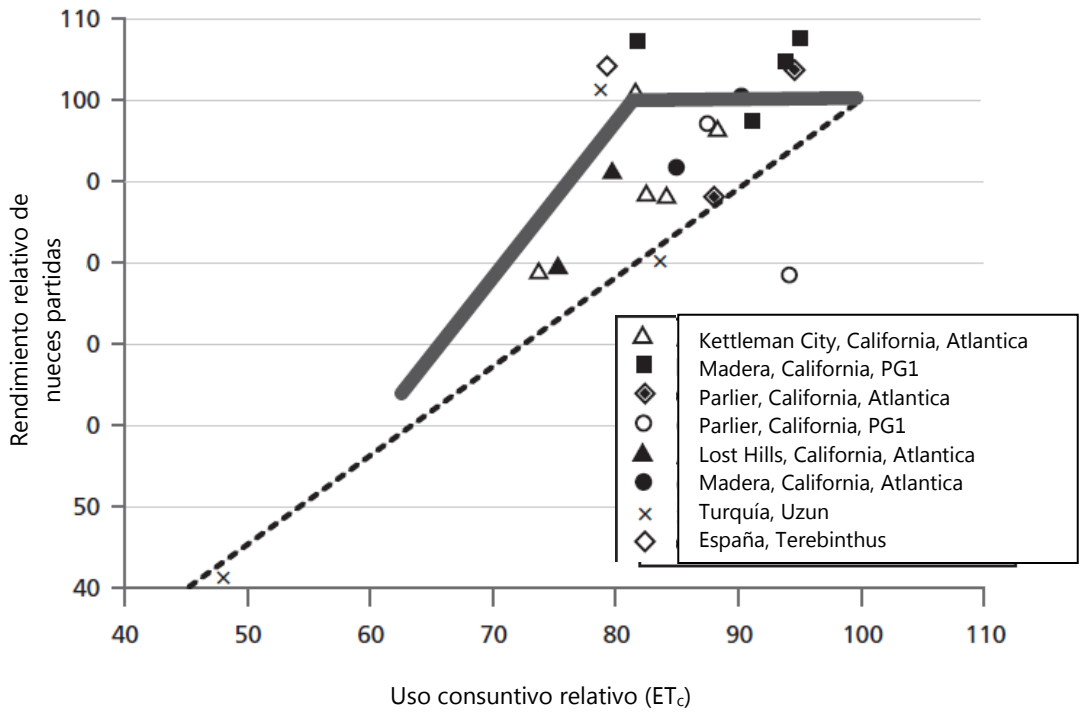
Cabe enfatizar que una reducción del 10 al 20 % de la ET_c se traduciría en un porcentaje más alto de reducción en el agua aplicada. Por ejemplo, si la ET_c fuera de 1100 mm, de los cuales 300 mm correspondieran a precipitación efectiva, entonces el agua de riego aplicada habría sido de 800 mm. Una reducción del 15 % de la ET_c reduciría el uso de consumo en 165 mm, lo cual equivale a una disminución de cerca del 21 % en el agua aplicada. Las reducciones del porcentaje de agua aplicada se incrementarían a medida que aumenta la precipitación efectiva.

REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

Con base en el supuesto de que la Etapa II y la fase postcosecha son los períodos más tolerantes al estrés, la Etapa I tiene tolerancia intermedia y la Etapa III es menos tolerante, es posible desarrollar un conjunto de estrategias de riego en sequía basadas en el cumplimiento de ciertos porcentajes de ET_c durante estos períodos (Tabla 2). El porcentaje para cada período varía dependiendo del suministro hídrico disponible. Cabe señalar que estas recomendaciones se basan en resultados experimentales de cantidades de agua aplicada, generalmente superiores a cerca de 750 mm (aproximadamente 65-70 % de ET_c); no se han publicado ensayos de regímenes de RDI por debajo

de esta cantidad. En consecuencia, los regímenes aquí sugeridos para los suministros de agua inferiores a 750 mm son nuestra mejor estimación de lo que resultaría en un funcionamiento óptimo del árbol, de nuevo con base en la sensibilidad al estrés en cada etapa de crecimiento.

FIGURA 6 Función de producción desarrollada utilizando estrategias de RDI en las que se impuso estrés durante las Etapas I y II y postcosecha, únicamente por una duración de cuatro años, como mínimo. Ocho estudios realizados en EE. UU y Europa cumplieron estos criterios y se presentan en la gráfica. La línea punteada muestra la regresión lineal del rendimiento máximo, hasta un rendimiento de cero con ET_c del 7 %; nivel que se supone necesario para la supervivencia del árbol.



Debido a que es difícil determinar la contribución de la humedad del suelo a la ET_c, especialmente al inicio de la estación, la estrategia de manejo de RDI que consiste en aplicar riego únicamente a ciertos porcentajes de ET_c resulta problemática. Una alternativa es utilizar un indicador de estrés hídrico del árbol basado en la planta, como el potencial hídrico de la hoja o del brote de dos años de edad con la cámara de presión. En los estudios citados anteriormente, el LWP en la sombra al mediodía durante la Etapa I, la Etapa II y la postcosecha no excedió de -1.8 a-2.0 MPa. Los valores recomendados para árboles maduros de pistacho sometidos a riego completo, bajo condiciones de alta demanda evaporativa, deben tener valores de LWP en la sombra al mediodía para la Etapa I, Etapa II, Etapa III y la postcosecha de -0.7 a -0.8 MPa, -0.8 a -1.0 MPa, -1.0 a -1.1 MPa y -1.0 a -1.2 MPa, respectivamente.

Un cultivador de pistacho en California observó que no hay gran necesidad de aplicar riego a los árboles masculinos a ET_c máxima, ya que el único papel que desempeñan es suministrar polen tan pronto inicia la estación. Este cultivador sugiere que el riego de los árboles masculinos se puede eliminar o reducir significativamente después de la Etapa I, sin que se presente un impacto negativo en la formación de polen en la estación siguiente. Este objetivo se puede lograr con relativa

facilidad mediante los sistemas de micro-riego. No obstante, dado que los árboles masculinos usualmente representan solamente cerca del 4 % de todos los árboles, la reducción del riego sería pequeña.

Aplicación típica con micro-aspersores:

Distancia entre los árboles	289 ft^2	
Tasa de aplicación	1.47 ft^3/hr	
Tasa de profundidad de aplicación por planta	0.01 ft/hr	(0.06 in/hr)
Cantidad por riego	1.47 in/24 hr	(37.2 mm/24 hr)

El cultivador hace seguimiento a las cantidades acumuladas que se aplicarán en los escenarios de RDI. Cuando el total asciende a 37 mm, el cultivador aplica riego. Por consiguiente, se aplicaría un riego del 16 al 30 de abril con suministro hídrico máximo, pero con 300 mm disponibles, el primer riego no se realizaría hasta la tercera semana de junio.

TABLA 2 Estrategias de RDI sugeridas para diferentes escenarios de suministro de agua disponible, desde 900 hasta 300 mm, cuando la ET_c es 1100 mm.

			ET_c	caso de 900 mm disponibles		caso de 750 mm disponibles		caso de 600 mm disponibles		caso de 450 mm disponibles		caso de 300 mm disponibles	
Fecha	Etapa de crecimiento		potencial en período (mm)	Tasa de riego (% ET_C)	Cantidad aplicada (mm)	Tasa de riego (% ET_C)	Cantidad aplicada (mm)	Tasa de riego (% ET_C)	Cantidad aplicada (mm)	Tasa de riego (% ET_C)	Cantidad aplicada (mm)	Tasa de riego (% ET_C)	Cantidad aplicada (mm)
16-30 de abril	1	Salida de las hojas, floración; elongación de los brotes	33	100	33	50	16	50	16	25	8	10	3
1-15 de mayo	1	Cuajado del fruto; expansión de la corteza y la cáscara	59	100	59	50	30	50	30	25	15	10	6
16-31 de mayo	2	Endurecimiento de la cáscara	91	50	45	25	23	25	23	25	23	10	9
1-15 de junio	2	Endurecimiento de la cáscara	122	50	61	25	31	25	31	10	12	10	12
16-30 de junio	2	Endurecimiento de la cáscara	137	50	68	25	34	25	34	10	14	10	14
1-15 de julio	3	Crecimiento rápido de la semilla	128	100	128	100	128	75	96	10	13	10	13
16-31 de julio	3	Crecimiento rápido de la semilla	123	100	123	100	123	75	93	75	93	50	62
1-15 de ago.	3	Apertura de la cáscara	124	100	124	100	124	75	93	75	93	50	62
16-31 de ago.	3	Dehiscencia de la corteza	100	100	100	100	100	75	75	75	75	50	50
1-15 de sept.	Cosecha		83	100	83	100	83	75	62	75	62	50	42
16-30 de sept.	Postcosecha	Diferenciación	56	100	56	25	14	25	14	25	14	10	6

		de yemas											
1-15 de oct.	Postcosecha	Diferenciación de yemas	35	100	35	25	9	25	9	25	9	10	4
16-31 de oct.	Postcosecha	Diferenciación de yemas	19	100	19	25	5	25	5	25	5	10	2
1-15 de nov.	Postcosecha	Defoliación	10	100	10	25	2	25	2	25	2	10	1
Total			1121		946		722		583		438		284
Riegos por estación			30		25		19		16		12		8

BIBLIOGRAFÍA

Ayd n, Y. 2004. *The effects of different irrigation water and nitrogen levels on yield and alternate bearing on pistachio.* Dep. of Agric. Struc. and Irrig. Basic and Applied Sciences, Universidad de Cukurova, Adana, 145 págs. (Tesis doctoral)

Beede, R.H, C.E. Kallsen, M.W. Freeman, L. Ferguson, B.A. Holtz, K.M. Klonskey, y DeMoura, R.L. 2004. *Sample costs to establish and produce pistachios.* University of California Coop. Extn. Publ. PI-SJ-04. 25 págs.

Behboudian, M.H, Walker, R.R. y Torokfalvy, E. 1986. Effects of water stress and salinity on photosynthesis of pistachio. *Scientia Horticulturae* 29:251-261.

Doster, M.A. y Michailides, T.J. 1995. The development of early split pistachio nuts and their contamination by molds, aflatoxins, and insects. *Acta Horticulturae* 419:359-364.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Germana, C. 1997. The response of pistachio trees to water stress as affected by two different rootstocks. *Acta Horticulturae* 449:513-520.

Goldhamer, D.A., Kjelgren, R., Beede, R., Moore, J.M., Lane, J., Menezes Jr., J., y Weinberger, G. 1984. Physiological response of pistachio to severe water stress. En: *Annual Report. Crop Year* 1983-1984. Fresno, CA, California Pistachio Industry, págs. 44-47.

Goldhamer, D.A., Kjelgren, R.K., Williams, L., y Beede, R. 1985. *Water use requirements of pistachio trees and response to water stress.* En: Proceedings of the National Conference on Advances in Evapotranspiration. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Chicago, IL, EE. UU., 16-17 de diciembre, 216-223.

Goldhamer, D.A., Kjelgren, R.K., Beede, R., Williams, L., Moore, J.M., Lane, J., Weinberger, G., y J. Menezes, Jr. 1985. *Water use requirements of pistachio trees and response to water stress.* En: Annual Report. Crop Year 1984-1985. California Pistachio Industry, Fresno, CA, págs. 85-92.

Goldhamer, D.A., Phene, B.C., Beede, R., Sherlin, L., Mahan, S., y Rose, D. 1987. Effects of sustained deficit irrigation on pistachio tree performance. En: *Annual Report. Crop Year* 1986-1987. Fresno, CA, California Pistachio Industry, págs. 61-66.

Goldhamer, D.A., Beede, R. H., y Fusi, S. 1991. Effects of deficit irrigation timing on pistachio tree productivity. En: *Annual Report, crop year 1990-1991.* California Pistachio Industry, Fresno, CA, págs. 84-87.

Goldhamer, D.A., y Beede, R. H. 2004. Regulated deficit irrigation effects on yield, nut quality and water-use efficiency of mature pistachio trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology,* 79(4):538-545.

Goldhamer, D.A., Beede, R.H., Michailides, T.J., Salinas, M. y Doster, M. 2005. Effects of regulated deficit irrigation on shell splitting and nut quality at harvest (second year report). En: *Annual Report, crop year* 2004-2005. Fresno, CA, California Pistachio Industry, págs. 104-106.

Kanber, R., Yazar, A., Onder, S. y Koksal, H. 1993. Irrigation response of pistachio *(Pistacia vera* L.). *Irrigation Science* 14:7-14.

Kermani, M.M. y Salesi, F. 2006. Determination of pistachio crop evapotranspiration (ET_c). *Acta Horticulturae* 726:441-448.

Monstra, F., Avanzato, D., Martelli, S. y Dascanio, D. 1995. Pistachio trial under different volumes of irrigation in Italy. *Acta Horticulturae* 419:249-252.

Polito, V.S. y Pinney, K. 1999. Endocarp dehiscence in pistachio *(Pistacia vera* L.). *International Journal of Plant Sciences* 160:827-835.

Sedaghati, N. y Alipour, H. 2006. The effect of different time of irrigation on occurrence of early split (ES) of pistachio nuts. *Acta Horticulturae* 726:583-586.

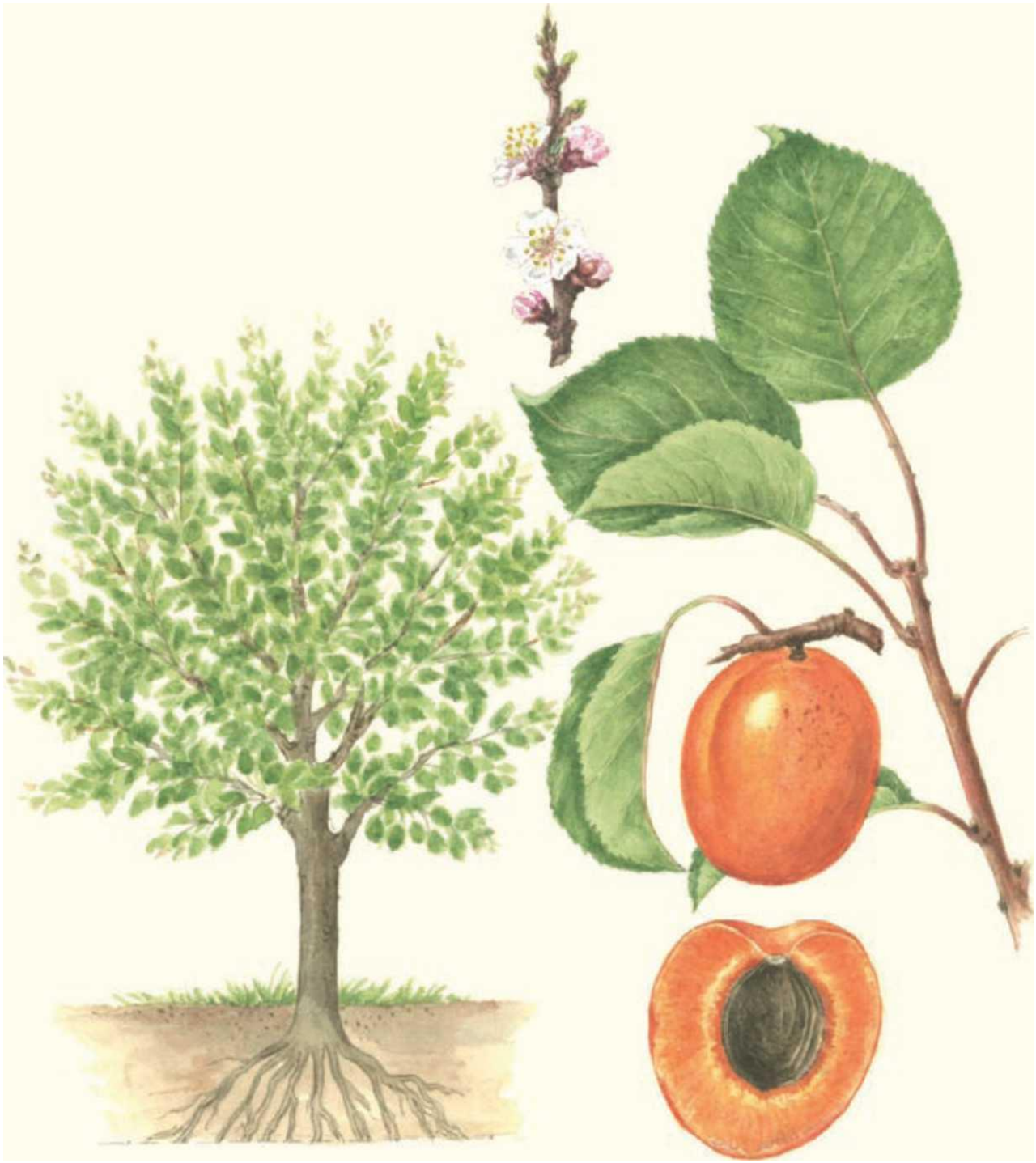
Spann, T.M, Beede, R.H. y DeJong, T.M. 2009. Contributions of short- and long-shoots to yield of 'Kerman' pistachio *(Pistaca vera* L.) *Scientia Horticulturae,* 121(4):495-500.

Spiegel-Roy, P., Mazigh, D. y Evenari, M. 1977. Response of pistachio to low soil moisture conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science,* 102(4):470-473.

Steduto, P., Kanber, R., Yükçeken, Y., Unlu, M., Özekici, B., Çetinkökü, Ö. y otros. 2002. Growth, yield and periodicity of pistachio under different water and nutritional levels: Investigation in the Southeastern Anatolia Project Region (GAP). *Final Report of WASIA PROJECT.* CIHAEM-IAM/Bari, 112 págs.

Tekin, H., Genc, C., Kuru, C. y Akkok, F. 1990. *Determining the nutrition levels and suitable time for leaf sampling of pistachio.* En: *Proceedings of the First Pistachio Symposium,* Gaziantep, Turquía, págs. 120-138.

Walter, R.R., Torokfalvy, E., y Behboudian, M.H. 1988. Photosynthetic rates and solute partitioning in relation to growth of salt-treated pistachio plants. *Australian Journal of Plant Physiology,* 15(6):787-798.



Albaricoque

Albaricoque

AUTORES PRINCIPALES
Cristos Xiloyannis
(Università degli studi della Basilicata, Potenza, Italia),
Bartolomeo Dichio
(Università degli studi della Basilicata, Potenza, Italia)

AUTORES COLABORADORES
Elías Fereres
(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España),
Giuseppe Montanaro *(Università degli studi della Basilicata, Potenza, Italia)*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Alrededor del mundo, el 90 % de los albaricoques cultivados comercialmente se derivan de la especie Prunus armeniaca (L.); unas cuantas variedades corresponden a *P. mume o P. sibirica*; o más recientemente, se originan de híbridos de albaricoque x ciruelo (y viceversa). Los albaricoques son árboles pequeños o medianos con copas frondosas (usualmente se mantienen por debajo de 3.5 m), cultivados para obtener frutos frescos o procesarlos (frutos secos, mermelada, jugo/zumo), y por el aceite extraído de la semilla. El albaricoque crece bien en regiones templadas; sin embargo, también puede tolerar temperaturas muy bajas durante el invierno. En particular, la variedad P. sibirica puede tolerar temperaturas del aire de cerca de -35 °C, y se comprobó que temperaturas del suelo hasta de -13 °C a 40 cm de profundidad no dañaron sus raíces (Kramarenko, 2010). La producción global total en 2009 fue de 3.73 millones de toneladas en 504 000 hectáreas (FAO, 2011). La Figura 1 presenta la evolución de la producción desde 1985. Turquía es el principal productor, seguido de Irán; Italia es el primer productor en la Unión Europea. La mayoría de las variedades madura entre finales de abril y finales de junio (hemisferio norte). En los últimos cinco años, se han cultivado e introducido en algunas áreas nuevas variedades con una fecha de maduración posterior (agosto-septiembre).

La densidad normal de plantación es aproximadamente de 400-500 árboles/ha; utilizando algunos sistemas de poda (p. ej., Y transversal) la densidad podría alcanzar 1200-1500 árboles/ha. En este caso, se requiere un cuidadoso manejo de la copa (p. ej., poda en verano) para minimizar el exceso de sombra que reduce la eficiencia del uso del agua a nivel de la hoja (Figura 2), el tamaño, el contenido de azúcar y el color de la fruta, la inducción de las yemas y la calidad de la flor en la cosecha del año siguiente, y el nivel de carbohidratos en yemas, flores y brotes (Nuzzo et al., 1999 y Xiloyannis et al., 2000).

ETAPAS DE DESARROLLO EN RELACIÓN CON LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

La inducción de las yemas florales empieza a finales de la primavera o el verano. Los requerimientos de la cantidad mínima de horas frío para la floración (n.º de horas < 7 °C) varían de 300 a 1200, dependiendo de la variedad. La temperatura mínima de floración (es decir, las unidades de calor GDH requeridas después del descanso (Ruiz *et al.,* 2007)) es relativamente baja, lo cual ocasiona que el la floración (y el desarrollo foliar) de los albaricoques ocurra de manera temprana en la mayoría de lugares. Por tanto, las flores y los nuevos brotes del albaricoque tienden a sufrir daños por las heladas a comienzos de la primavera. Los árboles de albaricoque suspenden la latencia y empiezan a florecer en el hemisferio norte a mediados de febrero, dependiendo de las condiciones ambientales y la variedad. La floración se completa usualmente en un intervalo de 20 días; en lo sucesivo, el fruto crece rápidamente y alcanza su tamaño máximo a mediados de mayo (hemisferio

norte). En este punto, se ha formado aproximadamente el 90 % del total de la materia seca del fruto (en variedades tempranas). En las regiones templadas, la cosecha inicia a finales de mayo y dura hasta finales de julio, en el hemisferio norte.

FIGURA 1 Tendencias de producción de los albaricoques en los principales países (FAO, 2011).

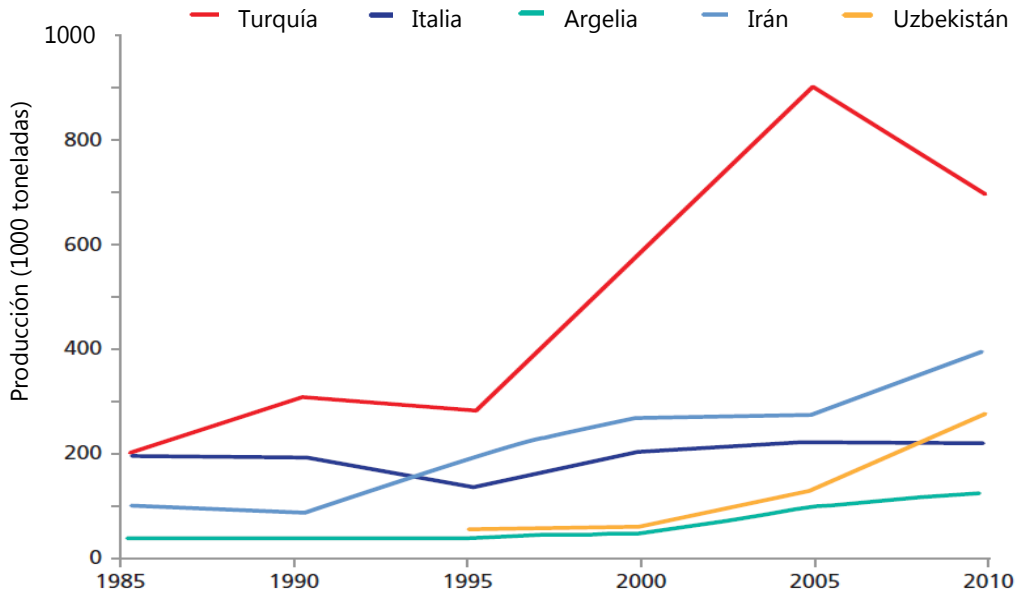
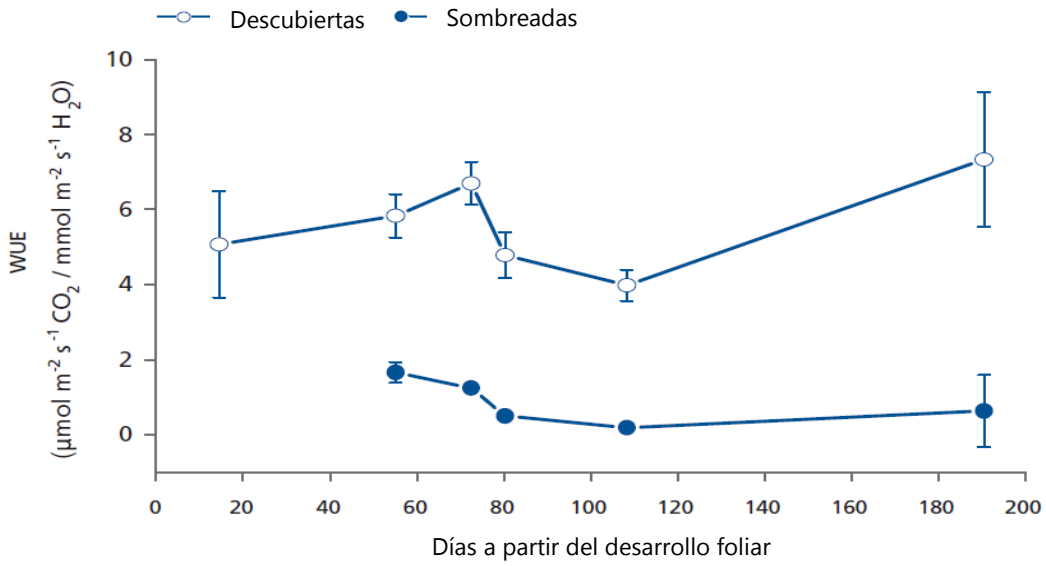


FIGURA 2 Variación estacional de la eficiencia media diaria del uso del agua (WUE) (±SE), medida en hojas descubiertas y sombreadas (PAr de< 350 µmol m^{-2} s^{-1}) en árboles de albaricoque podados en Y transversal (variedad Tyrinthos, 1111 plantas/ha) (Fuente: Xiloyannis *et al.*, 2000).

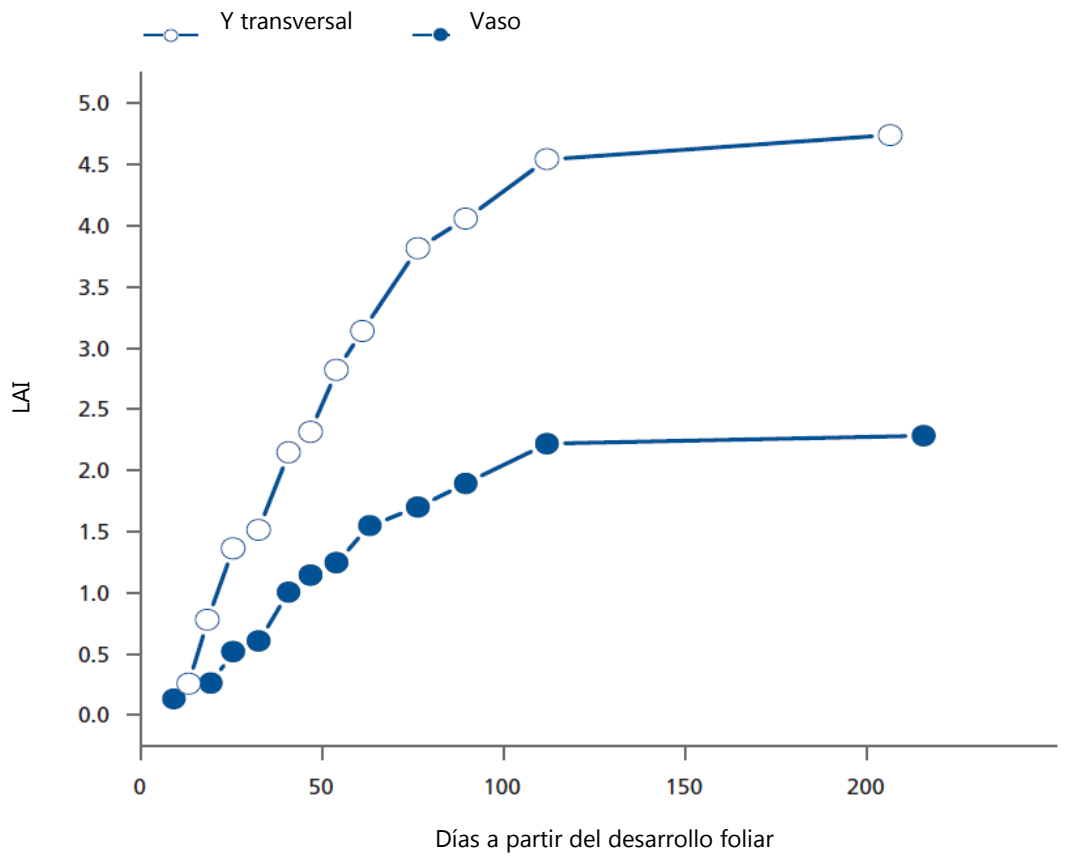


La emergencia de las hojas tiene lugar a finales de febrero, seguida por tasas de crecimiento rápido de los brotes. Aproximadamente el 80 % del área foliar total se completa hacia finales de mayo. En lo sucesivo, cerca del 95 % del área foliar final se alcanza a finales de junio (Figura 3). Los valores del índice de área foliar (LAI) varían desde aproximadamente 2 en huertos con densidad de

plantación normal (aprox. 400 plantas/ha) hasta 4.5 en huertos cultivados en sistemas de alta densidad (aprox. 1100 plantas/ha) (Figura 3).

En climas del Mediterráneo, el crecimiento vegetativo de los brotes de los árboles de albaricoque continúa (especialmente en los huertos jóvenes) por varios meses después de la recolección de los frutos, hasta octubre. Durante este período de postcosecha, los carbohidratos y los elementos minerales almacenados en los diferentes órganos de la planta cobran gran importancia. Por consiguiente, es importante proporcionar suficientes nutrición mineral y suministro hídrico mediante riego para proteger los árboles contra el estrés abiótico, durante el período de postcosecha. De esta manera, la actividad fotosintética de las hojas se mantiene y se prolonga hasta la senescencia foliar natural y a su vez, se maximiza el almacenamiento de reservas en brotes, yemas, ramas y raíces principales.

FIGURA 3 Evolución del LAI estacional en huertos de albaricoque (variedad Tyrinthos) podados a Vaso (400 plantas/ha) y Y transversal (1111 plantas/ha) (reformulada a partir de Dichio *et al.*, 1999).



RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

En áreas de precipitación en invierno y primavera, rara vez se presentan condiciones de estrés hídrico antes de la cosecha en variedades tempranas, particularmente cuando los suelos son profundos y tienen una alta capacidad de retención de agua. Los efectos de la reducción de la disponibilidad de agua del suelo, así como el nivel de estrés que experimentan las plantas, dependen de la intensidad y duración del déficit hídrico y de la etapa fenológica de la planta. Generalmente, los efectos del déficit hídrico son más evidentes en junio, julio y agosto (meses con alta demanda evaporativa).

Los albaricoques, al igual que la mayoría de los árboles de frutos de hueso, son sensibles a los recortes de agua durante todo el período de desarrollo del fruto. Las etapas iniciales del crecimiento del fruto son de gran importancia, no solamente para el tamaño del fruto, sino también para la acumulación de algunos nutrientes que no se pueden transportar por el floema (p. ej., calcio, Ca). Cerca del 85 % del contenido de Ca del fruto en el momento de la cosecha se obtiene en las primeras cuatro semanas de desarrollo (Montanaro *et al.,* 2010). Por tanto, el suministro óptimo de agua del suelo durante estas semanas es esencial para evitar la reducción en la absorción de agua (y nutrientes).

Los déficits hídricos durante las etapas posteriores de crecimiento del fruto conducen a la reducción del tamaño del fruto en la cosecha. Sin embargo, se reportó que para la variedad Búlida, la recuperación del estrés hídrico (potencial hídrico foliar (LWP) antes del amanecer de -1.0 MPa) durante la Etapa II del crecimiento del fruto provocó una tasa compensatoria de crecimiento del fruto durante las etapas finales, lo cual permitió que el fruto alcanzara un diámetro similar al fruto de plantas con riego completo (Torrecillas *et al.,* 2000). En el mismo experimento, los déficits hídricos aplicados durante las Etapas I y II, que impusieron estrés de leve a moderado desde mediados de marzo hasta mediados de mayo (LWP antes del amanecer de -1.1 MPa), ocasionaron una disminución del rendimiento de cerca del 15 % en los últimos tres años de un experimento de cuatro años. Sorprendentemente, esta diferencia no fue estadísticamente significativa en comparación con el rendimiento del cultivo de control con riego completo (LWP antes del amanecer de -0.4 MPa) (Torrecillas *et al.,* 2000).

En los árboles maduros, los déficits hídricos (LWP antes del amanecer de -1.0 MPa) afectaron negativamente al crecimiento del tronco durante el período de sequía (Pérez-Pastor *et al.,* 2009). No obstante, una vez que haya ocurrido la recuperación de la condición óptima de humedad del suelo, es posible que la circunferencia del tronco se recupere con facilidad (Torrecillas *et al.,* 2000).

El estrés hídrico (LWP antes del amanecer de -1.5 a -2.2 MPa) que ocurra durante el período inicial postcosecha (aprox. 30 días después de la cosecha), podría tener efectos perjudiciales en el rendimiento potencial del año siguiente, particularmente en variedades tempranas. Esto se debe a que los déficits hídricos en este momento afectan de manera negativa a la inducción de las yemas y el proceso de diferenciación floral, los cuales ocurren en el período de postcosecha inicial.

REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

Los requerimientos hídricos para el riego dependen principalmente del déficit hídrico anual del ambiente, más que de la variedad y el objetivo de rendimiento. Por ejemplo, la cantidad de agua de riego necesaria para producir 1 kg de fruta en el sur de Italia, donde el déficit hídrico estacional (ET_o-precipitación) es de aproximadamente 850 mm/año, es de cerca de 160 litros (aprox. 30 ton/ha rendimiento). En la misma variedad, este valor disminuyó a cerca de 40 litros/kg en el norte de Italia (44°08' N; 12°44' E), donde el déficit hídrico estacional es sólo de aproximadamente 160 mm/año.

Se han realizado muy pocas mediciones del uso de consumo (ET_c) de los árboles de albaricoque. Los coeficientes de cultivo (K_c) de los huertos de albaricoque son similares a los de otros frutos de hueso, como el ciruelo o el durazno o melocotonero. Sin embargo, debido a que el fruto se cosecha en una etapa bastante temprana, el riego limitado postcosecha es común, el cual afecta a los valores de K_c reportados, algunas veces mucho más bajos que aquellos que se pueden observar en huertos donde el suministro hídrico no limita la transpiración después de la cosecha. La Tabla 1 proporciona valores ajustados de K_c para huertos maduros de albaricoque en los que se ha aplicado riego por goteo, con base en un experimento realizado en el sudeste de España (37°52' N; 1°25' O) (Abrisqueta *et al.,* 2001).

TABLA 1 Coeficientes de cultivo de árboles maduros de albaricoque (el suelo no fue labrado y se aplicó riego por goteo a los árboles).

Mar.	Abr.	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.
0.4	0.7	0.8	1.0	1.0	0.85	0.7	0.5

FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN DEL AGUA

Con base en los resultados de experimentos publicados que relacionan el rendimiento y diferentes regímenes de riego para los albaricoques (Torrecillas *et al.,* 2000 y Pérez-Pastor *et al.,* 2009) y según nuestra propia experiencia, en la Tabla 2 se presenta un programa de SDI y en la Figura 5 se muestra una estrategia de RDI. Este programa reduce el agua aplicada estacional en 20 %, en comparación con un huerto con riego completo, y disminuirá el uso del agua de riego sin incidir de manera negativa en el rendimiento.

TABLA 2 Coeficientes de cultivo recomendados para una estrategia de SDI. Datos obtenidos en el sur de Italia (40 N; 16°38' E; C. Xiloyannis, sin publicar).

Mar.	Abr.	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.
0.4	0.5	0.6	0.7	0.85	0.5	0.5	0.5

REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

Como se describió anteriormente, los árboles de albaricoque tienen algunas características positivas que les ayudan a enfrentar restricciones de agua, las cuales se pueden utilizar en estrategias de RDI. Además, el crecimiento de los brotes y los frutos tiene lugar por separado en cultivares tardíos (Figura 4). Al igual que en el caso del durazno o melocotonero, este aspecto es bastante relevante cuando se adoptan estrategias de riego deficitario encaminadas a controlar la vegetación sin afectar el crecimiento del fruto. Sin embargo, la oportunidad de reducir la aplicación de agua en la Etapa II es limitada en los albaricoques, particularmente en las variedades tempranas donde la duración de la Etapa II es bastante limitada.

Una estrategia de riego deficitario regulado debe evitar los déficits hídricos durante el período crítico de alta sensibilidad al estrés hídrico (es decir, todo el período de crecimiento del fruto y el período inicial de postcosecha, aproximadamente 30 días después de la cosecha). Después de este período, con base en la cantidad de agua disponible en el volumen de suelo explorado por las raíces, el riego podría empezar a reducirse justo después de la cosecha. De esta manera, los árboles agotan el agua de las capas profundas del suelo y gradualmente ajustan su estado hídrico sin afectar los procesos de inducción y diferenciación de yemas. Se recomienda que en el período inicial de 30 días después de la cosecha, el Y_{leaf} antes del amanecer no sea inferior a -0.7 MPa.

Después de este período, una reducción de cerca del 50 % de ET_c es una estrategia viable de riego deficitario (Figura 5). Es conveniente supervisar el estado hídrico del árbol para evitar el exceso de estrés hídrico (el Ψ_{leaf} mínimo antes del amanecer no debe ser inferior al umbral de -1.30 MPa, el cual corresponde a un valor del mediodía que varía entre -2.5 y 3.0 MPa). El porcentaje de reducción de ET_c se debe evaluar cuidadosamente según el agua disponible en la zona radicular, el cual se ve afectado por las características hidráulicas del suelo y los portainjertos. La Tabla 2 presenta los valores recomendados de K_c para una estrategia de SDI evaluada en el sur de Italia. Esta estrategia se ensayó durante tres años en un huerto de albaricoque sometido a riego por goteo (variedad S.Castrese, Palmette 740 plantas/ha), cultivado en un área con ET_o de 980 mm, de abril a septiembre. Se suministró riego a aproximadamente 5600 m^3/ha durante toda la estación. La aplicación a largo plazo de la estrategia de SDI se debe evaluar según las condiciones locales y de una estación a otra. La sostenibilidad a largo plazo del huerto bajo régimen de RDI/SDI depende de la efectividad con que la precipitación del invierno vuelva a llenar el volumen del suelo explorado por las raíces.

FIGURA 4 Longitud de los brotes y diámetro del fruto del albaricoque (variedad Búlida) como porcentaje de su valor final (Torrecillas et al. 2000).

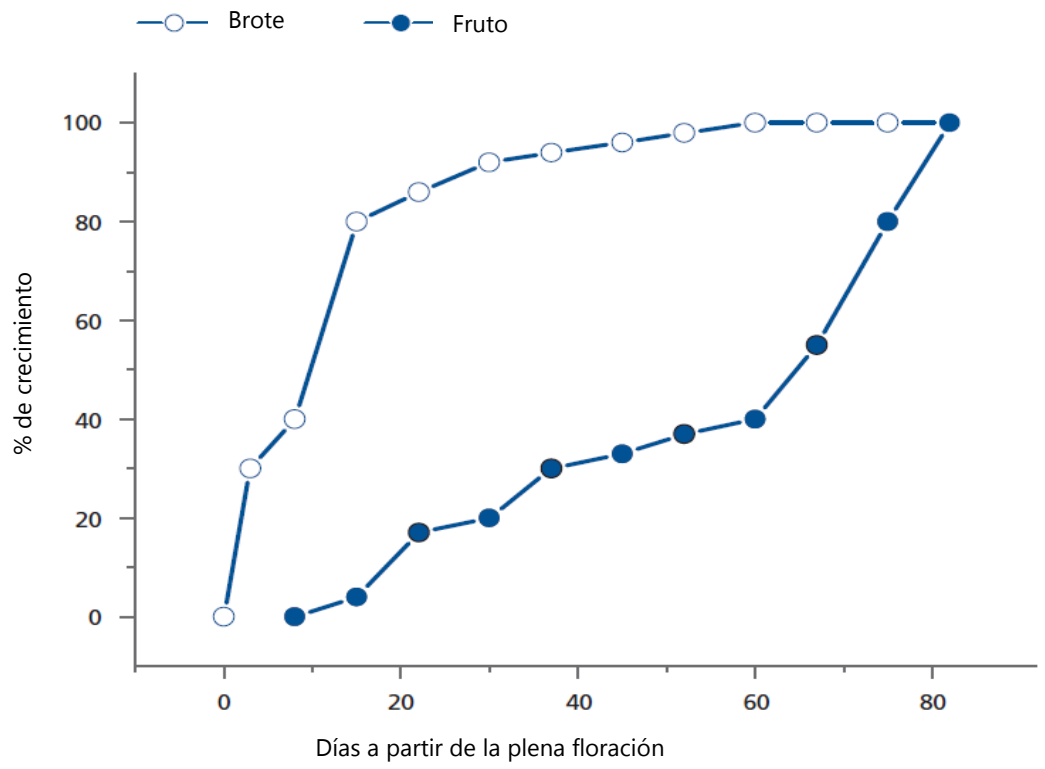
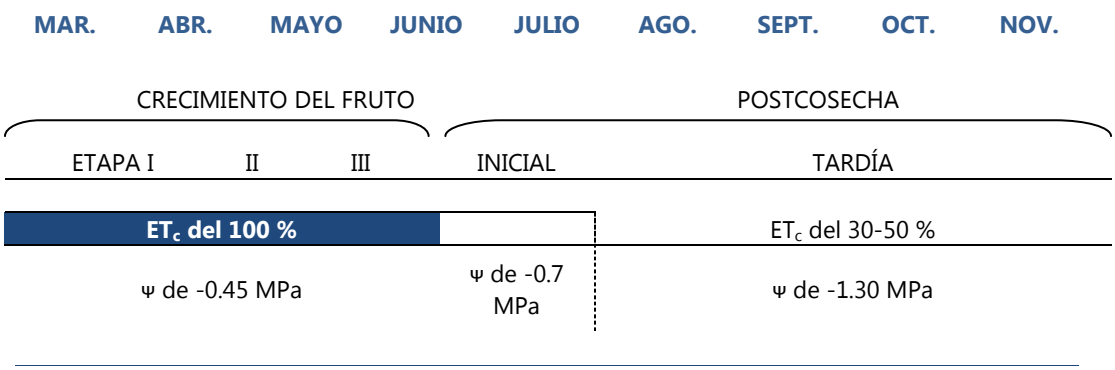


FIGURA 5 Representación esquemática de la estrategia recomendada de RDI durante la estación. Una reducción del 30-50 % de ET_c (dependiendo de la capacidad de retención de agua del suelo) se debe evaluar según la disponibilidad de agua en el suelo explorado por las raíces. Ψ indica el potencial hídrico foliar mínimo antes del amanecer, por debajo del cual existe el riesgo de que se presente reducción del rendimiento. El patrón de desarrollo corresponde al de una variedad de maduración temprana.



BIBLIOGRAFÍA

Abrisqueta J.M., Ruíz A. y Franco, J.A. 2001. Water balance of apricot trees *(Prunusarmeniaca* L. cv. Bulida) under drip irrigation. *Agricultural Water Management* 50:211-227.

Dichio B., Montanaro G., Nuzzo V., Xiloyannis C. y Giandomenico I., 1999. Leaf area evolution, light interception, yield and quality of apricot trees (cultivar Tyrinthos) trained to transverse Y and Vase. *Acta Horticulturae,* 488: 527-532.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Kramarenko, L.A. 2010. Withstanding of Moscow apricots under extremely low (winter 2006) and extremely high (winter 2006-07) temperatures. *Acta Horticulturae* (ISHS) 862:453-458

Montanaro, G., Dichio, B. y Xiloyannis, C. 2010. Significance of fruit transpiration on calcium nutrition in developing apricot fruit. *Journal of Plant Nutrition Soil Science,* 173: 618-622. doi: 10.1002/jpln. 200900376.

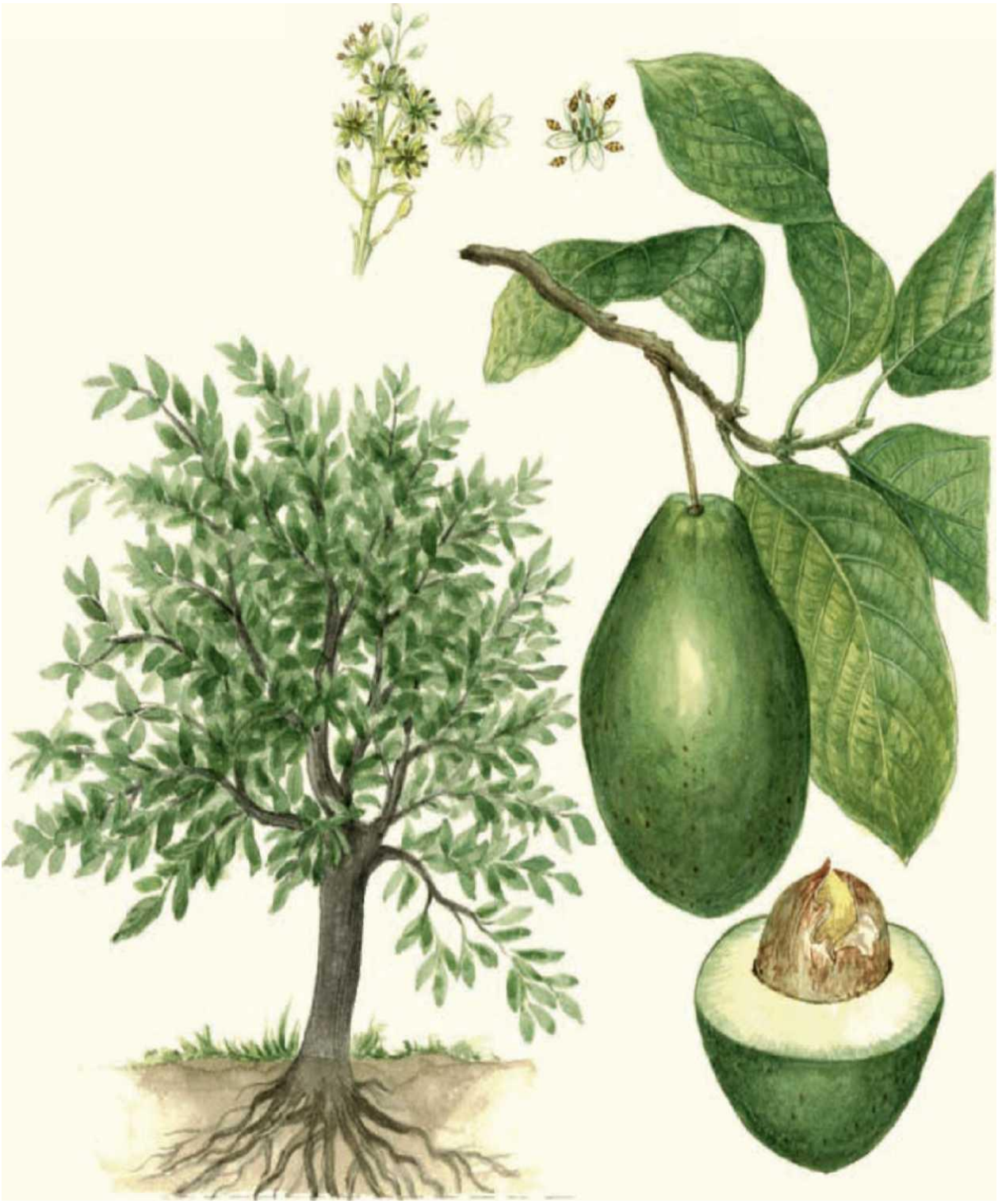
Nuzzo, V., Biasi, R., Dichio, B., Montanaro, G., Xiloyannis, C. y Lanzieri, A. 1999. Influence of different light availability on flower bud quality in cultivar Tyrinthos *(Prunus armeniaca* L.). *Acta Horticulturae,* 488: 477-482.

Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Torrecillas, A. y Ruíz-Sánchez, M. 2009. Response of apricot trees to deficit irrigation strategies. *Irrigation Science* 27:231-242.

Ruíz, D., Campoy, J.A. y Egea, J. 2007. Chilling and heat requirements of apricot cultivars for flowering. *Environmental and Experimental Botany* 61 (2007) 254-263.

Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R. y Ruíz-Sánchez, M.C. 2000. Apricot tree response to withholding irrigation in different phenological periods. *Scientia Horticulturae* 85:201-215.

Xiloyannis, C., Nuzzo, V., Dichio, B., Celano, G. y Montanaro, G. 2000. Characterization of training system in relation to water use efficiency in apricot and kiwifruit plants. *Acta Horticulturae,* 537: 207-213.



Aguacate

Aguacate

AUTOR PRINCIPAL
Raúl Ferreyra y
Gabriel Selles
(INIA, Santiago, Chile)

AUTOR COLABORADOR
Elías Fereres *(Universidad de Córdoba e IAS-CSIC, Córdoba, España)*

Introducción y antecedentes

El aguacate *(Persea americana* Mill) es un árbol que ha sido conocido por siglos en América Central y Suramérica, pero que sólo recientemente se ha convertido en un cultivo comercial. En 2009 había más de 430 000 ha de plantaciones comerciales, con un rendimiento promedio mundial de 8.8 ton/ha, siendo México (con 100 000 ha), Chile y los Estados Unidos los principales países productores. Sudáfrica, España e Israel son otros países con exportaciones significativas (FAO, 2011). La Figura 1 presenta las tendencias de producción de los principales países productores. Los rendimientos del fruto del aguacate son relativamente bajos en comparación con otros árboles frutales, debido a los altos requerimientos energéticos de su producción, ya que tiene una semilla grande y su composición es rica en aceite (Wolstenholme, 1986). Los rendimientos promedio de la variedad Hass, una de las variedades comerciales más populares, oscilan alrededor de 12 ton/ha, aunque pueden alcanzar las 25 ton/ha en años muy buenos, con un fruto cuyo porcentaje de aceite puede llegar hasta el 20 %. Hay tres razas de aguacate: mexicana, guatemalteca y antillana, que tienen diferentes sensibilidades en sus respuestas al medio ambiente. Los aguacates han evolucionado en suelos volcánicos que tienen muy baja densidad aparente, pH ácido, y un volumen muy alto de poros. Por ello no es de extrañar que esta especie sea extremadamente sensible al encharcamiento y no se comporte bien en suelos pesados con problemas de aireación. Es costumbre plantarlos en bermas o caballones, siempre que sea factible, a fin de mejorar el drenaje alrededor de las áreas cercanas a la base del tronco. Por esta razón, para la plantación de aguacates se prefieren los suelos arenosos a los pesados. Los aguacates también son muy sensibles a las bajas temperaturas, e incluso las heladas leves (temperaturas por debajo de -1 a -2 °C°) pueden ocasionar daños significativos. Entre las razas de árboles, la mexicana tiene mayor tolerancia a las bajas temperaturas, ya que se originó en las frías tierras altas de México.

Crecimiento y desarrollo con respecto a la determinación del rendimiento.

El crecimiento vegetativo ocurre en dos rebrotes: uno fuerte en primavera y uno más débil en otoño. La floración ocurre en primavera (entre inicios de octubre y mediados de noviembre en el hemisferio sur) y está seguida del cuajado del fruto. Durante las primeras 3 a 4 semanas después del cuajado y al final de la primavera ocurre una caída intensa de frutos, que conlleva al primer ajuste en su cantidad. Ésta se vuelve a ajustar con un periodo adicional de caída que tiene lugar alrededor del final del verano, cuando el tamaño del fruto oscila entre un 10 % y 40 % de su tamaño en la madurez. La Figura 2 ilustra las etapas de desarrollo de la variedad Hass en Chile central y muestra también dos períodos de crecimiento radicular que se producen en los comienzos del verano y principios del otoño.

FIGURA 1 Tendencias en la producción de aguacate en los principales países (FAO, 2011).

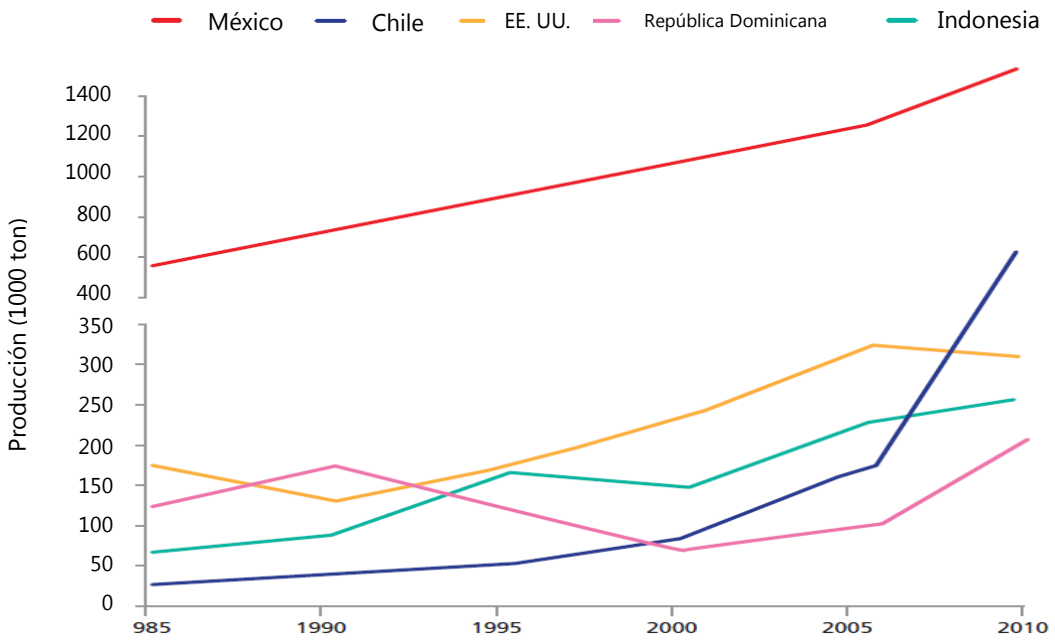
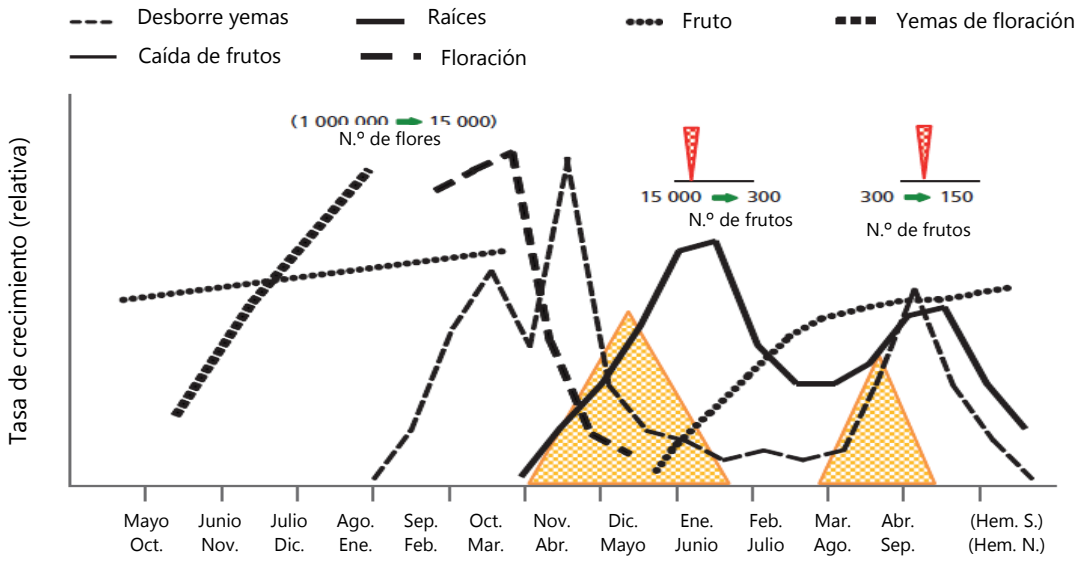


FIGURA 2 Patrones de desarrollo del aguacate (variedad Hass) observados en el valle central de Chile.

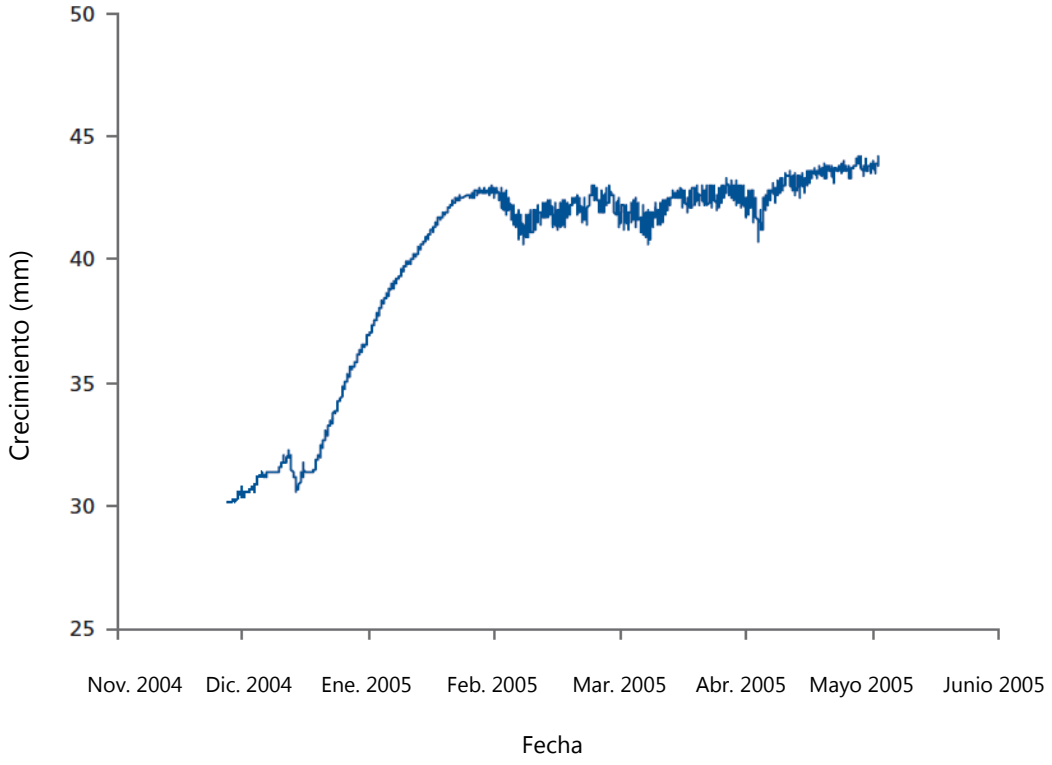


El periodo más crítico de desarrollo del aguacate tiene lugar entre finales de primavera e inicios de verano. En ese momento hay un crecimiento vigoroso de los brotes y raíces, se dal cuajado del fruto y se define el tamaño final del fruto. El estrés ambiental puede afectar negativamente al cuajado del fruto, la cantidad y el tamaño final de los frutos. También puede inducir a algunos defectos internos en los frutos. Durante ese período, la demanda de evaporación es relativamente baja y variable y por lo tanto, es posible que estas prácticas inadecuadas de riego causen déficit o exceso hídrico. Aunque las tasas de expansión del fruto son bastante altas durante un corto período de tiempo, como se muestra en la Figura 3, el crecimiento y desarrollo del fruto toma un tiempo largo, desde la primavera hasta el otoño. La temperatura también afecta la forma del fruto, el cual se alarga con temperaturas promedio más bajas.

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

Los árboles de aguacate son muy sensibles a los déficits hídricos; se ha determinado que su inflorescencia es más sensible a los déficits hídricos que las hojas circundantes. El cuajado del fruto también es bastante sensible a los déficits hídricos y se puede producir la caída de los frutos en cualquier momento entre del cuajado y aproximadamente al 50 % de su tamaño final, si la falta de riego induce el estrés hídrico. Los déficits hídricos afectan al tamaño del fruto durante su período de crecimiento, que dura aproximadamente cuatro meses después del cuajado. El estrés hídrico durante las últimas etapas del desarrollo del fruto afecta negativamente a la calidad del fruto maduro. La concentración de calcio en el fruto aumenta cuando los árboles se riegan frecuentemente y esto parece prevenir varios desórdenes fisiológicos del fruto.

FIGURA 3 Crecimiento expansivo de un fruto de aguacate de la variedad Hass, monitoreado constantemente en Chile central.



Los valores del potencial hídrico del tallo (SWP) al mediodía de árboles bien regados, en un día típico de verano, oscilan entre 0.5 MPa y -0.6 MPa. Estos valores deberían ser los niveles de umbral de referencia del SWP. Los déficits hídricos leves inducen valores del SWP a mediodía entre -0.6 y -1.0 MPa. Los niveles del SWP por debajo de -1.0 MPa que llegan incluso a -2.0 hasta -3.0 MPa indican déficits hídricos más severos. Los valores de conductancia estomática son algo superiores a los de las hojas de los cítricos, pero están por debajo de los valores observados en los huertos caducifolios. Se han medido valores promedio de conductancia foliar de alrededor de 0.3 cm/s en árboles con bien regados (Ferreyra *et al.,* 2007). El exceso de agua en los suelos mal drenados afecta a las relaciones hídricas del árbol de aguacate y por lo tanto, su funcionamiento general. Los bajos niveles de oxígeno en el suelo reducen las tasas de expansión foliar, así como el crecimiento radicular, y si se prolongan, pueden causar necrosis radicular y abscisión foliar. Varios estudios que han medido la tasa de difusión del oxígeno muestran que las raíces del aguacate son extremadamente sensibles a condiciones anaeróbicas. Aunque la mayoría de las especies vegetan bien en suelos donde el aire sólo llena el 10 % del volumen de poros, las raíces del aguacate parecen requerir que este volumen esté lleno de aire en aproximadamente un 30 %, como mínimo, para un funcionamiento óptimo (Ferreyra y Selles, 2007). Además del problema de aireación, existe un patógeno llamado *Phytophthora cinamomi,* que prospera en suelos encharcados y puede matar los árboles de aguacate tras la infección (Stolzy *et al.,* 1967).

Los árboles de aguacate también son muy sensibles a la salinidad, siendo la raza mexicana la más sensible y la antillana la menos sensible. Mientras que el sodio es excluido por las raíces hasta un cierto nivel, el cloruro se mueve libremente junto con el flujo de transpiración, provocando la quemadura de la punta y la abscisión foliar.

REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

El aguacate es un árbol perennifolio que sigue la demanda evaporativa del ambiente. Estudios en Chile y California indican que un coeficiente promedio de cultivo (K_c) entre 0.7 y 0.72 durante todo el año representa adecuadamente la ET_c del aguacate. Un estudio adicional en California ha sugerido un K_c algo menor de 0.64. Sin embargo, hay conflictos entre las cantidades de riego, tamaño de la copa y la eficiencia de producción (Faber *et al.,* 1995). La Figura 4 muestra que el tamaño de la copa aumenta y el rendimiento por unidad de volumen de copa disminuye a medida que aumenta la fracción de ET_c de 60 a 115 % de los requerimientos. El tamaño de la copa es entonces el factor determinante de la ET_c real, pero los rendimientos se maximizaron en el estudio cuando se utilizó un K_c de 0.64 durante todo el año (Faber *et al.,* 1995).

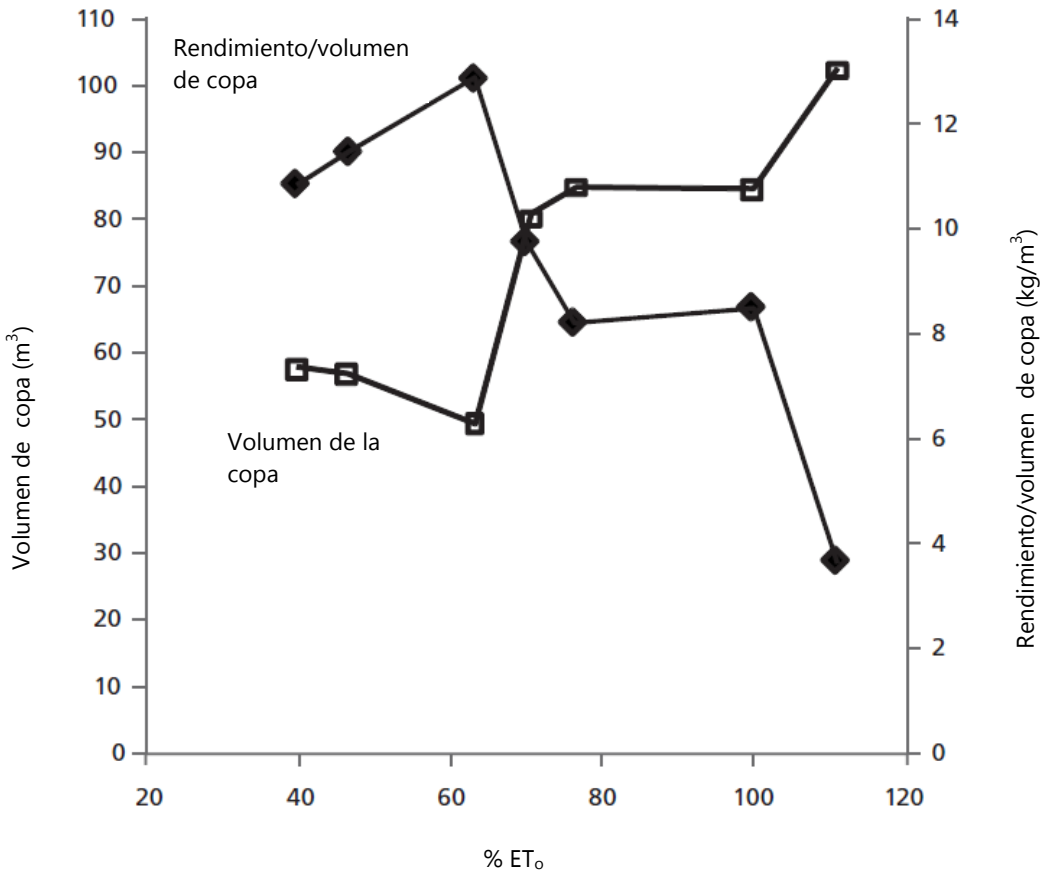
Las precipitaciones suplen parte de los requerimientos hídricos del aguacate; en el centro de Chile los requerimientos brutos anuales de riego varían 800-900 mm, mientras que en las zonas más secas del sur de California pueden alcanzar valores superiores a 1000 mm. Para determinar los requerimientos reales de riego en un área sería necesario realizar un balance de agua que tenga en cuenta la precipitación efectiva y la ETc real.

CALENDARIO DE RIEGO Y RIEGO DEFICITARIO

La sensibilidad extrema a los déficits y excesos hídricos indica que el calendario de riego en el aguacate debe concentrarse en mantener una aireación adecuada y al mismo tiempo evitar los déficits hídricos de los árboles (Lahav y Kalmar, 1983). En esta situación, la frecuencia de riego es una aspecto importante; aplicaciones diarias por goteo o micro-aspersores son las adecuadas en suelos de grano grueso y bien drenados. Sin embargo, el riego cada 2-3 días es más deseable en suelos de textura más pesada, que puedan sufrir condiciones anaeróbicas. Los experimentos en Chile han demostrado que al permitir entre un 50 a 60 % de agotamiento de humedad del suelo entre aplicaciones de riego (cada 5-6 días) el rendimiento y tamaño del fruto no se vieron

afectados, en comparación con aplicaciones más frecuentes (Ferreyra, *et al.,* 2006). Las frecuencias de riego que agotan entre 25-30 % del depósito hídrico del árbol son adecuadas para la mayoría de los suelos, como un compromiso para mantener un suministro adecuado de agua y oxígeno para el sistema radicular del aguacate. En condiciones de riego por goteo, es importante poder lixiviar el exceso de sales fuera de la zona radicular potencial y humedecer un volumen de suelo suficiente, particularmente en suelos poco profundos y de grano grueso. El contenido de aceite del fruto es una característica de calidad importante que se ve afectada negativamente cuando hay un riego inadecuado.

FIGURA 4 Efectos del nivel hídrico aplicado, expresado como una fracción de la ET de referencia (ET_o) sobre el volumen de la copa y sobre el cociente rendimiento-volumen de copa



Toda la evidencia experimental hasta la fecha indica que el RDI no es una práctica recomendable para el riego de aguacates, debido a la alta sensibilidad de los rendimientos comerciales a los déficits hídricos durante la mayor parte de la estación de riego. Por otra parte, el exceso de riego es muy perjudicial, debido a la sensibilidad al encharcamiento y el alto riesgo de infección de enfermedad micótica. Las mejores prácticas de riego del aguacate deben basarse en el suministro de la ET_c en intervalos óptimos, que prevengan los déficits hídricos y proporcionen el oxígeno adecuado al sistema radicular.

BIBLIOGRAFÍA

Faber, B., Apaia, M. y M. Yates. 1995. *Irrigation management of avocado in a California coastal environment.* En: *Proceedings of the World Avocado Congress III;* págs. 189 - 195.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Ferreyra, R., Selles, G., Maldonado, P., Celedon, J. y Torres, A. 2006. *Efecto de la macroporosidad y atmósfera del suelo en el estado hídrico del palto.* V Congreso Internacional de Ingeniería agrícola, 9 - 12 de mayo de 2006, Chillan, Chile; pág. 208.

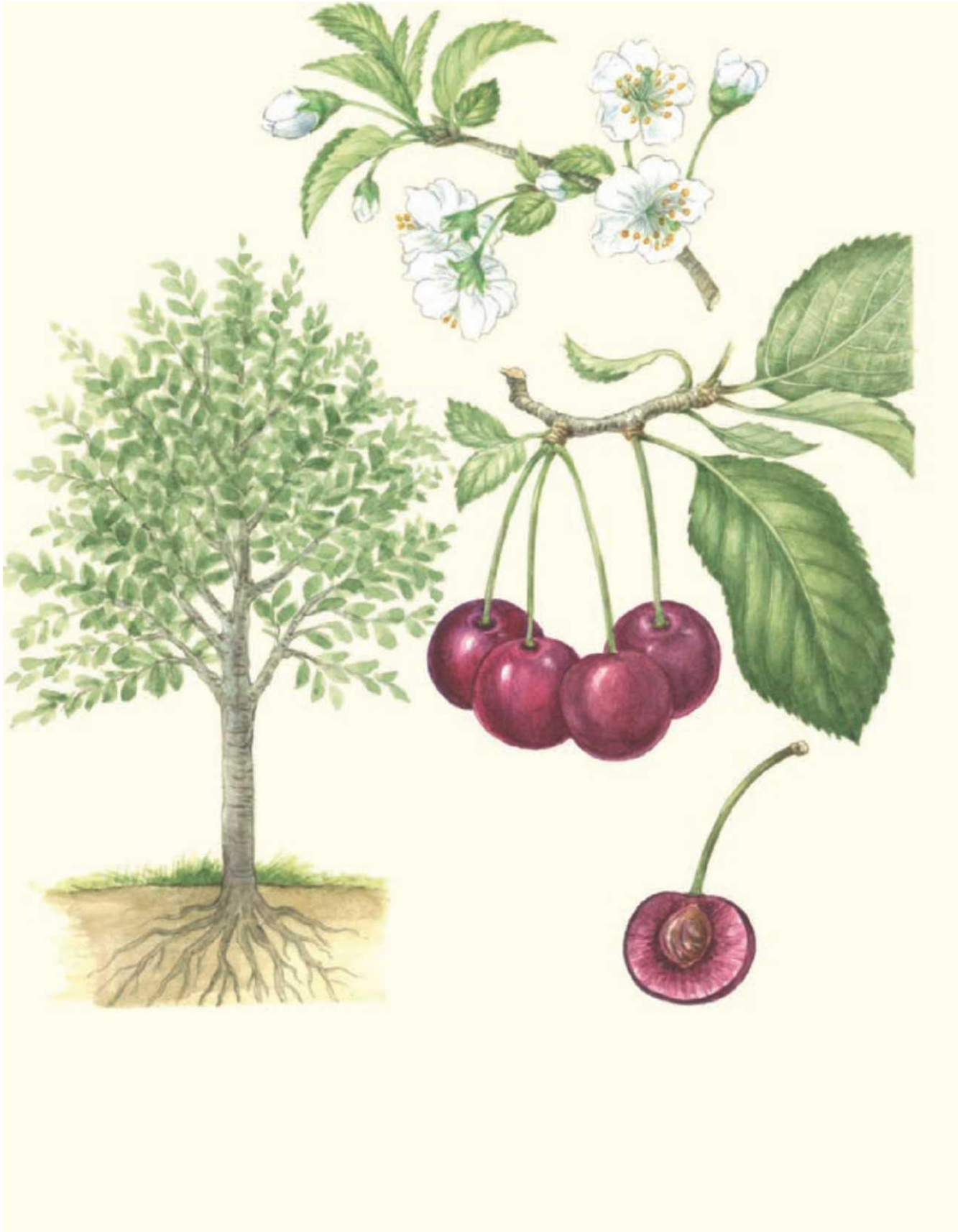
Ferreyra, R., Selles, G., Maldonado, P., Celedon, J. y Gil, P. 2007. Efecto del clima, de las características de la hoja y de la metodología de medición en el potencial hídrico xilemático en palto *(Persea americana* Mill.) *Agricultura Técnica* (Chile) 67(2):182-188

Ferreyra, R. y Selles, G. 2007. *Manejo del suelo y riego en palto.* La Cruz Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín 160; pág. 120.

Lahav, E. y Kalmar, D. 1983. Determination of irrigation regimes for an avocado plantation in spring and autumn. *Australian Journal of Agricultural Research* 34; Págs. 717-724.

Stolzy, L., Zentmyer, G., Klotz, A. y Labanauskas, C. 1967. Oxygen diffusion, water, and Phytophthora cinnamomi in root decay and nutrition of avocados. *American Society for Horticultural Science.* 90:67-76.

Wolstenholme, B. 1986. Energy costs of fruiting as a yield limiting factor. *Acta Horticulturae* 175: 121-126.



Cerezo dulce

Cerezo dulce

AUTOR PRINCIPAL
Jordi Marsal
(IRTA, Lleida, España)

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El cerezo dulce *(Prunus avium* L.) contribuye modestamente a la economía mundial de las especies frutales caducifolias. Sin embargo, la producción de cerezo puede ser crucial a nivel local en regiones especializadas en su cultivo; mientras que puede convertirse en una buena alternativa para otras áreas cuando se desacelera el mercado de los principales árboles frutales, como manzano, durazno o melocotonero y peral. En 2009 había 381 000 ha con un rendimiento promedio mundial de 5.8 ton/ha (FAO, 2011). La Figura 1 presenta las tendencias de producción de los principales países.

El desarrollo de la copa de los cerezos sigue un patrón similar al descrito en el capítulo sobre el durazno o melocotonero. Las flores del cerezo se desarrollan en glomérulos a partir de brotes individuales. Cada brote soporta de dos a cinco flores. Estos brotes pueden nacer lateralmente en brotes individuales o se pueden agrupar brotes cortos de dos años de edad en ramas de dos años. Aunque las flores de cerezo son monopistilo, en veranos muy calurosos muchas forman dos pistilos que resultan en frutos dobles. Se ha argumentado que el estrés hídrico podría desempeñar un papel ayudando a la formación del doble fruto no deseado, como ocurre en los duraznos o melocotoneros, pero existe poca evidencia de esto en los cerezos dulces (Beppu y Kataoka, 1999). Además, las temperaturas del aire también afectan la forma del fruto, que se hace más irregular a temperaturas altas del aire. La copa se puede enfriar utilizando riego por aspersión sobre las copas. La mayoría de las variedades comerciales de cerezo dulce son autoestériles y por lo tanto requieren el uso de polinizadores. Los cerezos son muy vigorosos y las tasas anuales de extensión de los brotes pueden superar 1 m cuando son jóvenes. Los cerezos habitualmente crecen de manera vertical y pueden requerir el uso de portainjertos adecuados para ayudar a controlar el vigor e inducir la aparición temprana de brotes reproductivos. El control del vigor se maneja normalmente con reguladores de crecimiento.

ETAPAS DE DESARROLLO

Las yemas florales del cerezo nacen justo antes del final de la etapa de alargamiento de los brotes y su formación y desarrollo continuará a lo largo de la postcosecha (Flore, 1994). Las flores de cerezo de la siguiente primavera se abrirán antes de la aparición de las hojas. El crecimiento reproductivo se puede dividir en tres etapas de crecimiento aproximadamente, similar al caso del durazno o melocotonero de maduración temprana. La Etapa I comprende el primer mes después de la plena floración y se caracteriza por un rápido incremento del volumen de los frutos, que se produce principalmente por división celular (Figura 2). El grado de actividad en la división celular tendrá un aporte importante en el tamaño final del fruto. En la Etapa II se produce el endurecimiento del hueso y puede coincidir con una desaceleración de la tasa de crecimiento del fruto (Figura 2). Por último, la Etapa III se lleva a cabo alrededor de 20 días antes de la maduración y conduce a un rápido incremento en el tamaño del fruto (Figura 2). Esta es una fase de rápido crecimiento expansivo. Las tres etapas pueden producirse en menos de tres meses, dependiendo de la variedad utilizada y el régimen de temperatura (grados día acumulados) del sitio.

FIGURA 1 Tendencias en la producción de cerezo dulce en los principales países (FAO, 2011).

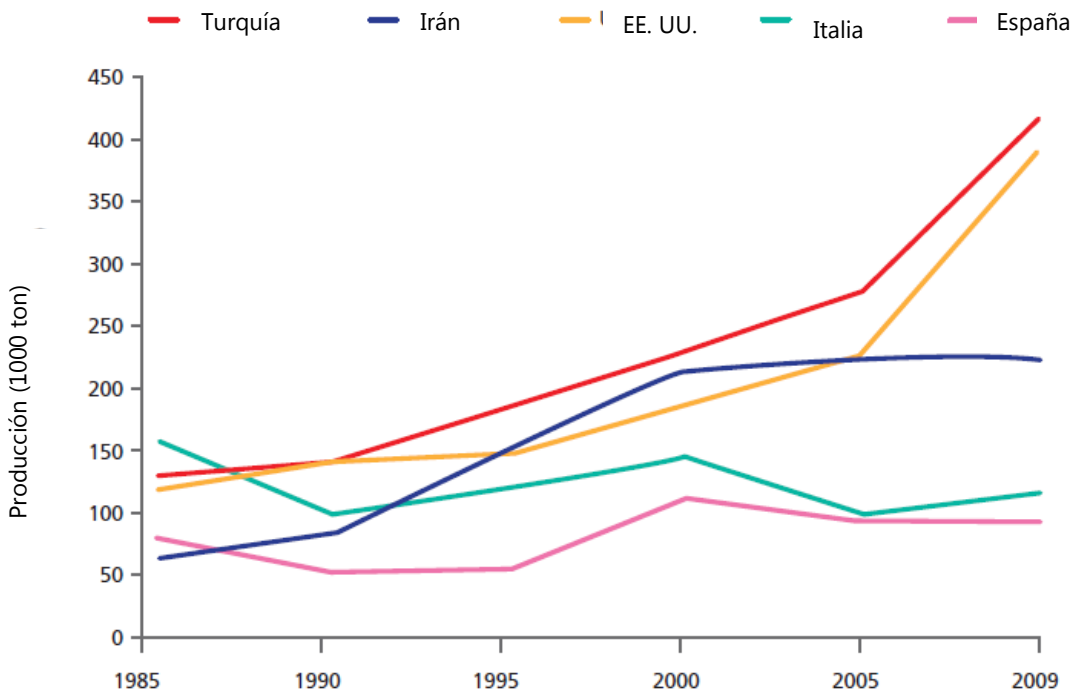
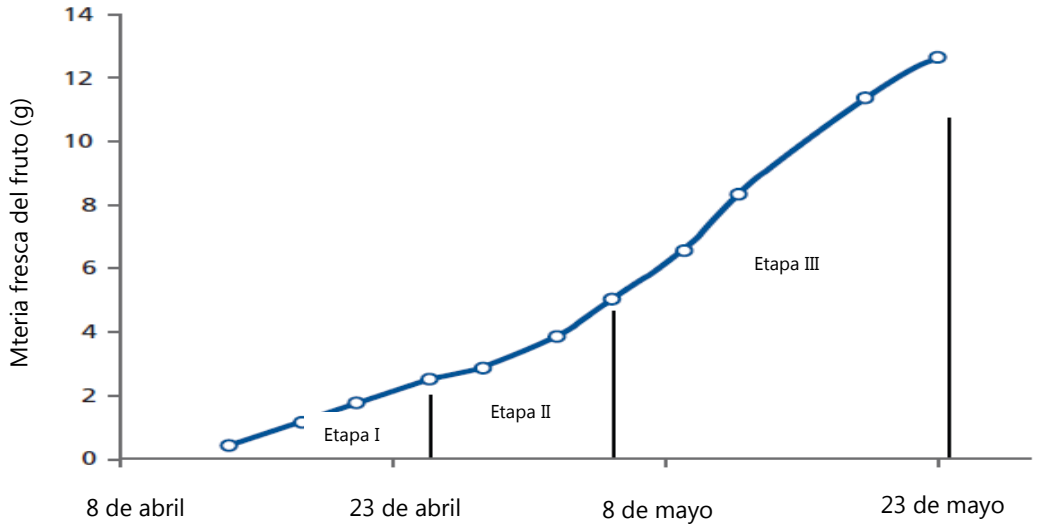


FIGURA 2 Patrones diarios de crecimiento medio individual de biomasa fresca de cerezo Summit en árboles con riego completo. Las etapas de crecimiento del fruto se indican en medio de las líneas verticales.



RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

El momento de estrés hídrico es importante para el cerezo. Las Etapas I y III son cortas y muy sensibles al estrés hídrico. La Etapa II puede ser aún más breve y usualmente se superpone a las Etapas I y III, por esta razón no se debe imponer estrés hídrico en cualquiera de las etapas de crecimiento del fruto. Sin embargo, se puede reducir el riego en ciertas condiciones; es decir, en suelos profundos y con una demanda evaporativa baja, sin inducir estrés hídrico en la planta. La etapa de postcosecha es el periodo de acumulación de reservas. El nivel de reservas de carbohidratos acumulados durante el período de crecimiento anterior afectará al cuajado del fruto en la primavera siguiente, y más aún si las yemas florales se han desarrollado antes que las yemas vegetativas, como en el caso de los cerezos. Los árboles de cerezo dulce no crecen bien sin riego en zonas con estaciones secas y cálidas (Proebsting *et al.,* 1981). El suministro de información precisa sobre la forma de regar los cerezos requiere una buena evaluación del estado hídrico de la planta. El método estándar para evaluar el estado hídrico de la planta en los huertos de cerezos es medir el potencial hídrico del tallo al mediodía (SWP). El déficit de presión de vapor de agua (VPD) tiene un impacto definitivo en las mediciones del SWP en los cerezos, y se deben desarrollar líneas de referencia de VPD para tener en cuenta este efecto. En el cerezo, los valores ψ del tallo por debajo de -1.0 MPa a mediados de estación probablemente indican condiciones de estrés hídrico (Marsal, 2009 y Marsal, 2010). Por lo tanto, el nivel de estrés hídrico en un árbol que tiene un SWP inferior a -1.0 MPa dependerá de las condiciones prevalecientes del VPD. Por ejemplo, un cerezo sin estrés hídrico podría tener un ψ del tallo menor de -0.7 MPa al inicio de la estación (desde finales de abril hasta finales de mayo, en el hemisferio norte), con VPD típicamente bajo (<1.5 kPa) y una copa todavía en desarrollo, (Marsal, 2009 y Marsal, 2010). El nivel de SWP se relaciona con la transpiración del árbol, ya que la conductancia foliar del vapor de agua disminuye a medida que se incrementa el estrés hídrico foliar. La respuesta de la conductancia foliar al SWP en los cerezos sigue una función exponencial estándar (Figura 3); sin embargo, aún no se ha descrito la respuesta de la transpiración del árbol al SWP. En el campo se puede observar una marchitez incipiente de las hojas del cerezo a un SWP de -1.8 MPa. En este valor, casi todos los estomas están cerrados y se acelera el crecimiento vegetativo (Figura 3 - condiciones de mitad de estación). Sin embargo, la marchitez foliar se puede observar con mayor claridad en SWP por debajo de -2.2 MPa.

FIGURA 3 Relación entre el potencial hídrico del tallo al mediodía y la conductancia foliar al mediodía en dos momentos diferentes de su desarrollo estacional (durante la cosecha y postcosecha a principios de septiembre) en cerezo dulce "Summit", obtenida en diferentes tratamientos de riego.

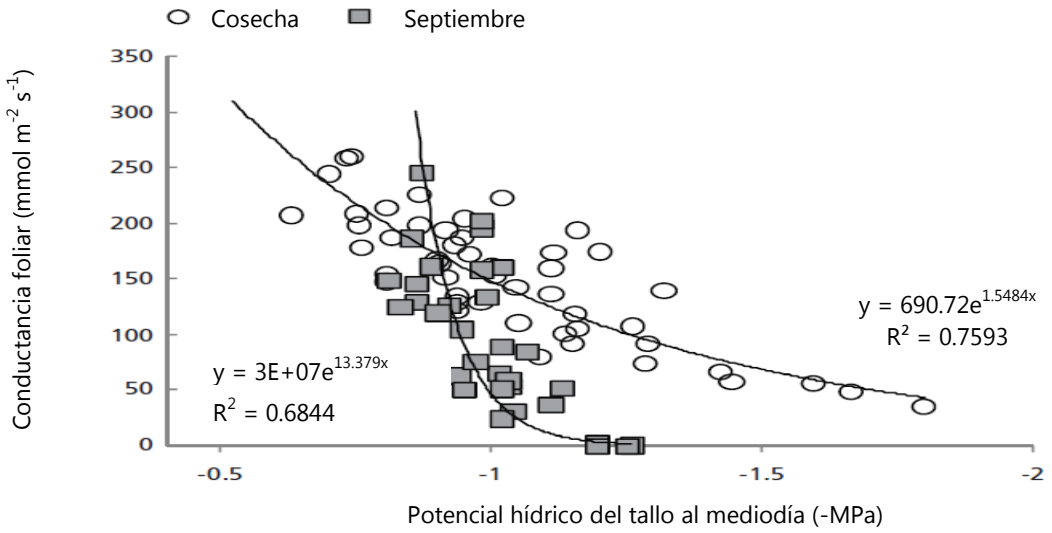


FIGURA 4 Patrones diarios de tasa de asimilación neta de una hoja iluminada, medidos después de la cosecha con IRGA en árboles de cerezo dulce Summit. Los árboles tuvieron riego completo durante la estación.

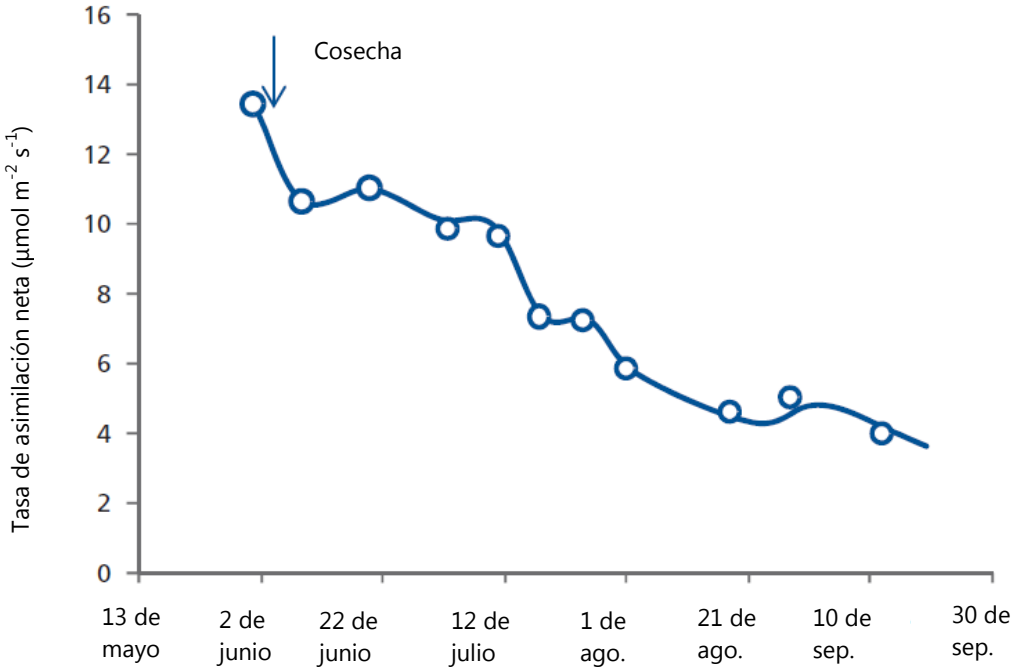
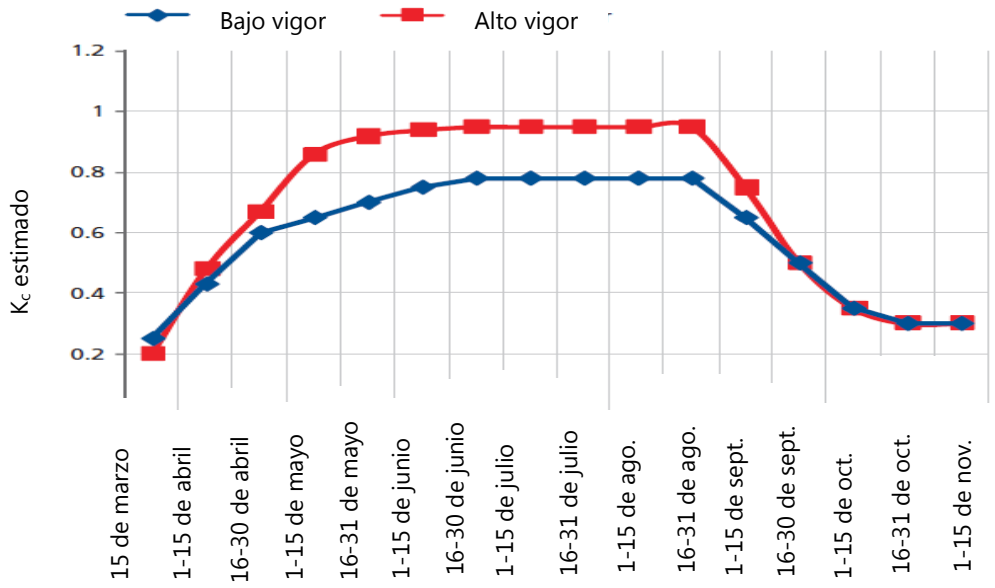


FIGURA 5 Coeficientes de cultivo estimados para árboles maduros de cerezo dulce, cultivados en un sistema de poda de vaso bajo dos condiciones diferentes de crecimiento (alto vigor en cuadrados y bajo vigor en romboides). La radiación interceptada al mediodía por los huertos de alto vigor y bajo vigor a mitad de estación fue 0.54 y 0.45, respectivamente.



Bajo ciertas condiciones de crecimiento, los estomas permanecen ligeramente cerrados al final del período de postcosecha, aún cuando los árboles no sufran estrés hídrico (Figura 3 - Condiciones en septiembre). Esto se ha encontrado en huertos de cerezos cultivados bajo condiciones mediterráneas cálidas. Dado que el mercado del cerezo en estas regiones presiona del uso de variedades de maduración temprana, el periodo postcosecha puede durar más de cuatro meses. Durante este período, se produce poco crecimiento porque el crecimiento del árbol se controla mediante la aplicación de reguladores de crecimiento. Las tasas fotosintéticas foliares netas tienden a disminuir con el tiempo después de la cosecha (Figura 4). Las reducciones en la fotosíntesis están acompañadas usualmente por reducciones en la apertura de los estomas, y en consecuencia, la transpiración también se reduce con el tiempo. A esto se le conoce en la bibliografía sobre fisiología como retroalimentación de la fotosíntesis.

USO DEL AGUA

Aunque se han hecho recientemente trabajos preliminares de creación de modelos de transpiración para cerezos (Antunez, 2006), la bibliografía carece de reportes específicos de mediciones de valores de ET_c o K_c en cerezos. Se puede llegar a una aproximación de los requerimientos de riego del cerezo mediante el uso de la información desarrollada para los árboles de durazno o melocotón (véase la Sección sobre durazno o melocotonero), donde el K_c se relaciona con la radiación interceptada por los árboles al mediodía. La Figura 5 proporciona un ejemplo de la evolución estacional de K_c, en donde se midió la radiación interceptada por el cerezo cada dos semanas hasta mediados de agosto. Se asume una disminución constante de K_c hasta mediados de agosto. Esta disminución de K_c se debe al proceso de muerte regresiva foliar, pero también al efecto de la regulación descendente de la fotosíntesis antes mencionado, que ya puede ser evidente a finales de julio (Figura 5). En la Figura 5 se consideran dos condiciones de vigor de árbol diferentes, y los efectos de la radiación interceptada por el cultivo y el K_c estimado son evidentes. Las condiciones de bajo vigor tuvieron un K_c notablemente menor, resultando una reducción del 18 % en los requerimientos hídricos anuales para las condiciones de la cuenca del Ebro, España (Marsal, 2010). Esto enfatiza la necesidad de ajustar los valores de K_c a las condiciones específicas de la huerta.

REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

La aplicación del RDI actualmente está muy extendida en algunas regiones, junto con el uso de reguladores de crecimiento. Sin embargo, raramente se utiliza el RDI antes de la cosecha porque, además de reducir el crecimiento y el tamaño final del fruto (Werenfels, 1967), también puede aumentar el agrietamiento si se alivia el estrés durante la maduración (Sekse, 1995). Es más común aplicar el RDI después de la cosecha. La aceptación del uso del RDI postcosecha por parte del cultivador se debe a que disminuye el sombreado interno del árbol y controla el vigor excesivo. Sin embargo, el riego deficitario se aplica con frecuencia después de la cosecha, en ausencia de recomendaciones formuladas con base en investigaciones. Por ejemplo, el riego se reduce normalmente en ciertas áreas hasta la marchitez visual de las hojas, sin tener en cuenta los posibles efectos de arrastre en la siguiente estación. A partir de los pocos reportes de investigaciones publicados se puede inferir que, en determinadas condiciones, el déficit hídrico postcosecha puede afectar negativamente la calidad del cerezo en la siguiente estación, y un estrés hídrico excesivo agrava este problema. Un estudio sobre el RDI postcosecha en cerezo dulce New Star, cultivado en el clima semiárido de Cataluña, España, encontró una relación lineal significativa entre la reducción de la firmeza del cerezo y los sólidos solubles con el potencial hídrico del tallo a mediodía promedio experimentado durante periodo de postcosecha anterior (Marsal, 2009). Otro tema relacionado con el uso de RDI postcosecha es la posibilidad de aplicar un estrés hídrico excesivo y afectar negativamente el cuajado de fruto y la carga de frutos en la próxima estación, como se ha reportado para el durazno o melocotonero y el almendro. En un estudio reciente sobre el cerezo Summit, un tratamiento RDI postcosecha, en el cual se recibió el 50 % del agua suministrada a un

tratamiento de control, redujo el cuajado de fruto y la carga de frutos en la siguiente estación (Marsal, 2010). Sin embargo, la presencia de posibles reducciones del rendimiento en la siguiente estación, después de un tratamiento de RDI postcosecha, dependerá de si se utiliza aclareo del cerezo para mantener el tamaño del fruto (Marsal, 2010). No obstante, si se mantiene el estrés hídrico durante el periodo postcosecha por encima de -1,5 MPa en el potencial hídrico del tallo a mediodía, pueden lograrse grandes ahorros de hasta 40 % en el agua utilizada en un control con riego completo durante el periodo postcosecha, sin tener un impacto notablemente negativo en el rendimiento y calidad del fruto. Evitar un estrés hídrico más severo que un cierto nivel (es decir, -1.5 MPa) implica que se debe ajustar la reducción del riego con el tiempo y sólo se debe mantener una tasa de riego fijo durante un cierto período para evitar sobrepasar dicho umbral del estado hídrico del árbol. Por esta razón se deben aplicar con precaución las reducciones significativas del riego durante el periodo postcosecha. También se puede reducir el riego durante el periodo postcosecha a tasas más bajas (es decir, 80 % del riego completo). El uso del 80 % del riego completo durante el periodo postcosecha produjo un ahorro de hasta 15 % del agua anual aplicada, sin que se presentarán efectos perjudiciales sobre el rendimiento y calidad del fruto (Tabla 1) (Marsal, 2009 y Marsal, 2010), aunque la investigación indicó que la calidad del cerezo y las respuestas del rendimiento al RDI dependen de la variedad. Por lo tanto se requiere de más investigación antes de hacer evaluaciones fiables para cada condición específica de crecimiento.

TABLA 1 Estrategias sugeridas de RDI postcosecha para los diferentes escenarios suministro de agua disponibles de 690 a 430 mm. Los datos meteorológicos corresponden al valle del Ebro (noreste de España) y los K_c corresponden a los presentados en la Figura 2 para condiciones de crecimiento con alto vigor.

	ET_c potencial	Req. hídricos	RDI-Postcosecha (580 mm)		RDI-Postcosecha (430 mm)	
	(mm)	(mm)	Tasa de riego (%)	(mm)	Tasa de riego (%)	(mm)
15-30 de marzo	9	10	100	10	100	10
1-15 de abril	24	26	100	26	100	26
16-30 de abril	34	31	100	31	100	31
1-15 de mayo	50	42	100	42	100	42
16-31 de mayo	49	40	100	40	100	40
1-15 de junio	66	72	80	58	50	36
16-30 de junio	80	88	80	70	50	44
1-15 de julio	76	78	80	62	50	39
16-31 de julio	81	89	80	71	50	44
1-15 de ago.	70	77	80	62	50	39
16-31 de ago.	68	75	80	60	65	49
1-15 de sept.	38	42	80	34	50	21
16-30 de sept.	23	25	80	20	50	12
1-15 de oct.	11	0	80	0	50	0
16-31 de oct.	7	0	80	0	50	0
1-15 de nov.	5	0	80	0	50	0
Total	**690**	**696**		**587**		**434**

BIBLIOGRAFÍA

Antunez A., Stockle, C. y Whiting, M.D. 2006. A gravimetric lysimeter for modelling transpiration in young cherry trees. *Acta Horticulture* 707:127-133.

Beppu, K. y Kataoka, I. 1999. High temperature rather than drought stress is responsible for the occurrence of double pistils in 'Satohnishiki' sweet cherry. *Scientia Horticulturae* 81:125-134.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Flore, J.A. 1994. Stone fruit. En: Schaffer, B. y Andersen, P.C., eds. *Handbook of environmental physiology of fruit crops*. Boca Ratón, Florida, EE. UU., CRC Press, Inc.; págs. 233-270

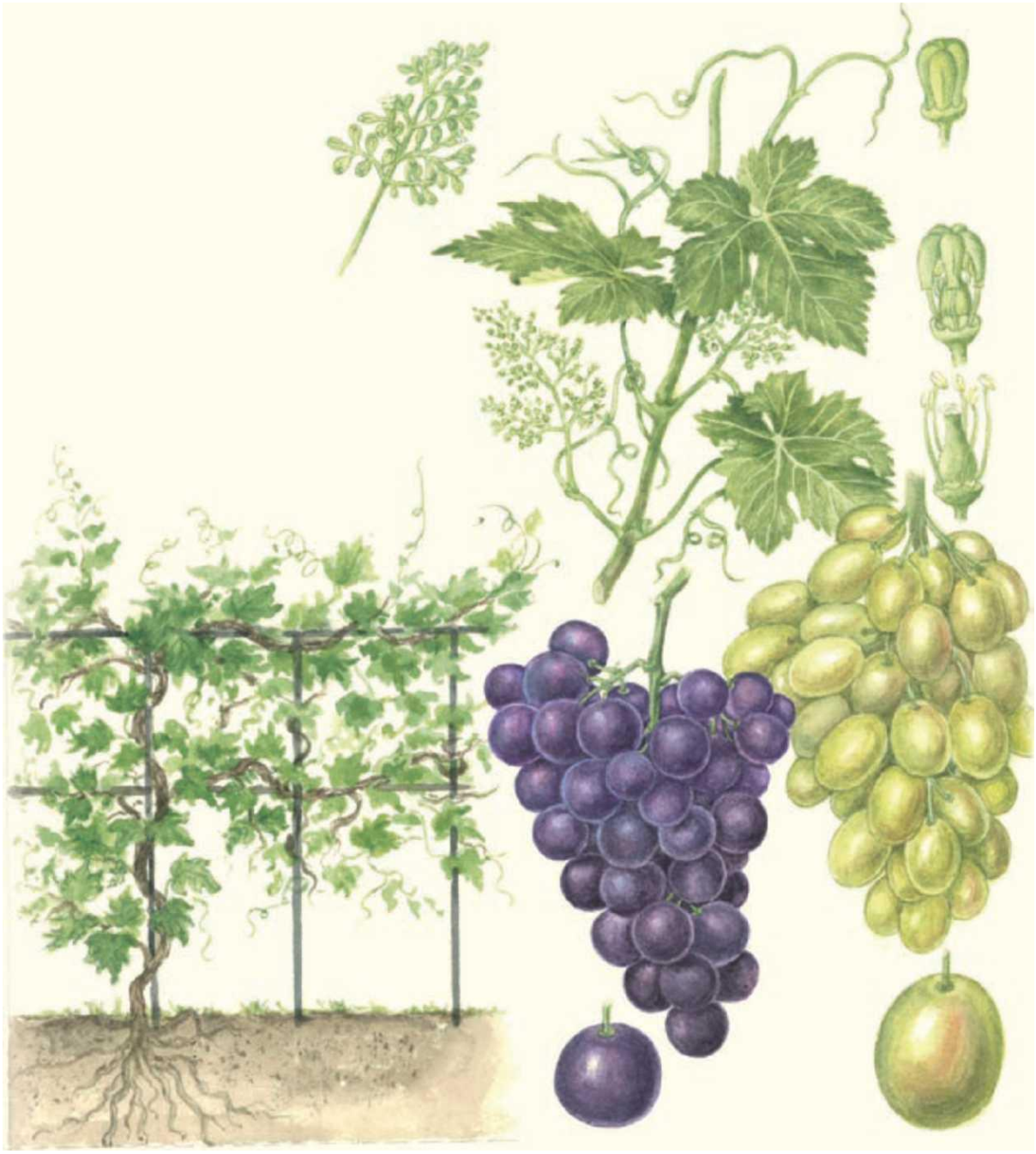
Marsal, J., López, G., Arbones, A., Mata, M., Vallverdu, X. y Girona, J. 2009. Influence of postharvest deficit irrigation and pre-harvest fruit thinning on sweet cherry (cv. New Star) fruit firmness and quality. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 84:273-278.

Marsal, J., López, G., J. del Campo, Mata, M., Arbones, A. y Girona, J. 2010. Postharvest regulated deficit irrigation in Summit sweet cherry: fruit yield and quality in the following season. *Irrigation Science* 28: 181-189

Proebsting, E.L., Middleton, J.E. y Mahan, M.O. 1981. Performance of bearing cherry and prune trees under very low irrigation rates. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 106: 243-246.

Sekse, L. 1995. Cuticular fracturing in fruit of sweet cherry *(Prunusavium* L.) resulting from changing soil water contents. *Journal of Horticultural Science* 63:135-141.

Werenfels, L.F., Uriu, K., Paul, H. y Charles, F. 1967. Effects of preharvest irrigation on cherry fruit size. *California Agriculture* 21(8):15-16.



Vid

Vid

AUTORES PRINCIPALES
Víctor O. Sadras
(SARDI Waite Campus, Australia)
Heinz R. Schultz
(GRC, Geisenheim, Alemania)

AUTORES COLABORADORES
Joan Girona,
Jordi Marsal
(IRTA, Lleida, España)

AGRADECIMIENTOS
La investigación de VS sobre la fisiología de la vid es financiada por el *River Murray Improvement Programme* y la *Australian Grapes and Wine Research and Development Corporation*

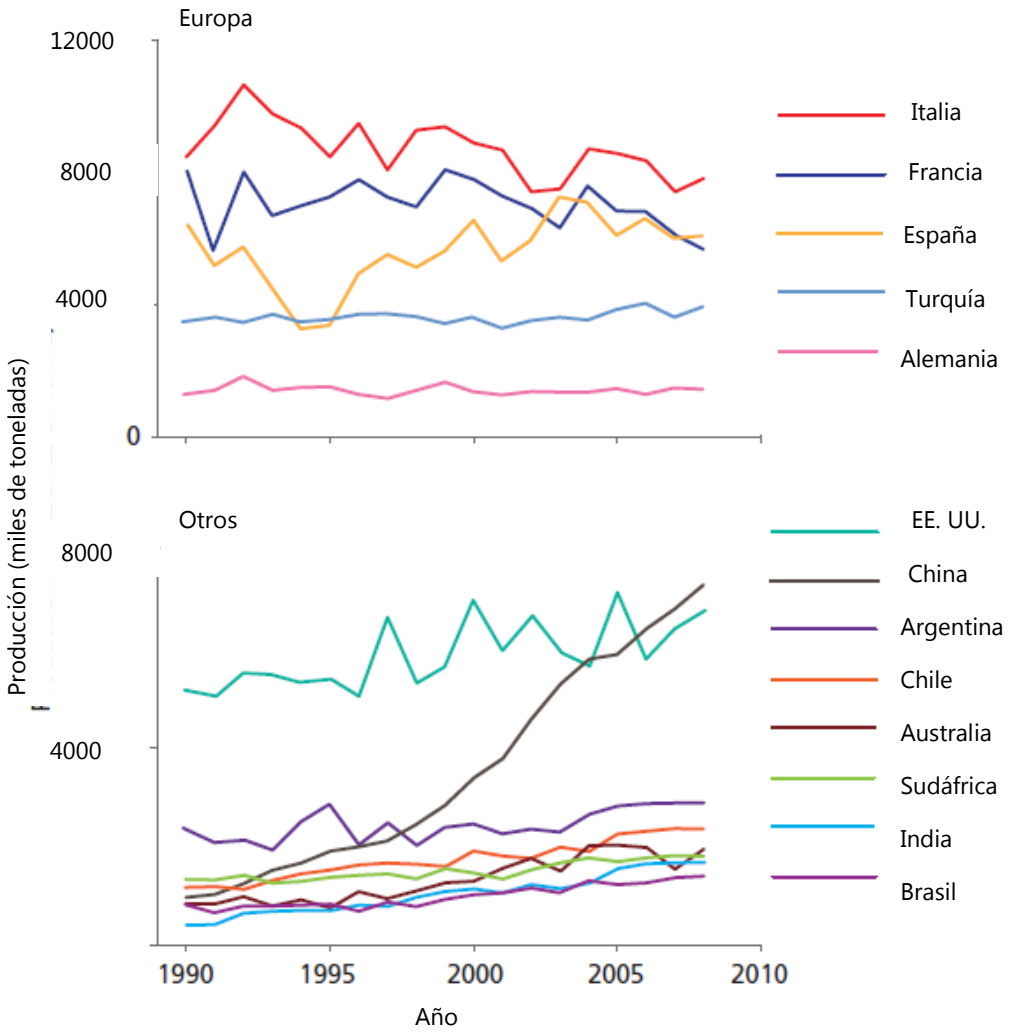
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La vid (para uva de vino) es un cultivo caducifolio de larga vida que se planta tradicionalmente en un rango latitudinal entre 30° y 50°. El rango geográfico de vid incluye los países europeos tradicionales, Italia, Francia y España, los cuales representan la mayor parte de la producción mundial, y otros países donde la industria ha alcanzado diferentes grados de desarrollo (Figura 1). El cultivo se está ampliando hacia nuevas áreas en países con una industria incipiente; en el año 2000 se aceptó a Dinamarca como un país con producción comercial de vino dentro de la Unión Europea, y el número de miembros de la Asociación danesa de viticultores ascendió a 1400 en 2009 (Bentzen y Smith, 2009). Tonietto y Carbonneau (2004) describieron los macroclimas para la viticultura a nivel mundial utilizando tres índices: el balance de agua del suelo durante el ciclo de crecimiento; la radiación solar y las condiciones de temperatura; y la temperatura nocturna durante la maduración en relación con los requerimientos de la variedad, la vendimia y la calidad del vino.

La rentabilidad de la industria vitivinícola está relacionada con el volumen de producción y el valor por unidad de volumen. La contribución relativa de estos dos factores varía desde empresas que se especializan en un enfoque de grandes volúmenes a aquellas que se centran en un bajo volumen y alto valor. Los conflictos entre el alto rendimiento y los rasgos de la baya en relación con la calidad del vino no son universales, pero son comunes y pueden limitar la maximización dual de volumen y el valor por unidad del volumen de producción. El conflicto entre el rendimiento y la calidad subyace a las regulaciones en algunos países europeos, donde no se permite la aplicación de riego para la producción de vino de alta calidad. Asumiendo que los vinos que atraen precios más altos a menudo provienen de vides que producen rendimientos de bajos a moderados, la pregunta crucial desde el punto de vista del riego es cómo manejarlo para aprovechar el beneficio del alto rendimiento mientras se logra un nivel de calidad que maximice la rentabilidad económica.

Por lo tanto, si bien la esencia del cultivo de la vid radica en la banda latitudinal de temperatura, existe una diversidad creciente de ambientes que, junto con los diversos objetivos de producción y los conflictos potenciales, dictaminan prácticas opuestas de manejo del agua en el viñedo. Adicionalmente, las industrias vitivinícola y de la uva operan en un contexto global de competencia por el uso de los escasos recursos para fines agrícolas y de otro tipo, principalmente el suelo, el agua y la energía, las crecientes preocupaciones ambientales, y cambios en las condiciones climáticas y en los mercados.

FIGURA 1 Producción de uva entre 1990 y 2008 (FAO, 2011).



ETAPAS DE DESARROLLO CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

Descripción general

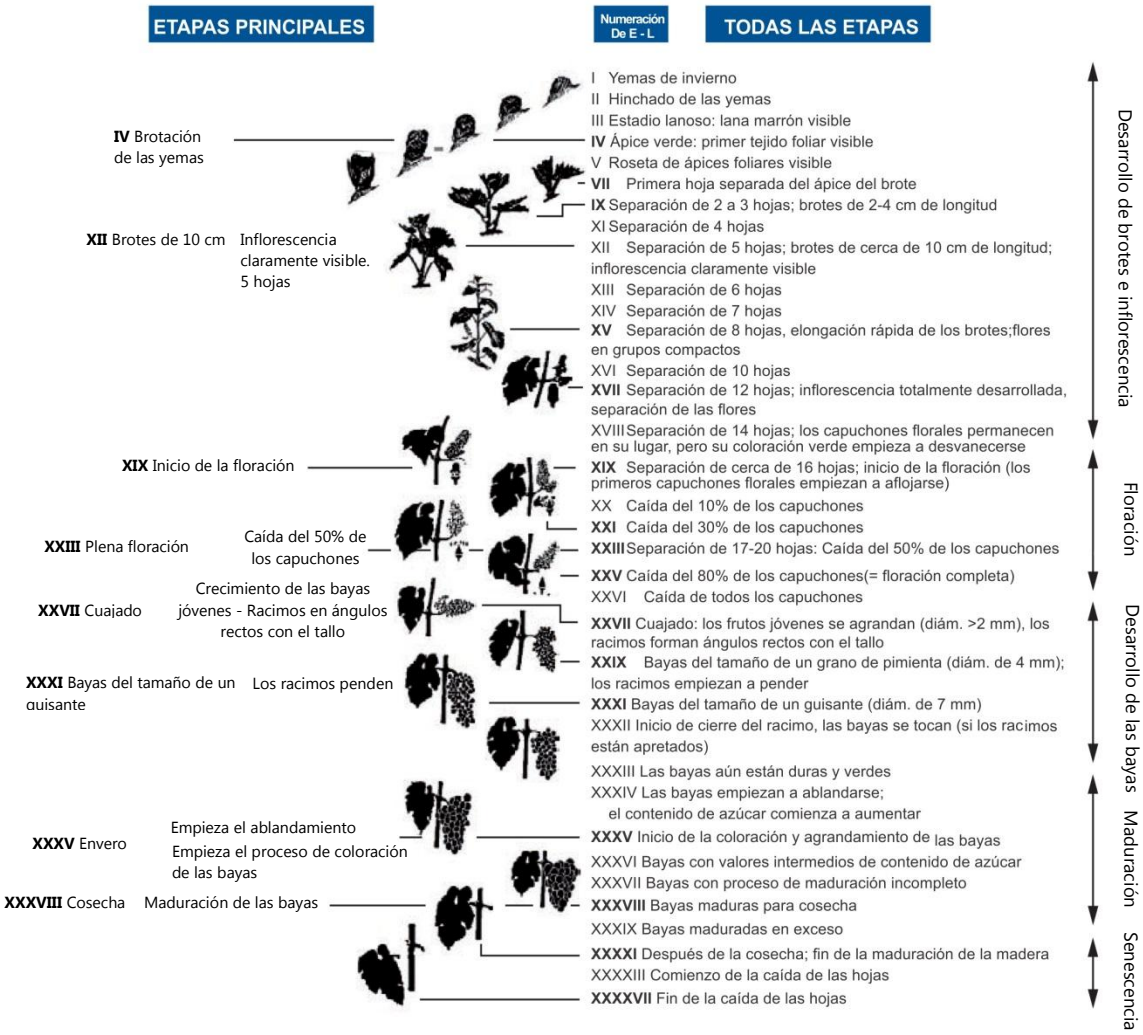
El ciclo anual de la vid para uva de vino en ambientes templados y fríos incluye una fase de latencia y una fase activa de desarrollo y crecimiento vegetativo y reproductivo. En ambientes tropicales, la actividad fisiológica de la vid es continua durante todo el año. La Figura 2 muestra una escala que explica las etapas fenológicas en ambientes templados, y la Tabla 1 ilustra el rango de componentes vegetativos y reproductivos clave de la vid en viñedos con objetivos opuestos de rendimiento.

Después de un período de hibernación, donde las yemas vegetativas y reproductivas permanecen dormantes, el tejido foliar visible marca el inicio de la brotación de las yemas (Etapa IV en la Figura 2). El crecimiento inicial de los brotes depende de las reservas de la planta y es lento al principio, y

luego se acelera hacia finales de la primavera. De manera paralela al crecimiento de las raíces y los brotes vegetativos, dos importantes procesos reproductivos tienen lugar: (a) reanudación del crecimiento de los primordios de inflorescencia que se iniciaron en la estación previa, ramificación, elongación de las ramas y formación de las flores; y (b) generación de un nuevo conjunto de yemas reproductivas e iniciación de la diferenciación que se completará en la siguiente estación (Dunn, 2005). La cantidad de racimos es generalmente la mayor fuente de variación relacionada con la estación y la ubicación en el rendimiento de la vid (Tablas 1 y 3).

Las inflorescencias de la estación actual se hacen visibles varias semanas después de la brotación de las yemas. La caída de los capuchones florales y la liberación del estambre marcan la etapa de floración plena (Etapa 23 en la Figura 2). La cantidad de bayas por racimo, el segundo componente del rendimiento, depende de la cantidad de flores y del cuajado, lo cual puede verse particularmente afectado en algunas combinaciones particulares de ubicación, estación y variedad; por ejemplo, Chardonnay en condiciones de clima frío. Sin embargo, al igual que en la mayoría de las plantas con flores, únicamente una fracción de flores produce fruto, generalmente 20-50 % en el caso de la vid.

FIGURA 2 Principales etapas en la escala fenológica modificada de Eichhorn y Lorenz (E-L) (tomado de Coombe 1995).



Adaptación de Elch horn y Lorenz 1977 por B.G. Coombe

TABLA 1 Componentes vegetativos y reproductivos clave en viñedos de bajo y alto rendimiento (Pearce y Coombe, 2005).

Componente	Bajo	Alto
Rendimiento (kg m^{-2})	0.20	5.0
Volumen equivalente de vino de mesa (litros m^{-2})	0.12	3.0
Peso de la poda (kg m^{-2})	0.03	1.0
Índice de área foliar (m^2 m^{-2})	0.50	5.0
Número de nudos (m^{-2})	3	30
Número de brotes (m^{-2})	2.5	25
Número de racimos (m^{-2})	5	50

El crecimiento de las bayas sigue un patrón característico sigmoidal doble; está dominado por la división celular en las primeras dos semanas posteriores a la floración y por la expansión celular en lo sucesivo. La primera trayectoria sigmoidal alcanza un nivel estable en sincronía con el tamaño completo de la semilla en las variedades con semillas. Luego de una fase intermedia de retraso, el inicio de la segunda fase sigmoidal se caracteriza por el ablandamiento de las bayas, acumulación de azúcares, disminución de la concentración de ácidos y acumulación de pigmentos en la piel de las variedades con color. Esta etapa se denomina envero (Etapa 35 en la Figura 2) y es muy sensible a los factores ambientales. Por ejemplo, en bayas físicamente limitadas, el umbral de presión de turgencia celular = 0.1 MPa, asociado al envero, bajo las condiciones experimentales de Matthews *et al.* (2009), se retrasó por dos semanas con respecto a los controles y se registró un retraso similar para el inicio de la acumulación de azúcares. La segunda etapa sigmoidal termina en un punto estable que corresponde al tamaño máximo de la baya específico de la variedad y el ambiente. Variedades como Shiraz, las cuales a menudo presentan una deshidratación considerable de las bayas al final de la estación, se caracterizan por una disminución en el peso de fruto fresco, en lugar de un nivel estable al final de la segunda fase (Sadras y McCarthy, 2007). Esta disminución también se observa cuando la cosecha se retrasa para aumentar los rasgos de las bayas asociados con la calidad del vino, a costa del peso del fruto y el rendimiento. La madurez de la cosecha (Etapa 38 en la Figura 2) se define mediante criterios vitivinícolas para la composición del fruto; a menudo se especifica en términos de concentración de azúcar o relación de azúcar y ácido en climas más fríos, pero los criterios de color y sabor complementan estas definiciones sencillas. Las variables ambientales, incluidas temperatura, radiación y disponibilidad de agua durante el crecimiento y la maduración de las bayas, pueden tener un impacto considerable en la composición de las bayas y por ende, en los atributos del vino. Este aspecto importante de la biología de las bayas, desde el punto de vista de la viticultura, supera el alcance de esta sección; pero se recomienda a los lectores consultar los estudios de Coombe y Iland (2005), Conde *et al.* (2007) y Dai *et al.* (2010). En una sección posterior nos concentraremos en los efectos de los déficits hídricos en las bayas y los atributos del vino.

Diferencias en el desarrollo según la variedad

El plan de desarrollo que se describió en la sección anterior se aplica para todas las variedades de vid. No obstante, el momento en que ocurre cada etapa crítica y la duración resultante de la estación se controlan genéticamente y se modulan mediante el ambiente, principalmente la temperatura. Es posible que algunas etapas fenológicas también sean sensibles a las prácticas de manejo; por ejemplo, el momento en que se realice la poda puede modificar el inicio de la

brotación de las yemas, y la manipulación de la relación copa-fruto por defoliación o remoción de racimos puede retrasar o agilizar la maduración bajo algunas condiciones.

Existen dos diferentes aspectos relacionados con el patrón fenológico dependiente de la variedad. Uno de ellos es el tiempo promedio para alcanzar una etapa determinada; por ejemplo, Gladstones (1992) clasificó las variedades en ocho grupos según el momento de su maduración (Tabla 2). El otro aspecto es la plasticidad del desarrollo fenológico, definida como el grado de respuesta a las condiciones ambientales en términos de fenología. Cabernet franc y Riesling, por ejemplo, tienen requerimientos comparables para la maduración, aprox. 1200-1250 oCd (Tabla 2), pero bajo las condiciones del sur de Australia, Cabernet franc fenológicamente tiene más plasticidad que Riesling (Figura 3), debido a que su fecha de floración varía más que la de Riesling en diferentes ambientes. El momento efectivo en que ocurren las etapas fenológicas críticas, la duración total de la estación y la plasticidad fenológica son rasgos críticos en la misión de sincronizar las variedades y los ambientes, incluido el manejo preciso del riego.

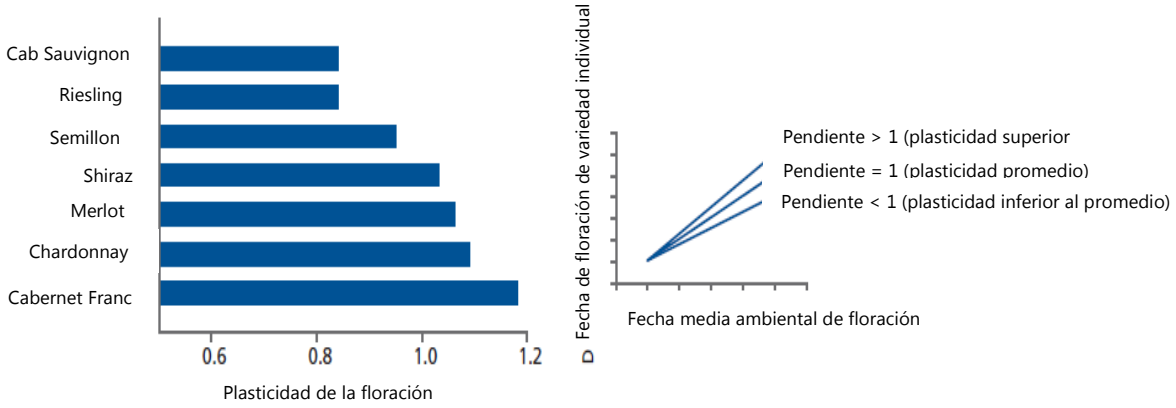
TABLA 2 Grupos de maduración y tiempo térmico* efectivo biológicamente desde el 1.° de octubre (hemisferio sur) o el 1.° de abril (hemisferio norte) hasta la maduración de las uvas de vino de acuerdo con Gladstones (1992).

Grupo de maduración (ºCd hasta la maduración)	Vino tinto	Vino blanco o rosado
1 (1050)		Madeleine, Madeleine-Sylvaner
2 (1100)	Azul Portugal	Chasselas, Müller-Thurgau, Siegerrebe, Bacchus, Pinot Gris, Muscat Ottonel, Red Veltliner, Pinot Noir, Meunier
3 (1150)	Pinot Noir, Meunier, Gamay, Dolcetto, Bastardo, Tinta Carvalla, Tinta Amarella	Traminer, Sylvaner, Scheurebe, Elbling, Morio-Muskat, Kerner, Green Veltliner, Cardonnay, Aligoté, Melon, Sauvignon Blanc, Frontignac, Pedro Ximenes, Verdelho, Sultana
4 (1200)	Malbec, Durif, Zinfandel, Schiava, Tempranillo, Tinta Madeira, Pinotage	Sémillon, Muscadelle, Riesling, Welschriesling, Furmint, Leanyka, Harslevelu, Sercial, Malvasia Bianca, Cabernet Franc
5 (1250)	Merlot, Cabernet Franc, Shiraz, Cinsaut, Barbera, Sangiovese, Touriga,	Chenin Blanc, Folle Blanche, Crouchen, Roussanne, Marsanne, Viognier, Taminga, Cabernet Sauvignon
6 (1300)	Cabernet Sauvignon, Ruby Cabernet, Mondeuse, Tannat, Kadarka, Corvina, Nebbiolo, Ramisco, Alvarelhão, Mourisco Tinto, Valdiguié	Colombard, Palomino, Dona Branca, Rabigato, Grenache
7 (1350)	Aramon, Petit Verdot, Mataro, Carignan, Grenache, Freisa, Negrara, Grignolino,	Muscat Gordo Blanco, Trebbiano, Montils

	Souzão, Graciano, Monastrell	
8 (1400)	Tarrango, Terret Noir	Clairette, Grenache Blanc, Doradillo, Biancone

** calculado usando una temperatura base de 10 °C y un corte en la temperatura mensual promedio de 19 °C.*

FIGURA 3 Plasticidad de la floración de las variedades de vid en el sudeste de Australia. La plasticidad se calcula como las pendientes de las líneas que relacionan la fecha de floración de cada variedad y la fecha media de floración del ambiente (recuadro). Adaptación basada en Sadras *et al.* (2009).



Desarrollo de la vid y tendencias de calentamiento

La fenología está determinada por la temperatura; por consiguiente, las tendencias de calentamiento registradas desde mediados del siglo XX se reflejan en los cambios fenológicos de la vid, los cuales tienen gran importancia para el manejo de la vid y la elaboración del vino (Duchene *et al.,* 2010). Varios estudios han evaluado las tasas de cambio asociadas con las variables fenológicas en los hemisferios norte y sur (Wolfe *et al.,* 2005 y Duchene y Schneider, 2005). No es sorprendente que las vides se desarrollen más rápidamente en condiciones cálidas, pero las tasas reales requieren análisis. Dos aspectos importantes de estas respuestas son la sensibilidad diferencial de las fases fenológicas particulares y la disociación potencial de los atributos de las bayas. Por ejemplo, la acumulación rápida de azúcar que no se compensa completamente con la cosecha temprana redunda en mayor contenido de azúcar en las bayas y mayor potencial de alcohol, según se sugirió para Riesling en Alsacia y para Cabernet Sauvignon y Shiraz en Australia (Petrie y Sadras, 2008 y Duchene y Schneider, 2005).

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

Descripción general: patrones de precipitación y desarrollo del déficit hídrico

El patrón de precipitación y la capacidad de almacenamiento de agua suelo son factores determinantes del patrón temporal de suministro hídrico y déficit hídrico en sistemas de secano, como se ilustra al comparar regiones vitivinícolas con precipitación en invierno y verano. Aschmann (1973) resaltó la concentración de precipitación en la mitad invernal del año como el elemento más distintivo del clima mediterráneo y propuso el 65 % de la precipitación anual en este período como un límite en su definición. Las uvas de vino se cultivan en climas de tipo mediterráneo en el sur de Europa, California y regiones de Sudáfrica, Chile y Australia. La precipitación en invierno a menudo garantiza el almacenamiento de agua en el suelo para permitir el crecimiento temprano, mientras que un patrón de sequía terminal es típico de vides de secano en ambientes mediterráneos. Los

déficits hídricos temporales son comunes en regiones templadas de Europa occidental y central con precipitación en verano, donde los viñedos se establecen en suelos poco profundos o suelos con baja capacidad de retención de agua. En estos ambientes, los ritmos de precipitación y la capacidad limitada de amortiguación de los suelos determinan ciclos marcados de humedad y sequía. La frecuencia, duración e intensidad de los períodos secos en estos ciclos es altamente impredecible. Debido a las tendencias de sequía y a la confiabilidad del suministro de vino de calidad que exigen los mercados globalizados, es probable que el riego suplementario aumente incluso en estas áreas que tradicionalmente se han sometido a producción de secano.

La Figura 4 compara el estado hídrico de las plantas de vides de secano en climas y suelos diferentes dentro de una región dada; también se incluyen ejemplos de vides con aplicación de riego. Queda claro que el riego estabiliza el potencial hídrico foliar antes del amanecer en un nivel que rara vez se encuentra de forma natural durante el período de crecimiento en estas áreas, incluidas las regiones de climas muy fríos del valle del Loira en Francia y el Rheingau en Alemania. La Figura 4 también muestra que las diferencias en el estado hídrico entre los viñedos de cada una de las regiones podrían ser mayores que las diferencias en el estado hídrico general entre zonas de climas diferentes. Asimismo, es claro que la variación en el estado hídrico durante una estación particular aumenta de climas cálidos y secos a aquellos con precipitación en verano, debido a la irregularidad de la frecuencia e intensidad de la precipitación en verano de este último.

Crecimiento y rendimiento

Las respuestas del cultivo al déficit hídrico dependen de la intensidad, la duración y el momento en que ocurra el estrés. Se ha reportado variación intraespecífica para los rasgos principales relacionados con el desarrollo, agua y economía del carbono de la vid, incluidos fenología, susceptibilidad al embolismo, densidad estomática y conductancia estomática en respuesta al contenido de humedad del suelo y al déficit de presión de vapor, biomasa por unidad de transpiración, partición de materia seca y respuesta del portainjerto al déficit hídrico, la salinidad y las enfermedades que se transmiten por el suelo.

Al igual que en la mayoría de los cultivos, la expansión de los tejidos en la vid es más sensible al déficit hídrico que a la regulación estomática y al intercambio de gases (Figura 5a-d). Los efectos de la intensidad y duración del estrés hídrico se han integrado en los índices de estrés basados en, por ejemplo, el estado hídrico del suelo (Figura 5a-d), el estado hídrico de la planta o la temperatura del dosel (Figura 6). El Cuadro 2 resume las técnicas utilizadas para supervisar el estado hídrico de las vides, y abajo analiza la respuesta del rendimiento al déficit hídrico desde la perspectiva de las funciones de producción.

Debido al programa de desarrollo de la planta y a la definición del rendimiento durante dos estaciones consecutivas, debemos tener en cuenta los efectos de los déficits hídricos de la estación previa en el crecimiento y rendimiento de la estación actual. Se reportaron todas las respuestas posibles, principalmente: los efectos del déficit hídrico en la estación 1 tuvieron un impacto negativo, neutral o positivo en el resultado reproductivo de la estación 2 (Williams y Matthews, 1990). Esta diversidad de respuestas es parcialmente el resultado de las diferencias en la sensibilidad según la variedad; el momento en que ocurra el déficit hídrico, al igual que su intensidad y duración; las interacciones con otros factores y, en algunos casos, las deficiencias en el diseño de los experimentos. En un experimento factorial bien diseñado, en el que se analizaron los efectos combinados de la poda y el riego postenvero en la variedad Shiraz, Petrie *et al*. (2004) midieron reducciones estadísticamente significativas en la cantidad de brotes, la cantidad de racimos y el rendimiento de la estación 2 en respuesta a la reducción de la tasa de riego en la estación 1 (Figura 7). En un experimento igualmente bien diseñado con las variedades Tempranillo, Intrigliolo y Castel (2010), no se observó ningún efecto de arrastre ocasionado por el régimen de riego en la fertilidad de las yemas. Sin embargo, los productores de uvas tienen cierta capacidad para regular los componentes del rendimiento mediante la poda y el aclareo de los racimos (Tabla 1, Figura 8).

FIGURA 4 Cursos estacionales del potencial hídrico foliar antes del amanecer de diferentes viñedos en ambientes opuestos. El panel de la izquierda corresponde a la variedad Syrah en dos áreas cálidas y secas en el sur de Francia: área de Pic St. Loup, al norte de Montpellier (Schultz, 2003) y la región de Aude (Winkel y Rambal, 1993). El panel central corresponde a la variedad Cabernet franc de viñedos con tres suelos de contraste bajo el verano frío y lluviso del valle de Loira en Francia (Morlat *et al.*,1992), el verano cálido y lluvioso de la región de St. Emilion en Francia (van Leeuwen y Seguin, 1994), y la región seca y cálida del valle de Napa en California, para un tratamiento de riego y un tratamiento de déficit hídrico después del envero (Schultz y Matthews, sin publicar). El panel de la derecha corresponde a la información de la variedad White Riesling, de la región fría y veranos lluviosos de Rheingau en Alemania, recopilada en 1999 (símbolo abierto y línea punteada) y 2002 (símbolos cerrados); adaptación basada en Gruber y Schultz (Gruber y Schultz, 2005). Todos fueron tratamientos de secano, a menos de que se indique lo contrario.

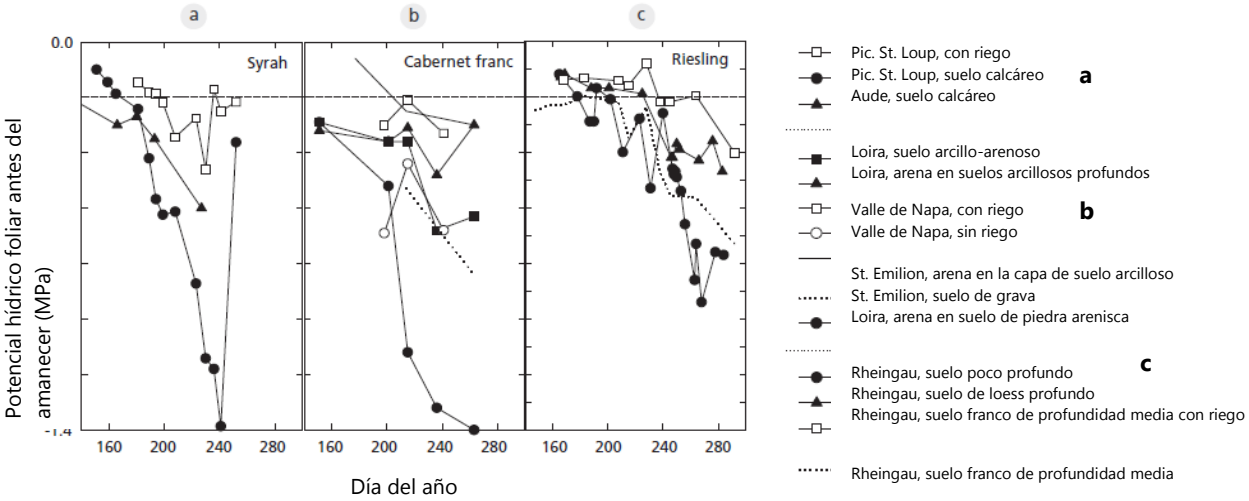
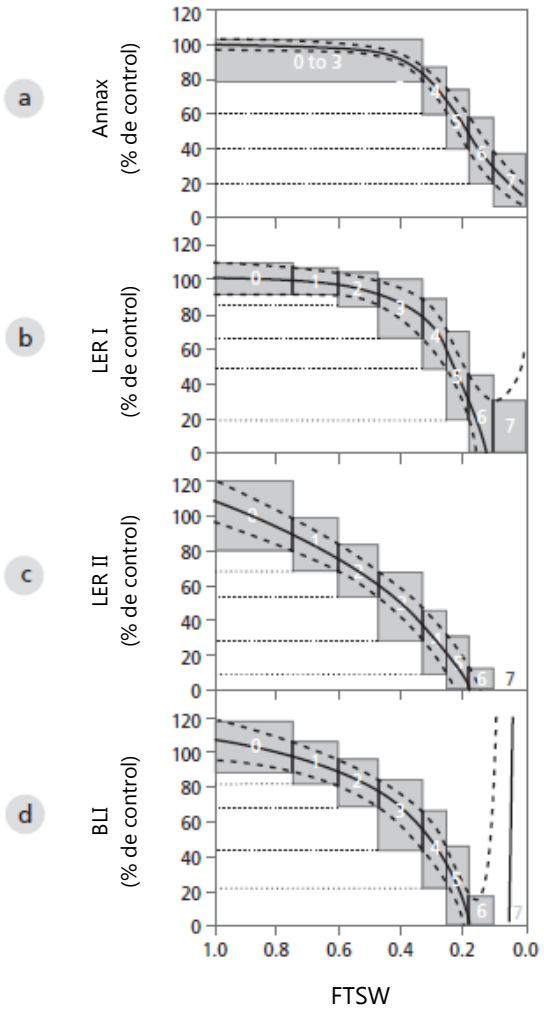
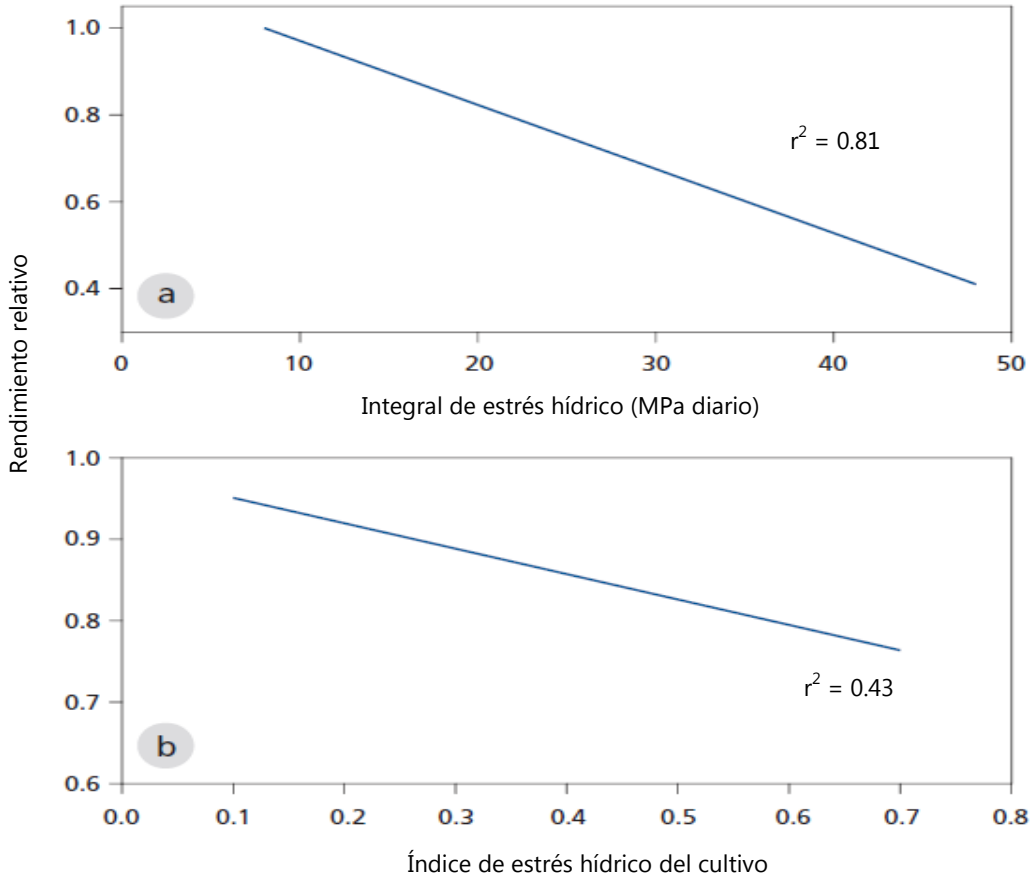


FIGURA 5 Programación del manejo del agua obtenida para Shiraz, Grenache y Mourvèdre en el sur de Francia. Relaciones entre la fracción de humedad del suelo transpirable (FTSW) y la tasa de (a) fotosíntesis neta saturada de luz; tasa de emergencia de las hojas en (b) ramas laterales de primer o (c) segundo orden, y (d) longitud final de las ramas laterales de primer orden. Las tasas cuyas mediciones se realizaron en tratamientos de déficit hídrico se normalizan con respecto a los controles bien regados. Los cuadros (0 a 7) representan ocho clases con limitación característica de la función de la planta debido a la sequedad del suelo; por ejemplo, (a) a nivel de saturación lumínica les superior al 80 % de los controles en clases 0 a 3, y se reduce a 60, 40, 20 y 7 % de los controles a medida que el suelo se seca de las clases 4 a 7. La tabla muestra el nivel recomendado de estrés hídrico (clase FTSW) para obtener una producción de vino tinto de calidad en diferentes etapas fenológicas. Adaptación basada en Pellegrino *et al.* (2006).



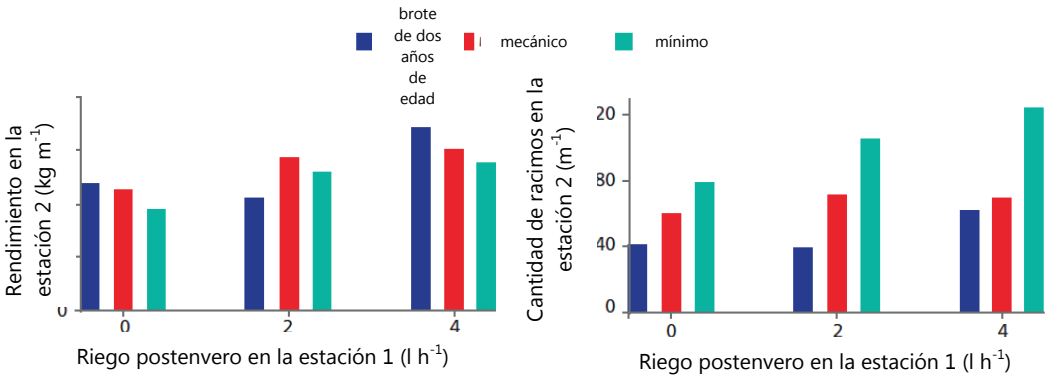
Etapa fenológica (Etapa E-L)	Clase FTSW para la producción de vino tinto de calidad
Brotación de las yemas a floración (4 a 23)	0 a 1
Floración a cierre de racimos (23 a 32)	2
Cierre de racimos a envero (32 a 35)	3
Envero a cosecha (35 a 38)	5 a 6

FIGURA 6 Reducción del rendimiento con aumento del déficit hídrico cuantificado utilizando (a) la integral del potencial hídrico del tallo y (b) la diferencia entre la temperatura del dosel y la temperatura del aire corregida por el déficit de presión de vapor. Fuentes: (a) Salón *et al.* (2005), (b) Grimes y Williams (1990).



Muchos estudios midieron el efecto del suministro hídrico durante la estación sobre el rendimiento y sus componentes, como se ilustra en la Tabla 3 para tres sistemas diferentes de producción. La combinación de variedad, ambiente y manejo redundó en el rendimiento de vides con riego completo desde 10 kg/vid para Bobal en Requena y Chardonnay en Niágara hasta 20 kg por vid para Shiraz en Riverland. La comparación entre cultivos de secano y cultivos de riego completo muestra un gran beneficio (hasta el doble) del riego en ambientes más secos (Riverland, Requena), con respecto al incremento del rendimiento de sólo 10-25 % en ambientes más frescos y húmedos (Niágara). La cantidad de racimos muestra gran variación entre los sistemas de producción, pero es relativamente estable en respuesta al suministro del agua durante la estación, como se prevé en base al ciclo reproductivo de las vides. Por lo tanto, el déficit hídrico durante la estación reduce el rendimiento al disminuir el peso de los racimos, y la importancia relativa de sus componentes (número y tamaño de las bayas) depende del momento en que se presenten los déficits hídricos. El déficit hídrico que ocurre cerca de la antesis y el cuajado tiene el potencial de reducir la cantidad y el tamaño de las bayas, mientras que el déficit hídrico que ocurre en etapas posteriores solo reduce el tamaño de las bayas. El período postenvero es particularmente crítico debido al conflicto entre el mantenimiento del suministro de agua –para garantizar el crecimiento de las bayas– y los requerimientos de la composición de las bayas, los cuales pueden beneficiarse del déficit hídrico controlado.

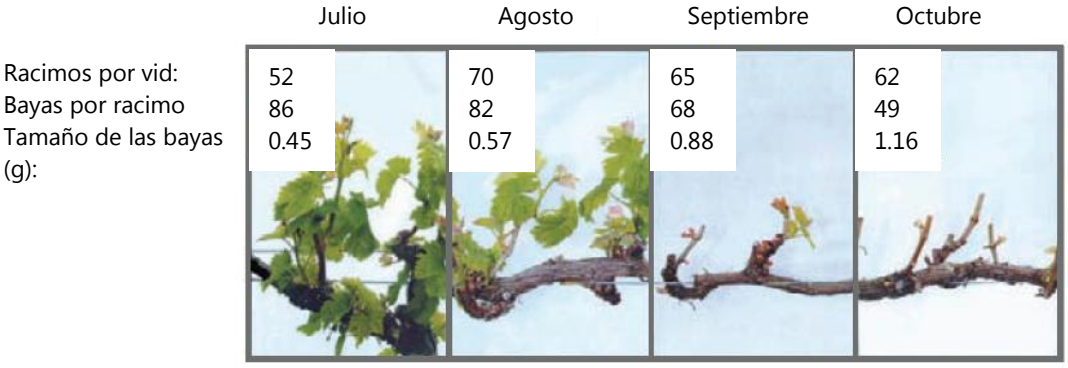
FIGURA 7 La reducción de la tasa de riego postenvero en la estación 1 redujo el rendimiento y la cantidad de racimos de Shiraz en la estación 2, independientemente del sistema de poda. El rendimiento y la cantidad de racimos se expresan en términos de metros del dosel. Fuente: Petrie *et al.* (2004).



Riego: P< 0.05
Poda: n. s.
Interacción: n. s.

Riego: P< 0.05
Poda: P< 0.01
Interacción: n. s.

FIGURA 8 Desarrollo de brotes registrado a mediados de octubre (fotografías) y componentes del rendimiento en la cosecha (números) en vides de Merlot, podadas en intervalos mensuales entre mediados de julio y mediados de octubre. Fuente: Friend y Trought (2007) para experimentos en Marlborough (41 ºS, 174 ºE), Nueva Zelanda.



Pocos estudios describieron el efecto a largo plazo del déficit hídrico en el rendimiento de la vid. Para la variedad Riesling, en un viñedo de pendiente pronunciada en Alemania, la combinación de déficits hídricos provisionales durante y entre estaciones redujo la producción a largo plazo de un promedio de 7.6 ton/ha en vides con reducidas cantidades de riego suplementario (29 litros/m^2 por estación), a 5.0 ton/ha para vides de secano (Tabla 4).

La disponibilidad de agua después de la cosecha tiene dos efectos, como mínimo. En primer lugar, puede influir en la actividad del dosel, la acumulación de reservas y por ende, el comportamiento del cultivo en el siguiente ciclo de crecimiento. En segundo lugar, el riego entre la cosecha y la caída de las hojas puede alterar la fenología bajo ciertas condiciones; por ejemplo, es posible que la reducción del riego después de la cosecha acelere la brotación de las yemas en la siguiente estación (Williams *et al., 1991),* lo que potencialmente incrementaría el riesgo de helada en algunos ambientes.

TABLA 3 Rendimiento y componentes del rendimiento de Shiraz en Riverland (Australia), Bobal en Utiel Requena (España) y Chardonnay en Niagara-on-the-Lake (Canadá) en respuesta al régimen de riego. Los valores son rangos durante tres estaciones. Fuentes: Riverland, McCarthy (1997); Utiel Requena, Salón *et al*. (2005); Niágara, Reynolds *et al*. (2005).

Régimen de riego		Rendimiento (kg/vid)	Racimos por vid	Peso del racimo (g)	Bayas por racimo	Peso de la baya (g)
Riverland						
Riego completo	(entre la brotación de las yemas y la cosecha)	13.4-19.5	166-182	81-108	67-81	1.2-1.5
Déficit postantesis	(eliminación del riego por 1 mes después de la antesis)	9.8-18.3	156-190	63-104	57-81	1.1-1.5
Déficit previo al envero	(eliminación del riego por un mes antes del envero)	11.4-20.1	168-210	68-97	62-75	1.1-1.3
Déficit postenvero	(eliminación del riego por 1 mes después del envero)	11.2-18.2	160-193	71-98	63-77	1.1-1.3
Déficit previo a la cosecha	(eliminación del riego por 1 mes antes de la cosecha)	12.4-20.1	154-197	81-106	67-78	1.2-1.5
Déficit antesis-envero	(eliminación del riego entre la antesis y el envero)	9.6-19.9	164-204	58-99	59-77	1.0-1.4
Déficit envero-cosecha	(eliminación del riego entre el envero y la cosecha)	11.2-17.3	154-176	73-99	62-76	1.2-1.4
Secano	(sin riego)	4.7-13.8	153-200	29-80	42-73	0.7-1.3
Utiel Requena						
Riego completo	(entre la antesis y la cosecha)	6.4-9.5	11-14	613-711	107-263	2.7-3.0
Déficit leve postenvero	(50% del riego de control después del envero)	6.7-8.0	11-14	549-738	193-271	2.7-2.9
Déficit severo postenvero	(eliminación del riego después del envero)	6.8-8.6	10-14	488-727	202-253	2.4-3.0
Secano	(sin riego)	3.5-4.2	9-13	346-476	169-248	1.8-2.1
Niágara						
Riego completo		3.2-9.2	39-84	83-110	56-66	1.4-1.7
Déficit post-cuajado	(eliminación del riego después del cuajado de frutos)	3.2-8.4	39-88	81-106	58-67	1.4-1.6
Déficit posterior a la fase de retraso	(eliminación del riego después de la fase de retraso)	2.7-8.7	35-84	76-103	54-65	1.4-1.6
Déficit postenvero	(eliminación del riego después del envero)	2.6-10.0	33-78	79-128	60-83	1.3-1.7
Secano	(sin riego)	2.9-7.8	36-84	81-102	60-66	1.4-1.6

TABLA 4 Rendimiento, concentración de fructosa y rendimiento de azúcar Riesling con riego y de secano en un viñedo ubicado en una pendiente pronunciada cerca de Geisenheim (50 °N), Alemania. Los valores corresponden a la desviación media ± estándar para ocho años consecutivos desde 2002. La combinación de un umbral de riego de -0.3 MPa de potencial hídrico antes del amanecer y el intervalo semanal de decisión de riego dio lugar a 7.4 ± 3.4 eventos por estación y agua aplicada de 29.3 ± 12.2 litros/m^2 (Gruber y Schultz, sin publicar).

Variable de respuesta	Con riego	Secano
Rendimiento (ton/ha)	7.6 ± 3.22	5.0 ± 2.16
conc. de Azúcar (g/litro)	212 ± 19.5	204± 29.7
rendimiento de azúcar (kg/ha)	1182 ± 460.1	728 ± 280.1

Atributos de las bayas y el vino

La calidad del vino es un concepto esquivo y los intentos por cuantificarla están destinados a ser controvertidos (Cuadro 1). Sin embargo, los análisis cuantitativos de los atributos de las bayas y el vino en respuesta al déficit hídrico son esenciales para determinar el calendario de riego. De hecho, la regulación de las relaciones hídricas de vid es una herramienta importante para el manejo de la calidad en la viticultura de riego. Existe una vasta recopilación de bibliografía que aborda los efectos de las relaciones hídricas en la composición de las uvas tintas, especialmente en los compuestos fenólicos; la información sobre los efectos del estado hídrico de la planta en la composición de las variedades de uva blanca es escasa.

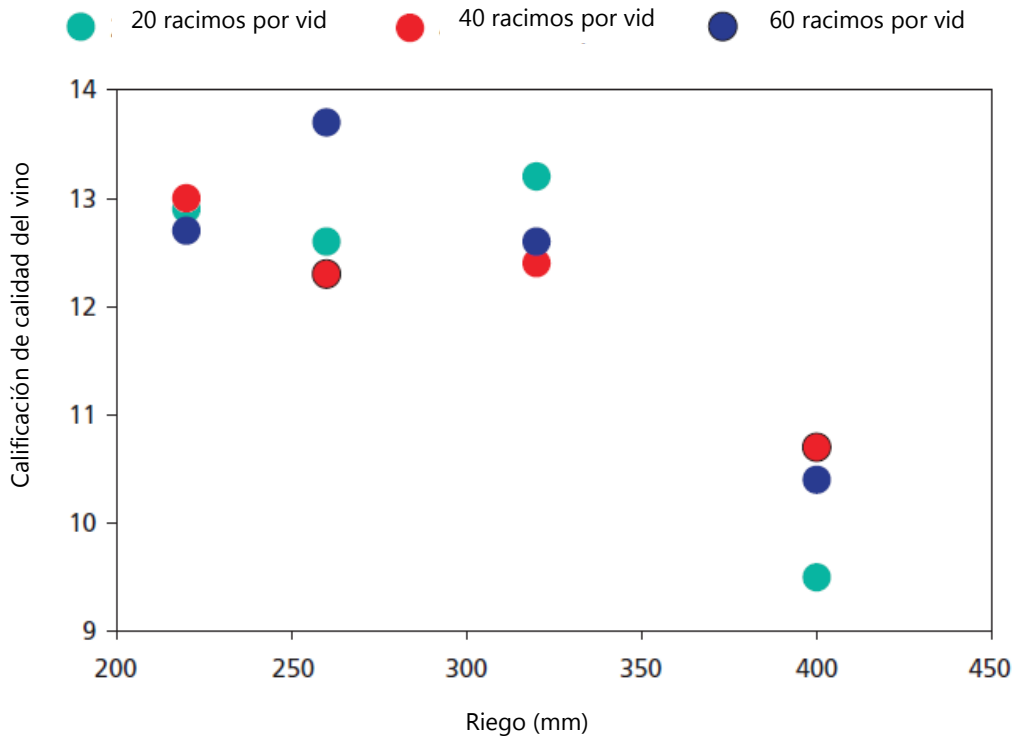
Variedades de uva tinta

La Figura 9 ilustra una relación típica, aunque no universal, entre la calidad del vino y el riego para variedades de uva tinta. La asociación negativa entre el suministro de agua y la calidad del vino está mediada parcialmente por una aparente conflicto entre el rendimiento y los atributos de calidad de las bayas (Figura 10, Figura 11). Las asociaciones negativas entre la tasa de acumulación de azúcar y antocianinas, y los componentes del rendimiento en la Figura 10b, probablemente reflejan un alto cociente fruto-dosel, en lugar de un alto rendimiento como tal. Si esta hipótesis es correcta, la manipulación de esta relación mediante riego, poda, aclareo y manejo del dosel puede ser importante para lograr un alto rendimiento y una alta calidad.

CUADRO 1 Calidad del vino

La ambigüedad de la "calidad del vino" se deriva de la complejidad de los atributos del vino, exacerbada por la complejidad y variabilidad en la sensibilidad del olfato y el gusto de los seres humanos. La variación en la calidad del vino, según la estación y la región, se evaluó con los precios y calificaciones de la vendimia (Cicchetti y Cicchetti, 2009 y Almenberg y Dreber, 2009). Cada uno de estos enfoques presenta muchas deficiencias, incluidos factores de comercialización que influyen en el precio más allá de los parámetros de calidad específicos, y las calificaciones de la vendimia emitidas por expertos, las cuales son evaluaciones subjetivas (Sadras *et al.,* 2007). Las opiniones sobre las calificaciones de la vendimia varían de "...controvertidas, potencialmente engañosas y esencialmente imposibles de obtener de manera correcta y consistente..." (Fuller and Walsh, 1999) hasta la propuesta de calificaciones que "... expresen la probabilidad de lo que razonablemente podría esperarse del vino de un año dado". (Stevenson, 2005). Por otro lado, los atributos individuales de las bayas y el vino, como el color o el contenido de muchos compuestos críticos, se pueden medir con precisión. No obstante, el desafío de este enfoque es la integración de mediciones individuales en una medición completa de la calidad. No cabe duda de que la calidad del vino es un concepto controvertido y de que la cuantificación de los atributos clave de las bayas y el vino, aunque imperfecta, es esencial para el manejo de riego.

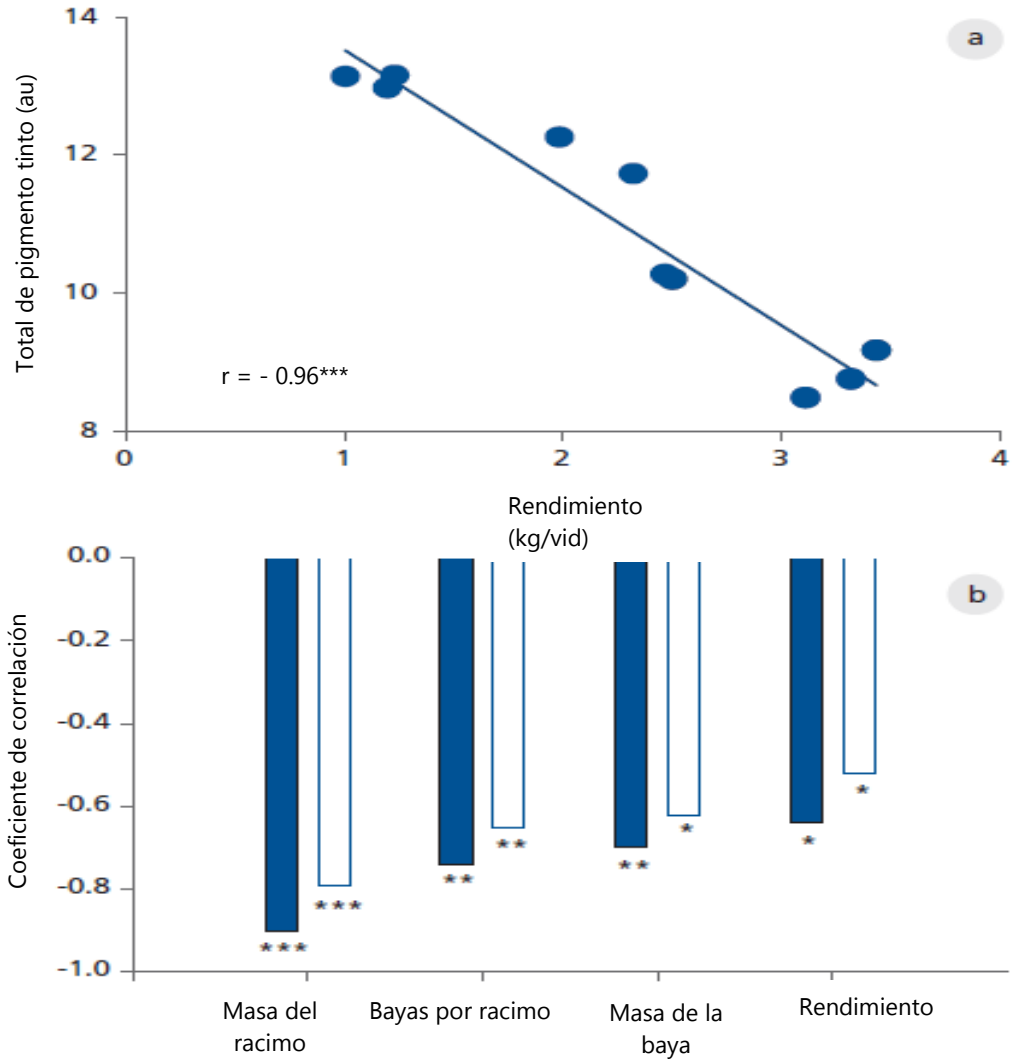
FIGURA 9 Calificación de calidad del vino como una función del riego total para Cabernet Sauvignon en Adulam, Israel. Fuente: Bravdo *et al.* (1985).



Por lo general, el déficit hídrico aumenta la concentración de compuestos fenólicos, pero tiene un efecto diferencial en grupos individuales de fenoles, dependiendo de la intensidad del estrés y el momento en que ocurra. La biosíntesis del ácido tánico puede verse afectada negativamente por la aplicación de estrés severo después de la antesis (Ojeda, 2002), pero déficits posteriores a menudo aumentan la concentración de ácido tánico (Roby *et al.,* 2004). En la mayoría de los casos, la concentración de antocianina responde de manera positiva a la escasez de agua después del envero, pero con menos frecuencia a los déficits previos al mismo (Matthews y Anderson, 1988); aunque la expresión de los genes que participan en la biosíntesis de la antocianina puede incrementarse mediante el estrés hídrico previo al envero (Castellarin *et al.,* 2007). Aparte de los compuestos fenólicos, es posible que los atributos del aroma también resulten afectados (Chapman *et al.,* 2005). Las diferencias en la respuesta de las variedades son probables, pero no están bien documentadas (para ver algunos ejemplos véase: regímenes sugeridos de RDI, más adelante). Además de los efectos en la cantidad y proporción de compuestos clave, el déficit hídrico puede ocasionar efectos más sutiles, pero relevantes. Por ejemplo, se ha demostrado que el déficit hídrico después del envero aumenta la complejidad estructural (grado de polimerización) y reduce la capacidad de extracción de compuestos fenólicos en las bayas de diversas variedades de uva tinta (Ojeda *et al.,* 2002; Sivilotti *et al., 2005).* Los efectos del déficit hídrico en los atributos de las bayas se relacionan parcialmente con reducciones en el tamaño de las bayas, aunque también se han reportado efectos que no se asocian con el tamaño. Se requiere análisis alométrico para (i) separar los efectos del déficit hídrico dependientes del tamaño sobre un componente particular; p. ej., el azúcar; y (ii) comparar la capacidad de respuesta relativa de diferentes componentes de las bayas al déficit hídrico (Sadras *et al.,* 2007, y Sadras y McCarthy, 2007). Por ejemplo, el análisis alométrico reveló que el déficit hídrico aceleraba la tasa de acumulación de antocianinas con respecto al azúcar de la variedad Cabernet Sauvignon en un ambiente cálido (Figura 12). Por tanto, el manejo

del agua es importante para garantizar cierto acople de los componentes clave de las bayas durante la maduración, lo cual eventualmente afectará al equilibrio del vino.

FIGURA 10 Asociaciones negativas entre los rasgos de las bayas relacionados con la calidad del vino y el rendimiento. (a) Total de pigmentos tintos en la piel de las bayas de la variedad Pinot Noir cultivada en clima frío. (b) Coeficientes de correlación de las regresiones entre la tasa de antocianinas o la acumulación de sólidos solubles en las bayas y variables relacionadas con el rendimiento en la variedad Cabernet Sauvignon cultivada en clima cálido. Las fuentes de variación fueron (a) fuente: manipulación del sumidero de nutrientes durante el aclareo de los racimos y la poda; y (b) estación, suministro hídrico y carga de frutos. Los asteriscos indican P < 0.05 (*), P < 0.01 (**) y P < 0.0001 (***). Adaptación basada en (a) Dunn *et al.* (2005) y (b) Sadras *et al.* (2007).



Variedades de uva blanca

En comparación con las variedades de uva tinta, las variedades de uva blanca generalmente son más sensibles a los períodos de estrés y pueden mostrar cambios negativos en la composición (Christoph *et al.,* 1998 y Peyrot des Gachons *et al.,* 2005). Los compuestos fenólicos se consideran menos convenientes en uvas blancas, debido a que los atributos sensoriales como la astringencia o el amargor, asociados tanto con fenoles flavonoides –es decir, flavan-3-oles y proantocianidinas (Singleton y Noble, 1976 y Brossaud *et al.,* 2001)– como con los fenoles no flavonoides –es decir, ácidos hidroxicinámicos u otros estéres (Arnold *et al.,* 1980 y Hufnagel y Hofmann, 2008)– son incompatibles con el tipo actual de vino blanco popular entre los clientes. Los fenoles flavonoides experimentan polimerización oxidativa, lo cual disminuye su umbral de sabor durante el envejecimiento del vino (Schneider, 1995) y pueden afectar negativamente la volatilidad de los compuestos del sabor (Aronson y Ebeler, 2004). Dependiendo de la variedad, el estrés hídrico y la reducción asociada en la absorción de nitrógeno se han asociado con alteraciones en la calidad del sabor de diversas variedades de vino blanco, como Chasselas, Silvaner, Sauvignon Blanc y Riesling (Peyrot des Gachons *et al.,* 2005 y Linsenmeier, 2008). En un ejemplo, el desarrollo de atributos del vino considerados negativos, después de sólo un período corto de envejecimiento en botella, se retardó mediante riego (Tabla 5). No obstante, al menos un estudio reportó un aumento de los monoterpenos unidos por enlace glucosídico, que contribuyen al perfil del sabor de la uva blanca Riesling bajo déficit hídrico (McCarthy y Coombe, 1999); pero incluso en ese ensayo particular, los atributos sensoriales experimentaron un cambio diferencial con el tiempo.

FIGURA 11 Atributos del vino de Tempranillo en Requena, España, como una función de la evapotranspiración relativa y rendimiento relativo. Los modelos ajustados se muestran cuando son significativos (P < 0.05). Fuente: Intrigliolo y Castel (2008).

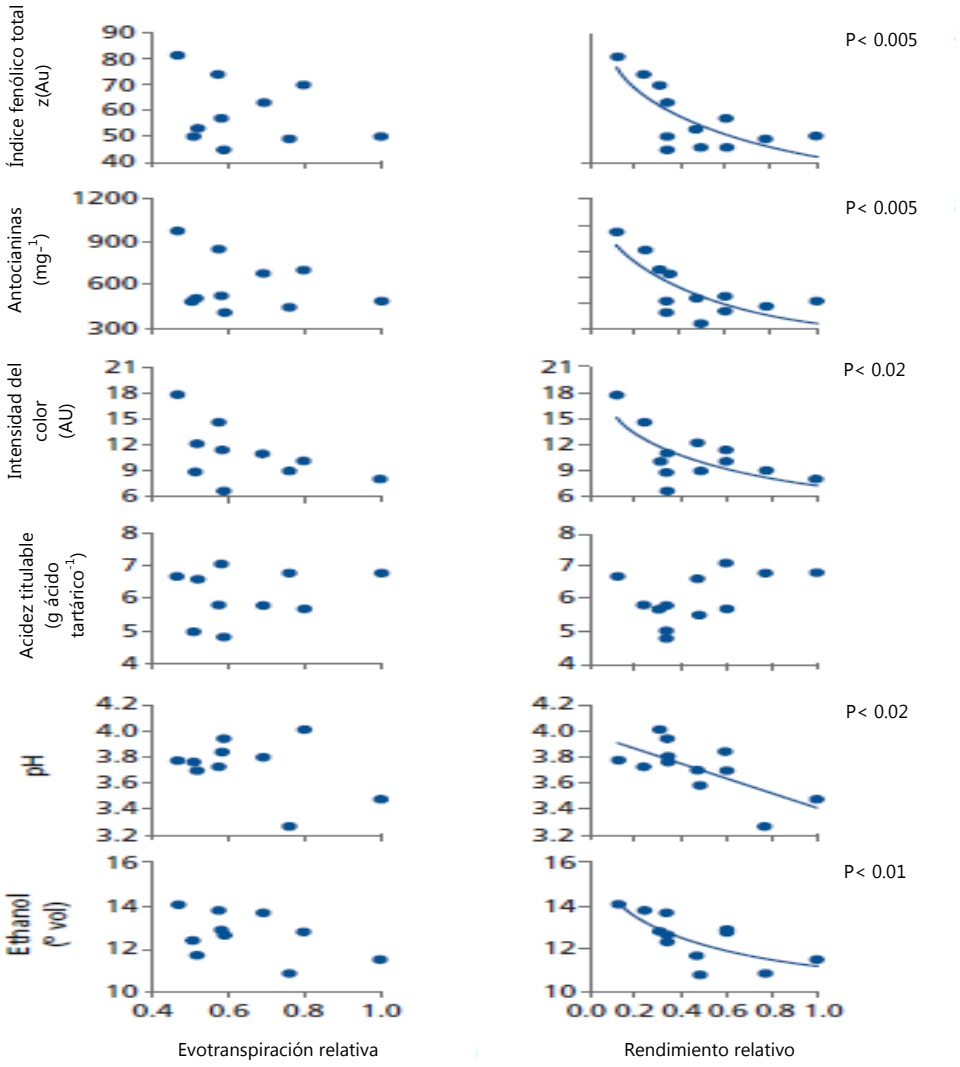
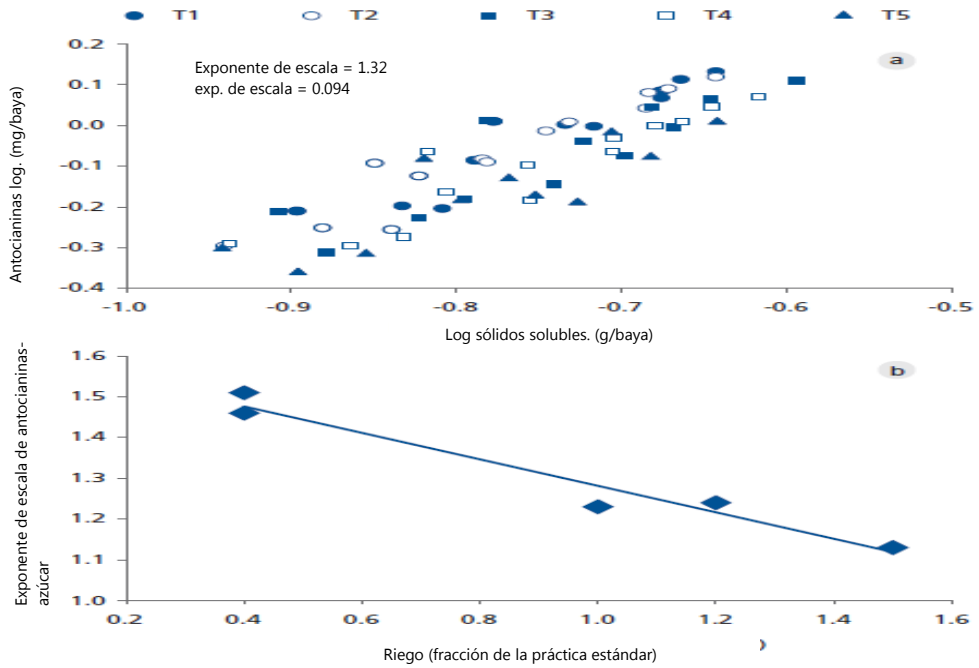


TABLA 5 Evaluación sensorial de vinos experimentales de la uva blanca Riesling, recibiendo riego suplementario o únicamente precipitación natural, de la vendimia de 2003 en la región de Rheingau, Alemania. Los vinos embotellados (con tapón de rosca) de los dos tratamientos se "envejecieron artificialmente" de manera parcial, al almacenarlos en caliente a 25 °C por tres meses. El 7 de septiembre de 2004, 115 jueces calificaron los atributos del vino en una escala de 0 a 5 (los valores más altos indicaban una percepción más intensa del atributo respectivo). Fuente: Schultz y Gruber (2005).

Atributo	Con riego		Sin riego	
	sin envejecimiento	envejecimiento artificialmente	sin envejecimiento	Envejecimiento artificialmente
Atributos positivos del aroma	3.45	2.37	2.85	1.93
Atributos negativos del aroma	2.10	2.61	2.43	3.79
Acidez	2.35	2.95	2.43	2.95
Amargor	2.40	2.63	2.70	2.87

FIGURA 12 (a) Relación alométrica entre la cantidad de azúcares y la cantidad de antocianinas durante la fase lineal de acumulación en las bayas de Cabernet Sauvignon, bajo cinco tratamientos (riego y carga de frutos) durante tres estaciones. El exponente de escala (es decir, pendiente de regresión en una escala doble logarítmica) es mayor que 1, lo cual indica que la tasa relativa de acumulación de antocianinas fue mayor que la tasa relativa de acumulación de azúcar en todos los tratamientos. (b) Relación entre el exponente de escala de azúcar-antocianina y el riego; el tratamiento estándar recibió 160 mm en 2003-2004, 210 mm en 2004-2005 y 220 mm en 2005-2006. Fuente: Sadras *et al*. (2007).



REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

La evapotranspiración del cultivo aumenta a medida que la vid envejece, desde la plantación hasta que el dosel, y el sistema de raíces alcanza su capacidad completa para capturar radiación y agua (Figura 13). Para las vides establecidas, de ambientes semiáridos a áridos –p. ej., California central (Estados Unidos) y Riverina (Australia)– la ET_c estacional varía de aproximadamente 500 a 800 mm (Williams y Matthews, 1990). La Figura 14 muestra la dinámica estacional de K_c, según se ve afectada por el envejecimiento del cultivo y por el ambiente (templado frente a tropical). La dinámica estacional de los coeficientes de cultivo comprende dos fases, donde la K_c aumenta desde el inicio del crecimiento activo hasta que el dosel alcanza su tamaño máximo, y donde la K_c disminuye durante la senescencia foliar. Suponiendo linealidad, la tasa promedio de aumento de K_c fue de 0.005 d^{-1} para vides jóvenes, 0.007 d^{-1} para vides más viejas en Washington y 0.013 d^{-1} en la región tropical de São Francisco. En la fase de disminución, la tasa de cambio de K_c fue 0.006, 0.011 y 0.042 d^{-1}, respectivamente. Además de las diferencias en la tasa de cambio de K_c, el K_c diferente a cero al inicio de la estación de riego en ambientes tropicales refleja la falta de latencia y la continua actividad fisiológica durante todo el año en ambientes tropicales.

Se podrían obtener coeficientes de cultivo más refinados sobre la base de una asociación directa, a menudo no lineal, con la interceptación de la luz por parte del dosel o las variables relacionadas, como el índice de área foliar. Sin embargo, debido a la gran variación en la estructura del dosel con los sistemas de poda, la relación entre el coeficiente de cultivo y el índice de área foliar no es única. La relación entre el coeficiente de cultivo y el índice de área foliar también puede mostrar histéresis; es decir, que la relación es diferente según la K_c aumente o disminuya (Netzer *et al.*, 2009). Para abordar estos problemas, Williams y Ayars (2005) propusieron un enfoque para caracterizar los coeficientes de cultivo con base en la interceptación de la luz por parte del dosel, y demostraron la solidez de un método de cuadrícula práctico para medir la cantidad de sombra proyectada en el suelo por las vides.

FIGURA 13 Cambios en la evapotranspiración del cultivo (ET_c) con el envejecimiento de la vid en Washington, EE. UU. La ET_c se midió en lisímetros grandes de drenaje. También se muestra la evapotranspiración de referencia (ET_o) estacional (1 de abril a 31 de octubre) derivada de Penman (referencia de alfalfa); la línea punteada corresponde al promedio. Adaptación basada en Evans *et al.* (1993).

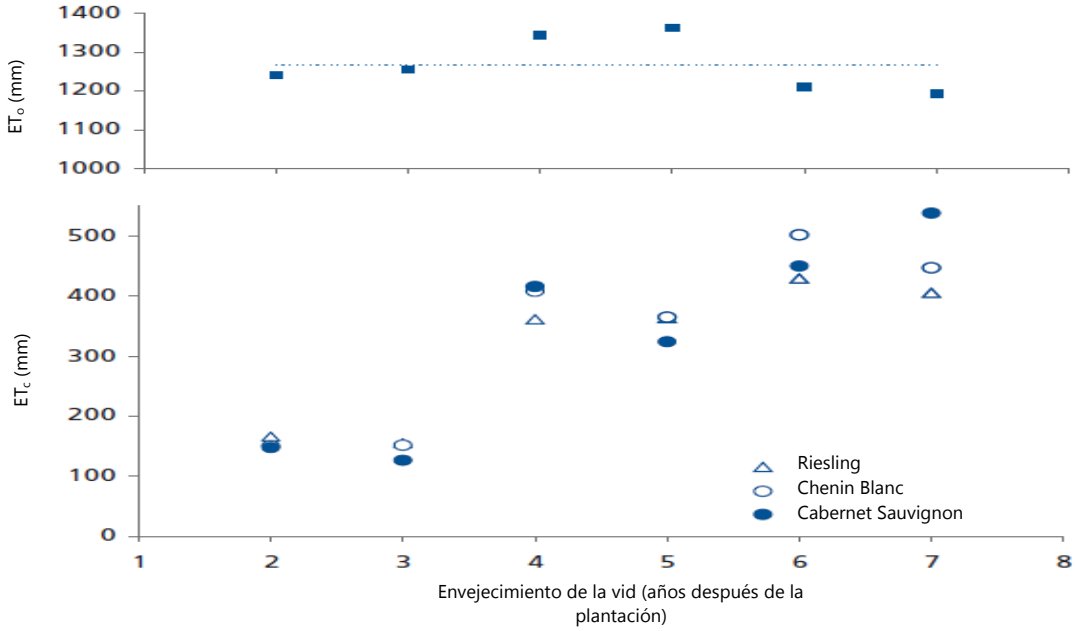
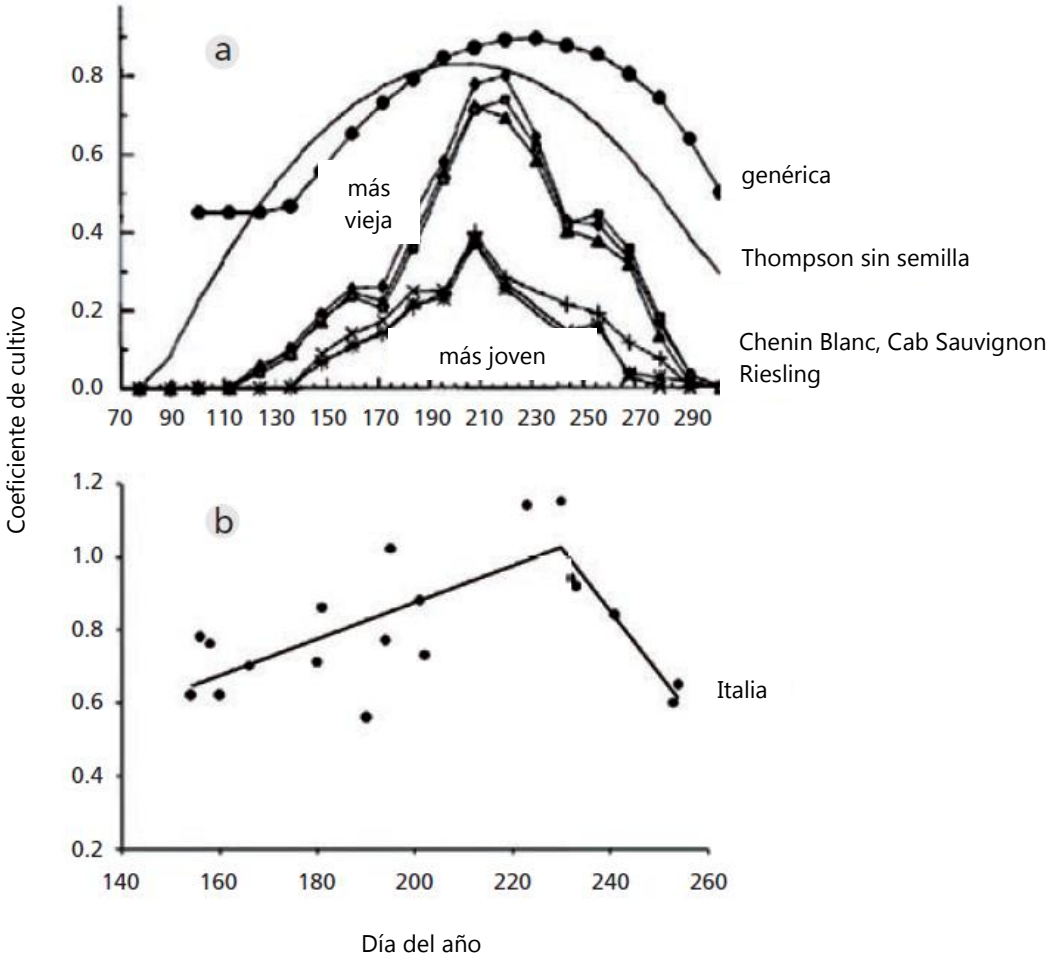


FIGURA 14 Dinámica estacional de los coeficientes de cultivo para las vides en (a) Washington central (46 ºN, EE. UU.) y (b) São Francisco (9 ºS, Brasil). Fuentes: (a) Evans *et al.* (1993) y (b) Teixeira (1999).

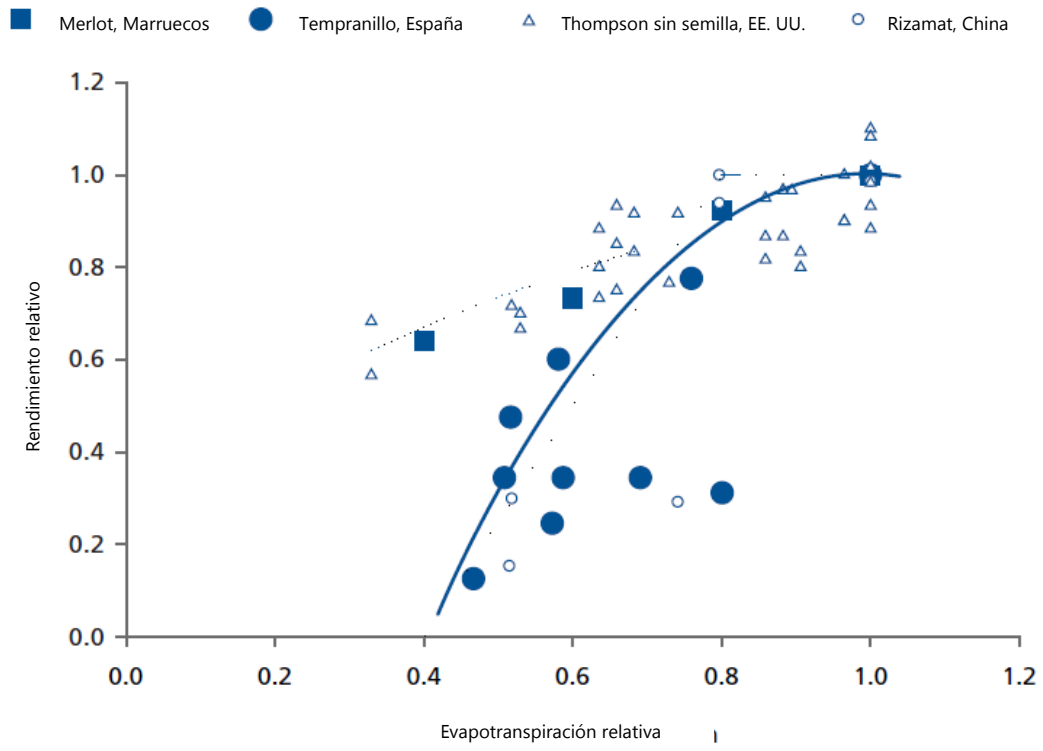


FUNCIONES DE PRODUCCIÓN HÍDRICA

La diversidad de sistemas de producción que buscan diferentes combinaciones de volumen de fruto y calidad contribuye a la gran discrepancia en la relación entre rendimiento y uso del agua. Además, la escasez de datos significa que la forma actual de la función continúa siendo especulativa, en particular para la ET_c relativa inferior a 0.4 (Figura 15). Al igual que en otros cultivos arbóreos, el rendimiento se mantiene hasta que la ET_c relativa se aproxima a 0.8 y se observa una disminución constante casi lineal en el rango de ET_c relativa, de 0.8 a 0.4. Los datos correspondientes a las uvas de vino Tempranillo sugieren una respuesta más sensible a los déficits de ET relativa, en contraste con la respuesta de las uvas de mesa (Figura 15). Esto quizá obedezca a una limitación en la ET_c máxima impuesta por la poda y otras técnicas de cultivo en el caso de las uvas de vino, mientras que tal limitación normalmente no se impone en las uvas de mesa. Las variaciones en los escasos datos de en las uvas de vino de la Figura 15 sugieren que la función de producción probablemente depende de la variedad y el sistema de cultivo.

En términos cualitativos, se prevé que la relación entre los ingresos brutos y la ET_c en las uvas de vino presente un óptimo, que se deriva del desfase entre la ET_c requerida para maximizar el rendimiento y la ET_c requerida para maximizar la calidad y el valor por unidad de volumen (Cuadro 19 en el Capítulo 4). No obstante, es probable que los parámetros reales de esta función sean específicos de los sistemas de producción local con sus propios precios para el agua y la uva.

FIGURA 15 Rendimiento relativo como una función de la evapotranspiración relativa en las uvas de vino (símbolos cerrados). Las líneas punteadas y continuas intentan capturar el límite superior de las uvas de vino. Las uvas de mesa (símbolos abiertos) y la función ajustada para las uvas Thompson sin semilla (línea punteada) se muestran para efectos comparativos. Fuentes: Messaoudi y El-Fellah (2004), Intrigliolo y Castel (2008), Du *et al.* (2006) y Grimes y Williams (1990).



REGÍMENES SUGERIDOS DE RDI

En el caso de las uvas de vino, donde el objetivo de calidad es esencial para obtener beneficios, el régimen de riego recomendado debe tener en cuenta muchos más factores que en la mayoría de los otros cultivos. A fin de lograr el triple objetivo de alto rendimiento, calidad y productividad del agua de riego, el riego de las variedades de uva tinta en ambientes templados debe garantizar el crecimiento vegetativo y el crecimiento reproductivo temprano en la primavera, y permitir el desarrollo de déficit hídrico progresivo hacia la etapa de la madurez. Para las uvas blancas, el manejo del agua debe estar encaminado a evitar tanto el déficit hídrico severo como el exceso del suministro hídrico. El manejo del riego después de la cosecha explica la necesidad de la acumulación de reservas de carbohidratos en las vides. Debido a la gran cantidad de factores que intervienen, seleccionamos cinco estudios de caso para ilustrar este patrón general y las variaciones particulares del sistema de producción objetivo. Estos ejemplos también resaltan la aplicación de diferentes métodos de evaluación (Cuadro 2).

CUADRO 2 Mediciones del cultivo y el suelo para determinar el calendario de riego de la vid

Se han probado los índices del estado hídrico de la planta, el cultivo y el suelo en vides cultivadas en diversos ambientes. La tabla a continuación presenta algunos ejemplos, y: "Regímenes sugeridos de RDI" describe la aplicación de algunos de estos métodos en el calendario de riego. La medición del potencial hídrico foliar demanda bastante tiempo y requiere considerables conocimientos especializados, pero parece ser más consistente que mediciones más rápidas, incluido el diámetro del tronco y la conductancia estomática.

Bajo las condiciones del estudio de Girona *et al.* (2006), el potencial hídrico foliar al mediodía superó al balance de agua del suelo como activador del riego; es decir, el potencial hídrico foliar captó la variabilidad espacial de mejor manera, y los cultivos manejados utilizando este índice basado en la planta presentaron menos variabilidad en el rendimiento y la composición de las bayas, lo cual podría mejorar la homogeneidad del jugo/zumo de uva. Las imágenes térmicas, visibles e hiperespectrales están atrayendo una atención cada vez mayor *(Moller et al., 2007; Rodríguez-Pérez et al., 2007)*. Estas tecnologías, junto con los GIS, dan cuenta efectiva de la variación espacial en escalas relevantes de regiones a campos. Existe una gran variación en costes y conocimientos requeridos para la implementación de estos enfoques, desde termómetros infrarrojos-manuales, relativamente económicos y fáciles de usar- hasta imágenes satelitales o aéreas, de montaje en tractor, en una amplia gama de rangos espectrales. El estado hídrico del suelo se puede determinar de manera indirecta a través del potencial hídrico foliar y de manera directa a través de mediciones con una serie de instrumentos que incluyen: sondas de neutrones, reflectometría en el dominio del tiempo y tensiómetros transductores de presión (Capítulo 4). A menudo, un modelo de balance de agua es una alternativa práctica para realizar mediciones directas del estado hídrico del suelo (Pellegrino *et al.*,2006).

Los índices adecuados para el manejo del riego deben combinar flexibilidad y una relación razonable entre precisión y costo de adquisición, en términos de tiempo, recursos y destrezas. Además de los conflictos entre la precisión y el costo, también hay conflictos entre los diversos efectos del riego en rendimiento, calidad, reservas y enfermedades (Pellegrino *et al.,* 2006). Pellegrino *et al.* (2006) desarrolló un método elegante que combina un modelo de humedad del suelo y una función de respuesta sencilla y empírica, que permite registrar los cambios en la capacidad de respuesta del cultivo al déficit hídrico durante el período de crecimiento (Sección 5.1).

CUADRO 2 (CONTINUACIÓN)

Principio	Cultivo y región	Características	Fuente
Teledetección hiperespectral	Pinot Noir California (38 °N)	Medidas de reflectancia y transmisividad, 350-2500 nm. Alternativas de la parte superior del dosel; es decir, montado en vehículo (0.7 m), aéreas o satelitales. Escala de bloque; resolución espacial. Generalmente consistente con las mediciones del estado hídrico foliar (potencial hídrico foliar y contenido de agua). Resultados variables dependiendo de la forma del dosel, el sol o la perspectiva de los sensores.	72
Imágenes térmicas y visibles	Merlot Israel (33 °N)	Imágenes térmicas (7.5-13 µm); imágenes digitales a color. Montado en grúa-camión (15 m). Índice de estrés hídrico del cultivo estrechamente asociado con la conductancia estomática.	73
Imágenes térmicas	Castelão, Aragonês SE Portugal	Imágenes térmicas (8-12 µm) con resolución de 0.1 °C. Referencias de condiciones de humedad y sequía. Índice de estrés hídrico del cultivo en relación con la conductancia estomática.	74
Diámetro del tronco	Tempranillo España (39 °N)	Diámetro del tronco medido con transformadores diferenciales de variación lineal; registrado en intervalos de 30 segundos. La contracción máxima diaria y la tasa de crecimiento del tronco fueron altamente variables y no tuvieron resolución después del envero.	76
Potencial hídrico, conductancia estomática	Tempranillo España (39 °N)	Potencial hídrico foliar antes del amanecer y al mediodía; potencial hídrico del tallo en la mañana y al mediodía medido con cámara de presión. Conductancia estomática al mediodía medida con porómetro de difusión. Mejores indicadores de los potenciales hídricos antes del amanecer y en la mañana. Gran influencia del tamaño del dosel.	77
Potencial hídrico	Pinot Noir España (42 °N)	Potencial hídrico foliar al mediodía medido con cámara de presión. En comparación con el método del balance hídrico, el potencial hídrico foliar al mediodía resultó ser mejor para capturar la variación espacial.	43
Flujo de la savia	Malagousia Grecia (41 °N)	Flujo de la savia medido con el método de Granier, que permite realizar mediciones y registros continuos, en comparación con el sistema de landa-pulso. Requiere referencia con riego completo. Correlaciones razonables entre el déficit de presión de vapor y el potencial hídrico foliar al mediodía.	79
Crecimiento vegetativo	Shiraz Ambiente controlado	La longitud y la cantidad de hojas de las ramas laterales fueron sensibles a los déficits hídricos de medios a leves. Estos indicadores fueron más sensibles al déficit hídrico del suelo que a la conductancia estomática del potencial hídrico foliar antes del amanecer.	80
Modelado del balance hídrico del suelo vinculado con las funciones de respuesta de la planta	Diversas variedades en el sur de Francia (43 °N)	El modelado del blance de agua en el suelo está vinculada con la fotosíntesis y las respuestas a la fracción de humedad del suelo transpirable (FTWS) relacionadas con la expansión de tejidos. Se prevé el estrés variable durante el ciclo del cultivo.	41

Shiraz, Grenache y Mourvèdre en el sur de Francia

La Figura 5 describe una programación de manejo de agua derivada para Shiraz, Grenache y Mourvèdre en viñedos del sur de Francia (43 °N) con diferentes tipos de suelos (Pellegrino *et al.*, 2006). Esta programación se basa en ocho clases de déficits hídricos y tiene el objetivo de lograr una producción de vino de calidad. Asimismo, resalta la necesidad de un buen suministro hídrico: es decir, una fracción de humedad del suelo transpirable (FTSW) superior a 0.6 al inicio de la estación. Esto permite el establecimiento del dosel y carga de frutos equilibrados, y el desarrollo adecuado de las yemas de inflorescencia, las cuales determinarían en gran medida el rendimiento de la siguiente estación. Un déficit hídrico leve desde la floración hasta el envero, (FTSW entre 0.6 y 0.4) conduce a un final más seco para enfrentar las enfermedades y la composición de las bayas en el momento de la cosecha. Un alto suministro hídrico, particularmente durante la maduración,

puede ocasionar una combinación de efectos indirectos (p. ej., enfermedades) y directos no deseados en la composición de las bayas y la calidad del vino. La meta de este régimen de RDI es lograr un final seco que, con frecuencia, provoque una concentración más alta de compuestos de color y sabor en las bayas.

Cabernet Sauvignon en California, Estados Unidos

Prichard (2009) derivó un régimen de RDI con base en la exhaustiva experimentación con Cabernet Sauvignon maduro en Lodi (38 ^{o}N). El régimen tiene como objetivo lograr la mejor relación entre rendimiento y calidad, y es conceptualmente similar al patrón general descrito anteriormente; es decir, garantizar un buen suministro hídrico al inicio del período de crecimiento y reducirlo progresivamente hacia la etapa de la maduración. Después de la cosecha, se recomienda aplicar riego completo para impulsar el crecimiento de las raíces y la acumulación de reservas de la planta en un ambiente notablemente más cálido y con mayor demanda evaporativa que en el estudio de caso previo.

Pinot Noir y Tempranillo in Lleida, España

Girona *et al.* (2006) utilizaron el potencial hídrico foliar al mediodía para determinar el calendario de riego de vides de Pinot Noir de 12 años en Raïmat (42 ^{o}N) durante tres estaciones consecutivas. Ellos utilizaron el mismo principio general de garantizar el suministro hídrico al inicio de la estación y permitir un déficit en las etapas reproductivas tardías, mediante los umbrales que se resumen en la Tabla 6. El RDI en este estudio redujo el rendimiento en 14-43 %, aumentó la productividad del agua de riego en 28-46 % y mejoró la concentración de antocianinas y polifenoles en las bayas en un 10-19 % (Tabla 6).

Trabajando con Tempranillo en el mismo ambiente, Girona *et al.* (2009) midieron el efecto del momento en que ocurriera el déficit hídrico en los atributos del mosto, incluidos contenido de sólidos solubles, polifenoles y concentración de antocianinas. Encontraron un impacto negativo del déficit hídrico entre el cuajado del fruto y el envero, y efectos positivos del déficit hídrico leve después del envero. Propusieron que el manejo del riego debería tener como objetivo evitar los déficits hídricos severos para Tempranillo antes del envero y que el RDI debería centrarse en la ventana entre el envero y la cosecha.

Sauvignon Blanc en Marlborough, Nueva Zelanda

El riego en este clima frío debe tener en cuenta la alta demanda evaporativa a mediados del verano (ET_o > 7 mm/d) y el riesgo del exceso de riego, con los efectos negativos en términos de la calidad del vino y el deterioro ambiental asociado con el lixiviación de nutrientes y pesticidas. Greven *et al.* (2005) establecieron un estudio de RDI en 5 ha de Sauvignon Blanc de 9 años. Combinaron mediciones del uso del agua en la vid, mediciones del crecimiento vegetativo y de las bayas y modelado para calcular la transpiración. Antes del envero, se aplicó riego a las vides cuando el potencial hídrico foliar antes del amanecer estaba por debajo de -0.2 MPa y el umbral era de -0.4 MPa, entre el envero y la cosecha. Las conclusiones preliminares de este sistema de producción en particular son que los atributos del rendimiento y el jugo/zumo no se vieron afectados por las reducciones del riego estacional hasta en el 40 % de las vides con riego completo que reciben 360-690 mm.

TABLA 6 Comparación de tres regímenes de riego con base en los umbrales del potencial hídrico foliar al mediodía y sus efectos en el rendimiento, la productividad del agua de riego (IWP, rendimiento por unidad de riego), y antocianinas y polifenoles en bayas de Pinot Noir. Fuente: Girona *et al.* (2006).

Tratamiento	Umbral de SWP (MPa)			Riego[a]	Rendimiento[b]	IWP[C]	Antocianinas[d]	Polifenoles[e]
	Vegetativo	Crecimiento inicial de las bayas	Postenvero					
Control	-0.73	-0.88	-0.93	1	1	1	1	1
Control-déficit	-0.73	-0.86	-1.12	0.67	0.85	1.28	1.12	1.10
Déficit-déficit	-0.86	-1.13	-1.20	0.39	0.57	1.46	1.19	1.17

a fracción de control; control aprox. 378 mm
b fracción de control; control aprox. 10.8 kg/vid
c fracción de control; control aprox. 54 kg/ha por mm
d fracción de control; control aprox. 556 mg/kg
e fracción de control; control aprox. 13.0 mg/kg

Riesling en el área de Rheingau, Alemania

La región se caracteriza por viñedos en pendientes, algunas de ellas muy pronunciadas, con suelos poco profundos (profundidad < 0.8-1 m). La evapotranspiración de referencia a mediados del verano es entre 3 y 6 mm d^{-1} y la precipitación anual es de 534 mm. Debido a la fuerte variabilidad en la cobertura de las nubes, la temperatura y el déficit de presión de vapor (también en ausencia de precipitación), el potencial hídrico del tallo o las hojas no es lo suficientemente estable para programar el riego. El umbral de riego utilizado es un potencial hídrico antes del amanecer de -0.3 a -0.4 MPa durante todo el desarrollo de las bayas, con excepción de la primera fase de crecimiento de baya, donde no se aplica riego. Se distribuyen cantidades muy reducidas de agua en cada evento de riego (en promedio 4 litros/m^2) para minimizar el riesgo del exceso de agua cuando haya precipitaciones poco después del riego. Durante un período de ocho años, se aplicó riego a las vides 7.4 veces al año en promedio, con un total de 29.3 mm por año (Tabla 4), lo cual representa cerca del 5.5 % de la precipitación anual. A pesar de estas cantidades reducidas, el rendimiento de las vides a las que se aplicó riego fue aproximadamente 50 % más alto con concentraciones de azúcar similares (Tabla 4).

BIBLIOGRAFÍA

Almenberg, J. y Dreber, A. 2009. When does the price affect the taste? Results from a wine experiment. *American Association of Wine Economists Working Paper 35*.

Arnold, R.A., Noble, A.C. y Singleton, V.L. 1980. Bitterness and astringency of phenolic fractions in wine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 28: 675-678.

Aronson, J. y Ebeler, S.E. 2004. Effect of polyphenol compounds on the headspace volatility of flavors. *American Journal of Enology and Viticulture* 55: 13-21.

Aschmann, H. 1973. Distribution and peculiarity of Mediterranean ecosystems. *En: Mediterranean type ecosystems* (di Castri, F. y Mooney, H.A., eds), págs. 11-19, Springer-Verlag.

Baeza, P., Sánchez-de-Miguel, P., Centeno, A., Junquera, P., Linares, R. y Cifre, J., Bota, J., Escalona, J.M., Medrano, H. y Flexas, J. 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (Vitis vinifera L.) An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 106: 159-170.

Bentzen, J. y Smith, V. 2009. *Wine production in Denmark. Do the characteristics of the vineyards affect the chances for awards?* Working Papers 09-21, University of Aarhus, Aarhus School of Business, Department of Economics.

Bravdo, B., Hepner, Y., Loinger, C., Cohen, S. y Tabacman, H. 1985. Effect of irrigation and crop level on growth, yield and wine quality of Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture* 36: 132-139.

Brossaud, F., Chenier, V. y Noble, A.C. 2001. Bitterness and astringency of grape and wine polyphenols. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 7: 33-39.

Castellarin, S.D., Matthews, M.A., Di Gaspero, G. y Gambetta, G.A. 2007. Water deficit accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta* 227: 101-112.

Chapman, D.M., Roby, G., Ebeler, S.E., Guinard, J.X. y Matthews, M.A. 2005. Sensory attributes of Cabernet Sauvignon wines made from vines with different water status. *Journal of Grape and Wine Research* 11: 339-347.

Christoph, N., Bauer-Christoph, C., Geßner, M., Köhler, H.-J., Simat, T.J. y Hoenicke, K. 1998. Bildung von 2- 2-Aminoacetophenon und Formylaminoacetophenon im Wein durch Einwirkung von schwefliger Säure auf Indol-3- 3-essigsäure. *Viticulture Enology Science* 53: 79-86.

Cicchetti, D.V. y Cicchetti, A.F. 2009. Wine rating scales: Assessing their utility for producers, consumers, and oenologic researchers. *International Journal of Wine Research* 1: 73-83.

Conde, C., Silva, P., Fontes, N., Dias, A.C.P., Tavares, R.M., Sousa, M.J., Agasse, A., Coombe, B.G. e Iland, P.G. 2005. Grape berry development and winegrape quality. En: Dry, P.R., y Coombe, B.G., eds, *Viticulture. Volumen 1 -Resources,* Winetitles. págs. 210-248.

Coombe, B.G. 1995. Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 1: 104-110.

Dai, Z.W., Vivin, P., Barrieu, F., Ollat, N. y Delrot, S. 2010. Physiological and modelling approaches to understand water and carbon fluxes during grape berry growth and quality development: a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16: 70-85.

Du, T., Kang, S., Zhang, J., Li, F. y Hu, X. 2006. Yield and physiological responses of cotton to partial root-zone irrigation in the oasis field of northwest China. *Agricultural Water Management* 84: 41-52.

Duchene, E. y Schneider, C. 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development* 25: 93-99.

Duchene, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C. y Merdinoglu, D. 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research* 41: 193-204.

Dunn G.M. 2005. *Factors that control ower formation in grapevines.* En: Australian Society for Viticulrure and Oenology Workshop Proceedings - Transforming Flowers to Fruit, 11-18, Australian Society for Viticulture and Oenology.

Dunn, G.M., Martin, S.R. y Petrie, P.R. 2005. Managing yield variation in vineyards. En: eds. Blair *et al., Twelfth Australian Wine Industry Conference,* Australian Wine Industry Technical Conference Inc.; págs. 51-56,

Evans, R.G., Spayd, S.E., Wample, R.L., Kroeger, M.W., y Mahan, M.O. 1993. Water-use of *Vitis vinifera* grapes in Washington. *Agricultural Water Management* 23: 109-124.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2009.

Friend, A.P. y Trought, M.C. 2007. Delayed winter spur-pruning in New Zealand can alter yield components of Merlot grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13: 157-164.

Fuller, P. y Walsh, B. 1999. *Barossa Vintage Classification 1947-1998.* Barossa Wine and Tourism Association.

Hufnagel, J.C. y Hofmann, T. 2008. Orosensory-directed identification of astringent mouthfeel and bitter-tasting compounds in red wine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56: 1376-1386.

Girona, J., Mata, M., del Campo, J., Arbones, A., Bartra, E. y Marsal, J. 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science* 24: 115-127.

Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Del Campo, J. y Basile, B. 2009. Phenological sensitivity of berry growth and composition of Tempranillo grapevines *(Vitis vinifera* L.) to water stress. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15: 268-277.

Gladstones, J.S. 1992. *Viticulture and environment.* Winetitles.

Greven, M., Green, S., Neal, S., Clothier, B., Neal, M., Dryden, G. y Davidson, P. 2005. Regulated deficit irrigation (RDI) to save water and improve Sauvignon Blanc quality? *Water Science and Technology* 51: 9-17.

Grimes, D.W. y Williams, L.E. 1990. Irrigation Effects on Plant Water Relations and Productivity of Thompson Seedless Grapevines. *Crop Science* 30: 255-260.

Gruber, B.R. y Schultz, H.R. 2005. Coupling of plant to soil water status at different vineyard sites. *Acta Horticulturae* 689: 381-390.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2006. Vine and soil-based measures of water status in a Tempranillo vineyard. *Vitis* 45: 157-163.

Intrigliolo, D. y Castel, J. 2007. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. *Irrigation Science* 26: 49-59.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2008. Effects of irrigation on the performance of grapevine cv. Tempranillo in Requena, Spain. *American Journal of Enology and Viticulture* 59: 30-38.

Intrigliolo, D. y Castel, J. 2010. Response of grapevine cv. 'Tempranillo' to timing and amount of irrigation: water relations, vine growth, yield and berry and wine composition. *Irrigation Science* 28: 113-125.

Linsenmeier, A.W., Loos, U. y Löhnertz, O. 2008. Must composition and nitrogen uptake in a long-term trial as affected by timing of nitrogen fertilization in a cool-climate Riesling vineyard. *American Journal of Enology and Viticulture* 59: 255-264.

Matthews, M.A. y Anderson, M.M. 1988. Fruit Ripening in Vitis vinifera L.: Responses to Seasonal Water Deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 39: 313-320.

Matthews, M.A., Thomas, T.R., y Shackel, K.A. 2009. Fruit ripening in Vitis vinifera L.: possible relation of veraison to turgor and berry softening. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15: 278-283.

McCarthy, M.G. 1997. *Timing of water deficit on fruit development and composition of Vitis vinifera, cv. Shiraz.* University of Adelaide. (Tesis doctoral)

McCarthy, M.G. y Coombe, B.G. 1999. Water status and winegrape quality. *Acta Horticulturae* 171: 447-456.

Messaoudi, Z. y El-Fellah, A. 2004. Optimisation de l'irrigation de la vigne dans le plateau de Meknès (Maroc). *Cahiers Options Méditerranéennes* 62: 197-201.

Moller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M. y Cohen, S. 2007. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 58: 827-838.

Morlat, R., Penavayre, M., Jacquet, A., Asselein, C. y Lemaitre, C. 1992. Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthèse de la vigne en millésime exceptionellement sec 1990. Conséquence sur la maturation du raisin. *Journal International des Sciences dela Vigne et du Vin* 26: 197-218.

Netzer, Y., Yao, C.R., Shenker, M., Bravdo, B.A. y Schwartz, A. 2009. Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system. *Irrigation Science* 27: 109-120.

Ojeda, H., Andari, C., Kraeva, E., Carbonneau, A. y Deloire, A. 2002. Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera cv.* Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture* 53: 261-267.

Pearce, I. y Coombe, B.G. 2005. Grapevine phenology. En: Dry, P.R. y Coombe, B.G., eds. *Viticulture. Volumen 1 -Resources,* Winetitles.; págs. 150-166.

Pellegrino, A., Lebon, E., Simonneau, T. y Wery, J. 2005. Towards a simple indicator of water stress in grapevine (Vitis vinifera L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 11: 306-315.

Pellegrino, A., Goze, E., Lebon, E. y Wery, J. 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy* 25: 49-59.

Petrie, P.R., Cooley, N.M. y Clingeleffer, P.R. 2004. The effect of post-veraison water deficit on yield components and maturation of irrigated Shiraz *(Vitis vinifera L.)* in the current and following season. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 10: 203-215.

Petrie, P.R. y Sadras, V.O. 2008. Advancement of grapevine maturity in Australia between 1993 and 2006: putative causes, magnitude of trends and viticultural consequences *American Journal of Enology and Viticulture 14:* 33-45.

Peyrot des Gachons, C., Van Leeuwen, C., Tominaga, T., Soyer, J.-P., Gaudillère, J.-P. y Dubourdieu, D. 2005. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc in field conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85: 73-85.

Prichard, T.L. 2009. Winegrape irrigation scheduling using deficit irrigation techniques. (sin publicar, ed.).

Reynolds, A.G., Lowrey, W.D. y De Savigny, C. 2005. Influence of Irrigation and Fertigation on Fruit Composition, Vine Performance, and Water Relations of Concord and Niagara Grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 56: 110-128.

Roby, G., Harbertson, J.F., Adams, D.A. y Matthews, M.A. 2004. Berry size and vine water deficits as factors in winegrape composition: Anthocyanins and tannins. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 10: 100-107.

Rodríguez-Pérez, J.R., Riano, D., Carlisle, E., Ustin, S. y Smart, D.R. 2007. Evaluation of hyperspectral reflectance indexes to detect grapevine water status in vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture.* 58: 302-317.

Sadras, V.O. y McCarthy, M.G. 2007. Quantifying the dynamics of sugar concentration in berries of *Vitis vinifera* cv. Shiraz: a novel approach based on allometric analysis *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13: 66-71.

Sadras, V.O., Soar, C.J. y Petrie, P.R. 2007. Quantification of time trends in vintage scores and their variability for major wine regions of Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13: 117-123.

Sadras, V.O., Stevens, R.M., Pech, J.M., Taylor, E.J., Nicholas, P.R. y McCarthy, M.G. 2007. Quantifying phenotypic plasticity of berry traits using an allometric-type approach: A case study on anthocyanins and sugars in berries of Cabernet Sauvignon. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13: 72-80.

Sadras, V.O., Reynolds, M., De la Vega, A.J., Petrie, P.R. y Robinson, R. 2009. Phenotypic plasticity of phenology and yield in wheat, sunflower and grapevine. *Field Crops Research* 110: 242-250.

Salón, J.L., Chirivella, C. y Castel, J.R. 2005. Response of cv. Bobal to timing of deficit irrigation in Requena, Spain: water relations, yield and wine quality. *American Journal of Enology and Viticulture* 56: 1-8.

Schneider, V. 1995. Evaluation of small amounts of flavonoid phenols in white wines by colorimetric assays. *American Journal of Enology and Viticulture* 46: 274-277.

Schultz, H.R. 2003. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment* 26: 1393-1405.

Schultz, H.R. y Gruber, B.R. 2005. Bewässerung und "Terroir" - Ergänzung oder Gegensatz. *Das deutsche weinmagazin* 1/8: 24-28.

Singleton, V.L. y Noble, A.C. 1976. Wine flavor and phenolic substances. En: Charalambous, G. y Katz, I., eds. *Phenolic, Sulfur and Nitrogen Compounds in Food Flavors. Symposium Series No. 26,* American Chemical Society; págs. 47-70.

Sivilotti, P., Bonetto, C., Paladin, M. y Peterlunger, E. 2005. Effect of soil moisture availability on Merlot: From leaf water potential to grape composition. *American Journal of Enology and Viticulture* 56: 9-18.

Stevenson, T. 2005. *The Sotheby's Wine Encyclopaedia.* Dorling Kindersley.

Teixeira, A.H., Azevedo, P.V.d., da Silva, B.B. y Soares, J.M. 1999. Consumo hidrico e coeficiente de cultura da videira na region de Petrolina, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental* 3: 413-416.

Tonietto, J. y Carbonneau, A. 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology* 124: 81-97.

Van Leeuwen, C. y Seguin, G. 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appreciée par l'etat hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif *et al.* maturation du raisin *(Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion 1990). *Journal international des sciences de la vigne et du vin* 28: 81-110.

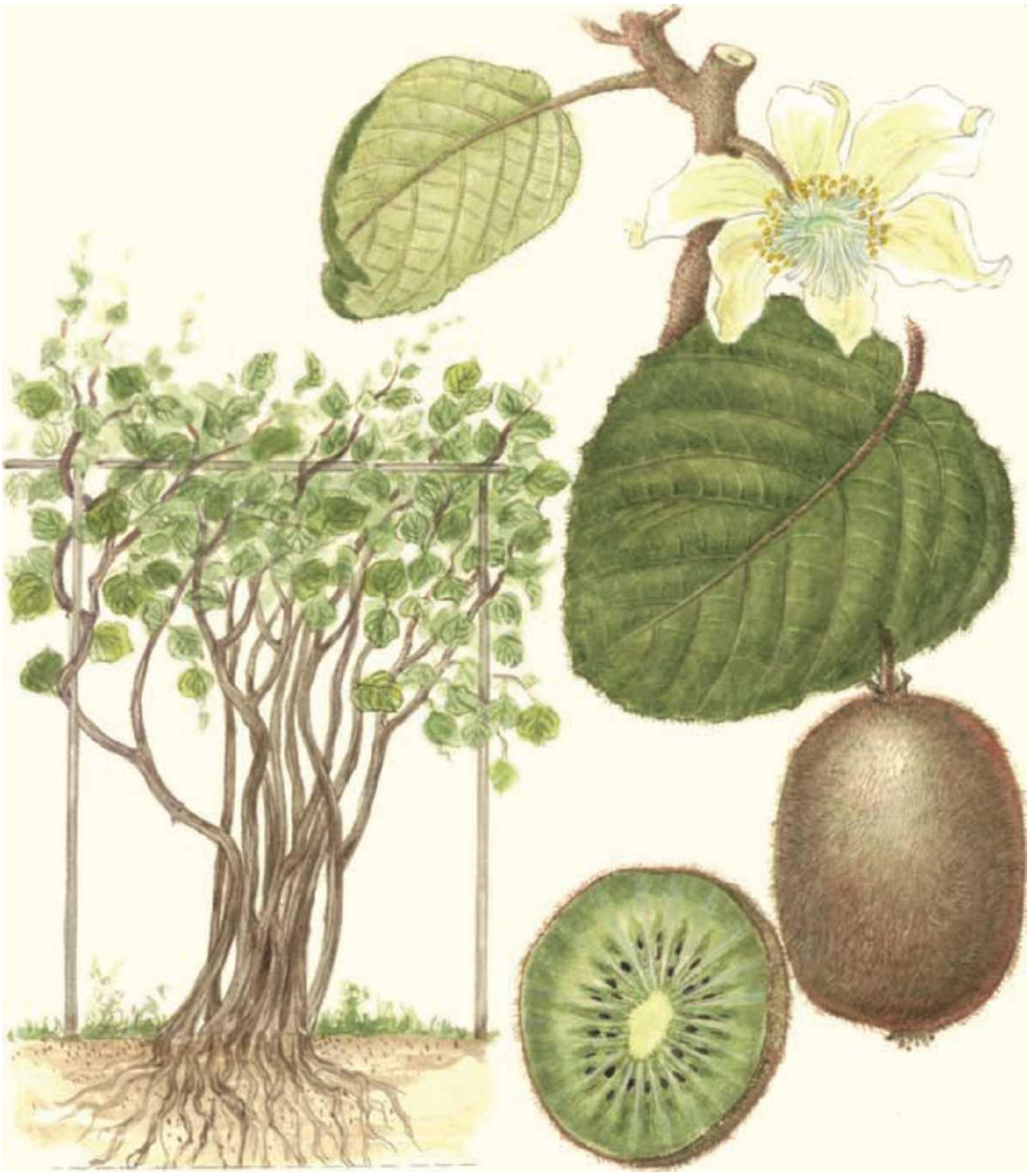
Williams, L.E. y Matthews, M.A. 1990. Grapevine. En: Stewart, B.A. y Nielsen, D.R., eds. *Irrigation of agricultural crops,* 1019-1055, ASA, CSSA, SSSA.

Williams, L.E., Neja, R.A., Meyer, J.L., Yates, L.A. y Walker, E.L. 1991. Postharvest irrigation influences budbreak of 'Perlette' grapevines. *Horticultural Science* 26, 1081

Williams, L.E. y Ayars, J.E. 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 201-211.

Winkel, T. y Rambal, S. 1993. Influence of water stress on grapevines growing in the field: from leaf to whole-plant response. *Australian Journal of Plant Physiology* 20: 143-157.

Wolfe, D.W., Schwartz, M.D., Lakso, A.N., Otsuki, Y., Pool, R.M. y Shaulis, N.J. 2005. Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA. *International Journal of Biometeorology* 49: 303-309.



Kiwi

AUTORES PRINCIPALES
Cristos Xiloyannis
(Università degli studi della Basilicata, Potenza, Italia),
Giuseppe Montanaro
(Università degli studi della Basilicata, Potenza, Italia)

AUTOR COLABORADOR
Bartolomeo Dichio
(Università degli studi della Basilicata, Potenza, Italia)

Kiwi

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Globalmente, el kiwi verde *(Actinidia deliciosa* [A.Chev.] C.F. Liang y A.R. Ferguson), representa aproximadamente el 95 % del kiwi para fines comerciales, el cual se produce con una sola variedad, Hayward. Otras especies, como *Actinidia arguta* (también conocida como *baby kiwi*) se cultivan para un mercado específico y también son reconocidas para efectos ornamentales. Solamente hace poco aparecieron en los mercados internacionales algunas variedades de pulpa amarilla que se originaron en Nueva Zelanda e Italia *(Actinidia chinensis* Planch).

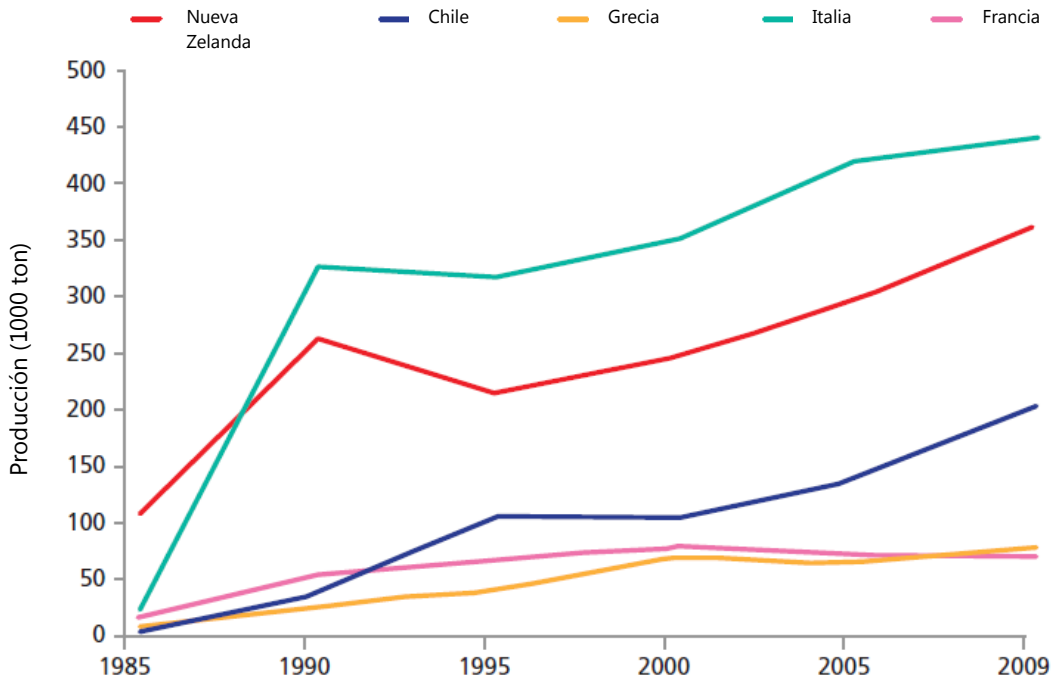
Los principales sistemas de poda adoptados para el kiwi son enrejados con barras en forma de T y la pérgola, con densidades de plantación desde 400-600 (pérgola) hasta 720 plantas/ha (enrejados con barras en forma de T). El manejo del dosel se debe centrar en determinar la carga adecuada de yemas (150 000-200 000 yemas/ha) en invierno y en maximizar el balance de carbono durante el período de crecimiento, al reducir la cantidad de hojas a la sombra mediante poda en verano (Xiloyannis *et al.,* 1999). Esto a su vez aumenta la disponibilidad de luz dentro del dosel, lo cual mejora el crecimiento del fruto y algunas características de su calidad (p. ej., contenido de calcio, Montanaro *et al.,* 2006).

Al igual que el pistacho, el kiwi necesita plantas masculinas que produzcan el polen para las plantas femeninas. La relación estándar adoptada entre plantas masculinas y femeninas es de 1 a 6. La distribución de las plantas masculinas es importante para garantizar la polinización y el tamaño del fruto y el rendimiento adecuados. Se recomienda el uso de colmenas o mecanismos artificiales de distribución de polen durante la floración.

La producción global total en 2008 fue de 1.31 toneladas, en un área de producción de 82 547 hectáreas (FAO, 2011). Italia es el principal país productor en el mundo (36 %) seguido de Nueva Zelanda (28 %) y Chile (13 %). Sin embargo, estas estadísticas no incluyen a China, cuya producción se estima en 403 000 toneladas de fruta en 2004 (un área de producción de aproximadamente 65 000 ha). La Figura 1 presenta las tendencias de producción de los principales países desde 1985.

Además de la variedad verde Hayward, un estudio reciente describe las nuevas variedades de *A. deliciosa* y *A. chinensis* (pulpa amarilla), las cuales se han seleccionado y lanzado recientemente (Testolin y Ferguson, 2009).

FIGURA 1 Tendencias de producción de kiwi en los principales países (FAO, 2011).



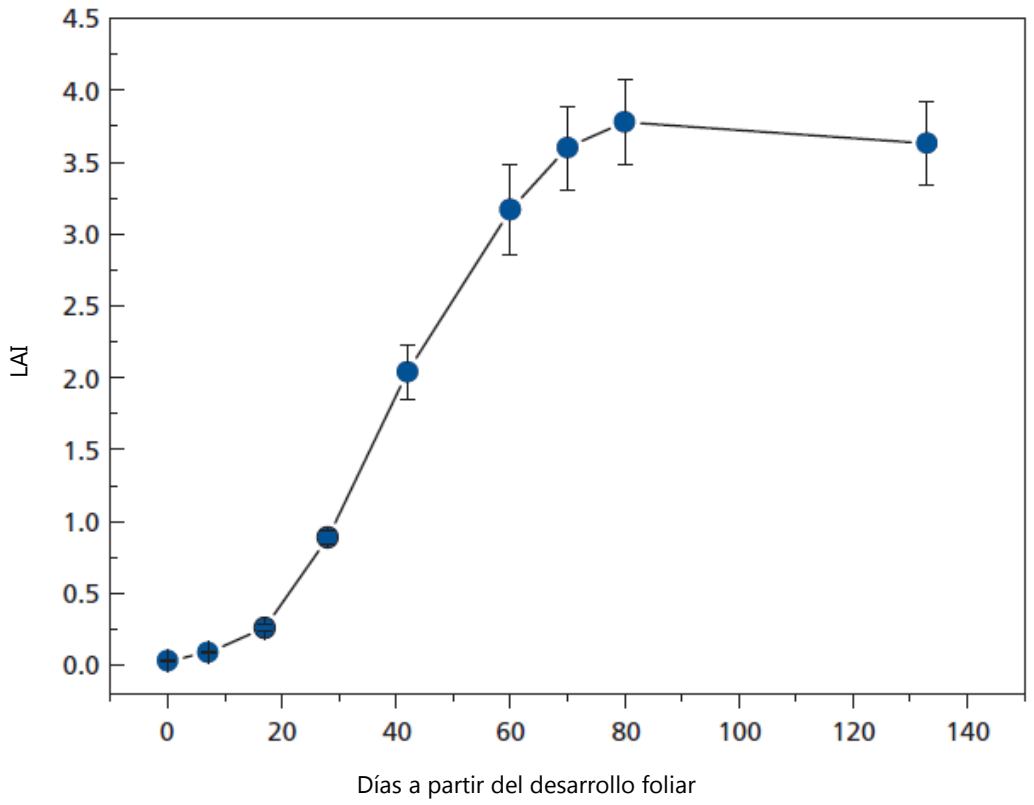
Consideraciones de calidad

Se debe prestar particular atención a la nutrición de calcio (Ca) del kiwi, debido a su importancia en la determinación de la fuerza mecánica de los tejidos y la tolerancia a los estreses bióticos y abióticos. La suspensión de la importación de calcio en el fruto se ha asociado a diversos cambios morfo-anatómicos en sus propiedades, relacionadas con las reducciones en la pérdida de agua del fruto, dado que la transpiración es el único mecanismo encargado de la importación de calcio. Por consiguiente, es conveniente que el manejo del dosel y el riego garanticen la distribución de la luz y la velocidad del viento adecuadas dentro del dosel, para aumentar la transpiración del fruto y la acumulación de Ca. (Montanaro *et al.,* 2006; Xiloyannis *et al.,* 2008).

ETAPAS DE DESARROLLO CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

El desarrollo de las yemas se inicia en primavera y finaliza en gran medida a mediados del verano. Algunas yemas son vegetativas, en el sentido que originan brotes vegetativos; mientras que otras son mixtas, dado que generan tanto hojas como flores que germinan de la misma yema. La inducción del desarrollo reproductivo de la yema ocurre durante la parte final del verano hasta el otoño, seguida de la diferenciación de la inflorescencia, la cual finalizará antes de la siguiente primavera.

FIGURA 2 Patrón estacional del índice de área foliar (LAI) en un huerto maduro de A. *deliciosa* (Hayward) en Italia (Pérgola, 625 plantas/ha). El día 0 es el 10 de abril (Xiloyannis *et al.*, 1999).



El requerimiento de cantidad mínima de horas frío para interrumpir la latencia es de aproximadamente 700-800 unidades de frío de Richardson para la variedad Hayward (Linsley-Noakes, 1989), mientras que para las variedades de pulpa amarilla es inferior (500-600 unidades). Los grados hora acumulados para el desborre de las yemas varían de cerca de 9000 a 16 000 (Wall *et al.,* 2008). El desborre de las yemas tiene lugar en primavera, en un plazo de 10-15 días; en lo sucesivo, los brotes se alargan rápidamente y alcanzan 20-30 cm después de tres semanas. Las hojas se expanden con mucha rapidez durante los primeros 30 días de crecimiento y el área foliar completa se alcanza en un plazo de tres meses (Figura 2). Los valores de LAI están entre 2.5-3 en huertos podados con el sistema de enrejados con barras en forma de T (aprox. 400 plantas/ha), y hasta 4-5 en huertos podados con el sistema de pérgola (aprox. 700 plantas/ha). Portainjertos de diferente vigor podrían incidir fuertemente en el LAI (Figura 3), particularmente durante los primeros años después de la plantación. La evolución del LAI durante los primeros años de plantación se muestra en la Figura 4. Dado que la fracción de hojas a la sombra puede representar hasta el 60 % del LAI en plantas podadas con el sistema de pérgola (Figura 5), es importante controlar el crecimiento mediante la poda en verano, de modo que aumente la proporción de hojas con alta eficiencia en el uso del agua (Figura 6) y de que se incrementen algunos rasgos de calidad del fruto (p. ej., contenido de calcio) relacionados con la disponibilidad de la luz (Montanaro *et al.,* 2006).

Después del cuajado del fruto, el desarrollo de un fruto implica un crecimiento rápido inicial (etapa predominante de división celular), que abarca aproximadamente 50 días y es seguido por una

etapa de agrandamiento de las células, que disminuye en la parte final de la estación. La Figura 7 muestra el patrón de crecimiento del fruto, el cual se describe en términos de cambios en la longitud del fruto o el área superficial.

RESPUESTAS A LOS DÉFICITS HÍDRICOS

El kiwi es bastante sensible al déficit hídrico; las plantas no sobreviven a niveles de estrés asociados con valores de potencial hídrico foliar antes del amanecer (LWP) inferiores a -1.5 MPa. Incluso déficits hídricos leves determinan el cierre estomático rápido y aumentan la temperatura de las hojas, lo cual provoca inicialmente la quemadura del ápice foliar y luego ocasiona la necrosis de todo el limbo. La restricción del suministro hídrico durante el verano reduce con facilidad el tamaño del fruto en la cosecha. El estrés hídrico leve (cerca de -0.5 MPa de LWP antes del amanecer) que ocurre al inicio del crecimiento del fruto (etapa de división celular) o en una etapa posterior durante el crecimiento del fruto ocasiona la reducción en el tamaño del fruto (Figura 8). Sin embargo, en el caso de suelos profundos con alta capacidad de retención de agua, un déficit inicial de riego puede ser tolerado sin afectar el tamaño del fruto (Reid *et al.,* 1996), siempre que el contenido de humedad del suelo sea lo suficientemente alto para evitar un estrés hídrico leve. Además, la demanda evaporativa y el consumo de agua de la planta son bajos en este punto.

FIGURA 3 Evolución del LAI en A. chinensis (variedad Hort16A) injertada con dos portainjertos de Actinidia, en el hemisferio sur (Clearwater *et al.*, 2004).

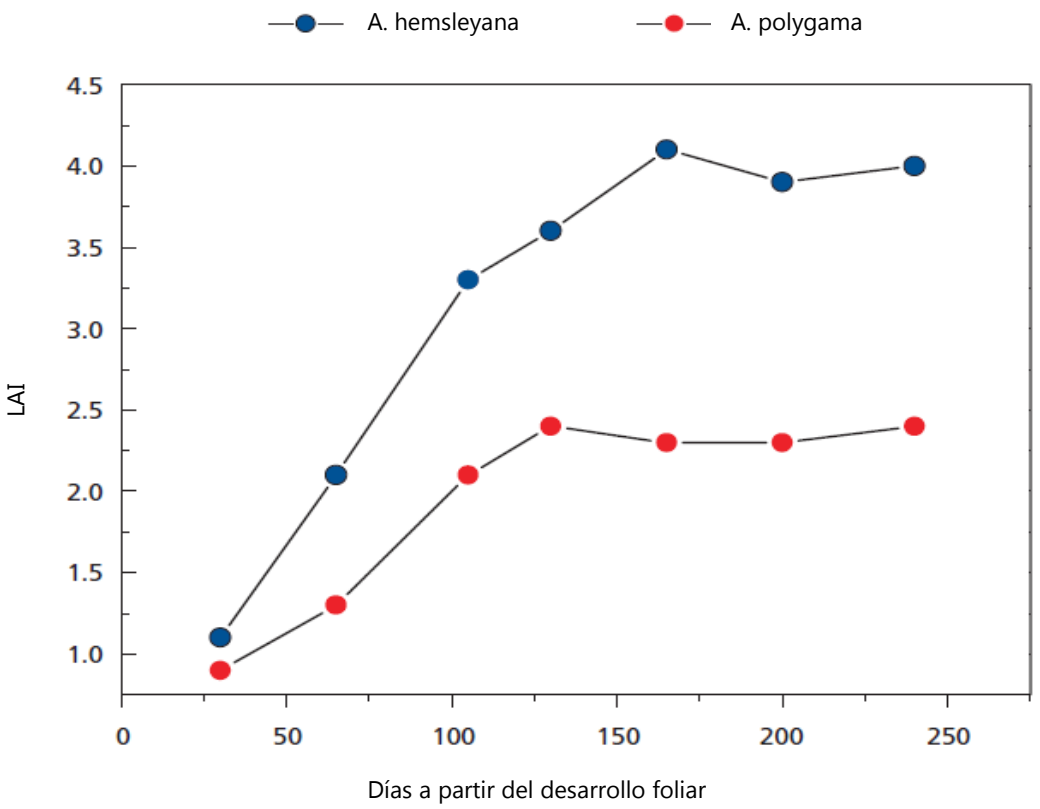


FIGURA 4 Variación del LAI en plantas de kiwi (variedad Hayward) podadas en enrejados con barras en forma de T durante los primeros cuatro años después de la plantación. Las plantas se sembraron a distancias de 4.5 m entre los hileras y 3 m a lo largo de las hileras. El rendimiento en el tercer año fue de 7 ton/ha. (Xiloyannis *et al*., 1999).

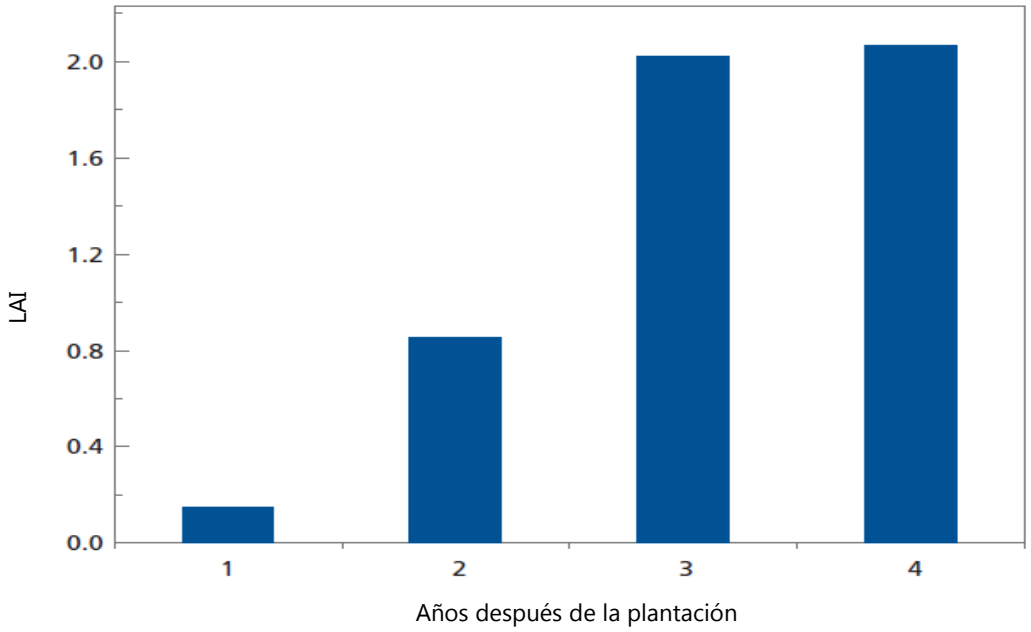


FIGURA 5 Fracción del LAI de hojas descubiertas y sombreadas (< 350 µmol m^{-2} s^{-1} PAR) en un cultivo de kiwi de la variedad Hayward, podado según el método de pérgola.

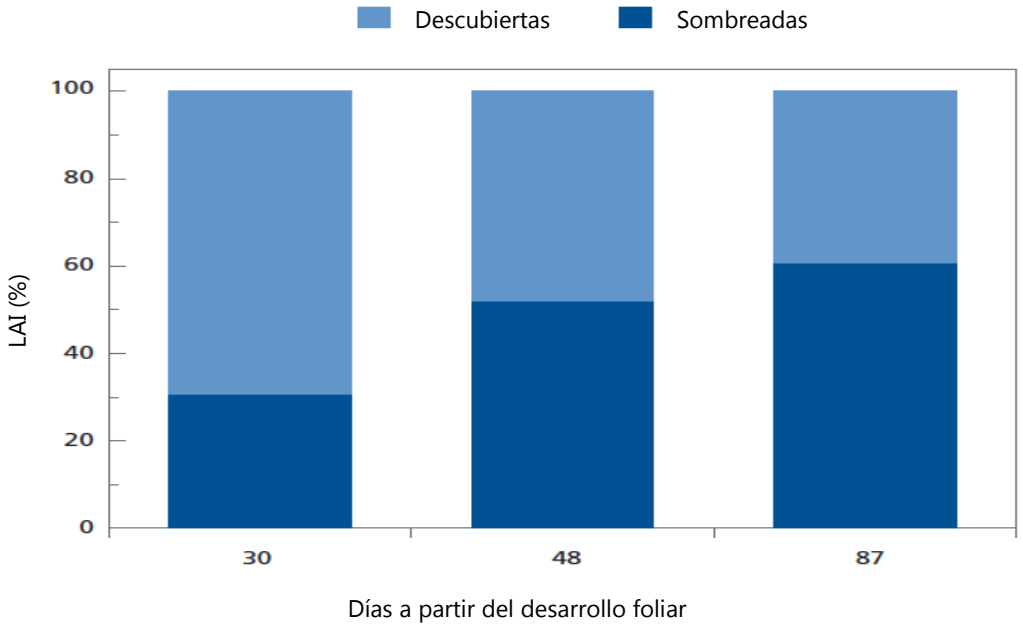


FIGURA 6 Eficiencia del uso del agua media diaria (WUE) en hojas descubiertas (•) y sombreadas (o) durante la estación. DOY = Día del año (Xiloyannis *et al.*, 1999).

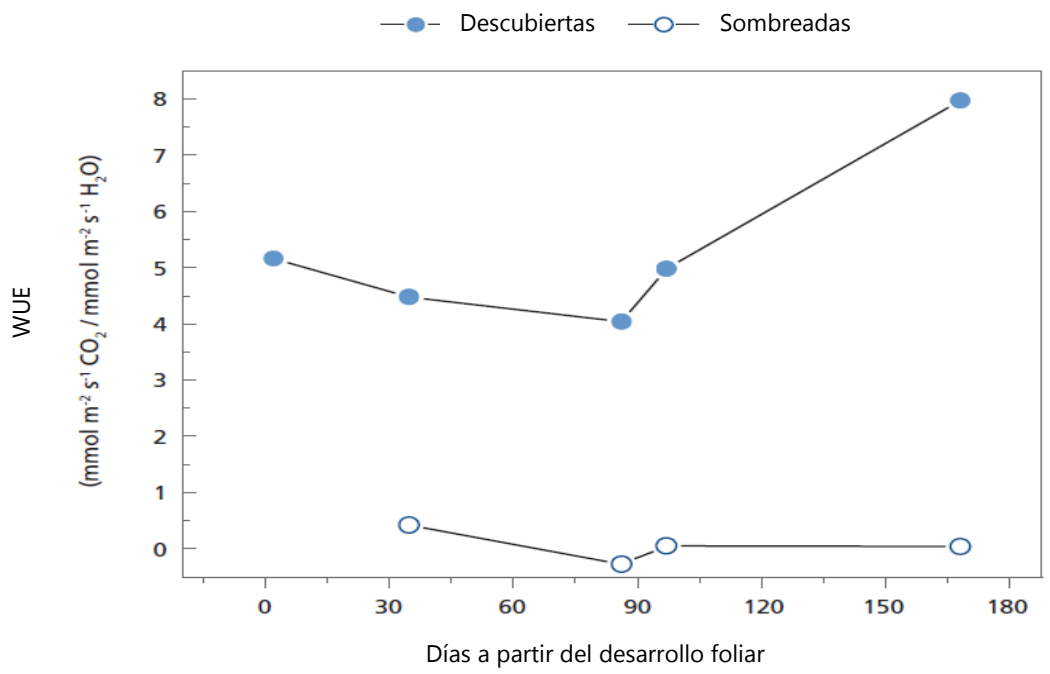


FIGURA 7 Representación esquemática de la evolución estacional de la longitud del fruto (línea continua) y del área de superficie del fruto en un huerto maduro de kiwi (variedad Hayward).

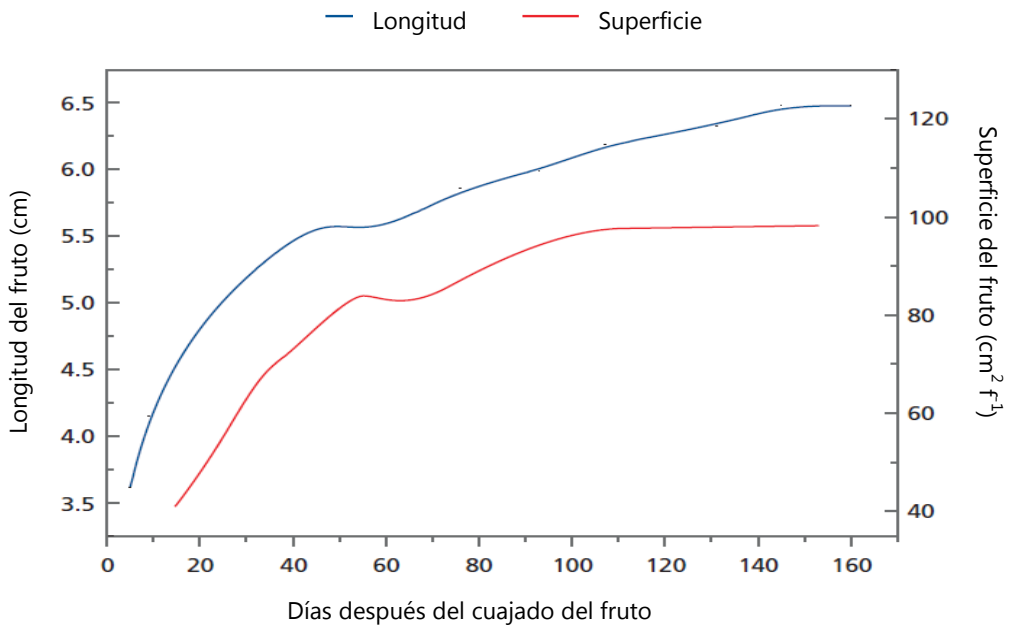


FIGURA 8 Efectos en el volumen del kiwi del período de estrés hídrico (21 días) impuesto al inicio del verano (línea verde) o final del verano (línea roja), en comparación con las plantas bien regadas (línea azul). Las franjas grises representan el período de déficit hídrico (Adaptación basada en Miller *et al.*, 1998).

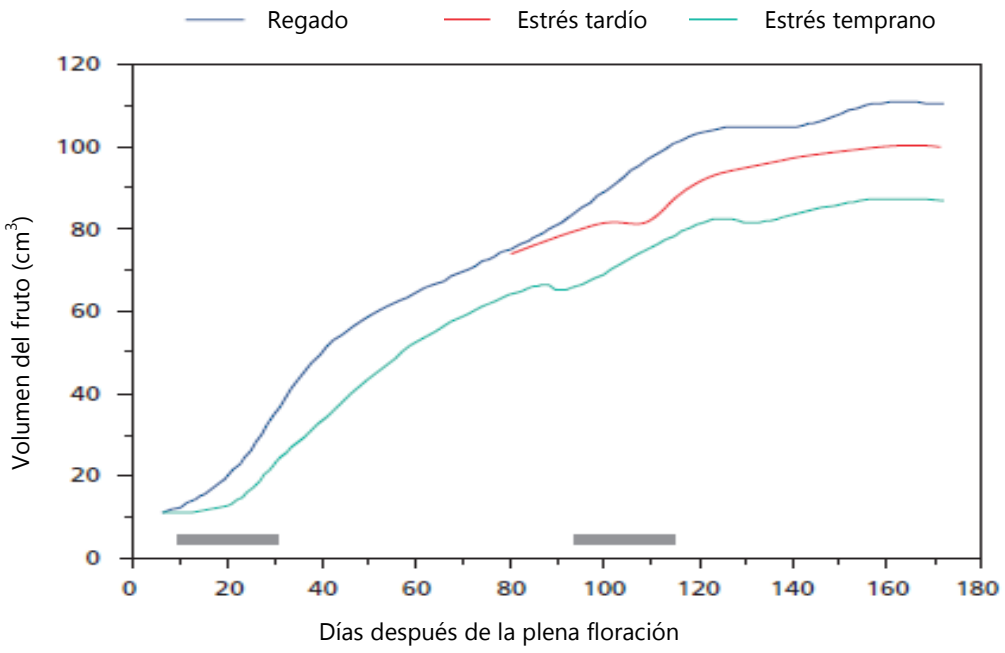


FIGURA 9 Volumen del suelo explorado por las raíces y el agua disponible relativa en un huerto de kiwi plantado con sus propias raíces (740 plantas/ha) durante los primeros 4 años después de la plantación. El rendimiento en el tercer año fue de 7 ton/ha. (Capacidad de campo: 22.3 % DW; punto de marchitez: 11 % DW) (Adaptación basada en Xiloyannis *et al.*, 1993).

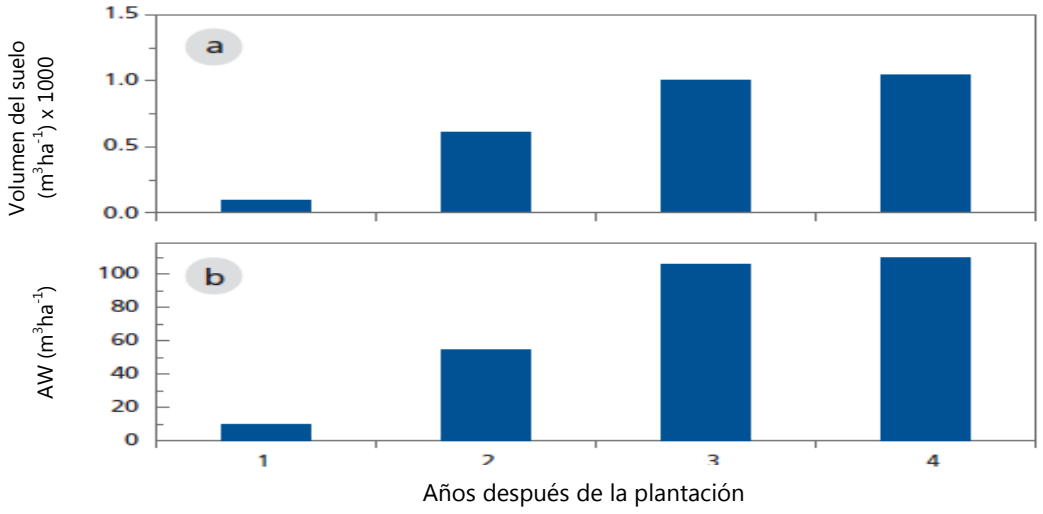
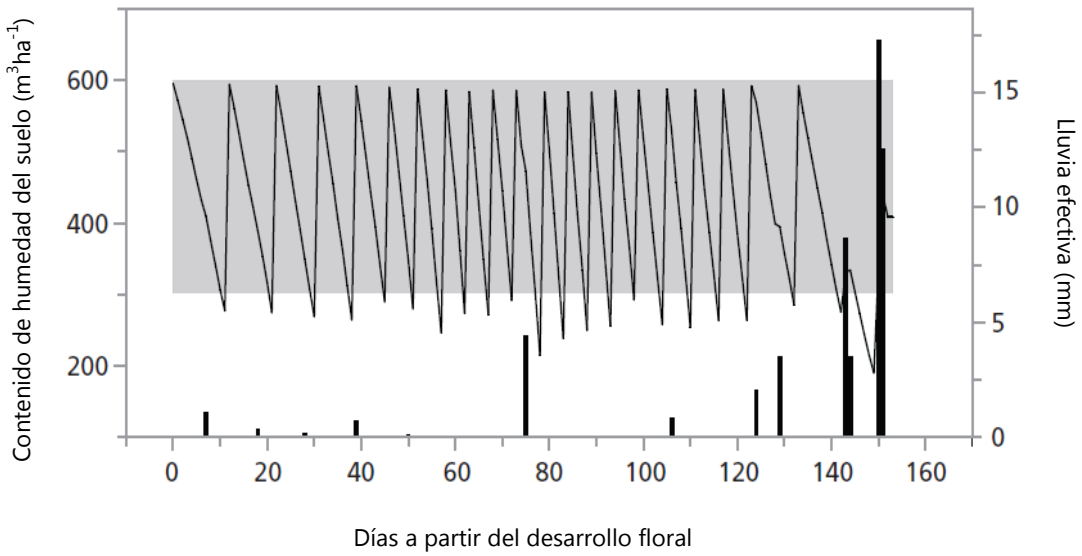


FIGURA 10 Variación del contenido volumétrico de humedad del suelo en una capa de 0-70 cm. El riego se programó cuando el contenido de humedad del suelo estuvo por debajo del umbral inferior del agua fácilmente disponible (RAW) (volumen de riego estacional = 10 012 m^3/ha; ET_o de abril a septiembre = 993.7 mm). La franja gris representa el RAW. Las barras son la precipitación efectiva. DOY = día del año. (El suelo no se labró, las plantas se regaron por microchorros humedeciendo toda la superficie del suelo) (tomado de Montanaro *et al.*, en preparación).



Lograr un objetivo específico de materia seca (DM) en el fruto ha sido identificado por la industria como un componente clave en la sostenibilidad continua de la producción de kiwi. Además, en algunos países se ha establecido el contenido mínimo de DM para el fruto comercializable (p. ej., 15 % de DM es el umbral mínimo en los mercados europeos (EC, 2004)). La acumulación de DM en el fruto depende del mantenimiento de alta fotosíntesis en el dosel, lo cual está relacionado con el sistema de poda, la distribución de luz dentro del dosel y el nivel de manejo del huerto (riego, fertilización, protección contra los estreses bióticos). Las tasas fotosintéticas se recuperan en aproximadamente 10 días después del reabastecimiento de agua en plantas con estrés severo (-1.0 MPa de LWP antes del mediodía) (Montanaro *et al.,* 2007); pero aparentemente la pérdida de acumulación de materia seca durante un período de estrés nunca se recupera.

El kiwi es bastante sensible al estrés hídrico durante todo el período de crecimiento; por tanto, el contenido de humedad del suelo no debe disminuir por debajo del 70 % del agua disponible en la zona radicular (Miller *et al.,* 1998). Es de vital importancia conocer el volumen efectivo del suelo explorado por las raíces para el diseño y manejo del riego en huertos maduros y jóvenes (Figura 8). Debido al peculiar sistema radicular del kiwi, el cual se caracteriza por una baja dominancia del ápice radicular y un alto número de raíces laterales (Figura 9 y Foto 1), el kiwi tiene una alta densidad radicular total en el volumen de suelo explorado (aprox. 0.9 cm por cm^3) (Miller *et al.,* 1998), en comparación con otras especies de árboles frutales, pero la falta de dominancia de una raíz primaria desacelera y limita la exploración del subsuelo por parte de las raíces del kiwi. Este patrón de exploración de las raíces puede ser en parte responsable de la alta sensibilidad del kiwi a los déficits hídricos.

FOTO 1 Sistema radicular de unas plantas de kiwi con raíces propias, arrancado al final del cuarto año después de la plantación.

RECOMENDACIÓN DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS Y MANEJO DE RIEGO

En un día de mediados de verano, un huerto de kiwi mediterráneo consume aprox. 60-70 m^3 de agua por ha y en cada estación se aplican aproximadamente 300-350 litros de agua por kg de fruto (para un rendimiento de 35 ton/ha). Debido a su alta demanda de agua y a la sensibilidad a los ambientes secos, el kiwi cultivado en áreas de alta demanda evaporativa exige riego por micro-aspersores, a fin de maximizar el área humedecida de la superficie del suelo. El contenido volumétrico de humedad del suelo debe permanecer cercano a la capacidad de campo en todo momento (nunca debe alcanzar valores inferiores al 30 % de la capacidad de almacenamiento de agua de la zona radicular); de ahí la necesidad de aplicaciones frecuentes de riego. Los coeficientes de cultivo recomendados para el kiwi se reportan en la Tabla 1; y la Figura 10 muestra un ejemplo de la variación estacional del contenido de humedad del suelo en un huerto de kiwi de la variedad Hayward (sur de Italia 40°08' N; 16°38' E).

TABLA 1 Coeficientes de cultivo para un huerto de kiwi (Hayward) maduro con riego por microchorros, cultivado en el hemisferio norte (N 40° 23′ E 16° 45′). (Volumen de riego estacional = 10 012 m^3/ha). Observe que toda la superficie del suelo se humedeció y el suelo no se labró.

Abr.	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.
0.5	0.7	0.9	1.1	1.1	0.80	0.80

En conclusión, debido a la sensibilidad del kiwi a los déficits hídricos, el RDI no es viable en esta especie, y se debe garantizar el suministro hídrico completo para cumplir los requerimientos hídricos del cultivo a fin de lograr la producción sostenible de kiwi.

BIBLIOGRAFÍA

Clearwater, M.J., Lowe, R.G., Hofstee, B.J., Barclay, C., Mandemaker, A.J. y Blattmann, P. 2004. Hydraulic conductance and rootstock effects in grafted vines of kiwifruit. *Journal of Experimental Botany,* Vol. 55, Nº. 401, págs. 1371-1382.

EC. 2004. European Commission Regulation (EC) No. 1673/2004 laying down the marketing standard applicable to kiwifruit. Official Journal L 300, 25/09/2004.

FAO. 2011. Base de datos FAOSTAT en línea, disponible en el enlace http://faostat.fao.org/. Consultada en diciembre de 2011.

Linsley-Noakes, C.G. 1989. Improving flowering of kiwifruit in climatically marginal areas using hydrogen cynamide. *Scientia Horticulturae* 38: 247-259.

Miller, S.A., Smith, G.S., Boldingh, H.L. y Johansson, A. 1998. Effects of water stress on fruit quality attributes of kiwifruit. *Annals of Botany* 81: 73-81.

Montanaro, G., Dichio, B., Xiloyannis, C., G. y Celano. 2006. Light influences transpiration and calcium accumulation in fruit of kiwifruit plants *(Actinidia deliciosa var. deliciosa). Plant Science* 170: 520-527.

Montanaro, G., Dichio, B. y Xiloyannis, C. 2007. Response of photosynthetic machinery of field-grown kiwifruit under Mediterranean conditions during drought and rewatering. *Photosynthetica* 45(4): 533-540.

Reid, J. B., Brash, D. W., Sorensen, I. B. y Bycroft, B. 1996. Improvement in kiwifruit storage life caused by withholding early-season irrigation. Nueva Zel. *Journal of Crop and Horticultural Science* 24: 21—28.

Testolin, R. y Ferguson, A.R. 2009. Kiwifruit *(Actinidia* spp.) production and marketing in Italy. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 37: 1-32.

Wall, C., Dozier, W., Ebel, R.C., Wilkins, B., Woods, F. y Foshee, W. III. 2008. Vegetative and floral chilling requirements of four new kiwi cultivars of *Actinidia chinensis* and *A. deliciosa. Horticultural Science* 43: 644-647.

Xiloyannis, C., Massai, R., Piccotino, D., Baroni, G. y Bovo, M. 1993. Method and technique of irrigation in relation to root system characteristics in fruit growing. *Acta Horticulturae* 335:505-510.

Xiloyannis, C., Dichio, B., Montanaro, G., Biasi, R. y Nuzzo, V. 1999. Water use efficiency of pergola-trained kiwifruit plants. *Acta Horticulturae* 498: 151-158.

Xiloyannis, C., Dichio B., Montanaro, G., Lang A., Celano, G. y Mazzeo, M. 2008. Fruit morphological and physiological traits influence calcium transport and accumulation in kiwifruit. *Acta Horticulturae,* 767:369-378

5. Epílogo

Esta publicación, *Estudio Riego y Drenaje N.º 66,* sigue la tradición de la FAO en la elaboración de estudios que abordan las problemáticas apremiantes relacionadas con el suelo y el agua, y que proporcionan guías para mejorar el manejo de los recursos agrícolas.

Con este nuevo documento de I&D, la FAO proporciona un conjunto mejorado de herramientas, métodos y conocimientos para el análisis y evaluación de la producción de cultivos con relación al clima, el suministro de agua y la escasez, para avanzar hacia estrategias de manejo que permitan mejorar la productividad de los cultivos y el ahorro de agua. Los usuarios potenciales a los que se dirige este documento son los profesionales agrícolas, incluyendo asociaciones de agricultores, distritos de riego, servicios de extensión, ingenieros consultores, agencias gubernamentales y no gubernamentales, investigadores científicos, y economistas agrícolas y de recursos naturales.

Frente a la creciente amenaza de la escasez de agua a nivel mundial, esta publicación llega en un momento de gran demanda de la maximización de la eficiencia y del uso productivo del agua. Existe la necesidad de intensificar la producción agrícola de manera sostenible, de cara a la aceleración incesante de la competencia por los recursos hídricos limitados, junto con las incertidumbres derivadas del cambio climático.

Las herramientas y métodos presentados son efectivos siempre y cuando el usuario sea plenamente consciente de las fortalezas y limitaciones de su aplicación. Invitamos al usuario a leer cuidadosamente los diferentes Capítulos, a fin de evitar caer en evaluaciones simplistas e inadecuadas.

El Capítulo 2 analiza el método original de la función de producción del agua de la FAO *(I& D* N.º 33) para la evaluación de la respuesta del rendimiento al agua. Este enfoque empírico es conveniente sobre todo cuando se requiere una aproximación rápida e inicial a la reducción del rendimiento relacionada con la limitación hídrica. Este método ha encontrado muchas aplicaciones, sobre todo en diversos estudios interdisciplinarios a escala regional o incluso nacional, donde prevalecen las condiciones generalizadas de los cultivos y se requiere de evaluaciones rápidas de las reducciones del rendimiento bajo suministro hídrico limitado. Es necesario tener precaución, ya que la simplificación introducida limita su aplicabilidad para la obtención de estimaciones precisas de la respuesta del rendimiento al agua.

El uso de *AquaCrop* (Capítulo 3) se limita solamente a cultivos herbáceos, pero tiene una amplia gama de aplicaciones, desde la parcela hasta el nivel de campo, y se puede escalar hasta el nivel de cuenca o regional a través de la agregación. Se puede utilizar para la evaluación de la brecha de rendimiento, para la evaluación comparativa del funcionamiento del riego, y puede ayudar en la toma de decisiones informadas –desde tácticas hasta estratégicas– para el manejo operativo relacionado con el agua. Se puede utilizar para optimizar el sistema de cultivo en términos de la elección del cultivo y la variedad, el período de siembra y el calendario de riego para una determinada combinación de suelo y clima donde el agua sea limitante. *AquaCrop* también es particularmente apropiado para el análisis del impacto de los escenarios de cambio climático sobre la productividad de los cultivos, los requerimientos hídricos y el consumo. Se debe tener precaución en el uso de *AquaCrop*, ya que su funcionamiento depende en gran medida de la exactitud de la información de entrada y de qué tan bien se haya calibrado el cultivo. Un cultivo bien calibrado y parámetros locales precisos –particularmente datos meteorológicos– características de humedad del suelo y la fenología de la variedad, son requisitos previos para obtener resultados de las simulaciones de alta calidad. Por lo tanto, se recomienda a los usuarios no depender únicamente del archivo de cultivo para los parámetros de un cultivo particular, sino revisar la página web de *AquaCrop* (www.fao.org/nr/water/aquacrop.html) para conocer la actualización de los parámetros

de cultivo, y prestar especial atención a las estimaciones o aproximaciones involucradas en la determinación de los parámetros locales. Las preguntas y solicitud de asistencia con respecto al modelo se deben dirigir al servicio de asistencia de *AquaCrop*, a su dirección de correo electrónico (AquaCrop@fao.org).

La respuesta del rendimiento de los cultivos arbóreos y vides al agua se aborda a través de las *Guías* para *árboles y vides* (Capítulo 4), ya que el nivel actual de conocimientos y la complejidad de los cultivos perennes impiden el desarrollo de un modelo de simulación como *AquaCrop*. El manejo del riego en la producción de vides y frutos debe estar basado en estimaciones precisas de los requerimientos de agua de los cultivos, y en las respuestas específicas de los cultivos a los déficits hídricos, con énfasis en la calidad del fruto. Primero se analizan los conceptos generales y aplicaciones, seguidos de secciones sobre cultivos específicos, en donde se generalizan las respuestas del rendimiento al suministro de agua en forma de funciones de producción. Para muchas de estos cultivos de plantas perennes existen conflictos entre la calidad del fruto y el rendimiento, ya que la máxima rentabilidad económica neta se consigue a niveles de riego por debajo de los requeridos para el rendimiento máximo. En la sección sobre uvas para la producción de vino se describe un ejemplo sobresaliente de esta respuesta. Teniendo en cuenta tales conflictos y la creciente escasez de agua en muchas áreas del mundo, cada capítulo incluye guías sobre el uso del riego deficitario regulado, bajo ciertos supuestos sobre los niveles de restricción del suministro de agua. El objetivo es proporcionar guías para optimizar el uso de un suministro limitado de agua, teniendo en cuenta la sensibilidad de ciertas etapas de crecimiento a los déficits hídricos.

Los cultivos perennes que se abordan en el Capítulo 4 se cultivan principalmente en zonas templadas, debido a que la información insuficiente impidió la inclusión de algunos cultivos arbóreos tropicales importantes. Dada la creciente demanda de frutos, este tema está recibiendo ahora mayor atención en los programas de investigación. En futuras versiones de esta publicación se introducirán guías para cultivos perennes adicionales. La síntesis de respuestas al agua de los árboles frutales y vides que aquí se presenta ofrece guías, no sólo para mejorar la eficiencia del uso del agua en las plantaciones, sino también para hacer frente a situaciones de escasez de agua, que son una gran amenaza para la viabilidad y sostenibilidad de la producción de frutos en muchas regiones del mundo.

En esta nueva publicación se incluye un CD que contiene una copia de cada uno de los siguientes: (i) esta publicación completa *(Estudio de Riego y Drenaje* N.º 66), (ii) la función original de producción de agua de la FAO *(Estudio de Riego y Drenaje* N.º 33), (iii) la guía de la FAO sobre evapotranspiración del cultivo (Estudio de *Riego y Drenaje* N.º 56); y (iv) un documento que enumera los software gratuitos potencialmente útiles y su enlace en internet.

Como próximos pasos, el mantenimiento y desarrollo del modelo *AquaCrop* tienen tres aspectos a tener en cuenta. (1) Uno de ellos es la mejora continua del modelo y el refinamiento de los parámetros de los cultivos ya calibrados. Se prevé que una nueva versión del modelo, impulsada por la retroalimentación de los usuarios y ensayos con conjuntos más extensos de datos experimentales, podría ser lanzada en la página web de *AquaCrop* como y cuando la situación lo requiera. En cuanto a los parámetros de cultivo, según se indica en el sitio web de *AquaCrop*, la exhaustividad de la parametrización varía de cultivo a cultivo. A medida que se disponga de más datos experimentales para la calibración y evaluación, se espera un refinamiento en los valores de los parámetros, los cuales se publicarán en el sitio web. (2) Los cultivos herbáceos adicionales están y continuarán siendo calibrados. Estos pueden incluir fríjol común o judías, mijo, yuca, papa o patata dulce, garbanzo, cultivos forrajeros y hortalizas de hoja. Algunos de ellos están entre los denominados como *cultivos importantes a nivel local*, a los que se les prestará especial atención. A medida que se finalicen, nuevas secciones de cultivos serán proporcionadas a través de la página web de *AquaCrop*, al igual que los archivos de cultivos calibrados con los parámetros calibrados. (3) Como parte del desarrollo continuo del software, se pondrán a disposición versiones especiales para su uso con varios sistemas operativos (p. ej., Linux, Unix, etc.) y plataformas de análisis espacial

(p. ej., GIS, DSS, etc.). Para la actualización, se le recomienda al usuario visitar periódicamente la página web de *AquaCrop*.

Se prestará también especial atención a la comunidad de usuarios de *AquaCrop* y a los proveedores de datos e información. Se estableció una *Red AquaCrop* con el propósito de compartir experiencias y difundir resultados significativos. La difusión y la propagación de la "formación" en el uso y aplicación de *AquaCrop* y de las *Guías* para árboles y vides, así como de otras herramientas relacionadas. *Se están desarrollando talleres presenciales*, cursos de formador de formadores, y métodos de *e-learning a distancia*, así como otras actividades de desarrollo de capacidades, para responder a esta necesidad.

El objetivo general es llegar e involucrar a una gran comunidad de usuarios, usuarios potenciales e investigadores con buenos datos experimentales, a fin de mejorar y ampliar la utilización de estas herramientas, métodos y conocimientos, y mejorarlas con base en los aportes y retroalimentación de la comunidad. Esto finalmente conducirá a una capacidad aumentada de los usuarios en la gesntión sostenible del agua y de los cultivos, al tiempo que mejora su productividad.

ESTUDIOS DE RIEGO Y DRENAJE DE LA FAO

1 Irrigation practice and water management, 1972 (Ar* E* F* S*)
1 Rev.1 Irrigation practice and water management, 1984 (E)
2 Irrigation canal lining, 1971 (New edition, 1977, available in E, F and S in the FAO Land and Water Development Series, No. 1)
3 Design criteria for basin irrigation systems, 1971 (E*)
4 Village irrigation programmes - a new approach in water economy, 1971 (F E*)
5 Automated irrigation, 1971 (E* F* S*)
6 Drainage of heavy soils, 1971 (E* F* S*)
7 Salinity seminar, Baghdad, 1971 (F E*)
8 Water and the environment, 1971 (E* F* S*)
9 Drainage materials, 1972 (E* F* S*)
10 Integrated farm water management, 1971 (E* F* S*)
11 Planning methodology seminar, Bucharest, 1972 (E* F*)
12 Farm water management seminar, Manila, 1972 (E*)
13 Water use seminar, Damascus, 1972 (F* E*)
14 Trickle irrigation, 1973 (E* F* S*)
15 Drainage machinery, 1973 (F* E*)
16 Drainage of salty soils, 1973 (C* E* F* S*)
17 Man's influence on the hydrological cycle, 1973 (E* F* S*)
18 Groundwater seminar, Granada, 1973 (E* F S*)
19 Mathematical models in hydrology, 1973 (E)
20/1 Water laws in Moslem countries - Vol. 1, 1973 (F* E*)
20/2 Water laws in Moslem countries - Vol. 2, 1978 (F E)
21 Groundwater models, 1973 (E)
22 Water for agriculture - index, 1973 (E/F/S*)
23 Simulation methods in water development, 1974 (E* F* S*)
24 Crop water requirements, (rev.) 1977 (C* E F S)
25 Effective rainfall, 1974 (C* E* F* S*)
26/1 Small hydraulic structures - Vol. 1, 1975 (E* F* S*)
26/2 Small hydraulic structures - Vol. 2, 1975 (E* F* S*)
27 Agro-meteorological field stations, 1976 (E* F* S*)
28 Drainage testing, 1976 (E* F* S*)
29 Water quality for agriculture, 1976 (E* F* S*)
29 Rev.1 Water quality for agriculture, 1985 (C** E* F* S*)
30 Self help wells, 1977 (E)*
31 Groundwater pollution, 1979 (C* E* S)
32 Deterministic models in hydrology, 1979 (E)*
33 Yield response to water, 1979 (C* E F S)
34 Corrosion and encrustation in water wells, 1980 (E)
35 Mechanized sprinkler irrigation, 1982 (C E* F S*)
36 Localized irrigation, 1980 (Ar C E* F S*)
37 Arid zone hydrology, 1981 (C E)
38 Drainage design factors, 1980 (Ar C E F S)
39 Lysimeters, 1982 (C E* F* S*)
40 Organization, operation and maintenance of irrigation schemes, 1982 (C E* F S*)
41 Environmental management for vector control in rice fields, 1984 (E* F* S*)
42 Consultation on irrigation in Africa, 1987 (F E)
43 Water lifting devices, 1986 (F E)
44 Design and optimization of irrigation distribution networks, 1988 (F E)
45 Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems, 1989 (E)
46 CROPWAT - a computer program for irrigation planning and management, 1992 (E F* S*)
47 Wastewater treatment and use in agriculture, 1992 (E)
48 The use of saline waters for crop production, 1993 (E)
49 CLIMWAT for CROPWAT, 1993 (E)
50 Le pompage eolien, 1994 (F)
51 Prospects for the drainage of clay soils, 1995 (E)
52 Reforming water resources policy, 1995 (E)
53 Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects, 1995 (E)
54 Crues et apports, 1996 (F)
55 Control of water pollution from agriculture, 1996 (E* S)
56 Crop evapotranspiration, 2006 (E S)
57 Soil salinity assessment, 1999 (E)
58 Transfer of irrigation management services: guidelines, 1999 (E F R S)
59 Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems, 2000 (E)
60 Rev.1 Materials for subsurface land drainage systems, 2005 (E)
61 Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas, 2002 (E)
62 Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems, 2007 (E)
63 Modernizing Irrigation Management - the MASSCOTE approach. Mapping System and Services for Canal Operation Techniques, 2007 (E)
64 Manual on small earth dams. A guide to siting, design and construction, 2010 (E)
65 Guidelines on spate irrigation, 2010 (E)
66 Crop yield response to water, 2012 (E)

Ar	-	Árabe	Multil	-	Plurilingüe
C	-	Chino	*		Fuera de circulación
E	-	Inglés	**		En preparación
F	-	Francés			
P	-	Portugués			
R	-	Ruso			
S	-	Español			

Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua

A partir del conocimiento científico y los avances tecnológicos desarrollados en las últimas décadas y con la colaboración de una red de diversas instituciones científicas, la FAO ha recopilado un conjunto de herramientas en este Estudio de Riego y Drenaje, para evaluar de mejor manera y mejorar la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua.

Estas herramientas proporcionan los medios para perfeccionar las capacidades de evaluación y manejo necesarias para: comparar los resultados de varios planes de asignación de agua, mejorar las prácticas de control de humedad del suelo bajo condiciones de secano, optimizar el calendario de riego (ya sea máximo, deficitario o suplementario), intensificar de forma sostenible la producción agrícola, cerrar las brechas en el rendimiento y en la productividad de agua, cuantificar el impacto de la variabilidad climática y el cambio en los sistemas de cultivo, mejorar las estrategias que buscan mayor productividad hídrica y ahorro de agua, y minimizar el impacto negativo sobre el medio ambiente causado por la agricultura.

Estas herramientas tienen un valor incalculable para varios profesionales del sector agrario, entre ellos: gestores y planificadores del suministro hídrico, servicios de extensión, distritos de riego, ingenieros consultores, agencias gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y asociaciones de agricultores, economistas agrarios y científicos investigadores.

INSTITUCIONES COLABORADORAS

I2800S/1/09.14