

El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque

C.L. Meneses-Tovar

Aplicación de un método de interpretación de las imágenes de teledetección a la observación de los cambios en la salud del bosque en el tiempo.

La degradación del bosque es un problema especialmente grave en los países en desarrollo. En el año 2000, la superficie total de los bosques degradados en 77 países se estimó en 800 millones de hectáreas; y en 500 millones de hectáreas de esos bosques se pudo constatar que la vegetación primaria se había transformado en vegetación secundaria (OIMT, 2002). Entre otras de sus repercusiones adversas, la degradación representa una proporción importante de las emisiones de gases de efecto invernadero. Es pues urgente medir y analizar este fenómeno con el objeto de diseñar medidas que permitan contrarrestarlo.

En el presente artículo se describe la forma en que fue llevado a la práctica un método de análisis de los datos de teledetección, el cual, en conjunción con

los datos que se recogieron en el terreno, permitió hacer el seguimiento de la degradación. Se presenta un estudio que desvela la relación entre los indicadores de las funciones del bosque y el índice normalizado diferencial de la vegetación (NDVI, por su sigla en inglés). Este índice arroja valores estimados del «verdor» del bosque que resultan del análisis de datos obtenidos mediante satélite. Se parte de la premisa de que el NDVI representa un indicador de la salud vegetal porque la degradación de la vegetación del ecosistema, es decir la megua de su verdor, quedaría reflejada en el valor, más reducido, del NDVI. Por consiguiente, determinando la relación entre la magnitud de un indicador de varios ecosistemas forestales —la biomasa aérea—

Carmen Lourdes Meneses-Tovar
es Subgerente de teledetección de la
Comisión Nacional Forestal de México.

Vegetación natural, México



y el NDVI es posible hacer el seguimiento de los procesos de degradación.

MEDICIÓN DE LOS CAMBIOS

Teledetección y fenología

Una de las aplicaciones más importantes de la teledetección es el seguimiento de los procesos que ocurren en la Tierra.

Las imágenes de teledetección pueden utilizarse para el análisis de procesos breves, por ejemplo para el seguimiento del ciclo de crecimiento de los cultivos y la evaluación de los rendimientos de una cosecha. Se estudian con este propósito las imágenes de satélite captadas en diversas etapas del ciclo de cultivo para un único año: la preparación del suelo, la siembra, el establecimiento de la planta, el crecimiento activo, la floración, la fructificación y la translocación de nutrientes o la maduración de los frutos y la cosecha.

Las imágenes de satélite también permiten conocer los procesos vegetales y edáficos de plazo mediano o largo. El análisis de la degradación forestal y la detección del cambio del uso de la tierra constituyen los principales ejemplos de aplicación de esta técnica. Las imágenes obtenidas en diferentes años pueden entonces ser comparadas siempre y cuando hayan sido captadas en el mismo período del año; se reduce así al mínimo la expresión de variables como la calidad de la luz, la geometría de la observación y, en el caso de los ecosistemas vegetales, las diferencias de comportamiento de la comunidad a lo largo del año (Singh, 1986; Mouat *et al.*, citado por Chuvieco, 1998).

Los dos procedimientos mencionados son técnicas *fenológicas*. La fenología es el estudio de la cronología de los ciclos biológicos de plantas y animales, y en particular en lo referente a los cambios que tienen lugar en las distintas estaciones y bajo diversas condiciones climáticas. En el caso de los cultivos anuales, la observación de las variaciones en las imágenes es relativamente sencilla. Los cambios en la fotorreflexancia a lo largo del ciclo de crecimiento de los cultivos son evidentes y ocurren durante períodos breves. En el caso de los ecosistemas forestales, los procesos naturales y los métodos para observarlos son prolongados. El comportamiento de los individuos tiene tiempos

más dilatados (5 a 25 años), y esto también vale para las plantaciones forestales, que son «ecosistemas puros» (por ejemplo, los rodales de una misma edad). A lo largo de este período es posible distinguir entre las fases de plantación, establecimiento de los plantones y crecimiento vegetativo hasta la madurez comercial; estas fases abarcan procesos dinámicos más complejos como la floración, la fructificación, el cambio de las hojas y ramas y el engrosamiento del tronco, que suponen modificaciones constantes de la materia viva, o biomasa aérea, presente por encima del suelo.

Más compleja resulta la observación de los procesos fenológicos de un rodal primario o natural que encierra individuos de diferentes edades y especies, donde cada ejemplar tiene su propio ritmo o comportamiento fenológico —floración, fructificación, pérdida de las hojas y rebrote—, y su propia estrategia de supervivencia en cuanto a la competencia por la luz, los nutrientes y el agua.

El NDVI y la fenología

Existen diversas metodologías para estudiar mediante imágenes satelitales los cambios estacionales que ocurren en la vegetación; uno de ellos es la aplicación de índices vegetativos relacionados con el verdor (Chuvieco, 1998). El NDVI mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres. Aplicado a las comunidades de plantas, el índice arroja valores de intensidad del verdor de la zona, y da

cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo. El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de -1 a $+1$.

En la práctica, los valores que están por debajo de $0,1$ corresponden a los cuerpos de agua y a la tierra desnuda, mientras que los valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética de las zonas de matorral, el bosque templado, la selva y la actividad agrícola.

EL ESTUDIO

Antecedentes y conjuntos de datos

Partiendo de las imágenes de teledetección y de estudios de campo, se buscó establecer la relación entre el NDVI y la biomasa aérea. En primer lugar, hubo que recolectar las imágenes. Luego, se definieron los valores del NDVI por medio del análisis de esas imágenes. A continuación, dichos valores se aplicaron a diferentes comunidades vegetativas con el fin de validar tanto el método mismo como de especificar una línea de referencia para las observaciones. Luego, el comportamiento de las comunidades fue observado a lo largo del tiempo. Por último, se pudo correlacionar el NDVI con la biomasa aérea —un indicador de la salud del bosque— mediante datos de estudios de campo. Estos permitieron comprobar la validez del método para el seguimiento del uso de bosque.

El estudio se centró en México, país que posee una superficie de tierras emergidas de alrededor de 2 millones de kilómetros

CUADRO 1. Clasificación de las observaciones de campo hechas entre 2004 y 2007 y utilizadas para el análisis del NDVI

Comunidad vegetal	Clave del Instituto Nacional de Estadística y Geografía	Número de sitios
Bosque de encino	Encino y encino y pino	20 139
Bosque de pino	Pino, abeto, enebro, ciprés, enebro y pino y encino, con predominancia de pino	6 276
Desierto y dunas	Matorral desértico micrófilo	199
Manglar	<i>Rhizophora</i> spp.	980
Matorral	Diferentes fisonomías de matorral	10 945
Bosque mesófilo	Bosque muy húmedo de montaña	1 526
Pastizal	Pastos naturales por la presencia de sodio y yeso	235
Selvas altas y medianas	Selvas altas y medianas deciduas o perennifolias	16 976
Selvas bajas	Selvas bajas deciduas o perennifolias	6 470
Tular	<i>Thyphus</i> spp.	190
Sin cobertura vegetal	Sin cobertura vegetal	1 229

1
Comportamiento mensual promedio del NDVI por tipo de comunidad vegetal

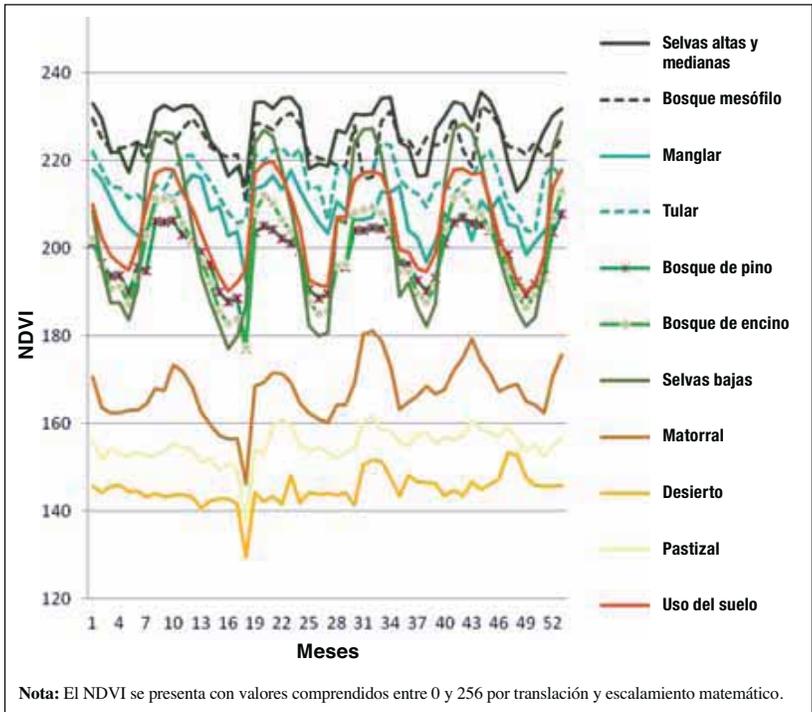
cuadrados. Dada su particular localización y relieve, México presenta una gran variedad de ecosistemas y zonas de vida, que van de las tropicales a las templadas. Para el estudio se utilizaron imágenes satelitales e información procedente de inventarios. Las imágenes satelitales fueron obtenidas por medio del espectrómetro de formación de imágenes de resolución moderada (MODIS), un instrumento lanzado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de los Estados Unidos de América a bordo de dos satélites que proporciona mediciones a gran escala de la dinámica global.

El Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), una base documental que está bajo la responsabilidad operativa de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), fue la fuente de la información terrestre para las estimaciones. Las estadísticas del INFyS fueron recogidas durante el período 2004-2007 y actualizadas en 2008-2009.

Determinación de los valores del NDVI

Para estimar el comportamiento fenológico de los ecosistemas forestales se analizaron compuestos de imágenes MODIS de resolución espacial de 500 m tomadas durante los meses sin nubosidad. Las imágenes fueron elaboradas por el Instituto para Estudios Computacionales Avanzados de la Universidad de Maryland (Estados Unidos de América). Se examinaron 53 imágenes compuestas consecutivas correspondientes a 30 días, desde el 16 de noviembre de 2000 hasta el 13 de agosto de 2005. Los valores del NDVI fueron calculados para esas imágenes.

A continuación, fue necesario correlacionar los valores del NDVI con los tipos de vegetación de los diferentes sitios estudiados. Se obtuvo así una muestra estratificada sistemática de datos de campo provenientes del INFyS que abarcaba todos los ecosistemas del país. El tipo de comunidad vegetal atribuido a una determinada zona indicaba, para cada uno de los sitios muestreados, la vegetación más frecuentemente observada. Los tipos



de vegetación fueron identificados mediante las etiquetas clasificatorias de la Carta de uso de suelo y vegetación, Serie II, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2000). Como puede verse en el Cuadro 1, fueron sometidos a observación y clasificación un total de 65 165 sitios.

Los sitios muestreados se superpusieron a la serie de 53 imágenes que habían sido elaboradas a partir de las imágenes compuestas mensuales captadas mediante MODIS. Para conocer el comportamiento interanual de cada tipo de comunidad vegetal se calculó un valor promedio mensual para el NDVI.

Observaciones

Los valores de NDVI más elevados correspondieron a los bosques tropicales de alta y mediana altitud y a los bosques mesófilos de montaña. Estos valores se mantuvieron por encima del umbral de verdor de referencia a lo largo de todo el año (Figura 1). El umbral tiene un valor aproximado de 190 (véase en la Figura 1 la nota sobre los valores del NDVI), y se puede relacionar con el hábito perennifolio del ecosistema o umbral, que diferencia los bosques de otras tierras arboladas.

Una tendencia sinusoidal o un comportamiento cíclico anual son las respuestas

clásicas a un ciclo regular de pluviosidad y almacenamiento de agua en el terreno. Los valores de NDVI mínimos se registran entre febrero y abril de cada año y corresponden al período más seco. Los valores de NDVI máximos se observan en los meses más lluviosos de julio y agosto. La variabilidad puede aún ser mayor puesto que las fechas de la estación de lluvias cambian según la altitud. Se ha de tener presente que México es un país que se extiende sobre una superficie considerable de norte a sur.

Las extremas oscilaciones muestran que en las selvas bajas el ciclo de variaciones es más acentuado. Al igual que los bosques de encino y pino, estos bosques tienen valores que, entre los meses de febrero y mayo de los años analizados, están por debajo del umbral de referencia de 190. Los descensos en el valor del NDVI ocurren porque el nivel de verdor correspondiente a esos períodos es bajo a causa de la caída o del cambio de color de las hojas.

El lector deberá tomar nota de que el valor mostrado corresponde a la respuesta combinada total del ecosistema (el suelo y los estratos herbáceos, de matorral y de árboles). Por lo tanto, es también posible que durante ese período, a causa del estrés hídrico, una parte del estrato de pasto se seque por completo en esos bosques.

2 Comportamiento anual del NDVI de la estación seca para varios tipos de ecosistema

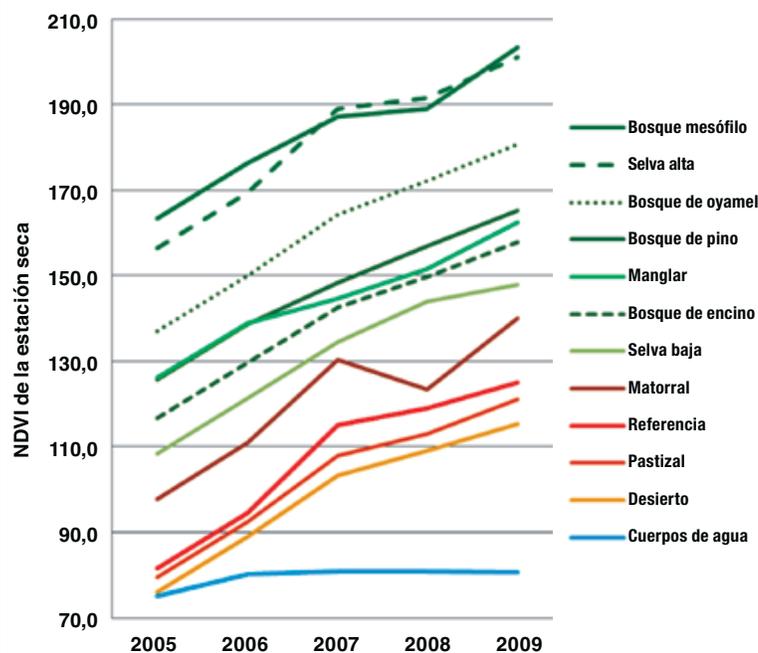
Las comunidades vegetales con los valores de NDVI más bajos son los desiertos, en los cuales las hojas son muy escasas, seguidos por los pastizales y las zonas de matorral. Estas comunidades no muestran tendencia sinusoidal; su respuesta es más bien la de una región de pluviosidad irregular. Esta fluctuación complica el análisis de los procesos de degradación.

Los ecosistemas de manglar y de tular presentan el comportamiento más complejo en cuanto a valores de NDVI. Los valores están siempre por encima de los valores de referencia pero carecen de picos claramente definidos y se ven muy afectados por las fluctuaciones del nivel hídrico.

La muestra comprendía una serie de sitios clasificados en la categoría «uso del suelo», una expresión que corresponde por lo general a la presencia de actividades agrícolas. Estas superficies muestran un comportamiento sinusoidal de perfil algo más estrecho que el de la selva baja, y sus valores de NDVI promedio nunca están por debajo del umbral de referencia. Estos valores constantemente «verdes» son difíciles de explicar cuando se practican cultivos anuales y la agricultura es mecanizada, ya que se hubiera podido esperar que durante el período de preparación del suelo los valores fuesen cercanos a los de la tierra desnuda. El fenómeno se podría atribuir quizá a que para estos cultivos se prescinde de cualquier tipo de mecanización.

El muestreo pone de manifiesto que en un análisis multitemporal de los procesos la fecha de la toma de las imágenes satelitales es un factor importante. Es fundamental comparar imágenes que correspondan a unas mismas fechas, puesto que durante los distintos meses del año se constatan diferencias en el vigor vegetativo, e incluso en las comunidades perennifolias puede haber variaciones pronunciadas entre las estaciones seca y lluviosa.

Este tipo de análisis desvela los cambios naturales experimentados por la vegetación a lo largo de un determinado



Nota: El NDVI se presenta con valores comprendidos entre 0 y 256 por translación y escalamiento matemático.

período. A los fines del seguimiento, será necesario distinguir las fluctuaciones en el verdor que resultan de oscilaciones naturales de las que derivan de otros procesos.

Variaciones del NDVI de un año a otro

El paso siguiente consistió en determinar el comportamiento anual del NDVI para las diferentes zonas de vegetación. La estación seca fue seleccionada porque durante ella las imágenes MODIS son menos afectadas por la cubierta nubosa, y las tierras arables, que están generalmente desnudas, son fácilmente distinguibles.

Se preparó un compuesto de imágenes MODIS con resolución espacial de 250 m. Las imágenes fueron captadas entre el 15 de febrero y el 15 de abril de cada año, período que corresponde a la estación seca. Los valores de NDVI promedio se calcularon para dicho período. Los puntos observados en las rondas anteriores se superpusieron, y el comportamiento promedio se calculó para cada tipo de comunidad vegetal (Figura 2).

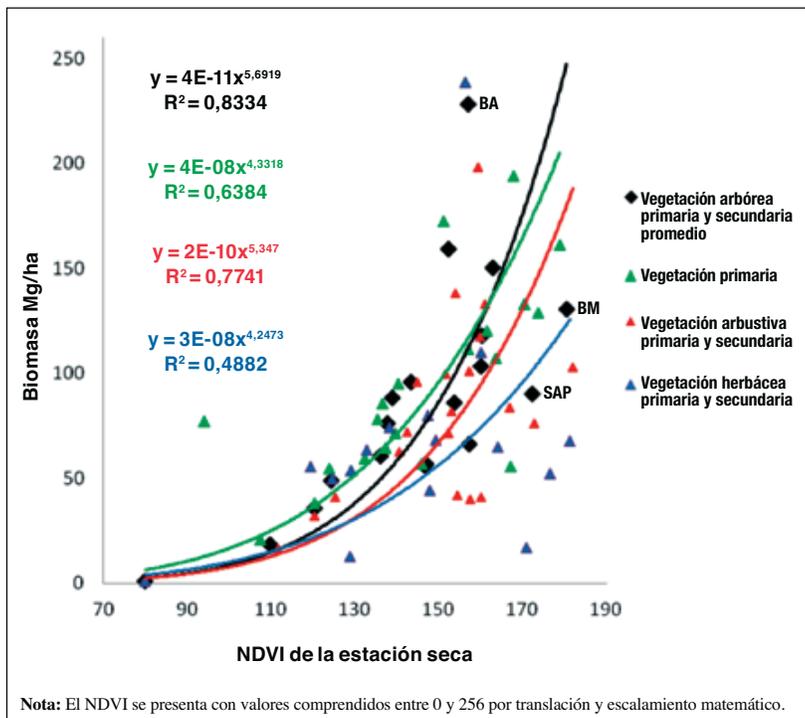
Es posible percibir que el contenido de biomasa de los diferentes ecosistemas obedece a una pauta definida. En los diversos tipos de vegetación se constata que el NDVI aumenta de forma

casi constante a lo largo del período; sin embargo, se aprecian excepciones en el bosque mesófilo de montaña, la selva de alta y mediana montaña y las zonas de matorral, que casi no muestran fluctuaciones entre las estaciones de 2007 y 2008.

Vinculaciones entre el NDVI y la biomasa aérea

La biomasa aérea se seleccionó como variable indicadora de la función del bosque para compararla con el comportamiento del NDVI. El bosque puede experimentar un cambio de cubierta vegetal sin perder necesariamente su condición original; pero un cambio estructural, que disminuye la capacidad del bosque de proporcionar servicios y productos, puede sí considerarse una forma de degradación.

Se midieron 25 000 puntos en el campo con el objeto de elaborar un inventario. Cada punto de medición, o conglomerado, comprendió cuatro sitios, o subconglomerados. En cada uno de los sitios se hicieron mediciones de las variables para todos los árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) de más de 7,5 cm. Se tomaron variables como el número de árboles, el número de especies, el número de árboles vivos, el número de tocones,



3
Relación entre el NDVI de la época seca y la cantidad de biomasa aérea por tipo de comunidad vegetal

cuales se ha asumido una biomasa aérea equivalente a 0. Los valores más altos de biomasa corresponden al bosque de abeto (BA), mientras que los valores más altos del NDVI corresponden al bosque mesófilo de montaña (BM), seguido por la selva alta perenne (SAP). Para el cálculo de la biomasa aérea de estas dos últimas comunidades se utilizaron las ecuaciones generales propuestas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su orientación sobre las buenas prácticas relacionadas con el uso de la tierra, el cambio del uso de la tierra y la silvicultura (IPCC, 2003). La relación general muestra un coeficiente de correlación (R^2) de 0,8334.

Se ha de tener presente que la morfología de la selva y los bosques mesófilos de montaña difiere marcadamente de la morfología de las coníferas, y que en el modelo ambos están subestimados. Pero por otra parte, el modelo también produce un efecto de «sobreestimación», ya que solo los árboles de más de 7,5 cm de DAP se han tomado en cuenta para el cálculo de la biomasa, mientras que las mediciones de NDVI satelitales integran la totalidad de la respuesta del ecosistema (estrato arbóreo, arbustivo y herbáceo).

La Figura 3 muestra un declive en la relación entre biomasa aérea e NDVI, según su situación o estado sucesivos. Esta tendencia indica que, para una determinada comunidad, la biomasa aérea es más abundante en los

la altura total del árbol, la altura comercial, la altura libre, el DAP, el diámetro de la corona y del área basal, y otras 21 variables cuantitativas y 45 variables cualitativas relacionadas por ejemplo con la regeneración del bosque, la naturaleza de las repercusiones, el estado de la capa superficial y el humus y el uso del recurso (CONAFOR, 2011).

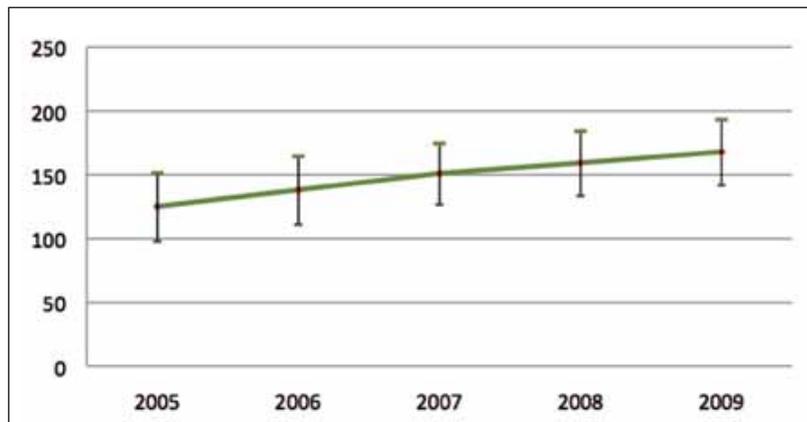
El volumen de la biomasa aérea (en toneladas por hectárea) se calculó para 16 842 conglomerados medidos en el campo con vistas a su inclusión en el INFyS (ECOSUR, 2009). Para cada ecosistema se formularon ecuaciones que estaban basadas en una revisión de la literatura. La mayor parte de las ecuaciones se derivaron de materiales que reflejan una perspectiva comercial y están referidos a ecosistemas de coníferas y latifoliadas de regiones templadas.

Se elaboraron ecuaciones alométricas para 120 de las casi 3 000 especies que figuran en el INFyS. En la mayor parte de los modelos se utilizan como variables independientes el DAP y la altura. No se usaron datos de regeneración para estimar la biomasa; las especies suculentas de zonas áridas fueron omitidas,

y no se elaboraron ecuaciones para la biomasa o el volumen de la madera de ciertas comunidades (*Thalia*, sabana, tular, palma, manglar y algunas selvas). Se tomaron en consideración 1 230 127 de los 1 305 307 árboles observados (véase la Figura 4; ECOSUR, 2009). Los 16 842 conglomerados se superpusieron a las imágenes de NDVI y se clasificaron de acuerdo con la comunidad vegetal y su condición (primaria, primaria con vegetación secundaria arbórea, y primaria con vegetación secundaria arbustiva) (Figura 3).

La relación entre biomasa aérea e NDVI muestra un comportamiento exponencial cuyo origen corresponde al valor del NDVI de los cuerpos de agua, para los

4
Comportamiento general del NDVI, 2005-2009, de una muestra que se volvió a medir en 2009



ecosistemas primarios que en los ecosistemas perturbados.

SEGUIMIENTO

Se ha lanzado una iniciativa destinada a volver a medir los sitios visitados en la primera campaña de mediciones. Los sitios fueron visitados por primera vez en 2009 y serán visitados nuevamente en 2012. Por consiguiente, se seguirá disponiendo de información sobre el crecimiento y los cambios en las funciones forestales para el 20 por ciento de los 25 000 conglomerados existentes. La información sobre suelos, incendios y salud del bosque podrá ser estimada interrogando la base de datos del INFyS (2010).

En el primer ciclo de nuevas mediciones se recogieron los valores del NDVI correspondientes a las mediciones de campo del INFyS hechas en 2009, y se analizaron tanto los puntos que habían

sufrido perturbaciones como los puntos que no habían sido alterados.

Del total de los 3 533 conglomerados medidos en 2009, 3 486 arrojaron valores de NDVI superiores a los de la medición inicial. El comportamiento general del NDVI se muestra en la Figura 4. También se analizó el comportamiento de algunas clases específicas de vegetación.

En el recuadro y en el cuadro, figura y fotografías que lo ilustran, se ofrecen los datos correspondientes a uno de los puntos que forman parte del grupo estudiado, el conglomerado 56890 de Campeche. Este punto fue uno de los puntos tomados aleatoriamente con el fin de demostrar tanto la situación que caracterizaba el conglomerado en el momento de la primera y segunda mediciones como la pauta de variación del NDVI. Más adelante (Figura 5) se presentan los resultados relativos a una agrupación de terrenos sin cubierta vegetal.

Debe tenerse en cuenta que los puntos de medición en el campo permiten evaluar tan sólo una superficie de 1 600 m²; que estos puntos son representativos de 1 ha de terreno, y que el área de píxeles total es de 6,25 ha.

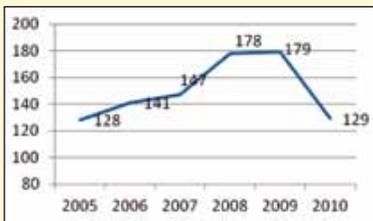
Se pudo detectar una reducción del valor del NDVI en 47 de los 3 533 conglomerados medidos en 2009.

Según se informó, la muestra de 2009 contenía 258 conglomerados sin cubierta vegetal.

En este grupo se distinguieron cuatro clases:

- 129 conglomerados no fueron visitados en la primera ronda porque se los interpretó como conglomerados de «uso de la tierra»; estos conglomerados fueron validados por interpretación de imágenes; no se detectó reducción del valor del NDVI en ninguno de estos casos (puntos verdes en el mapa).

Seguimiento: conglomerado 56890 (Campeche)



Comportamiento del NDVI, 2005-2010, conglomerado 56890

El conglomerado 56890 es un caso interesante. De acuerdo con el NDVI de la estación seca observado hasta el 15 de abril de 2009, fue posible determinar que el mismo había sido quemado recientemente. Aunque el comportamiento del NDVI para algunos años (figura) pudo ser objeto de descripción, se necesita llevar a cabo otros análisis para completar su conocimiento.

En agosto de 2005, en el conglomerado 56890 se comprobó la existencia de una selva subperenne de media altitud; y se midieron 192 árboles (fotografía, izquierda). La observación hecha en abril de 2009 no mostró cubierta vegetal alguna; en esa zona había 0 individuos (fotografía, derecha; cuadro).

Resultados del estudio del conglomerado 56890 (Campeche)

Visita	Número de árboles	DAP cm	Ancho de copa m	Cubierta %	Altura total m	Tocones
09/08/2005	192	11,82	2,51	60,1	8,98	0
17/04/2009	0	0	0	0	0	0





5

Conglomerados declarados sin cubierta vegetal en el estudio de 2009, por caso

- 53 conglomerados eran terrenos «sin cubierta vegetal» entre 2004 y 2007, y seguían careciendo de cubierta vegetal en 2009; no se detectó reducción del valor del NDVI en ninguno de estos casos (puntos amarillos en el mapa).
- 61 conglomerados fueron etiquetados erróneamente en el período 2004-2007. Las zonas de bosque estaban indicadas, pero tras la revisión de las fotografías y datos se comprobó que los conglomerados carecían en realidad de cubierta vegetal; no se detectó reducción del valor del NDVI en ninguno de estos casos (puntos rojos en el mapa).
- La observación de 2004-2007 mostró para 14 conglomerados cubierta vegetal en algunos tipos de bosque; en cambio, la observación de 2009 evidenció que esos conglomerados carecían de cubierta vegetal (puntos azules en el mapa).

CONCLUSIONES

Existen limitaciones al uso del NDVI como instrumento de medición de la degradación del bosque; pero existen

también áreas en que este índice podría ser perfeccionado. Dado que la fenología desempeña una función importante en el análisis de los procesos de cambio, es necesario seleccionar cuidadosamente las fechas de captación de las imágenes MODIS que permiten evaluar dichos procesos. Para la elaboración de las imágenes es oportuno eliminar las nubes, las sombras proyectadas por las nubes, las sombras creadas por la topografía y los valores de saturación en los números generados por la geometría de la observación del satélite o la presencia de agua sobre las hojas de los árboles.

Los modelos de regresión pueden igualmente ser mejorados, por ejemplo haciendo comparaciones entre dos mediciones temporales en un único punto del INFyS o tomando en cuenta ciertos factores como el rebrote. El INFyS contiene además otras variables mensurables, como los árboles en pie muertos y los tocones —que permitirían entender más cabalmente la dinámica forestal en cada uno de los puntos observados—, y la edad de la muestra madre de las poblaciones de coníferas. La mayor parte de las ecuaciones

alométricas para estimar la biomasa aérea se basan solo en la altura del individuo y en el DAP; no son tomados en cuenta en ellas aspectos como la cubierta de copas, el diámetro de las ramas y el área basal. Conforme se vayan refinando las estimaciones de la biomasa presente en los bosques mesófilos de montaña y los ecosistemas de selva, dicho método podrá ser más representativo de los cambios ocurridos. Se deberá prestar atención a otros aspectos tales como las anomalías climáticas que repercuten mayormente en el vigor del crecimiento. Por ejemplo, los años «húmedos» asociados con el fenómeno La Niña y El Niño determinarán un incremento del valor del NDVI, mientras que los años «secos» generarán valores muy bajos del indicador de cambio.

Pese a las limitaciones relativas a la resolución de las imágenes y al cálculo de la biomasa aérea, el modelo de regresión de 0,83 es muy satisfactorio. Las imágenes generadas por el sensor MODIS son apropiadas para el análisis

de los cambios que resultan de la degradación, siempre que su impacto haya sido suficientemente grande para determinar una variación en la radiometría y por consiguiente en el NDVI. El NDVI puede ser utilizado como indicador debido a que tiene un comportamiento que se puede conocer con anticipación. ◆



Bibliografía

- Chuvieco, E.** 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 10: 1–9.
- CONAFOR.** 2011. *Preliminary report of the National Forest and Soil Inventory, 2004–2009*. Zapopan, México, Comisión Nacional Forestal.
- ECOSUR.** 2009. *Estimation of biomass for FRA 2010 tables*. Villahermosa, México, Colegio de la Frontera Sur.
- INEGI.** 2000. *Land use and vegetation chart*. Aguascalientes, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- IPCC.** 2003. *Orientación sobre las buenas prácticas relacionadas con el uso de la tierra, el cambio del uso de la tierra y la silvicultura*. Hayama, Japón, elaborado por el Instituto para las Estrategias Ambientales Globales para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (disponible también en: www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_contents.html).
- OIMT.** 2002. *ITTO Guidelines for the restoration, management and rehabilitation of degraded and secondary tropical forests*. ITTO Policy Development Series No. 13. Yokohama, Japón, Organización Internacional de las Maderas Tropicales (disponible también en: www.itto.int/policypapers_guidelines/).
- Singh, A.** 1986. Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat. En: M.J. Eden y J.T. Parry, eds. *Remote sensing and tropical land management*, pp. 237–254. Chichester, Reino Unido, John Wiley. ◆