



Ministerio
del **Ambiente**



EVALUACIÓN NACIONAL FORESTAL

PROTOCOLO

PARA EL PROCESAMIENTO DEL MAPA
DENSIDADES DE CARBONO
PARA ESTRATOS BOSCOSOS
DEL ECUADOR CONTINENTAL
CON IMÁGENES MODIS Y LANDSAT

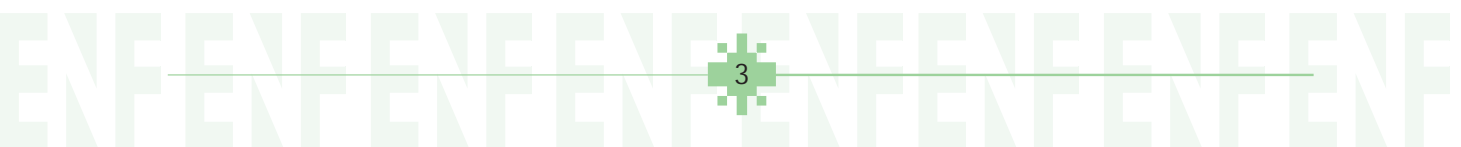
2014

Quito - Ecuador



ÍNDICE GENERAL

| CONTENIDO | PÁGINA |
|--|--------|
| 1. ANTECEDENTES..... | 7 |
| 2. ÁREA DE ESTUDIO | 8 |
| 3. OBJETIVO GENERAL | 10 |
| 4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 10 |
| 5. METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES | 10 |
| 5.1 Open Foris Geospatial Toolkit..... | 10 |
| 5.2 Imágenes Satelitales MODIS..... | 10 |
| 5.2.1 Descarga de imágenes satelitales MODIS | 11 |
| 5.2.2 Pre-procesamiento de imágenes satelitales MODIS | 12 |
| 5.2.3 Relleno de vacíos de información..... | 12 |
| 5.2.4 Generación de mosaico | 14 |
| 6. PREPROCESAMIENTO CON IMÁGENES LANDSAT..... | 14 |
| 6.1 Imágenes satelitales LANDSAT..... | 14 |
| 6.2 Características del sensor LANDSAT 7 ETM+ | 15 |
| 6.3 Fuente alternativa de información: Universidad de Maryland..... | 15 |
| 6.4 Búsqueda y revisión de imágenes..... | 16 |
| 6.5 Descripción de procedimientos para el procesamiento de imágenes LANDSAT ... | 17 |
| 7. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE CARBONO CON IMÁGENES SATELITALES . | 19 |
| 7.1 Modelamiento de carbono con el algoritmo k-nn..... | 19 |
| 7.1.1 Datos del Inventario Nacional Forestal para el cálculo del Mapa de Carbono | 21 |
| 7.1.2 Cálculo del Mapa de Carbono con K-NN en Open Foris..... | 21 |
| 7.1.3 Validación cruzada y selección del valor de k | 23 |
| 7.1.4 Selección del valor de k..... | 24 |
| 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 27 |
| 9. ANEXOS..... | 29 |





ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1. | Mapa de estratos y distribución de parcelas a nivel nacional..... | 5 |
| Figura 2. | Distribución de Tiles a nivel mundial..... | 7 |
| Figura 3. | Ejemplo del relleno de áreas sin información con imágenes MODIS. Se puede apreciar que el porcentaje de nubes se reduce en la imagen rellena, especialmente en la zona de la costa. | 11 |
| Figura 4. | Mosaico Preliminar del Ecuador utilizando Imágenes MODIS del 2010 al 2012 | 12 |
| Figura 5. | Mosaico del Ecuador utilizando Imágenes LANDSAT para el 2012 proporcionado por la Universidad de Maryland | 14 |
| Figura 6. | Captura de pantalla del portal Glovis del USGS..... | 15 |
| Figura 7. | Explicación gráfica del algoritmo K-nn..... | 20 |
| Figura 8. | Explicación gráfica de la utilización del oft-extr. | 21 |
| Figura 9. | Gráficos de valores de k con gnuplot | 25 |
| Figura 10. | Flujograma para la obtención del Mapa de Carbono con Imágenes MODIS | 26 |
| Figura 11. | Flujograma para la obtención del Mapa de Carbono con Imágenes LANDSAT..... | 27 |



Metodología Mapas de Carbono

La generación de información para el manejo sostenible de los recursos naturales y de todos los servicios ecosistémicos es un aspecto fundamental en las agendas de desarrollo de los países. La misma representa un factor clave dentro del proceso de conservación de la biodiversidad para mejorar así la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones.

Desde el año 2010, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) ha colaborado con el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), para desarrollar estrategias que apoyen la reducción de los efectos del cambio climático.

Una de las colaboraciones más estrechas ha sido realizada en el marco de la Evaluación Nacional Forestal, con la generación del mapa de densidades de carbono de los bosques del país. Para tal fin se capacitó a personal técnico en aspectos metodológicos, tanto dentro como fuera del país, para poder aplicar sus conocimientos en el Ecuador, respondiendo con ello a uno de los principales objetivos de la FAO: generar capacidades locales que puedan colaborar con el desarrollo de sus respectivos Estados Miembros.

Es así que el proyecto Manejo Forestal Sostenible ante el Cambio Climático, el cual ha contado con la generosa contribución financiera del Gobierno y pueblo de Finlandia, ha contribuido a generar capacidades y resultados a través de un equipo de profesionales de distintas disciplinas comprometidos con el desarrollo del país. Este equipo profesional y sus contrapartes locales en los territorios ha respondido tanto a las prioridades nacionales como al Objetivo estratégico 2 de la FAO que procura: “Aumentar y mejorar el suministro de bienes y servicios procedentes de la agricultura, la actividad forestal y la pesca de una manera sostenible.” En el desarrollo de este trabajo se ha generado un valioso aprendizaje a través de pruebas, aciertos y errores que han sido esenciales para generar conocimiento. Con estos antecedentes nos complace presentar la publicación “Protocolo para el procesamiento del mapa de densidades de carbono para estratos boscosos del Ecuador continental con imágenes MODIS y LANDSAT.” El libro es el resultado no sólo de los aportes generados por FAO a técnicos nacionales, sino también de la cooperación entre instituciones estatales e internacionales, así como del esfuerzo y el trabajo interdisciplinario de profesionales, con el apoyo de las familias que viven dentro y alrededor de los bosques, quienes contribuyeron con sus conocimientos, capacidades y saberes a generar este valioso instrumento que, de seguro, servirá de base para trabajos y proyectos futuros. Sabíamos que estábamos, como dijo el poeta, “haciendo camino al andar.” Gracias a todos y a todas por haber sabido encontrar la fortaleza en momentos de traspie y la humildad en momento de éxitos.

Esperamos que este documento sea de gran utilidad para las personas interesadas en procesos de generación de capacidades que aporten a fortalecer la gestión ambiental en Ecuador.

Pedro Pablo Peña
Representante FAO Ecuador



1. Antecedentes

En la actualidad el Ministerio del Ambiente (MAE) se encuentra en un proceso de preparación para acceder a los mercados internacionales de carbono a través de los mecanismos de Reducción de Emisiones causadas por Deforestación y Degradación de los bosques (REDD+). Este es un mecanismo clave para mitigar el cambio climático y se centra en cinco actividades forestales que actúan como medidas de mitigación medibles, reportables y verificables (MAE - ENF *et al* 2010). Estas actividades son: reducción de emisiones por deforestación, reducción de emisiones por degradación, gestión sostenible de los bosques (GSB), aumento de las reservas forestales de carbono y conservación de existencias forestales de carbono. Además el país tiene la obligación de enviar Comunicaciones Nacionales que incluyan información sobre emisión y absorción de carbono por fuentes y sumideros nacionales (FCCC 2007). Dado que los censos forestales resultan extremadamente costosos y requieren de mucho tiempo y esfuerzo, es necesario recurrir a técnicas de sensores remotos que permitan realizar estimaciones de valores de carbono por área. En este contexto se enmarca la necesidad de generar mapas de carbono, a un nivel de confianza aceptable, a nivel nacional y por estrato.

Debido a la facilidad de acceso gratuito en el mercado de imágenes satelitales de resolución espacial media y gruesa, se ha propuesto combinar datos del Inventario Nacional Forestal (INF) e imágenes satelitales LANDSAT (30 m. de resolución espacial) y MODIS (500 m. de resolución espacial) para la elaboración del mapa de carbono de áreas boscosas del Ecuador Continental.

Entre los resultados del INF se determinó el valor de carbono total por parcela, el que abarca los 5 depósitos de carbono considerados en el IPCC: biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca, y materia orgánica en el suelo (MAE - ENF *et al* 2010). Este valor de carbono es posible obtenerlo a nivel de parcela, que con su correspondiente coordenada geográfica, permite establecer una relación entre los datos de campo con los valores espectrales de las imágenes satelitales y realizar una interpolación al resto de zonas en donde no se posee valores de campo.

La metodología que se describe a continuación se desarrolló con apoyo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) a través del Proyecto Manejo Forestal Sostenible antes del Cambio Climático, el cual generó herramientas geográficas de acceso gratuito denominadas Open Foris Geospatial Toolkit en el Sistema Operativo Linux, y que permiten sistematizar los procesos y ajustarlos de acuerdo a los requerimientos de cada proyecto. Para este caso específico se utilizó el algoritmo K-nn (ver 7.1) y para su respectiva evaluación la técnica de Validación Cruzada (ver 7.1.3).



2. Área de Estudio

El cálculo de carbono se realizó para todo el Ecuador Continental, específicamente en las áreas donde existe bosque nativo de acuerdo a las especificaciones del IPCC para el Nivel 2 de la leyenda temática para generar mapas de uso y cobertura del suelo (MAE 2012) y que corresponde a 9 estratos de bosque nativo a nivel nacional (ver Cuadro 1 y Figura 1). Estos son diferenciados por sus características climáticas, fisionómicas y principalmente debido a su potencial contenido de carbono (MAE - ENF *et al* 2010).

El objetivo principal de la estratificación consistió en dividir a la población en subpoblaciones homogéneas en términos de biomasa que reflejen los impactos humanos sobre los bosques del Ecuador (MAE - ENF *et al* 2010). Estos estratos se calcularon mediante técnicas SIG, ajustándose a técnicas e información disponible en el país (basándose en criterios bioclimáticos, áreas gestionadas/no gestionadas, bosque no bosque, áreas deforestadas, etc.). Los nueve estratos representan una remanencia aproximada de 11.3 millones de hectáreas de bosque nativo para el Ecuador continental. Esta información está actualizada y homogeneizada con el Mapa de Ecosistemas (MAE, 2013) y Mapa de Deforestación Histórica (MAE, 2010).

La cobertura boscosa continental se distribuye en 9 estratos identificados en la Evaluación Nacional Forestal (MAE 2012), estos estratos son:

- Bosque Seco Andino (BSA)
- Bosque Seco Pluvioestacional (BSP)
- Bosque Siempre Verde Andino Montano (BSVAM)
- Bosque Siempre Verde Andino de Pie de Monte (BSVAPM)
- Bosque Siempre Verde Andino de Ceja Andina (BSVCA)
- Bosque Siempre Verde de Tierras bajas de la Amazonía (BSVTBA)
- Bosque Siempre Verde de Tierras Bajas del Chocó (BSVTBCH)
- Manglar (M)
- Moretal (Mo)

Cuadro 1. Listado de estratos de bosque del Ecuador Continental

| Estrato | Código | Área (Ha) | Área estrato / Área bosque total (%) | Conglomerados | Parcelas | Parcelas / 100km ² |
|---------|--------|------------|--------------------------------------|---------------|----------|-------------------------------|
| BSA | 1 | 162.963 | 1,43 | 30 | 90 | 5,52 |
| BSP | 2 | 399.323 | 3,51 | 70 | 210 | 5,25 |
| BSVAM | 3 | 502.770 | 4,42 | 117 | 344 | 6,84 |
| BSVAPM | 4 | 1.888.674 | 16,62 | 77 | 225 | 1,19 |
| BSVCA | 5 | 1.079.697 | 9,50 | 86 | 258 | 2,38 |
| BSVTBA | 6 | 6.293.513 | 55,38 | 113 | 327 | 0,51 |
| BSVTBCH | 7 | 465.706 | 4,10 | 80 | 240 | 5,15 |
| M | 8 | 104.572 | 0,92 | 30 | 89 | 8,51 |
| Mo | 9 | 466.069 | 4,10 | 30 | 89 | 1,90 |
| TOTAL | | 11.363.288 | 100,0 | 633 | 1872 | 4,14 |

Fuente: MAE - ENF *et al* (2012)

Nota: Ver definiciones en el Manual de Campo de la ENF del MAE (2012)



En la siguiente figura se presenta el Ecuador Continental dividido en los 9 estratos y las parcelas¹ de campo que conforman los conglomerados que hasta el momento dispone el INF.

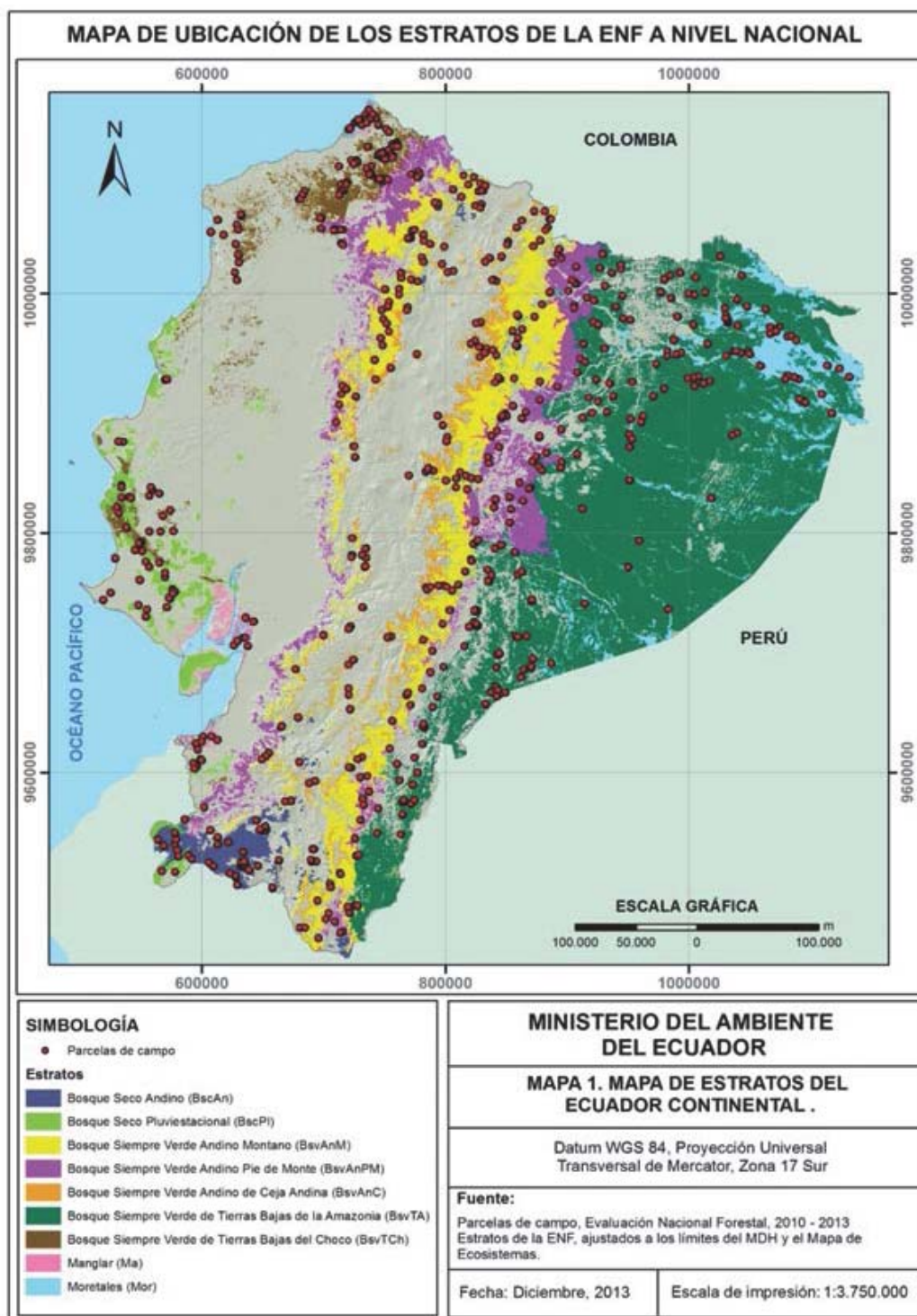


Figura 1 . Mapa de estratos y distribución de parcelas a nivel nacional.

Fuente: MAE - ENF *et al.* (2013)

1 Las parcelas son de forma cuadrada de 60 x 60 m, donde se realizan las mediciones de biomasa y de la mayoría de tipos de vegetación (Ravindranath y Oswald, 2008); en los estratos 8 y 9 se elaboraron parcelas de 60 x 40 m debido a la homogeneidad de especies dentro de la parcela.



3. Objetivo General

Describir el procedimiento para la generación de un mapa de carbono a partir de la combinación de datos del INF e imágenes satelitales MODIS y LANDSAT.

4. Objetivos Específicos

- Definir los procesos para descarga y procesamiento de imágenes MODIS y LANDSAT
- Diseñar una metodología para elaborar el mapa de carbono con el algoritmo k-nn con imágenes MODIS y LANDSAT.

5. Metodología para El Procesamiento de Imágenes Satelitales

5.1 Open Foris Geospatial Toolkit

Antes de iniciar con la descripción de los procesos para el pre-procesamiento y procesamiento de imágenes satelitales MODIS, es necesaria una breve descripción de las herramientas tecnológicas utilizadas.

Para el cálculo de los mapas de carbono se utiliza la herramienta Open Foris Geospatial Toolkit desarrollada por la FAO. Consiste en un conjunto de utilidades en forma de líneas de comando para el procesamiento de datos geo-espaciales. Las herramientas comprenden programas stand-alone (independientes) y scripts (secuencias de comandos) que fueron probados en el sistema Ubuntu Linux, Mac, OS y Windows. La mayoría de los programas stand-alone usan librerías GDAL y la gran parte de los scripts se basan principalmente en utilidades de líneas de comandos GDAL (Open Foris 2013).

5.2 Imágenes Satelitales MODIS

El sensor MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) fue lanzado por la NASA en 1999 a bordo del satélite Terra y en el 2002 a bordo del satélite Aqua. Las imágenes MODIS poseen una resolución espacial de 500 m en las bandas 3 a 7 y una resolución temporal de uno a dos días. Fue creada para proveer medidas en gran escala de la dinámica global que incluye cambios en la cobertura de nubes, superficie terrestre y océanos. (NASA 2008).

Para cubrir todo el Ecuador Continental se necesitan 4 imágenes MODIS localizadas en los Tiles ² h9 v9, h9 v8, h10 v9 y h10 v8, siendo esta última la que abarca la mayoría del país.

En la siguiente figura se indica la distribución de Tiles a nivel mundial y en el cuadrado en rojo se resalta los Tiles usados para el Ecuador.

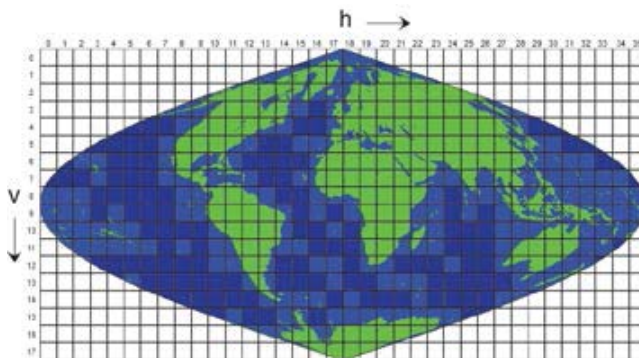


Figura 2. Distribución de Tiles a nivel mundial.
Fuente: Mas (2011)

² Tiles: La mayoría de los productos de MODIS están organizados en una retícula de 1,200 x 1,200 km (10 por 10 grados al ecuador) en proyección sinusoidal. Cada cuadro, llamado tile, se localiza por un número de columna (h) y línea (v).



5.2.1 Descarga de imágenes satelitales MODIS

Existen algunas maneras de descargar imágenes MODIS, a continuación se presentan dos de ellas: la primera de forma manual y la segunda de manera automatizada mediante un script en Linux.

Para descargar manualmente las imágenes MODIS se debe acceder a la página https://lpdaac.usgs.gov/get_data, se selecciona la opción LP DAAC Data Pool y se escoge descargar los datos vía HTTP – MODIS COMBINED. En seguida se despliega la lista de opciones en donde se elige el producto denominado MCD43A4. Este producto provee información reflectada a 500 metros, ajustada utilizando una función bidireccional de la distribución de la reflectancia (BDRF por sus siglas en inglés) para modelar los valores como si se hubiesen tomado con una vista de nadir. Esta información se provee cada 16 días en el mismo sitio del planeta.

Cuadro 2. Descripción de las características del Sensor MODIS.

| Altitud | | 708 kilómetros | |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Tipo de órbita | | Heliosincrónica | |
| Fecha de lanzamiento | | Febrero del 2000 | |
| | | | |
| Banda N°: | Longitud de onda (µm) | Resolución espacial (m) | Bits por píxel |
| B1 | 0.62 - 0.67 | 250 | 12 |
| B2 | 0.841 - 0.876 | 250 | 12 |
| B3 | 0.459 - 0.479 | 500 | 12 |
| B4 | 0.545 - 0.565 | 500 | 12 |
| B5 | 1.230 - 1.250 | 500 | 12 |
| B6 | 1.628 – 1.652 | 500 | 12 |
| B7 | 2.105 - 2.155 | 500 | 12 |

Fuente: Mas (2011)

Una vez identificadas las imágenes, el primer criterio a utilizar para la descarga es la fecha del producto y el Tile correspondiente a los límites del Ecuador.

Para automatizar la descarga de imágenes MODIS se generó un script que permite la descarga de imágenes por año sin mayor intervención del operador. Este script se denomina *bash oft-dlmodis.sh* (Ver Anexo MODIS 1) y debe estar guardado en la carpeta donde se desea colocar las imágenes MODIS. Para correr este script se debe abrir el terminal en Ubuntu y escribir lo siguiente:

```
bash oft-dlmodis.sh <year> <h> <v>
```

Donde:

year: año de las imágenes

h: Tile horizontal

v: Tile vertical

Importante: Para correr este script es necesario tener conexión de internet.



5.2.2 Pre-procesamiento de imágenes satelitales MODIS

El pre-procesamiento de las imágenes satelitales MODIS comprende desde la extracción de las 7 bandas del archivo original HDF hasta la generación del mosaico con imágenes MODIS para todo el país.

El pre-procesamiento de las imágenes MODIS abarca los siguientes pasos:

- **Extracción de bandas:** descomprime del formato HDF las 7 bandas y las exporta a formato Tif.
- **Composición de las 7 bandas:** Se las combina en una sola imagen en formato Tif.
- **Reproyección de bandas:** Realiza una transformación de proyección sinusoidal a UTM, datum WGS84, zona 17 Sur.
- **Generación de máscara:** Se transforman las imágenes a un archivo binario, en donde los píxeles con información cambian a 1 y los píxeles sin información cambian a cero. Este último corresponde a valores digitales mayores a 30000.
- **Generación del histograma:** Genera un histograma de las imágenes en un archivo txt que contiene la fecha, nombre de la imagen y el número de píxeles válidos³ dentro de los límites del Ecuador. Esto sirve para jerarquizar la cantidad de píxeles con información que poseen las imágenes, ordenando la cantidad de información válida de mayor a menor para saber cuáles de estas imágenes son más útiles para el relleno.

Para correr el script se coloca lo siguiente en el terminal:

```
bash preprocesamiento_modis_2.0
```

El código fuente de este script se lo puede ver en el Anexo_MODIS_2_Preprocesamiento de imágenes MODIS.

El script debe estar guardado en la misma carpeta en donde se encuentran las imágenes MODIS originales.

5.2.3 Relleno de vacíos de información

Las imágenes satelitales MODIS tienen áreas sin información generadas por la presencia de nubes y sombras de las mismas, por lo que es necesario analizar varias imágenes para rellenar dichos vacíos de información con datos de diferentes imágenes y fechas. Para este proceso es recomendable que las cuatro imágenes base que conforman el mosaico del país sean de la misma fecha para evitar estacionalidad y contraste de tonos al momento de generar el mosaico.

Para realizar este análisis es necesario comparar un par de imágenes del mismo Tile en donde la mejor imagen (con mayor información válida) será rellenada por la segunda imagen en zonas donde falta información válida. Para esto se generó un script que utiliza el comando `oft-calc` que al encontrar un píxel con valor digital mayor a 30000 (para imágenes MODIS el valor de 32767 corresponde a píxeles sin información) lo reemplaza por el valor de la segunda imagen (imagen de relleno) en el caso de tener un dato válido.

Para realizar el relleno de imágenes, primero es necesario unir las dos imágenes del mismo Tile (imagen de referencia, imagen de relleno) en una sola y generar una nueva imagen conformada por 14 bandas. Para esto se utiliza el comando `gdal_merge.py`

El comando que se usa para unir las dos imágenes es:

```
gdal_merge.py -o output -separate Imagen Base Imagen de Relleno
```

Donde,

Output: imagen de salida .tif con 14 bandas

Imagen base: imagen base .tif con mayor cantidad de información válida

Imagen de relleno: imagen .tif cuyos píxeles válidos van a servir para complementar la imagen base.

³ Se entiende por información válida a los píxeles que no corresponden a nubes y que representan una cobertura de la superficie terrestre.



Una vez realizada la unificación de imágenes se procede a reemplazar los píxeles sin información por los píxeles válidos utilizando el comando `oft-calc`.

oft-calc input output

número de bandas: 7

#1 30000 > #1 #8 ?

#2 30000 > #2 #9 ?

#3 30000 > #3 #10 ?

#4 30000 > #4 #11 ?

#5 30000 > #5 #12 ?

#6 30000 > #6 #13 ?

#7 30000 > #7 #14 ?

Explicación de los comandos:

Input: Imagen .tif con 14 bandas

Output: Imagen resultante .tif con 7 bandas

: banda.

? : caso contrario.

Ejemplo: #1 30000 > #1 #8 ? : El lenguaje de programación utilizado es el polaco inverso. Si el valor digital de la banda 1 es mayor a 30000, ponga el valor digital de la banda 8, caso contrario mantenga el valor de la banda 1.

Nota: el relleno de las imágenes se realizó utilizando imágenes del 2010 al 2012 cada 8 días.

En la siguiente figura se indica un ejemplo de relleno de imágenes MODIS.

Imagen Base Imagen rellena

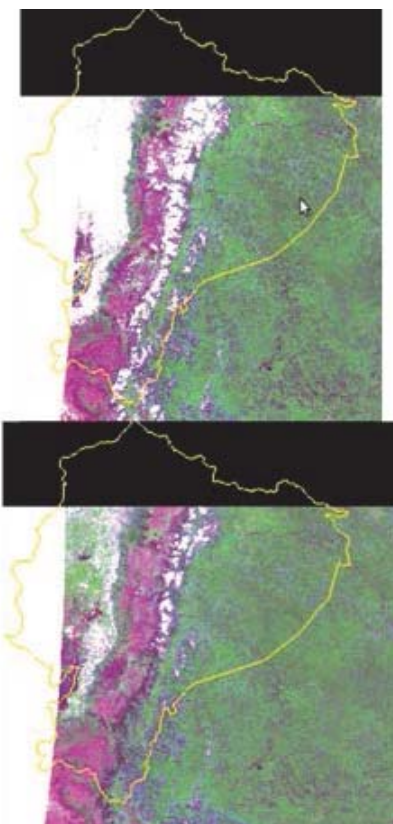


Figura 3. Ejemplo del relleno de áreas sin información con imágenes MODIS. Se puede apreciar que el porcentaje de nubes se reduce en la imagen rellena, especialmente en la zona de la costa.



5.2.4 Generación de mosaico

Para generar el mosaico del Ecuador con los 4 Tiles de las imágenes MODIS rellenas anteriormente es necesario verificar si las 4 imágenes tienen el mismo tamaño del píxel utilizando el comando `gdalinfo`. En el caso de existir incongruencias se deberá homogeneizar las diferencias, como por ejemplo tamaño del píxel y sistemas de referencia⁴, para lo que se deberá correr el siguiente modelo.

`oft-clip.pl imagen con el pixel de referencia imagen a cambiar output`

Una vez unificadas las características de los 4 tiles se generará el mosaico utilizando el comando `gdal_merge.py`.

`gdal_merge.py -o output.tif -n 32767 Imagen1.tif Imagen2.tif Imagen3.tif Imagen4.tif.`

Donde

Output: Mosaico resultante

-n: corresponde al valor de NoData de las imágenes que van a conformar el mismo.

El mosaico resultante con imágenes MODIS para todo el país se presenta a continuación. Se debe tener en cuenta que las zonas en negro dentro del límite del Ecuador pertenecen a áreas en donde no fue posible realizar el relleno con información.

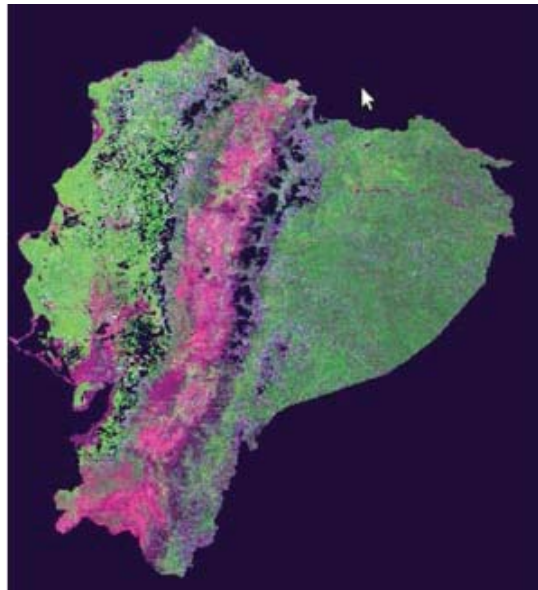


Figura 4. Mosaico Preliminar del Ecuador utilizando Imágenes MODIS del 2010 al 2012.

6. Preprocesamiento con Imágenes Landsat

6.1 Imágenes satelitales LANDSAT

Con el lanzamiento del Satélite Landsat 1 en 1972, se abrió una nueva percepción del planeta con una resolución temporal y espectral desconocida hasta entonces. Este satélite, dotado de sensores empleados en teledetección, fue diseñado con el fin de obtener datos de recursos terrestres. En base a este objetivo se diseñaron las resoluciones para adaptarse a este fin. La serie de satélites Landsat, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 dan una de las mejores series históricas de la evolución del planeta (Fernández y Herrero 2001).

⁴ Se utiliza el comando `gdalwarp`.



6.2 Características del sensor LANDSAT 7 ETM+

Las características del Sensor Landsat 7 EMT+ se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Descripción de las características del Sensor Landsat 7 ETM+.

| Altitud | 705 kilómetros | | | |
|----------------------|-------------------------------|--|-------------------------|----------------|
| Tipo de órbita | Polar - Sincrónica con el sol | | | |
| Anchura de Barrido | 185 kilómetros | | | |
| Fecha de lanzamiento | Abril de 1999 | | | |
| Período de revisita | 16 días | | | |
| | | | | |
| Banda N°. | Longitud de onda (µm) | Zona del Espectro | Resolución espacial (m) | Bits por píxel |
| B1 | 0.45 - 0.52 | Visible azul | 30 | 8 |
| B2 | 0.53 - 0.61 | Visible verde | 30 | 8 |
| B3 | 0.63 - 0.69 | Visible rojo | 30 | 8 |
| B4 | 0.78 - 0.90 | Infrarrojo próximo (Visible) | 30 | 8 |
| B5 | 1.55 - 1.75 | Infrarrojo Lejano | 30 | 8 |
| B6 | 10.40 – 12.5 | Térmico Lejano | 60 | 8 |
| B7 | 2.09 - 2.35 | Infrarrojo Lejano | 30 | 8 |
| B8 | 0.52 – 0.90 | Pancromática, prácticamente todo el visible. | 15 | 8 |

Fuente: Fernández y Herrero (2001)

Fuente alternativa de información:

6.3 Fuente alternativa de información: Universidad de Maryland

Es importante destacar que la metodología de procesamiento de imágenes LANDSAT que se describirá a continuación fue realizada por la Universidad de Maryland, que entregó al MAE un mosaico de imágenes LANDSAT del Ecuador Continental, con información en su mayoría del año 2008. En este caso se recibió la colaboración de dicha Universidad, pero si no se contaba con esta donación el proceso se lo hubiera realizado de todas maneras porque que es obligatorio y se lo debe realizar siempre.

Esta entrega ahorró una gran cantidad de trabajo, tanto en tiempo como en mano de obra, ya que el mosaico está totalmente procesado y con todas las correcciones pertinentes a la metodología implementada por Hansen *et al* (2007). Sin esta imagen, el tiempo de procesamiento, corrección y elaboración del mosaico se hubiera ampliado aproximadamente 5 meses más.

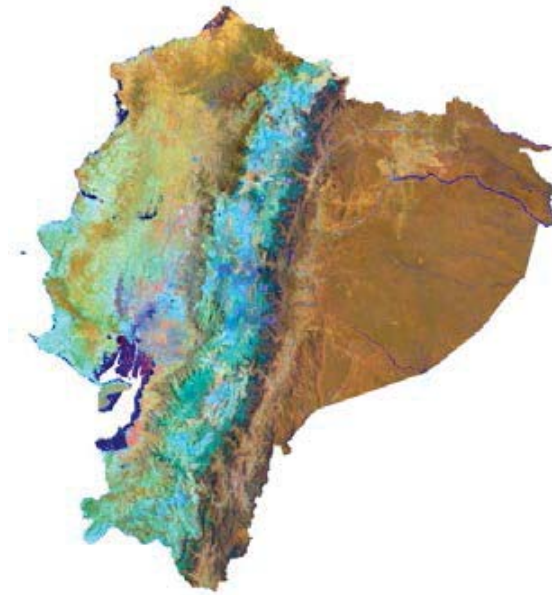


Figura 5. Mosaico del Ecuador utilizando Imágenes LANDSAT para el 2008 proporcionado por la Universidad de Maryland.

6.4 Búsqueda y revisión de imágenes

Según Baquero (2012), la búsqueda y revisión de imágenes comprende la fase de adquisición y preparación de la información LANDSAT. En esta etapa se deben tomar en cuenta algunos criterios para la selección de imágenes como son: Path y Row (filas y columnas de ubicación de la escena o imagen), porcentaje de nubes y fecha de toma de la imagen. El Path y Row corresponde a la distribución de cada una de las escenas tomadas por el sensor Landsat. Cada escena o imagen de cada Path y Row cubre una superficie de 183 km x 170 km cuya temporalidad de paso (por el mismo sitio) es de 16 días. El Path para el Ecuador se distribuye del 8 al 11 y el Row del 59 al 63, es decir la cobertura del sensor Landsat para el área continental es de 17 escenas en total, sin contar con la región de Galápagos.

Se debe ingresar al sitio WEB: <http://glovis.usgs.gov/> - USGS Global Visualization Viewer. Una vez ingresado se deberá escoger cual imagen o imágenes se van a descargar. Posteriormente se debe llenar una solicitud en línea para que la NASA envíe un link de descarga, esta aprobación demora entre 48 a 72 horas.

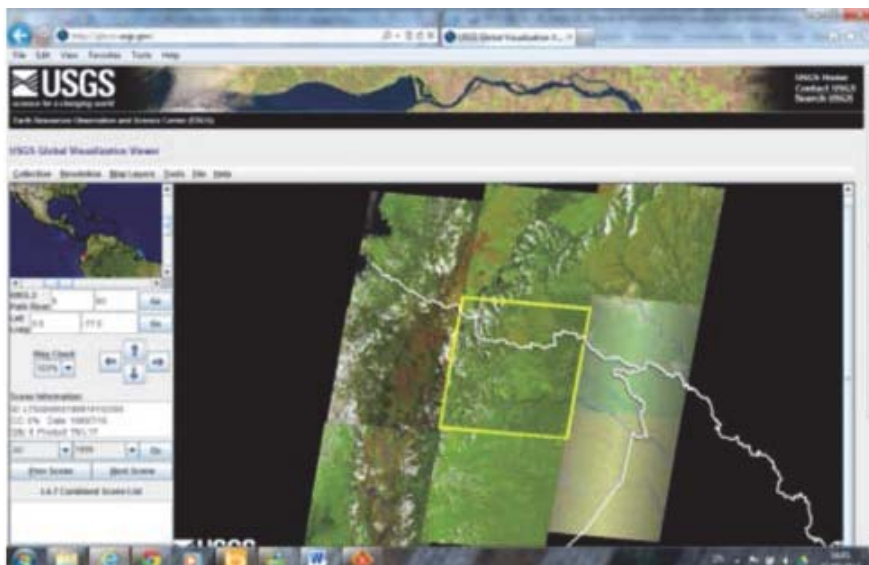


Figura 6. Captura de pantalla del portal Glovis del USGS.



6.5 Descripción de procedimientos para el procesamiento de imágenes LANDSAT

Corrección Atmosférica con Ledaps

Luego de haber realizado la descarga de imágenes se deben aplicar los siguientes comandos para realizar la corrección atmosférica (LEDAPS 2012).

- Comando **Indpm**: Extrae los metadatos de un producto Landsat estándar. Usa la siguiente secuencia como ejemplo: `Indpm L71033033_03320020702_MTL.txt`
- Comando **Indcal**: Calibra Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+. Se escribe el siguiente comando. `Indcallndcal.L71033033_03320020702_MTL.txt`
- Comando **Indcsm**: Genera máscara de nubes. Se utiliza la siguiente secuencia. `IndcsmIndcsm.L71033033_03320020702_MTL.txt`
- Comando **Indsr**: Realiza la corrección atmosférica. Usa el siguiente comando como ejemplo: `IndsrIndsr.L71033033_03320020702_MTL.txt`

También se puede escribir el script `ledapsscript.bash`, para esto ubicarse en la dirección donde se encuentran las carpetas descomprimidas y ejecutar el comando `ledapsscript.bash /home/usuario/LEDAPS/ANC`

Donde:

`/home`: Direcciona hacia el nombre de la máquina.

`/usuario`: Nombre de máquina.

`/LEDAPS/ANC`: Dirección donde se encuentran los archivos auxiliares para que se ejecute la corrección atmosférica.

Generación de máscara de información de nubes y sombras de nubes

Aplicar el comando `oft-mask.bash`: el que crea una máscara de nubes y sombras de nubes provenientes de las imágenes del proceso de corrección atmosférica de Ledaps⁵ derivadas del archivo `Indcsm`.

oft-mask.bash input

Ejemplo: `oft-mask.bash LE70090602007029EDC00`; genera un archivo `mask_LE70090602007029EDC00.img`

Importante: siempre se debe realizar una revisión de la máscara obtenida, en el caso de que se encuentren errores se puede revisar el script `oft-mask.bash` y cambiarlo para que enmascare mejor. También se puede mejorar la máscara digitalizando sobre las partes que no hayan salido bien.

Crear una composición de n bandas para cada escena Landsat

Aplicar el comando `stack.bash` el cual crea una imagen compuesta de 7 bandas en formato hdf proveniente del proceso de corrección atmosférica de Ledaps.

Ejemplo: `stack.bash LE70090602007029EDC00`.

⁵ Ledaps viene de las siglas en inglés Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System.



Se origina una carpeta `ledaps_stack` en donde aparecerán dos archivos:

`LE70090602007029EDC00_cm.img`: genera una máscara del proceso de corrección atmosférica.

`LE70090602007029EDC00_stack.img`: crea una imagen compuesta de 7 bandas.

Como complemento, el comando `gdal_merge.py` permite realizar la composición de las bandas provenientes de Ledaps o de bandas de cualquier imagen. Estas imágenes necesitan tener el mismo sistema de coordenadas y el mismo número de bandas, pero pueden superponerse y tener diferentes resoluciones.

Ejemplo: `gdal_merge.py -o landsat_p009r060_345.tif -separate L71009060_06020020912_B30.TIF L71009060_06020020912_B40.TIF L71009060_06020020912_B50.TIF`

Este comando se usará para combinar el stack generado de las 7 bandas con la máscara de la misma imagen, que pasará a ser la banda 8 de esta composición. Luego de esto se realizará una multiplicación entre la banda 8 (máscara) y cada una de las 7 bandas para obtener una imagen sin nubes ni sombras.

Para realizar esta multiplicación se usa el comando `oft-calc` imagen de entrada nombre de salida de la imagen de entrada.

A continuación pide el número de bandas, en este caso se debe colocar el 7.

Realizar la multiplicación: `#1 #8 * (# en Open Foris significa banda)`. Hacer la misma operación para el resto de bandas `#2 #8 *(enter)`, `#3 #8 *(enter)`,....., `#7 #8*(enter)`. El resultado es una imagen sin nubes ni sombras de nubes.

El comando `oft-calc` utiliza el lenguaje de programación polaco inverso, donde las operaciones se ponen al final. Por ejemplo:

- Para sumar dos números ($2 + 5 = 7$) se debe escribir: `2 5 +` que es igual a 7
- Para multiplicar dos números ($3 \times 4 = 12$) se debe escribir: `3 4 *` que es igual a 12
- Si se desea hacer una operación combinada, es decir $(2 + 5) \times (3 \times 4) = 84$, se debe escribir: `2 5 + 3 4 **` que es igual a 84

Se sigue la misma lógica para el resto de operadores

Obtener información sobre las imágenes

Para obtener esta información, utilizar el comando `gdalinfo`:

Ejemplo: `gdalinfo landsat_p009r060_345.tif`

Cambiar la proyección

En el caso de que las imágenes no se encuentren en la proyección, ni el Datum que trabaja el proyecto (UTM zona 17 Sur, Datum WGS84) se debe realizar un cambio de proyección utilizando el comando `gdalwarp`.

El sistema de coordenadas (SRS = spatial reference system) se indica en código EPSG (ej: 4326 es el sistema lat long WGS1984, 32618 es WGS 84 / UTM zone 18N, 32717 es WGS 84 / UTM zone 17S, 32617 es WGS 84 / UTM zone17N). Para encontrar el código de una proyección se puede consultar Spatialreference (<http://spatialreference.org>).

Ejemplo: `gdalwarp -t_srs EPSG:32717 landsat_p009r060_345.tif landsat_p009r060_345_r.tif`

Visualizar los resultados

Para visualizar los resultados se pueden utilizar los programas `openev2`, `QGIS` u otro software similar. Ej. `openev2 mosaico.jpg`



Generación de una imagen compuesta a partir de varias imágenes corregidas atmosféricamente

César Cisneros desarrolló el comando *multifiller_3.1.bash* que no está ingresado dentro del paquete Open Foris Toolkit. Este es el comando que hay que utilizar para generar una imagen compuesta, para esto se debe poner en un directorio las carpetas corregidas atmosféricamente y las imágenes generadas con *stack.bash* mediante un link. Para esto se utiliza el comando *ln -s* que permite relacionar archivos en un directorio sin duplicar información.

Ejemplo: Crear una carpeta y dentro de esta hacer links de las carpetas que contienen los archivos de corrección atmosférica y los stack.

- *ln -s directorio donde están las imágenes corregidas atmosféricamente/ input1 directorio de destino.*
- *ln -s directorio donde están los archivos ledaps_stack/LE70090602007029EDC00_stack.img directorio de destino.*

Se aplica el comando *multifill_3.1.bash* y a continuación se ordena las carpetas de imágenes jerárquicamente desde la que mejor cubra un área del path a row a la que peor lo hace.

Ejemplo: *multifill_3.1.bash anchor image1 image2 image3 image_n*

Importante: el archivo *multifiller_3.1.bash* tiene dos parámetros dentro del script: la (*large area*, ej. si está un valor de 3 realiza bloques de 3 x 3 en la imagen, es decir 9 bloques) y *sd* (*sampling density*, o densidad de muestreo para construir el modelo).

Si la imagen multifill resultante no sale bien se puede probar cambiando estos parámetros para mejorar la imagen resultante. También se deben revisar las máscaras generadas obtenidas del comando. En el caso de que sea necesario, se deben crear dos carpetas:

- Carpeta *shp*: Completar una máscara con vectores que tengan el mismo nombre de la máscara que se quiere alterar.
- Carpeta *msk*: Contiene archivos raster en la misma carpeta con el mismo nombre de la máscara que se desea alterar. (Por ejemplo se puede utilizar una máscara *termal* que mejore la máscara generada por el comando *oft-mask-bash*.)

7. Metodología para el Cálculo de Carbono con Imágenes Satelitales

7.1 Modelamiento de carbono con el algoritmo k-nn

El mapa de carbono es el resultado de la relación entre los valores digitales de la imagen y los valores de carbono provenientes del campo de cada una de las parcelas del INF. Para realizar este modelamiento se utilizó el algoritmo *K-nearest neighbors* (K-nn) implementado en Open Foris. Una de las ventajas de este estimador es que se puede calcular simultáneamente diferentes variables forestales, conservando la dependencia entre las mismas (Moeur 1987).

Para correr el algoritmo de K-nn se necesita como insumos: el mosaico de la imagen MODIS con sus respectivas 7 bandas, las coordenadas de las parcelas y su respectivo valor de carbono en toneladas por hectárea (Tn/ha).

A continuación se presenta la ecuación utilizada para correr el algoritmo K-nn (Mäkela y Pekkarinen 2004)



Ecuación 1. Ecuación K-nn

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_i^2}\right) y_i}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_i^2}\right)}$$

Donde:

\hat{y} Valor estimado

y_i Valor de la i -ésimo vecino más cercano

d_i Distancia euclidiana al i -ésimo vecino más cercano

k Número de vecinos utilizados.

La Figura 7 muestra un gráfico explicativo sobre el funcionamiento del algoritmo K-nn que combina los datos de campo con los niveles digitales de una imagen. Al ejecutar el algoritmo primero se calcula la Distancia Euclidiana desde el píxel objetivo a todas las parcelas de la muestra utilizando los datos espectrales; luego ordena las distancias de manera ascendente, selecciona las k primeras muestras de la lista, y por último estima las variables desconocidas como un promedio ponderado inversamente al cuadrado de la distancia espectral de las k muestras seleccionadas.

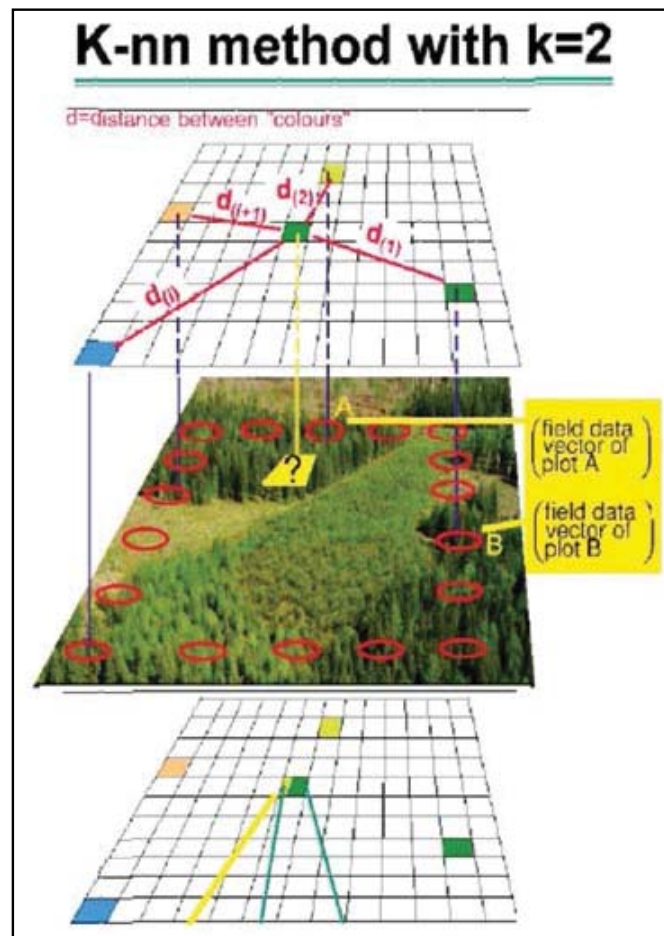


Figura 7. Explicación gráfica del algoritmo K-nn.

Fuente: Metla (Centro de Investigación de Bosques de Finlandia) 1996.



7.1.1 Datos del Inventario Nacional Forestal para el cálculo del Mapa de Carbono.

Para el cálculo de carbono se utilizaron datos del Inventario Nacional Forestal, los que se exponen a continuación. (Para mayor información referirse al Manual de Campo de la ENF (MAE 2012)):

- **Conglomerado:** Código del conglomerado que involucra codificación del estrato y número de conglomerado.
- **Parcela:** Número de parcela 1, 2 o 3.
- **Coordenada ESTE:** Coordenada Este UTM, WGS 84, zona 17 Sur
- **Coordenada NORTE:** Coordenada Norte UTM, WGS 84, zona 17 Sur
- **Carbono (Tn/ha):** Corresponde al carbono por Tonelada que existe por parcela tomando en cuenta el área efectiva obtenida durante el trabajo de campo y su relación con una hectárea.

Con la información antes descrita se realizaron dos tipos de depuración. En la primera se corrigió errores en las coordenadas UTM y estas se reproyectaron a la zona 17 sur para estar alineada con el sistema de referencia de las imágenes MODIS. En la segunda depuración se quitaron las parcelas que caían fuera del área de la máscara de bosque utilizada.

7.1.2 Cálculo del Mapa de Carbono con K-nn en Open Foris.

De la información descrita en el apartado anterior, se genera un archivo en formato txt que debe contener lo siguiente: identificador (estrato, conglomerado y parcela), coordenada este, coordenada norte y la variable o variables que se desea correlacionar con los píxeles de las imágenes satelitales. Para esta aplicación la variable a utilizar es el valor de carbono en biomasa.

Para correr el modelo con k-nn se utilizan el comando *oft-extr* que extrae los valores de los píxeles en una imagen. Aplicando este comando se obtiene una tabla que contiene: identificador, coordenadas este y norte, la variable que se desea correlacionar con la imagen satélite, dos coordenadas internas de Imagen X y Y y los valores digitales de cada una de las bandas.

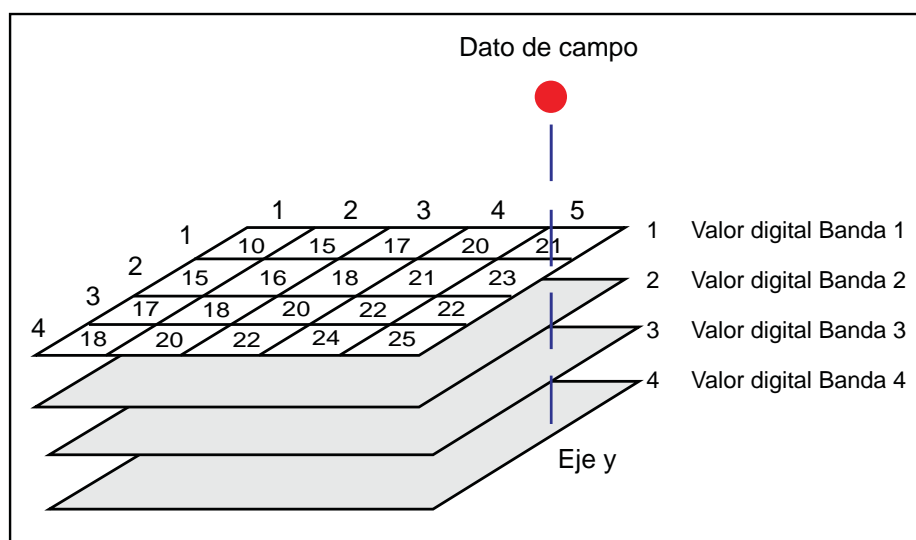


Figura 8. Explicación gráfica de la utilización del oft-extr.

En la Figura 8 se explica de manera gráfica la utilización del comando *oft-extr* en donde un punto de campo es sobrepuesto sobre una imagen de satélite y este comando extrae los valores digitales de sus diferentes bandas.



Para correr el comando se usa la siguiente sintaxis:

```
oft-extr -o output.txt pointfile img-file
```

Donde

-o output: Nombre del archivo de salida .txt

pointfile: Archivo original de los datos de carbono en formato.txt

img-file: Mosaico_MODIS.tif

El comando solicita el número de columna con sus correspondientes datos:

- 2: La segunda columna contiene las coordenadas Este
- 3: La tercera columna contiene las coordenadas Norte

Puede ser necesario igualar el tamaño de los píxeles de la imagen MODIS o LANDSAT y la máscara de bosque no bosque utilizada para el proceso. Para solucionar este conflicto se sugiere utilizar el comando *oft-clip.pl*. A continuación se describe la manera de cómo utilizarlo:

```
oft-clip.pl input_reference input_image output_image
```

Donde:

input_reference: Imagen de referencia de entrada es la imagen a la cual se igualará el tamaño del píxel, en formato tif.

input_image: Imagen que se requiere igualar el tamaño del píxel, en formato tif.

output_image: Imagen de salida en formato tif.

Una vez obtenido el archivo resultante del *oft-extr* e igualada la resolución espacial entre imágenes, se corre el algoritmo k-nn de la siguiente manera:

```
oft-nn -i input_image -o output_image -aw -um maskfile
```

Donde:

input_image: Imagen de entrada, en este caso, pueden ser los mosaicos de imágenes MODIS o LANDSAT.

output_image: Imagen de salida para el modelo k-nn.

aw: Los pesos han de asignarse a las bandas de la imagen de entrada.

Masfile: Es la máscara⁶ que se va a procesar, en este caso la imagen máscara de bosque no bosque.

El comando pide la siguiente información:

- *Input signature file name?*: Nombre del archivo de salida del proceso oft-extr

Feature 1: 1 ; Peso de 1 asignado a la banda 1

Feature 2: 1 ; Peso de 1 asignado a la banda 2

Feature 3: 1 ; Peso de 1 asignado a la banda 3

Feature 4: 1 ; Peso de 1 asignado a la banda 4

Feature 5: 1 ; Peso de 1 asignado a la banda 5

Feature 6: 1 ; Peso de 1 asignado a la banda 6

Feature 7: 1 ; Peso de 1 asignado a la banda 7

⁶ Es un archivo binario donde 0 son valores de los píxeles que no se tomarán en cuenta en el proceso y 1 los valores que si se emplearán para realizar el cálculo o que entrarán en el estudio.



- *Number of k?*: Se debe hacer un análisis para determinar el mejor valor para cada caso
- *Nbr of output variables?* : Número de variables de salida. Para este caso se utilizó solo una variable que corresponde al valor de carbono.
- *Cols of 1 output vars in sig file?* : Número de la columna en donde se encuentran los valores de la variable.
- *Output var type*: Tipo de variable de salida
- *Class/Other = (0/1)?*: 0 para indicar que es una variable discreta y 1 que es una variable continua. En este caso se escoge 1 porque cada píxel contiguo puede tener un valor distinto.

7.1.3 Validación cruzada y selección del valor de k

Para escoger el valor de k que brinda mejores resultados y para validar el Modelo ejecutado con K-nn, se utiliza la validación cruzada o cross-validation que es una técnica para evaluar los resultados de un análisis estadístico y garantizar que son independientes de la partición entre datos de entrenamiento y prueba. Consiste en repetir y calcular la media aritmética obtenida de las medidas de evaluación sobre diferentes particiones. Se utiliza en entornos donde el objetivo principal es la predicción y se quiere estimar la precisión de un modelo (Lindgren 1976). En la validación cruzada todo el conjunto de datos es utilizado y se ensaya con todas las características espectrales de las bandas de las imágenes satelitales (Mäkela y Pekkarinen 2004).

Según Lindgren (1976), la confiabilidad de la estimación se comprueba comparando los valores estimados en el modelo con los valores reales basados en el inventario de campo y se mide a través del Error Medio Cuadrático (RMSE) y el Error Medio Cuadrático Relativo (RMSEr).

El RMSE se define como la diferencia que existe entre los valores conocidos y los valores que han sido predichos (ej. A través de un modelo). El RMSE se obtiene al sacar la raíz cuadrada de la sumatoria de las diferencias entre los valores conocidos y los valores predichos al cuadrado, dividiendo esta sumatoria para el tamaño de la muestra (n) (ESRI 2006). Las unidades del RMSE serán las mismas que las ingresadas en la variable de estimación, en este caso Tn/ha.

El RMSEr es el error muestral expresado en términos relativos (%).

A continuación se indican las Fórmulas del RMSE y RMSEr:

Ecuación 2. RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}};$$

Ecuación 3. RMSEr

$$RMSE_r = \frac{RMSE}{\hat{y}};$$

Donde:

y_i : Valor estimado

\bar{y} : Media de las estimaciones

y_i : Valor observado de y

n: Número de observaciones (Makela&Pekkarinen, 2001)



Para ejecutar la validación cruzada en Open Foris se utiliza el siguiente comando:

```
oft-crossvalidate -i datafile -v col -bands val -dw 2
```

Donde:

datafile: Nombre del archivo de salida del proceso oft-crossvalidate (formato .txt).

col: Número de columna donde se encuentra la variable en el archivo de salida del proceso oft-extr.

bands val: Número de bandas a usar.

dw 2: Utiliza el método de inverso a la distancia.

Se generó un script llamado bash tst.bash para correr la validación cruzada con diferentes valores de k (Ver Anexo_MODIS_4_Validacion_cruzada) y obtener el valor de RMSE para cada k. Se recomienda calcular los valores de k hasta máximo 20, pasado este número se corre el riesgo de usar valores que no pertenezcan a la misma zona de interés. (Pekkarinen⁷ 2013)

7.1.4 Selección del valor de k

Con el cálculo del RMSE para cada valor de k es posible generar un gráfica que permite observar la incertidumbre para cada uno y escoger cuál de estos modelos brinda mejores resultados⁸.

Antes de ingresar al programa *gnuplot* es necesario generar un archivo txt que contenga el RMSE para cada valor de k. Esto se realiza utilizando el lenguaje *awk*.

A continuación se puede escribir la secuencia de comandos *bash run-crossvalidation.bash|grep RMSE|awk '{print NR,\$2}' > plot_Ha.txt*

Para generar el gráfico dentro del gnuplot se sugiere escribir el siguiente comando:

gnuplot : Escribiendo en el terminal “gnuplot” se accede al programa.

set xlabel “numero de k” : Para darle nombre al eje X

set ylabel “RMSE” : Para darle nombre al eje Y

plot './plot_Ha.txt' u 1:2 w l : Al escribir “plot” va a graficar el archivo de nombre “plot_Ha.txt” grabado anteriormente.

De esta manera se obtiene el siguiente tipo de gráfico en donde se puede determinar con qué valor de k se obtiene la incertidumbre más baja del modelo. En la figura 9 se observa el resultado de utilizar los comandos antes descritos.

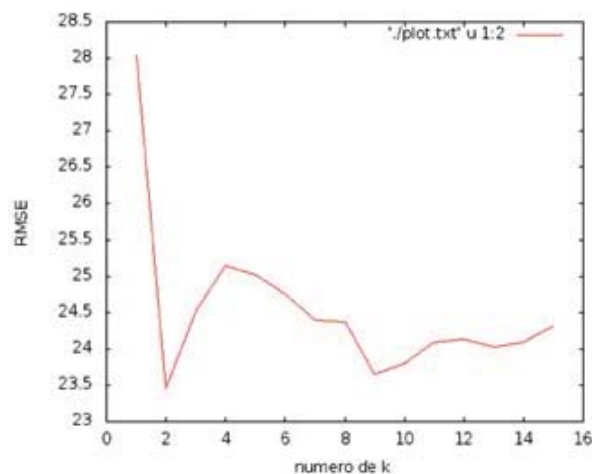


Figura 9. Gráficos de valores de k con gnuplot

⁷ Comunicación personal, julio 2013.

⁸ Esto se lo puede realizar por ejemplo en el programa libre gnuplot.



Una vez seleccionado el valor de k y el mejor modelo de estimación de carbono con K-nn se procede a calcular el RMSEr (ver ecuación 3), el cual consiste en dividir el valor de RMSE correspondiente al k seleccionado entre el valor de la media de los valores de carbono obtenidos en campo.

En las Figuras 10 y 11 se indica el proceso para la obtención del Mapa de Carbono para las imágenes MODIS y LANDSAT respectivamente. El cálculo del mapa de carbono está dividido en tres macroprocesos: por descarga de imágenes (color amarillo), por pre-procesamiento de imágenes (color verde) y por ejecución del modelo K-nn (color azul).

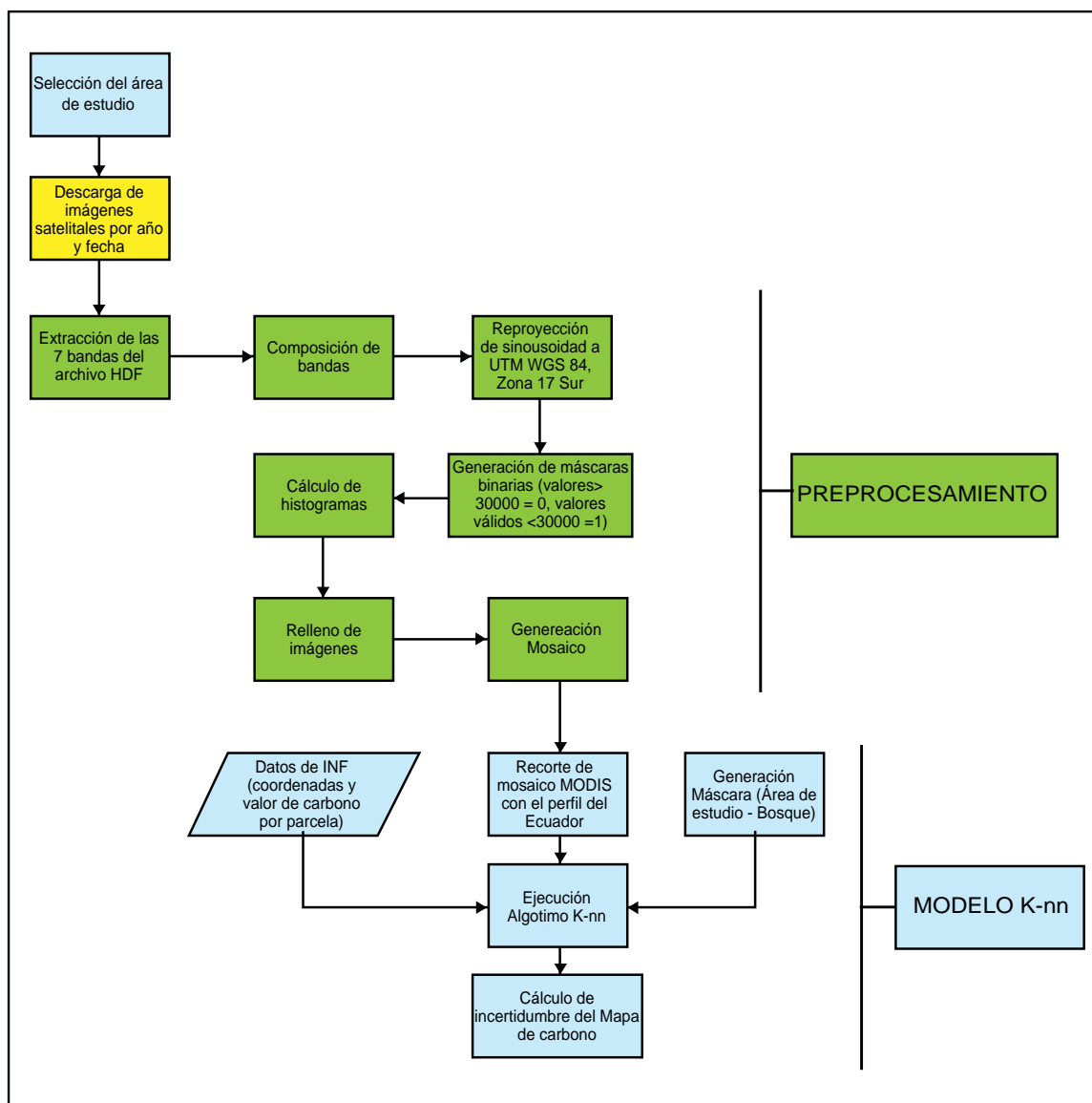


Figura 10. Flujograma para la obtención del Mapa de Carbono con Imágenes MODIS

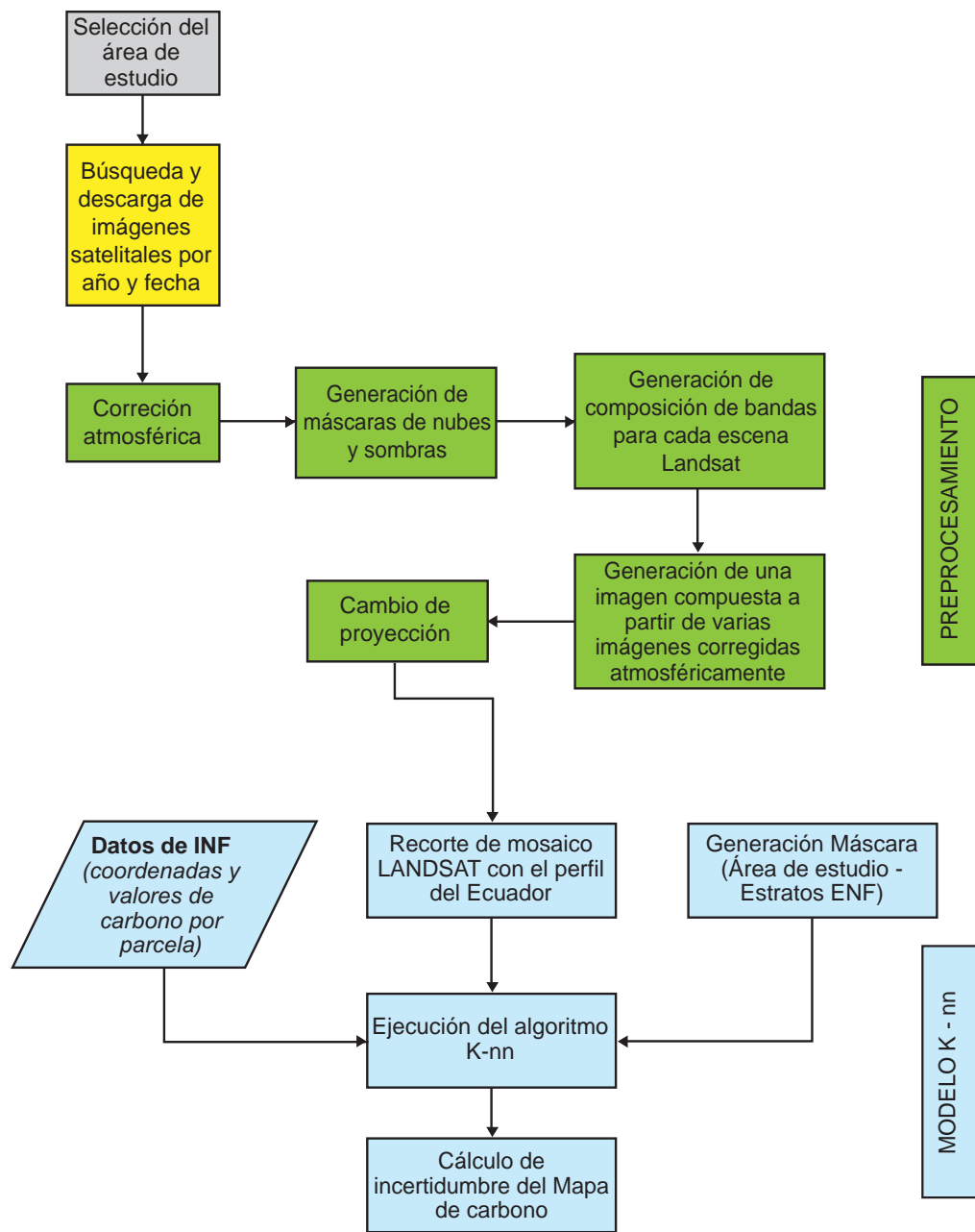


Figura 11. Flujograma para la obtención del Mapa de Carbono con Imágenes LANDSAT.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altman, N. 1992. Introduction to Kernel and nearest -neighbour nonparametric regression. *Am. Stat.* 46 (3), 175-184.

Cisneros, C. 2012. Prueba de concepto de mapeo de biomasa aérea en áreas de Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía en la provincia de Sucumbíos – Ecuador. Informe año 2012. Proyecto MFSCC-FAO. Quito, Ecuador. 23 pp.

ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2006. A to Z GIS. Sommer, S.; Wade, T. eds. ESRI Press 2006. Redlands, CA. 288 pp.

FCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2007. Actividades Forestales como medidas de mitigación mesurables, notificables y verificables. Add.1 Decisión 2. Bali, ID.

Hansen, M., Roy, D., Lindquist, E., Adusei, B., Justice, C., Alstatt, A. 2007. A method for integrating MODIS and Landsat for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. *Remote Sensing of Environment*, 112 (2008): 2495-2513.

Lindgren, B.W. 1976. *Statistical Theory*, 3rd ed. Macmillan Publishing Co. Inc. Nueva York, US. 614 pp.

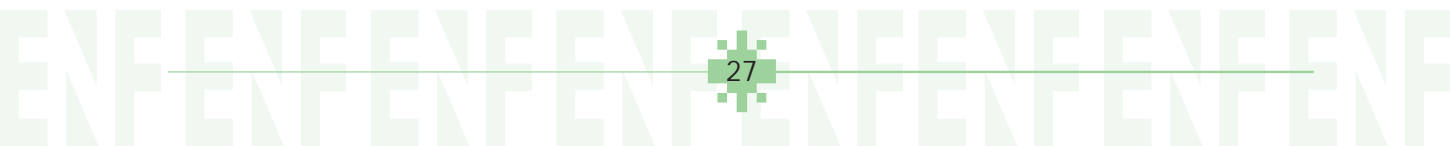
Mäkela, H., Pekkarinen, A. 2004. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data, February 2004, *Forest Ecology and Management*, Elsevier, p. 245-255.

MAE (Ministerio del Ambiente, EC). 2010. Metodología para desarrollar el estudio piloto de la ENF en conformidad con el mecanismo REDD+, Ecuador.

MAE. 2012. Manual de Campo de la Evaluación Nacional Forestal. FAO-UNREDD-MAE. Quito, Ecuador.

Metla (Finnish Forest Research Institute). 1996. Multi-source National Forest Inventory of Finland. Helsinki, FI. 14 pp.

Moeur, M. 1987. Nearest neighbour inference for correlated multivariate attributes. In: *Proceedings of the IUFRO Conference on Forest Growth Modelling and Prediction*, Minneapolis, MN, 23-27 August 1987. USDA Forest Service. General Technical Report NC-120, p. 716-723.





BASES DE DATOS CONSULTADAS

LEDAPS (Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System). 2012. Consultado 20nov.2012. Disponible en: <http://ledaps.nascom.nasa.gov>

NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2008. MODIS. Consultado 15 junio, 2012. Disponible en: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

Open Foris Geospatial Toolkit. 2012. Open Foris Wiki. Consultado 20nov.2012. Disponible en: http://km.fao.org/OFWiki/index.php/En_Espa%C3%B1ol



ANEXOS

9.1 ANEXO 1

Descarga automática de imágenes MODIS por año y Tile.

oft-dlmodis.sh

```
# $1 = year
# $2 = horizontal crd
# $3 = vertical crd
year=$1
h=$2
v=$3
wget ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOTA/MCD43A4.005/
grep "$year" index.html | sed s/"[<?a>\\"]"/ "/g | awk -v h=$h -v v=$v '{for(i=1;i<=NF;i++)
if(index($i,"ftp") > 0) printf("%s*h%02dv%02d*.hdf\n", $i, h, v)}' > /tmp/list.txt
wget -i /tmp/list.txt
```

9.2 ANEXO 2

Preprocesamiento MODIS. Este script realiza:

La extracción de bandas de MODIS.

Realiza una composición de bandas.

Reproyecta las bandas.

Genera una máscara (Este es un archivo binario)

Genera un histograma de las imágenes en un archivo txt que contiene la fecha, nombre de la imagen y número de píxeles válidos, dentro del área del Ecuador.

```
#!/bin/bash
##jos
mkdir mascaras
mkdir imagenes
for modis in `ls *.hdf`
do
modis2=${modis%.*}
echo -e "\n  EXTRAYENDO BANDAS DE $modis2  \n"
resample -u 17 -i $modis -o $modis2.tif -t UTM -p parameter_file.txt
mkdir $modis2
mv *.tif $modis2
cd $modis2
echo -e "\n  REALIZANDO MERGE DE BANDAS DE $modis2  \n"
gdal_merge.py -o $modis2'_merge.tif' -separate *.tif
echo -e "\n  REPROYECTANDO $modis2'_merge.tif (UTM - 17S)  \n"
gdalwarp -t_srs EPSG:32717 $modis2'_merge.tif' $modis2'_17S.tif'
```



```
In -s /media/JOSE_WD/CARBONO/2011/9-9/$modis2/*17S.tif /media/JOSE_WD/CARBO-
NO/2011/9-9/imagenes/
echo -e "\n      GENERANDO MÁSCARA DE NUBES Y SOMBRAS DE NUBES DE
$modis2*_17S.tif (bin 1/0)  \n"
oft-calc $modis2*_17S.tif 'mascara_`$modis2`.tif' <<EOF
1
#1 32767 = 1 0 ?
EOF
In -s /media/JOSE_WD/CARBONO/2011/9-9/$modis2/mascara*.tif /media/JOSE_WD/CAR-
BONO/2011/9-9/mascaras/
cd ..
done
cd mascarass
for his in `ls mascara*.tif` ;
do
his2=${his%.*}
oft-clip.pl ecuador.tif $his $his2*_cut.tif
done
j=0;
for his in `ls mascara*_cut.tif` ;
do
((++j))
`ls mascara*_cut.tif>listaimagenes.txt`;
oft-his -hr -maxval 1 $his $his val_his.txt;
n=`cat val_his.txt lwc -l`;

for((i=1;i<=n;i++));do awk -v contador=$j 'NR==contador {print substr($1,9,41)}' listaimage-
nes.txt;done> jos.txt;
paste jos.txt val_his.txt>val_his_con_nombres.txt;
awk '{print $1,$3}' val_his_con_nombres.txt>>acum_val_his.txt;
done
sort -k 2 -k 3 -nr acum_val_his.txt >orden_por_2col.txt
awk '{print "jul", substr($1,10,4), substr($1,14,3)}' orden_por_2col.txt> fechas_julianas.txt;
paste fechas_julianas.txt orden_por_2col.txt> ordenadas_con_fechas.txt;
jul () { date -d "$1-01-01 +$2 days -1 day" "+%Y/%m/%d"; };
n=`cat ordenadas_con_fechas.txt lwc -l`;
for((i=1;i<=n;i++));do `awk -v contador=$i ' NR==contador {print $1,$2,$3}' ordenadas_con_
fechas.txt`;done> fechas_calendario.txt;
paste fechas_calendario.txt orden_por_2col.txt > ordenadas_con_fechas_calendario.txt;
```

9.3 ANEXO 3

Extrae los valores espectrales por banda de cada una de las parcelas y genera un archivo txt

Ejecuta el algoritmo K-nn con diferentes valores de k (k=5, k=10, k=15, y k=20)

Genera una imagen con todos los valores de k calculados

Genera imágenes comparativas con diferentes valores de k



```
oft-calc merge_img_knn.tif 10-5.tif <<EOF
1
#1 #4 -
EOF
```

```
oft-calc merge_img_knn.tif 15-20.tif <<EOF
1
#2 #3 -
EOF
```

```
oft-calc merge_img_knn.tif 15-5.tif <<EOF
1
#2 #4 -
EOF
```

```
oft-calc merge_img_knn.tif 20-5.tif <<EOF
1
#3 #4 -
EOF
```

9.4 ANEXO 4

Calcula la incertidumbre para cada uno de los puntos de campo

```
for k in 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27
28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41
42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55
56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69
70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83
84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97
98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111
112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125
126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139
140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153
154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167
168 169 170 171 172 173 174 175 176; do
```

```
oft-crossvalidate -i Carbono_Amazonia_Tn_knn.txt -bands 7 -v 4 -dw 2 Carbono_Amazonia_Tn_knn.txt -k $k
```

done

