



 Ministerio  
del Ambiente

# Protocolo metodológico para la generación del Mapa de Deforestación Histórica en el Ecuador continental

Versión 3



Diciembre de 2010

  
**SocioBosque**  
Programa de protección de bosques

## Presentación

En enero de 2009 el Ministerio del Ambiente a través del Proyecto Socio Bosque empezó una vieja aspiración del Ministerio y de muchos sectores del país, la actualización de la información relacionada a la cobertura de la vegetación nativa y al cambio de uso del suelo. Información básica para la toma de decisiones en todo lo relacionado a actividades de desarrollo y de conservación.

El esfuerzo que ha realizado el Ministerio del Ambiente nos llena de satisfacción pues se lo ha emprendido con talentos de jóvenes ecuatorianos, comprometidos por cambiar la historia de frustraciones del país y todo gracias a la voluntad política de la Señora Ministra del Ambiente, Marcela Aguiñaga Vallejo y del Señor Presidente de la República, Rafael Correa Delgado.

En el mes de febrero de 2011 el Ministerio del Ambiente estará en la capacidad de entregar a la ciudadanía los resultados históricos de la cobertura y uso de la tierra del Ecuador para los períodos 1990-2000, 2000-2008, esta información es muy valiosa para los sectores de planificación, productivos, de infraestructura, de conservación, entre otros. Por ejemplo, para el Ministerio del Ambiente esta información permitirá enfatizar las acciones necesarias en las áreas donde se ha incrementado la deforestación, siendo una herramienta importantísima en el actual Modelo de Gobernanza Forestal (de la cual forma parte el proyecto Socio Bosque) que la actual administración esta implementando desde hace un par de años. Así como también, permitirá que el país este en capacidad de participar en los posteriores mecanismos internacionales de compensación por secuestro de carbono.

Algo muy importante del esfuerzo realizado es que el Ministerio del Ambiente ha asumido esta labor no como una acción coyuntural, sino como parte de un cambio estructural en el quehacer del Ministerio, se tiene previsto que en base a esta información se desarrolle e implemente el Sistema Integrado de Monitoreo de Uso y Cobertura de la Tierra del país, con la repetición del ejercicio actual luego de cuatro o cinco años y con un monitoreo más grueso de carácter anual.

Para este objetivo, el Ministerio del Ambiente ha fortalecido sus capacidades, hasta 2008 el Ministerio contaba con apenas un ingeniero geógrafo, en la actualidad el Ministerio cuenta con más de 30 ingenieros geografos que trabajan tanto en el mapa de deforestación, como en otros proyectos: Socio Bosque, Mapa de Vegetación, Evaluación Nacional Forestal. Todos proyectos de inversión que se encuentran en ejecución, pero que se tiene previsto a futuro su institucionalización en alguna estructura que sea liviana pero que permita continuar con la labor que se ha iniciado.

Otro aspecto que debe ser señalado, es que esta tarea si bien ha sido hecha por talento ecuatoriano, no se ha despreocupado de cumplir con elevados estándares internacionales para su posterior reconocimiento, es por esto que durante 2009 y 2010 el trabajo realizado se ha visto supervisado por entidades internacionales como el Panel Científico Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), la FAO, y ha contado con el asesoramiento de otras entidades técnicas como CONDESAN, Conservation International, Instituto Carnegie, quienes han brindado un acompañamiento técnico.

Por lo anterior es también satisfactorio poder comentar que a nivel internacional el Ecuador es luego de Brasil, el país que más ha avanzado en la construcción de esta información, siendo ya reconocido a nivel mundial, constituyéndose en un ejemplo de que con voluntad política, se puede realizar todas las acciones que se requieren, sin necesidad de hacer largas filas para la asistencia condicionada de organismos internacionales, que hasta la fecha no logran hacer que otros países de la región tengan los avances que tiene el Ecuador.

En este contexto es para el Proyecto Socio Bosque, en nombre del Ministerio del Ambiente y sus autoridades, un privilegio presentar un producto técnico que tiene la virtud de ser elaborada por ecuatorianos, financiada con recursos ecuatorianos, validada por entidades internacionales independientes, completamente verificable y replicable, que pone al Ecuador en la vanguardia a nivel de latinoamerica en la generación de información que permitirá al país la toma de decisiones en distintos campos, así como postular a futuro en mecanismos de compensación o en mercados de carbono en el contexto de la Convención de Cambio Climático.

**Max R. Lascano V.**  
**Gerente Proyecto Socio Bosque**  
**Ministerio del Ambiente**

## Prologo

Los datos de deforestación que han sido utilizados en el Ecuador provienen del Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), mencionada institución reporta que el Ecuador ocupa el noveno lugar entre los países del Trópico con altos niveles de deforestación, equivalente a una tasa anual del 1,47% en el período 1991 – 2000. Es importante mencionar que las metas de reducción de la tasa de deforestación del Plan Nacional provienen de la fuente antes mencionada. Los datos de deforestación del CLIRSEN fueron obtenidos mediante un análisis multitemporal de cambio de uso y cobertura del suelo con mapas generados para los años 1991 y 2000 utilizando interpretación visual (Sánchez R., 2003). El análisis provee información cuantitativa para evaluar la magnitud y distribución espacial de la deforestación en el país. Sin embargo, no se cuenta con documentación sobre los niveles de incertidumbre asociados a este ejercicio y que permita estandarizar un proceso metodológico para su replicación futura.

Adicionalmente existen otros estudios de deforestación realizados por distintas instituciones. Según FAO a nivel nacional la tasa de deforestación anual es de 1,2% para la década de los 90s, una de las más altas en Latino América. Conservación Internacional en el 2008 reporto que la tasa anual de deforestación en la década de los 90s es de aproximadamente 0.39%. En este estudio también se menciona que aproximadamente el 30% de la superficie continental del país no cuenta con información de imágenes de satélite. Esto se debe a que el Ecuador tiene serios problemas por la presencia persistente de cobertura de nubes en ciertas zonas de su territorio (p.ej. vertientes Andinas, provincia de Esmeraldas) lo que dificulta la adquisición de información de buena calidad por los sensores ópticos.

Indudablemente el país cuenta con datos de deforestación, pero existen notables diferencias entre los mismos. Por tanto, es evidente la necesidad de la generación de información actualizada sobre los patrones espaciales y el comportamiento de la deforestación en el Ecuador adecuadamente documentada y con un nivel de confianza aceptable.

Por lo antes mencionado y debido a que la conversión y transformación de ecosistemas naturales a usos y cobertura del suelo antrópicos son uno de los principales procesos de afectación a la biodiversidad y el funcionamiento de dichos ecosistemas (MAE, 2000), el Ministerio del Ambiente (MAE) está ejecutando el proyecto "Mapa de Deforestación Histórica del Ecuador" cuyo objetivo principal es construir el escenario histórico de deforestación de forma espacialmente explícita a escala nacional.

Además de su valor intrínseco para proporcionar información clave para la planificación y gestión territorial, el mencionado proyecto es un componente importante para implementar actividades de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Debidas a Deforestación y Degradación (REDD), en donde se busca obtener recursos financieros del mercado de carbono y otro tipo de fondos que permitan apoyar iniciativas sustentables de uso y gestión del territorio.

La metodología del Mapa de Deforestación Histórica del Ecuador, es un esfuerzo conjunto de jóvenes profesionales ecuatorianos, quienes han realizado una investigación exhaustiva de procesos técnicos, con el fin de obtener el mejor resultado para este proyecto.

Es importante mencionar que esta investigación ha sido desarrollada a escala nacional y está siendo mejorada continuamente; por lo tanto existirán varias versiones de la misma que contendrán procesos que efectivicen recursos a corto y largo plazo.

Es un honor para mí, agradecer y felicitar a los técnicos involucrados en este proceso, Andrea Araujo, Alexandra Chacón, Alicia Gómez, María Fernanda Michelena, Mario Jijón, Pablo Moncayo y Rafael Castro.

Agradezco, de igual manera a todas las personas del Ministerio del Ambiente, que han creído en este esfuerzo y que han hecho posible la consecución de la presente metodología.

**Jeaneth Delgado Aguilar**

## Tabla de Contenidos

1.	Introducción y resumen de la metodología	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivo general	2
1.3	Objetivos específicos	2
1.4	Resumen de la metodología	3
1.5	Diagrama de procesos	4
1.6	Marco institucional y proceso de desarrollo de la metodología	5
2.	Desarrollo del protocolo	5
2.1	Consideraciones conceptuales y metodológicas iniciales	6
2.1.1	Resolución espacial y selección de sensores	6
2.1.2	Selección y recopilación de imágenes satelitales	6
2.1.3	Área de intervención del proyecto	8
2.1.4	Definición de sub – regiones	8
2.1.5	Definición operativa de bosques y leyenda temática	11
2.2	Pre – Procesamiento	12
2.2.1	Correcciones radiométricas	13
2.2.2	Correcciones geométricas	14
2.2.3	Definición de áreas de trabajo y remoción de nubes	15
2.3	Clasificación y detección de cambios de uso y cobertura del suelo	16
2.3.1	Trabajo de campo	16
2.3.2	Clasificación de imágenes satelitales	17
2.4	Reporte de trayectorias de cambio de la cobertura de bosques	19
2.5	Evaluación de exactitud	21
3.	Recomendaciones	22
3.1	Implementación de la metodología	23
3.2	Investigación aplicada al monitoreo de uso y cobertura del suelo	24
4.	Acrónimos	26
5.	Referencias Bibliográficas	27

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b>	Esquema metodológico para la caracterización de la línea base de deforestación. Los objetos azules representan datos espaciales. Los objetos naranja representan procesos metodológicos.	4
<b>Figura 2.</b>	Mosaico de imágenes por año de referencia: a) 1990 (LANDSAT), b) 2000 (LANDSAT), c) 2008 (ASTER), y d) 2008 (LANDSAT).	7
<b>Figura 3.</b>	Sub – regiones definidas en el Ecuador continental para estratificar el procesamiento digital de imágenes satelitales.	10
<b>Figura 4.</b>	Flujo de procesos del protocolo integrado de clasificación de imágenes satelitales	17
<b>Figura 5.</b>	Ejemplo genérico de tabulación de áreas de transición de uso y cobertura del suelo con cuatro clases hipotéticas.	20
<b>Figura 6.</b>	Ejemplo genérico de una matriz de transición para el reporte de cambio de uso y cobertura del suelo con cuatro clases hipotéticas.	20

## Lista de Anexos

- Anexo 1. Lista de imágenes satelitales a nivel nacional.
- Anexo 2. Protocolo de documentación de datos y procesos.
- Anexo 3. Leyenda temática de tipos de uso y cobertura del suelo.
- Anexo 4. Protocolo de manejo de datos
- Anexo 5. Protocolo de ortorectificación de imágenes satelitales ASTER
- Anexo 6. Protocolo de ortorectificación de imágenes satelitales LANDSAT
- Anexo 7. Protocolo de levantamiento de puntos de campo
- Anexo 8. Protocolo integrado de clasificación de imágenes satelitales
- Anexo 9. Protocolo híbrido de clasificación de imágenes satelitales
- Anexo 10. Protocolo de validación
- Anexo 11. Implementación en sitios piloto
- Anexo 12. Normalización Radiométrica Relativa Automática para generar mosaicos Landsat 7 SLC – off
- Anexo 13. Sistema de control de aseguramiento de la calidad
- Anexo 14. Tasa de deforestación nacional
- Anexo 15. Patrones de deforestación

# Metodología para la generación de la línea base de deforestación histórica en el Ecuador continental

Manuel Peralvo<sup>1</sup>, Jeaneth Delgado<sup>2</sup>

1 Consorcio Regional para el Desarrollo Sostenible de la Ecoregión Andina (CONDESAN). manuel.peralvo@condesan.org

2 Programa Socio Bosque, Ministerio del Ambiente del Ecuador. mdelgado@ambiente.gov.ec

## 1. Introducción y resumen de la metodología

### 1.1 Introducción

La implementación de actividades para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero debidas a deforestación y degradación (REDD) está siendo discutida como una herramienta de respuesta para reducir la emisión de gases que contribuyen al calentamiento global. La Conferencia de las Partes del UNFCCC realizada en Bali en 2007 (COP13) reconoció la necesidad de promover la construcción de capacidades en países en vías de desarrollo para contar con una base sólida para el monitoreo de dinámicas de cambio de uso del suelo (especialmente conversión y degradación de bosques) y las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero (GEI).

El Programa Socio Bosque es una iniciativa del Ministerio del Ambiente del Ecuador que brinda incentivos económicos a propietarios de áreas con cobertura de bosques nativos con el objeto de garantizar su permanencia en el mediano y largo plazo. El Programa prioriza áreas con dinámicas rápidas de cambio de uso y cobertura del suelo, áreas críticas para el mantenimiento de procesos ecosistémicos que generan beneficios para la sociedad y áreas con alta incidencia de pobreza. Adicionalmente, se ha identificado la necesidad de alinear esta iniciativa dentro del marco provisto por una eventual estrategia REDD a nivel nacional.

En este contexto, el Estado Ecuatoriano, a través de su Programa Socio Bosque, ha comenzado un proceso de investigación y desarrollo orientado a la generación de un escenario de referencia de emisiones de CO<sub>2</sub> por deforestación a nivel nacional. El escenario de referencia se refiere a las condiciones que se esperaría encontrar sin la implementación de acciones políticas de prevención. El primer componente de dicho escenario corresponde a la estimación de contenidos de carbono asociado a distintos tipos de uso y cobertura del suelo, con énfasis en ecosistemas de bosque. El segundo componente requiere estimados confiables de la extensión y ubicación de la deforestación en el pasado (Olander et al. 2008). El componente de estimación de contenidos de carbono se implementará dentro del proyecto Evaluación Nacional Forestal. El escenario histórico de deforestación es ejecutada por el Programa Socio Bosque.



La presente propuesta metodológica busca establecer los procedimientos necesarios para generar mapas de cobertura y uso del suelo para los años de referencia 1990, 2000 y 2008<sup>1</sup> que permitan identificar espacialmente conversiones del bosque a otras coberturas y usos del suelo en los períodos 1990 – 2000 y 2000 – 2008. La metodología ha sido desarrollada utilizando los siguientes criterios de diseño:

- Se busca mapear trayectorias de cambio de uso y cobertura del suelo utilizando el Enfoque 3 establecido por el IPCC (2003). En este enfoque se representan de forma espacialmente explícita y exhaustiva las trayectorias de deforestación a nivel nacional.
- Se busca lograr una representación consistente de tipos de uso y cobertura del suelo en los tres años de referencia. Esto quiere decir que la misma metodología va a ser utilizada en los tres años para minimizar la incertidumbre debido a variaciones metodológicas
- La metodología busca caracterizar deforestación. La resolución temporal de los datos de base no permite caracterizar adecuadamente procesos de degradación.
- La metodología propuesta es sencilla con el propósito de minimizar costos de implementación (p.ej. en procesos de capacitación especializada).
- La metodología propuesta incluye procesos de aseguramiento y control de calidad como parte de los protocolos. Esto se traduce en procedimientos detallados de documentación de procesos y manejo de datos.
- La metodología debe incluir procedimientos robustos de cuantificación de la incertidumbre de los mapas producidos.

## 1.2 Objetivo general

Desarrollar y validar una metodología para construir el escenario histórico de deforestación de forma espacialmente explícita a escala nacional.

## 1.3 Objetivos específicos

1. Construir una propuesta metodológica para caracterizar la deforestación a nivel nacional en los años 1990, 2000 y 2008 de forma sistemática y coherente.
2. Establecer procedimientos de documentación, verificación y validación que permitan evaluar la calidad de la información generada.
3. Implementar y validar la metodología en tres sitios piloto que representan la diversidad de condiciones ambientales asociadas a los ecosistemas de bosque en el Ecuador continental.

---

1. Estos años de referencia han sido recomendados de forma general para proveer un periodo temporal de análisis que permita caracterizar de forma adecuada tendencias históricas recientes de deforestación (GOFCC – GOLD 2009).

## 1.4 Resumen de la metodología

- El mapeo de clases de uso y cobertura del suelo se realiza utilizando sensores ópticos montados sobre plataformas satelitales. Los sensores escogidos fueron LANDSAT TM, LANDSAT ETM+, y ASTER) (§ 2.1.1).
- La clasificación de uso y cobertura del suelo se realiza de forma independiente para cada año de referencia (1990, 2000 y 2008). La fecha efectiva de las imágenes utilizadas puede corresponder a años anteriores o subsiguientes a los años de referencia de acuerdo a la disponibilidad de imágenes sin cobertura de nubes (§ 2.1.2).
- Se utiliza una leyenda jerárquica (anidada) donde el nivel superior corresponde a las seis clases de uso y cobertura definidas por el IPCC (2006), y los niveles inferiores están definidos de acuerdo a la factibilidad de su detección utilizando las imágenes satelitales. Las definiciones operativas de las clases temáticas siguen aquellas establecidas por la AND (Autoridad Nacional Designada) en el caso de bosques y otras dependencias del Estado Ecuatoriano para el resto de clases de uso y cobertura del suelo (§ 2.1.5).
- El pre – procesamiento incluye un proceso de ortorectificación de las imágenes. Adicionalmente, las áreas de nubes son interpretadas y removidas de forma visual (§ 2.2.1).
- La clasificación de las imágenes integra procesos automáticos y visuales. El proceso de segmentación define regiones (polígonos) homogéneos dentro de la imagen. Estos polígonos se clasifican en un conjunto de clases espectrales utilizando un método no supervisado. Las clases espectrales se asignan a clases temáticas de la leyenda visualmente. Finalmente, los mapas se revisan y editan visualmente para resolver problemas de mezcla espectral entre clases temáticas (§ 2.3).
- Las áreas donde ha ocurrido conversión de la cobertura boscosa se identifican comparando pares consecutivos de mapas de uso y cobertura para generar dos mapas de cambio: 1990 – 2000 y 2000 – 2008 (§ 2.4).
- Se cuantifica la incertidumbre asociada a los mapas de uso y cobertura de forma estadísticamente robusta. Esta cuantificación combina distintas estrategias (p.ej. trabajo de campo, uso de imágenes de referencia) de acuerdo al contexto de accesibilidad existente en distintas regiones del Ecuador (§ 2.5).
- Se plantea un proceso de evaluación y control de calidad embebido en todos los componentes de la metodología con el objeto de disminuir la incidencia de errores y promover la consistencia temática de la línea base de deforestación.
- Se utiliza un proceso de manejo de información a través de bases de datos relacionales que permite sistematizar las fuentes de datos utilizadas y los resultados obtenidos y adicionalmente documentar la implementación de la metodología (Anexo 2).

## 1.5 Diagrama de procesos

La Figura 1 presenta los procesos generales propuestos para establecer la línea base histórica de deforestación a nivel nacional.

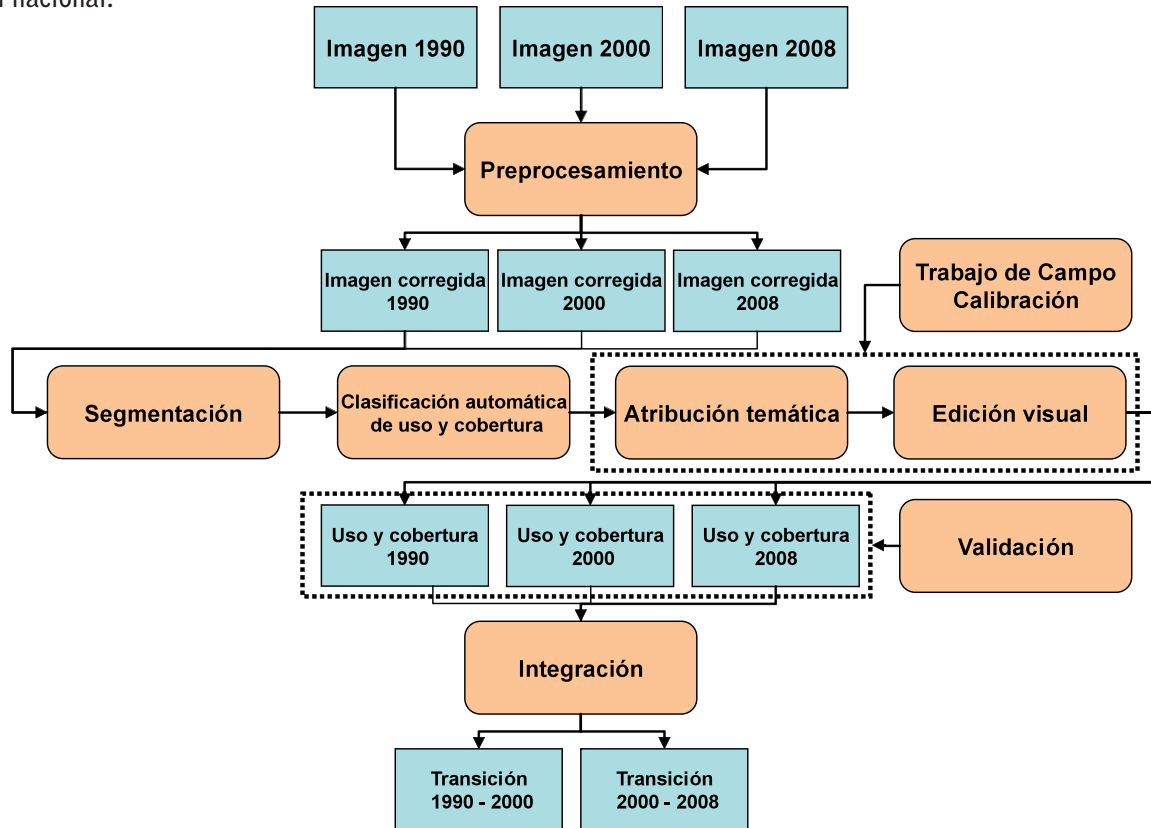


Figura 1. Esquema metodológico para la caracterización de la línea base de deforestación. Los objetos azules representan datos espaciales. Los objetos naranja representan procesos metodológicos.

## 1.6 Marco institucional y proceso de desarrollo de la metodología

En Mayo del 2009, el Programa Socio Bosque del Ministerio del Ambiente del Ecuador y el CONDESAN<sup>2</sup> iniciaron un proceso de cooperación para el desarrollo conjunto de la metodología para el Mapa de Deforestación Histórica (MDH) en el Ecuador y asistir a la Evaluación Nacional Forestal (ENF) en el desarrollo metodológico para la cuantificación de reservorios de carbono en los bosques ecuatorianos. El enfoque central de este proceso de colaboración se concibió como un espacio de investigación y desarrollo que permita identificar alternativas metodológicas que puedan ser aplicadas a nivel nacional. La estrategia escogida fue identificar un conjunto de sitios piloto que permitan probar estas alternativas y seleccionar un conjunto adecuado de protocolos para el MDH.

Se escogieron tres sitios piloto correspondientes a diferentes condiciones ambientales encontradas en áreas de bosque a nivel nacional. Una descripción detallada de la implementación de la propuesta metodológica en los sitios piloto y sus resultados consta en el Anexo 11. La implementación en los sitios piloto y las distintas pruebas metodológicas fueron desarrolladas por el equipo de geógrafos del MDH del Programa Socio Bosque coordinado por Jeaneth Delgado. El desarrollo conceptual de la metodología estuvo a cargo de Manuel Peralvo (CONDESAN) con el apoyo de Jeaneth Delgado (MAE) y Julio Novoa (CONDESAN). Steven De Gryze y Jeremy T. Freund de Terra Global Capital tuvieron un rol substancial en la definición de los protocolos de evaluación de exactitud. Marc Steiner de Conservación Internacional dio comentarios y sugerencias a una versión temprana de la metodología.

## 2. Desarrollo del protocolo

La metodología tiene cinco secciones principales. En la primera se describen los procedimientos iniciales de recopilación de información primaria, definición de la leyenda temática y el área de interés para la generación de la línea base de deforestación. La segunda sección describe los procedimientos de pre – procesamiento de las imágenes satelitales previos a la generación de los mapas de uso y cobertura del suelo para cada año de referencia. La tercera sección se enfoca en los procedimientos utilizados para la interpretación de las imágenes satelitales, los cuales combinan métodos automáticos y visuales. A continuación, se describe el proceso de generación de los mapas de trayectorias de cambio de uso y cobertura del suelo y las tablas de reporte necesarias para el escenario de referencia de emisiones por deforestación. La última sección presenta la metodología para cuantificar la exactitud de los mapas producidos.

Los lineamientos del IPCC (2003) requieren la implementación de un sistema de control y aseguramiento de la

2. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Región Andina ([www.condesan.org](http://www.condesan.org)).

3. El equipo está compuesto por Andrea Araujo, Alicia Gómez, Carolina Tapia, Ana Gómez, Rafael Castro, Ma. Fernanda Michelena, Mario Jijón, Ma. Alexandra Chacón, Pablo Moncayo, Felipe Aguirre. Hasta Junio de 2009 el equipo fue coordinado por Paulina Álava.

4. <http://www.terraglobalcapital.com>

calidad (SCAC). El control de la calidad se realiza mediante actividades que monitorean la integridad y consistencia de los datos, identifican y corrigen errores y documentan y archivan la implementación de procedimientos y los resultados de la metodología. El aseguramiento de la calidad requiere un sistema de procedimientos de revisión realizado por personas u organizaciones independientes a la agencia que implementa el inventario de emisiones de GEI en el sector LULUCF. En este contexto, se plantea un conjunto de procedimientos para el SCAC que se llevan a cabo en paralelo con las distintas etapas de la metodología. Estos procedimientos se identifican en el presente documento dentro de cuadros de texto con el encabezado SCAC.

## **2.1 Consideraciones conceptuales y metodológicas iniciales**

### **2.1.1 Resolución espacial y selección de sensores**

El presente protocolo presenta procedimientos para caracterizar procesos de cambio en la cobertura boscosa utilizando sensores remotos ópticos. Para los años de referencia 1990 y 2000, se utilizan imágenes LANDSAT TM y ETM+. Para el año de referencia más reciente (2008), se utilizan imágenes ASTER como fuente principal de datos, aunque se están recopilando también imágenes LANDSAT que pudieran estar disponibles. Para mantener homogeneidad espacial, todos los análisis se realizarán utilizando un tamaño de píxel de 30 m. La Unidad Mínima de Mapeo (UMM) utilizada para la generación de los mapas de uso y cobertura del suelo es de 10.000 m<sup>2</sup> (1 ha) para mantener consistencia en la representación de acuerdo a la definición nacional de bosques (Ver § 2.1.4)

### **2.1.2 Selección y recopilación de imágenes satelitales**

Para cada año de referencia, se seleccionaron imágenes con la menor cobertura de nubes posible. En algunos casos, fue necesario seleccionar una segunda imagen para maximizar el área libre de nubes u otros factores atmosféricos como humo y neblina. En regiones donde los ecosistemas de bosque presentan importantes variaciones fenológicas, se recomienda utilizar para cada año de referencia una imagen de época seca y una imagen de época húmeda (GOF-C-GOLD 2009). El procesamiento combinado de estas imágenes debería facilitar la identificación de bosques estacionales presentes en la costa (especialmente Manabí y Guayas) y los Andes del Sur (Loja).

La lista completa de imágenes recopiladas para cada año de referencia se presenta en el Anexo 1. Después del preprocesamiento de cada imagen (Ver § 2.2), el área de cobertura y otros datos de identificación de la imagen se guardan en la base de datos de procesamiento (Anexo 2). La Figura 2 presenta de forma general el mosaico de cobertura de imágenes a nivel nacional para cada año de referencia. Hasta la fecha, los vacíos de cobertura de imágenes para 1990 y 2000 son menos del 5% y para el 2008 se estiman en 19%. El vacío por cobertura de nubes para cada año no ha sido calculado todavía, pero otros estudios han estimado cobertura de nubes mayor al 40% para el noroccidente del Ecuador en un mosaico multi-temporal de imágenes LANDSAT para los años 1990 y 2000 (Olander et al. 2008). Se están explorando alternativas metodológicas para resolver el problema de cobertura de nubes utilizando otros sensores (Ver § 3.2).

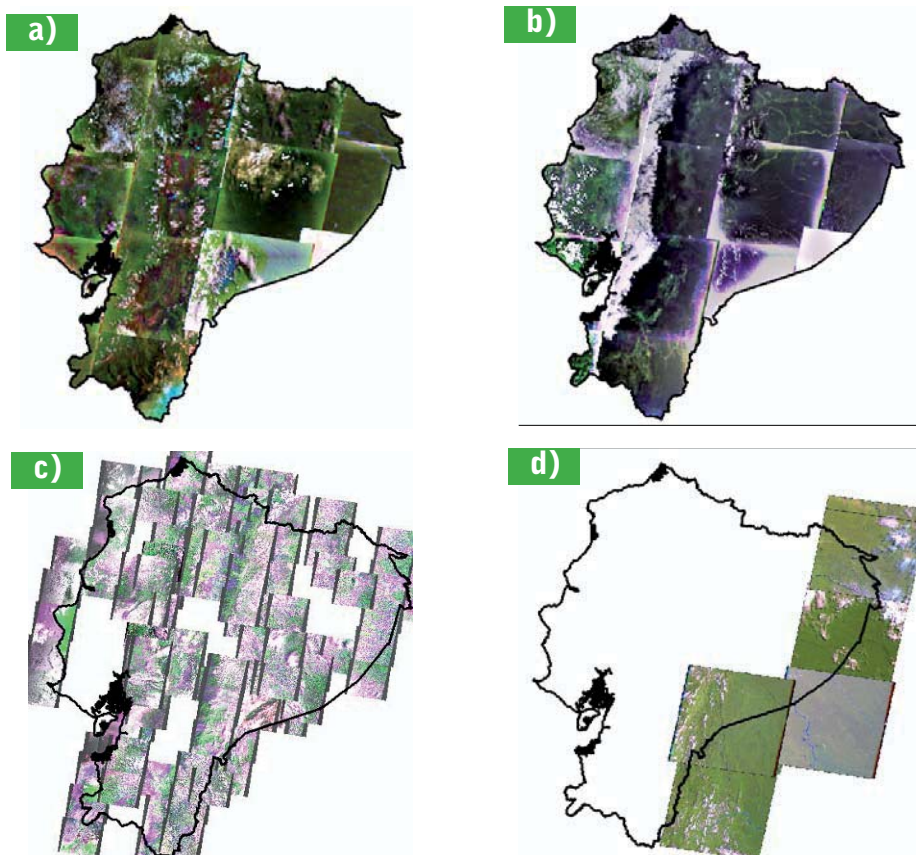


Figura 2. Mosaico de imágenes por año de referencia: a) 1990 (LANDSAT), b) 2000 (LANDSAT), c) 2008 (LANDSAT), y d) 2008 (ASTER).

### 2.1.3 Área de intervención del proyecto

La metodología propone mapear de forma explícita las conversiones de cobertura boscosa entre para los tres años de referencia en todo el país<sup>5</sup>. Esto requiere la caracterización de los distintos tipos de uso y cobertura del suelo especificados en la leyenda temática (Ver § 2.1.5) de forma exhaustiva a nivel nacional. Sin embargo, para optimizar la implementación de la línea base de deforestación, se plantea la siguiente estrategia para definir el área de intervención del proyecto:

- Generar un mapa nacional para los años 1990 y 2008
- Identificar las áreas que han permanecido bajo uso de suelo agrícola o cobertura de pastos plantados en el período 1990 – 2008.
- Para el año 2000, excluir las áreas donde la matriz del paisaje la constituyan áreas agrícolas o pastos plantados (p.ej. el callejón interandino). Se recomienda mantener un área alrededor de la matriz de bosques para mapear clases de uso y cobertura del suelo para este año.

En este contexto, el mapa de uso y cobertura del suelo para el año 2008 constituiría el mapa de referencia que va a servir para monitorear conversión en la cobertura boscosa en el futuro. En el caso en el que se decida monitorear deforestación únicamente, el mapa de referencia puede servir para definir un área de intervención que se concentre alrededor de las zonas con cobertura boscosa en el año 2008 (GOF-C-GOLD 2009).

### 2.1.4 Definición de sub – regiones

El Ecuador se caracteriza por presentar gradientes ambientales muy pronunciados, lo cual genera paisajes altamente heterogéneos tanto en la estructura y distribución de ecosistemas naturales como sistemas productivos humanos. Esto dificulta el procesamiento digital de imágenes ya que se incrementa la probabilidad de confusión espectral entre distintos tipos de uso y/o cobertura del suelo. Por lo tanto, se plantea la definición de regiones al interior del país que actúen como estratos con menor variación interna dentro de las imágenes. Cada estrato por imagen entonces se clasifica de forma separada con el objeto de reducir problemas de mezcla entre clases de uso y cobertura del suelo (Furby 2002; Jensen 2004).

Se propone la definición de siete sub-regiones (Fig. 3) que separen zonas con dinámicas biofísicas (p.ej. topografía) y socioeconómicas particulares. Esta es una propuesta inicial que ha sido utilizada para el desarrollo de escenarios de dinámicas de cambio de uso y cobertura del suelo a nivel nacional (Peralvo 2008). Las descripciones generales de cada sub – región se presentan a continuación:

5. Esto corresponde al Enfoque 3 definido por IPCC (2003): observaciones espacialmente explícitas de cambio de uso y cobertura del suelo.

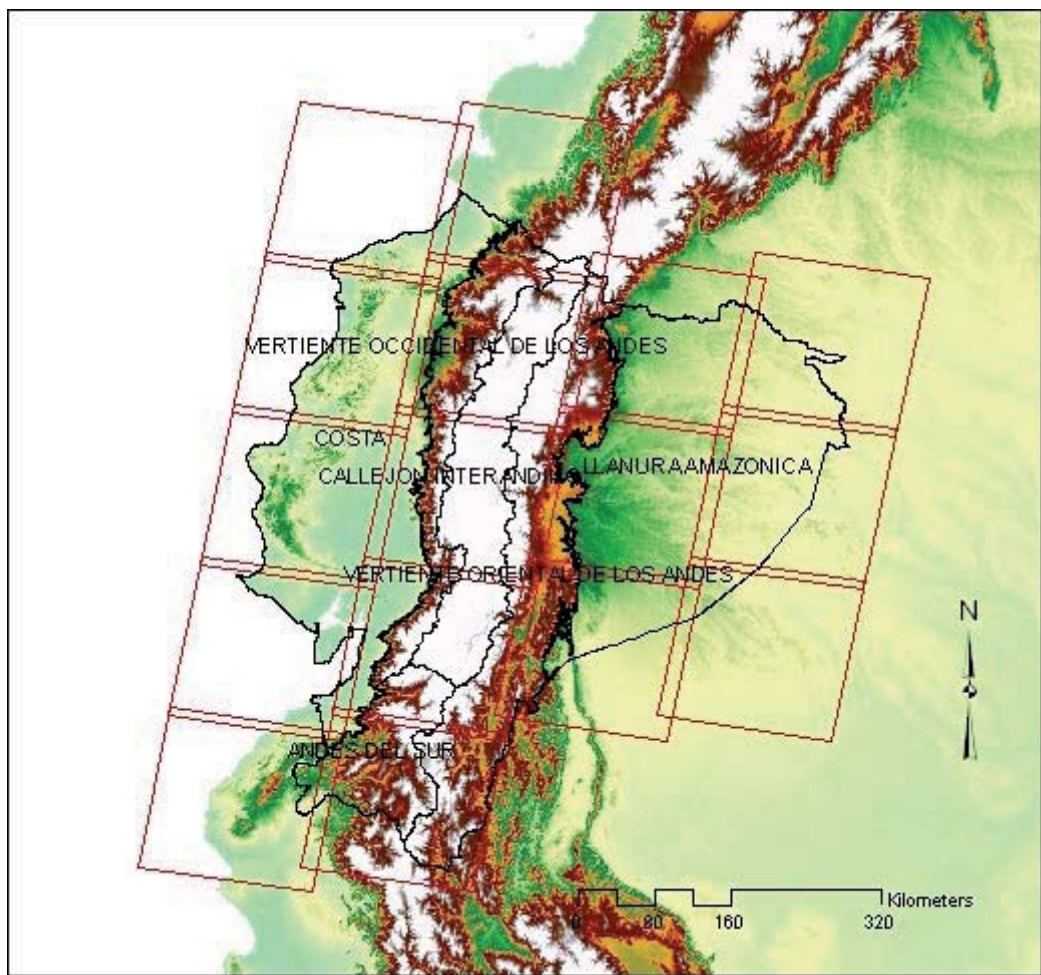
- (i) Amazonía: Áreas con poco relieve en el Oriente Ecuatoriano hasta la cota de 800 m. Esta subregión abarca una superficie 75204.612 km<sup>2</sup>
- (ii) Vertiente Oriental Andina: Ecosistemas montanos en la vertiente externa de la cordillera Oriental. Se extiende entre los 800 m de elevación y la divisoria continental de aguas. Esta subregión abarca una superficie de 43270.771 km<sup>2</sup>.
- (iii) Vertiente Occidental Andina. Ecosistemas montanos en la vertiente exterior de la cordillera Occidental (Río San Juan, Río Blanco, Río Babahoyo, Río Taura, Río Cañar, Río Balao, Río Gala, Río Tenguel, Río Pagua). Esta subregión abarca una superficie de 27173.383 km<sup>2</sup>.
- (iv) Valles Interandinos: Longitudinalmente está sub – región está definida por los límites de las vertientes exteriores de los Andes. Se extiende desde el límite con Colombia al Norte hasta las partes altas de la cuenca del río Jubones, en la provincia del Azuay al Sur. Esta subregión abarca una superficie de 27173.383 km<sup>2</sup>.
- (v) Costa: Áreas con poco relieve en la costa del Ecuador. Se extienden desde el nivel del mar hasta los 500 m. Esta subregión tiene una superficie de 68721.990 km<sup>2</sup>.
- (vi) Andes del Sur: Comprende las provincias de Loja, la porción oriental del El Oro, el sur de Azuay, y la porción occidental de Zamora Chinchipe. Esta subregión abarca una superficie 15327.096 km<sup>2</sup>.

#### **SCAC:**

- Verificar que la definición espacial de las regiones mantenga consistencia con los estratos de carbono desarrollados para la ENF.

Las sub – regiones así definidas se presentan en la Figura 3. Se muestran también las áreas de cobertura de dos imágenes LANDSAT (P10R61 y P9R60). Se puede observar como la imagen P10R61 cubre una alta heterogeneidad de condiciones ambientales (cinco de las seis sub – regiones definidas) que incluyen la Costa, los Andes y la Amazonía. De igual forma, la imagen P9R60 corresponde principalmente a la Amazonía pero cubre una porción significativa de la Cordillera Oriental Andina. Las sub – regiones definidas permiten controlar efectos de iluminación por diferencias en la topografía y facilitan la discriminación de distintos tipos de uso y cobertura del suelo (Furby 2002).





**Figura 3.** Sub – regiones definidas en el Ecuador continental para estratificar el procesamiento digital de imágenes satelitales.

### 2.1.5 Definición operativa de bosques y leyenda temática

El objetivo mínimo de representación para la leyenda temática corresponde al estándar definido por el IPCC (2006), el cual considera las siguientes clases de uso y cobertura del suelo:

#### (i) Bosques

Esta categoría corresponde a áreas con vegetación arbórea que cumplen con la definición de bosques utilizada por la AND. Esta clase puede dividirse por tipo de manejo (bosques manejados y no manejados). Esta clase también incluye áreas donde la vegetación no cumple con la definición de bosques pero podría potencialmente alcanzar este estatus. En la presente metodología se utiliza la siguiente definición de bosques<sup>6</sup> :

- Cobertura mínima del dosel del 30%
- Altura del estrato superior de al menos 5 m
- Área mínima de mapeo de 10.000 m<sup>2</sup> (1 ha)

#### (ii) Áreas agrícolas

Esta categoría incluye áreas bajo cultivo incluyendo campos de arroz y sistemas agroforestales donde la estructura de la vegetación no cumple con la definición de bosque. Esta clase también incluye áreas de pastos plantados con usos mayormente pecuarios o que se encuentren dentro de un sistema de rotación entre pastos y cultivos.

#### (iii) Vegetación arbustiva y herbácea

Esta categoría incluye áreas de vegetación arbustiva o herbácea que no se consideran como Áreas Agrícolas. Incluye también áreas donde la estructura de la vegetación no cumple con la definición de bosques y que se espera que se mantengan así sin intervención humana (p.ej. páramos). Se incluyen áreas de vegetación no manejada y algunos tipos de vegetación resultado de uso extensivo del suelo (p.ej. mosaico producto de régimen de quemadas en áreas de páramo asociado al pastoreo extensivo de ganado).

#### (iv) Humedales

A esta categoría pertenecen áreas que se encuentran cubiertas o saturadas de agua por todo o una parte del año

6. Acuerdo Ministerial 41, Registro Oficial 401 del 18 de Agosto de 2004.

y que no pertenecen a las categorías de bosques, áreas agrícolas, vegetación herbácea o centros urbanos. La única excepción son los bosques de palmas o moretales (p.ej. *Mauritia flexuosa*) con suelos inundados que ocurren en la región Amazónica. Incluye reservorios en una sub-categoría de humedales manejados y ríos y cuerpos de agua naturales en una sub-categoría no manejada.

#### (v) Zonas urbanas

Pertenecen a esta categoría todas las áreas desarrolladas incluyendo infraestructura de transporte y áreas urbanas de cualquier tamaño que no hayan sido consideradas en otras categorías. Estas áreas deberán ser consistentes con las definiciones nacionales.

#### (vi) Otras áreas

En esta categoría están representadas áreas de suelo desnudo, afloramientos rocosos, glaciares y otras clases que no caigan en las otras cinco categorías.

Estas definiciones mantienen consistencia con las presentadas por IPCC (2006) con dos excepciones principales. La primera corresponde a la clasificación de áreas de pastos plantados dentro de la clase de Áreas Agrícolas. Esto ayuda a mantener consistencia conceptual, especialmente en áreas donde el uso del suelo pecuario constituye una etapa dentro de períodos de rotación entre pastos y cultivos. La segunda excepción es la inclusión de bosques de palmas dentro de la categoría de humedales. Esto permite caracterizar las peculiaridades de estos ecosistemas en cuanto al contenido de carbono (p.ej. carbono en suelos).

Con el objeto de maximizar el número de clases representadas en los mapas para los tres años de referencia, se plantea utilizar una leyenda temática jerárquica de múltiples niveles que agrupa sub-clases para cada una de las seis clases definidas arriba. El Anexo 3 presenta la estructura de la leyenda temática propuesta y las definiciones operativas de las clases. Adicionalmente, se presenta un análisis preliminar de la facilidad de discriminación entre las clases propuestas en la leyenda para el Nivel 2. Esto implica que existen algunas clases de uso y cobertura del suelo propuestas en el Nivel 2 que no pueden ser representadas adecuadamente en todas las regiones del Ecuador. Durante la generación de la línea base a nivel nacional, se recomienda realizar un proceso de comparación entre la propuesta conceptual de la leyenda presentada en el Anexo 3 y la leyenda de representación utilizada en los mapas.

## 2.2 Pre – Procesamiento

Los procedimientos de pre – procesamiento permiten corregir problemas geométricos y espectrales de las imágenes generados por diversas fuentes tales como distorsiones originadas por la plataforma satelital, el sistema de

registro de datos del sensor, la rotación terrestre y la influencia de la atmósfera (Chuvienco 2007). El pre – procesamiento incluye correcciones radiométricas, geométricas, y remoción de nubes. Adicionalmente, se describe un procedimiento de pre – segmentación de las imágenes satelitales utilizando las sub – regiones definidas para el Ecuador continental (Ver § 2.1.4)

### **2.2.1 Correcciones radiométricas**

Las correcciones radiométricas permiten compensar el efecto de factores ambientales (p.ej. factores atmosféricos) para obtener variables físicas tales como la reflectividad. Existen dos alternativas metodológicas para la corrección radiométrica de las imágenes. La primera consiste en realizar una calibración absoluta de cada imagen a reflectancia en el terreno. La ventaja de un método absoluto de corrección radiométrica es que permite optimizar el procesamiento de imágenes debido a que la información espectral extraída de una imagen puede ser utilizada en otra imagen. Sin embargo, los métodos absolutos de calibración requieren mediciones exactas de las propiedades ópticas de la atmósfera en la fecha de adquisición de la imagen las cuales raramente se encuentran disponibles.

La segunda opción es realizar una normalización radiométrica relativa en la cual los valores digitales de una imagen se calibran a los de una imagen de referencia utilizando datos de un conjunto de elementos del paisaje cuya respuesta espectral permanece constante en el tiempo. Esto requiere identificar una imagen de referencia y normalizar las otras imágenes disponibles para el mismo sitio a la primera. La ventaja de estos métodos es que no requieren información detallada sobre propiedades atmosféricas. La desventaja principal es que el procesamiento se vuelve más largo puesto que se necesita normalizar cada conjunto de imágenes por separado.

En esta metodología no se realizan correcciones radiométricas de las imágenes. Existen dos argumentos principales para esta decisión:

- (i) Se está utilizando un método de detección de cambios post – clasificación (Ver § 2.3). En este método las imágenes para cada año de referencia se clasifican de forma separada y la determinación de áreas de cambio en la cobertura boscosa se realiza comparando los mapas de uso y cobertura del suelo resultantes. Esta estrategia de detección de cambios no requiere la corrección absoluta o relativa de las imágenes puesto que el efecto de la atmósfera se incorpora dentro del proceso de clasificación de cada imagen satelital (Song et al. 2001).
- (ii) La corrección absoluta o relativa de las imágenes requiere un conjunto complejo de procedimientos. Algunas alternativas requieren la estimación subjetiva de algunos parámetros (p.ej. definición de objetos oscuros) o necesitan datos raramente disponibles o con alta incertidumbre asociada (p.ej. parámetros atmosféricos). Sin embargo, queda planteada la posibilidad de incorporar procedimientos de calibración radiométrica en el futuro tanto en cuanto permitan optimizar la implementación de la metodología (Ver § 3).

El único proceso de corrección radiométrica implementado es la corrección de bandeado. Este problema se presenta en sensores de barrido secuencial (p.ej. TM) debido a diferencias en la calibración entre los scanners o por saturación del sensor sobre áreas muy brillantes (p.ej. nubes) (Helder et al. 1992). Esto genera un patrón periódico de líneas con mayor o menor intensidad que puede causar problemas en el procesamiento digital de las imágenes. Se presenta un protocolo que permite remover el efecto de bandeado (Anexo 4, § 3). Se debe tomar en cuenta que este procedimiento afecta el contenido de información de las imágenes, y puede causar pérdida de información válida. El protocolo utiliza una Transformada de Fourier de la imagen con bandeado. Esta transformada convierte la imagen óptica al dominio de frecuencias. En este dominio, es posible remover ruido periódico en las imágenes (Jensen 2004). Una vez aplicado el protocolo, se regresa al espacio original de las imágenes utilizando una transformada inversa de Fourier para obtener la imagen corregida.

#### **SCAC:**

- En la base de datos de procesamiento de imágenes se documenta si la imagen fue sometida al proceso de remoción de bandeado, y las bandas que fueron tratadas.

### **2.2.2 Correcciones geométricas**

Las correcciones geométricas implican el cambio en la posición de los píxeles de la imagen satelital de forma que la información de la imagen quede correctamente referenciada a un sistema de coordenadas proyectado. De forma similar, se aplican correcciones geométricas para referenciar una imagen no corregida a una corregida. Esto permite integrar y comparar la información temática de uso y cobertura del suelo derivada de imágenes de distintas fechas para una misma área geográfica.

En una primera etapa, se corrigen errores sistemáticos provenientes de las características orbitales del satélite y de la curvatura y rotación de la tierra. Las imágenes de base que se están utilizando para el MDH (Anexo 1) tienen niveles de procesamiento que corrigen estos errores sistemáticos. Por ejemplo, las imágenes ASTER fueron adquiridas con un nivel de procesamiento LIB, el cual aplica coeficientes radiométricos y geométricos y proyecta la imagen en un mapa rotado, orientado a la trayectoria del satélite (Abrams et al. 2002). De forma similar, las imágenes LANDSAT fueron adquiridas en niveles de procesamiento L1G o L1T que incluyen correcciones radiométricas y geométricas sistemáticas.

Para lograr una mayor exactitud geométrica en los productos generados por el MDH, se aplica un método empírico que utiliza puntos de coordenadas conocidas, denominados puntos de control, para establecer los parámetros de corrección de la imagen. Se realizan dos procesos principales:

- (i) Georeferenciación absoluta de las imágenes utilizadas en el MDH correspondientes a uno de los años de referencia a un sistema de coordenadas adecuado. Se está utilizando el sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) para la zona 17 Sur asociado al Datum WGS84. Se utilizan como referencia las cartas topográficas a escala 1:50,000 generadas por el Instituto Geográfico Militar y escaneadas y compiladas por SENPLADES. Las imágenes corregidas con georeferenciación absoluta se denominan imágenes de referencia.
- (ii) Registración relativa de las imágenes correspondientes a los otros años a la imagen de referencia.

En áreas con topografía compleja como los Andes, el relieve puede incluir errores aleatorios en el orden de 300 m a 700 m en imágenes LANDSAT y SPOT, respectivamente (Gupta 2003). Por lo tanto, en la presente metodología se aplica un procedimiento de ortorectificación utilizando modelos digitales de elevación para compensar el desplazamiento debido al relieve. Los procedimientos detallados para ortorectificar imágenes ASTER y LANDSAT se presentan en los Anexos 5 y 6, respectivamente.

#### **SCAC:**

- El error posicional residual del proceso de corrección geométrica deberá ser menor a 1 píxel.
- Los protocolos de ortorectificación establecidos describen procedimientos de documentación del error obtenido, y el número y distribución de los puntos de control utilizados.
- Una vez finalizados los procesos de corrección radiométrica y geométrica de la imagen, se debe crear un registro en la base de datos de procesamiento donde se documentan los resultados de los procesos de calibración radiométrica geométrica de la imagen (Anexo 4, § 4)

### **2.2.3 Definición de áreas de trabajo y remoción de nubes**

Todos los procesos descritos hasta ahora se implementan a nivel de cada imagen de satélite. Sin embargo, la alta heterogeneidad ambiental del Ecuador hace que muchas escenas cubran paisajes extremadamente diferenciados, lo cual dificulta la interpretación de patrones de uso y cobertura del suelo en escenas completas. En este contexto, se plantea la creación de áreas de trabajo que permitan estratificar a priori escenas que cubren más de una de las sub – regiones definidas en la Sección 2.1.4. Adicionalmente, se plantea un procedimiento para la interpretación visual de áreas cubiertas por nubes y sombras de nube. Esto permite la creación de áreas de trabajo con buenas características espectrales a ser utilizadas en los procesos subsecuentes de interpretación de patrones de uso y cobertura del suelo (GOF-C-GOLD 2008). Los procedimientos de creación de las áreas de trabajo y el enmascaramiento de nubes se describen en el Anexo 4.

### **SCAC:**

- Cada área de trabajo corresponde a un nuevo registro en la base de datos de procesamiento. En consecuencia, todos los procesos de clasificación de uso y cobertura del suelo se documentan de forma independiente para cada área de trabajo.

## **2.3 Clasificación y detección de cambios de uso y cobertura del suelo**

La clasificación de patrones de uso y cobertura del suelo se realiza de forma independiente para cada área de trabajo definida en las escenas correspondientes a cada año de referencia. La clasificación está planteada como un proceso iterativo donde el primer paso consiste en la generación de una clasificación preliminar. De forma paralela, se implementa un protocolo para recopilar información en campo que sirva de referencia para afinar la clasificación. Los procesos finales corresponden a la edición visual de los resultados de la clasificación, y la generación de un mapa integrado de uso y cobertura del suelo para cada año de referencia.

### **2.3.1 Trabajo de campo**

La metodología de mapeo de uso y cobertura del suelo propuesta requiere de un alto nivel de familiaridad del intérprete con el paisaje que está siendo representado. En este contexto, se plantea un proceso de trabajo en campo que permita recopilar información sobre uso y cobertura del suelo en etapas tempranas del proceso de clasificación de imágenes satelitales. El protocolo detallado para recopilar información de puntos en campo consta en el Anexo 7. Se incluyen procedimientos para recopilar información para dos tipos de puntos de campo:

- (i) Los puntos de calibración son ocupados físicamente por el equipo de campo. Se recoge información sobre cobertura / uso del suelo de acuerdo a la leyenda temática utilizada y además datos sobre cobertura y altura del dosel (en el caso de coberturas de bosque). Adicionalmente se registra la posición del punto y se toman cuatro fotos para futura referencia.
- (ii) Los puntos de referencia corresponden a información de sitios que no han sido ocupados físicamente. Se toma una foto del sitio de interés y se registran las coordenadas del punto desde el cual se tomó la foto e información sobre uso y cobertura del suelo.

A diferencia de los puntos utilizados para validación (§ 2.5), el diseño experimental para definir el número y ubicación de los puntos de calibración y referencia toma en cuenta principalmente la necesidad de visitar áreas donde el equipo de intérpretes necesiten definir patrones de uso y cobertura del suelo poco conocidos o muy complejos.

**SCAC:**

- La información recogida en campo asociada con los puntos de calibración y referencia se sistematiza en una base de datos (Anexo 2) para facilitar su consulta y verificación futura.

**2.3.2 Clasificación de imágenes satelitales**

El objetivo principal del protocolo de clasificación de imágenes satelitales es producir mapas consistentes de uso y cobertura del suelo sobre la base de la leyenda temática propuesta para cada año de referencia. El protocolo integra procesos automáticos de clasificación de imágenes satelitales con procedimientos visuales de atribución temática y edición (Anexos 8 y 9). El resultado principal del proceso de clasificación de imágenes satelitales son los mapas de uso y cobertura del suelo a nivel nacional para cada año de referencia. La metodología comprende cuatro procesos principales (Fig. 4):

- (i) Ingreso / salida de datos
- (ii) Segmentación
- (iii) Clasificación automática digital
- (iv) Edición y depuración visual

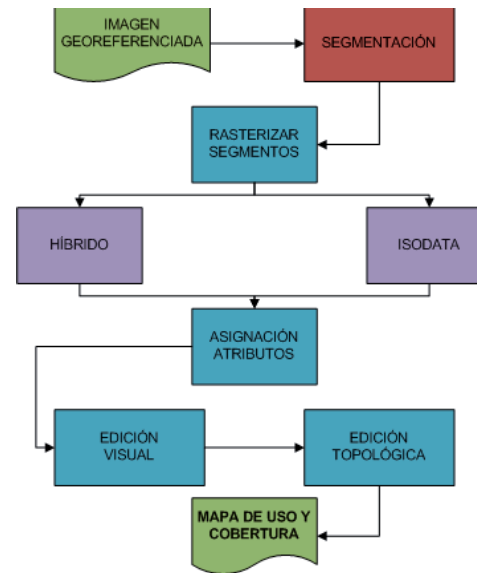
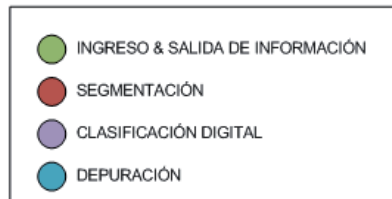


Figura 4. Flujo de procesos del protocolo integrado de clasificación de imágenes satelitales



El insumo inicial para este proceso son las áreas de trabajo, libres de cobertura de nubes, definidas a partir de las imágenes ortorectificadas (§ 2.2). El primer proceso al que son sometidas las imágenes es la generación automática de segmentos. Los segmentos representan áreas de la imagen con características espectrales similares. Los procesos de segmentación han sido identificados como una práctica recomendable en la generación de información de uso y cobertura del suelo consistente y a un nivel de detalle adecuado (GOF-C-GOLD 2009). En la presente implementación, la segmentación requiere la definición de un parámetro de escala y de un parámetro de generalización (Anexo 8). Ambos parámetros controlan el nivel de detalle de los segmentos generados en la imagen.

### SCAC:

- Se incluye un procedimiento de verificación de la consistencia en la selección de los parámetros de escala y generalización. Este consiste en la segmentación de la misma área de trabajo por diferentes intérpretes y la comparación de los valores definidos para estos parámetros.
- Los valores finales de escala y generalización se documentan en la base de datos de procesamiento.

Una vez segmentada, la imagen entra en un proceso de generación automática de agrupamientos (clusters) espectrales. Los clusters agrupan segmentos con características espectrales similares que después son vinculados a las clases de información definidas en la leyenda temática (Anexo 3). Existen dos alternativas metodológicas planteadas para la generación de estas clases espectrales:

- (i) Se plantea un método híbrido de clasificación de los segmentos definidos en las imágenes satelitales (Anexo 9). Este método combina un algoritmo no supervisado de clasificación, un procedimiento iterativo de depuración de firmas espectrales, y un algoritmo supervisado de máxima verosimilitud para crear clases con una separación espectral óptima (Messina et al. 2000). El método tiene la ventaja de que no requiere parámetros definidos por el usuario. Sin embargo, en algunos casos las imágenes no pueden ser procesadas con éste método por problemas numéricos dentro del programa de procesamiento<sup>7</sup>. En este contexto, se plantea una segunda alternativa para la clasificación de las imágenes satelitales.
- (ii) Definición de clases espectrales utilizando un algoritmo no supervisado (ISODATA). Este algoritmo de clasificación no supervisada ha sido ampliamente utilizado para definir agrupamientos espectrales a nivel de pixel (Jensen 2004). En la presente metodología se utiliza el mismo principio pero implementado para agrupar segmentos de acuerdo a sus características espectrales (Anexo 8)

7. Las matrices de covarianza de algunas clases no pueden ser invertidas, lo cual impide evaluar la separabilidad espectral de las clases definidas (Ver Anexo 9).

El método de preferencia a ser utilizado es el protocolo híbrido. En los casos en que las imágenes no pueden ser procesadas con este método, se utiliza el algoritmo ISODATA.

**SCAC:**

- Todos los parámetros de procesamiento asociados al protocolo híbrido o al ISODATA son documentados en la base de datos de procesamiento.

Una vez definidas las clases espectrales, empiezan los procedimientos de edición visual de las imágenes. El primer paso consiste en asignar las clases espectrales a las clases de información definidas en la leyenda temática. El objetivo es identificar una correspondencia entre la información espectral contenida en la imagen y los tipos de uso y cobertura del suelo a ser mapeados. Una vez identificadas las clases de información, empieza un proceso de edición visual en el cual se verifica, a nivel de segmentos, que las asignaciones correspondientes a las clases de información hayan sido las correctas (Anexo 8).

Al inicio del proceso de edición visual, se realiza un filtro para eliminar los segmentos menores a la UMM (1 ha). Esto disminuye el tiempo necesario para el proceso de edición de los segmentos. Después de obtener una representación adecuada de las clases de uso y cobertura del suelo, es necesario unir los mapas generados para las distintas áreas de trabajo en un año de referencia dado. Adicionalmente, se plantea un proceso de creación de topología que permite obtener un mapa de uso y cobertura con características espaciales adecuadas para cada año de referencia. Estos procedimientos de post – procesamiento se describen con detalle en el Anexo 4.

**SCAC:**

- El proceso de atribución temática inicial de las clases espectrales y de revisión visual de la asignación de los segmentos queda documentado en la base de datos de procesamiento.

## **2.4 Reporte de trayectorias de cambio de la cobertura de bosques**

La metodología para caracterizar de forma espacialmente explícita las trayectorias de cambio de la cobertura del bosque se denomina detección de cambios post – clasificación. Como se mencionó en secciones anteriores, una de las ventajas de utilizar este método es que se minimizan los requerimientos de calibración absoluta y/o relativa de las imágenes (Lu et al. 2004). En este procedimiento, los mapas de uso y cobertura del suelo para cada año se comparan entre sí para identificar áreas donde han existido cambios desde o hacia bosques.

La guía de mejores prácticas generada por el IPCC (2003) recomienda utilizar dos herramientas de reporte cuando se utiliza el Enfoque 3<sup>º</sup> en la generación de trayectorias de cambio de uso y cobertura del suelo. La primera es una tabla donde se tabulan las áreas asociadas a cada trayectoria de cambio de uso y cobertura del suelo (Fig. 5). La segunda es una versión modificada de la misma tabla donde se muestran las áreas de cambio entre distintos tipos de uso y cobertura del suelo como una matriz de transición (Fig. 6). Un componente adicional del reporte lo constituyen los mapas de transición de uso y cobertura del suelo para el período 1990 – 2000 y 2000 – 2008. Los procedimientos detallados para la construcción de estas matrices y del mapa de transición de uso y cobertura del suelo se detallan en el Anexo 4.

Uso del suelo inicial	Uso del suelo final	Área de transición (ha)
A	A	a1
A	B	a2
A	C	a3
A	D	a4
B	B	a5
B	A	a6
B	C	a7
C	C	a8
C	D	a9
D	D	a10

Figura 5. Ejemplo genérico de tabulación de áreas de transición de uso y cobertura del suelo con cuatro clases hipotéticas.

Final	Inicial				Área final
	A	B	C	D	
A	a1	a6			Sum Af
B	a2	a5			Sum Bf
C	a3	a7	a8		Sum Cf
D	a4		a9	a10	Sum Df
<b>Área inicial</b>	Sum Ao	Sum Bo	Sum Co	Sum Do	
<b>Cambio neto</b>	Sum Ao - Sum Af	Sum Bo - Sum Bf	Sum Co - Sum Cf	Sum Do - Sum Df	

Figura 6. Ejemplo genérico de una matriz de transición para el reporte de cambio de uso y cobertura del suelo con cuatro clases hipotéticas. Los subíndices f y o indican el área final e inicial, respectivamente.

8. Caracterización espacialmente explícita de trayectorias de cambio de uso y cobertura del suelo.

### SCAC:

- La caracterización de trayectorias de cambio de uso y cobertura del suelo permite evaluar la consistencia temática de los mapas producidos. Por ejemplo, es necesario verificar áreas donde han existido trayectorias del tipo agricultura – bosque – agricultura para comprobar que dichos cambios no son producto de inconsistencias en la representación de las clases.
- Dado que en muchos casos las imágenes utilizadas para caracterizar el uso y cobertura del suelo provienen de años cercanos a los años de referencia, es necesario compensar y calibrar las áreas de transición para que representen los períodos de referencia (1990 – 2000 y 2000 – 2008).

### 2.5 Evaluación de exactitud

Las actividades de validación corresponden a procedimientos implementados durante la planificación, implementación, o después de la finalización de la línea base de deforestación que permiten establecer la confiabilidad para su uso dentro de los objetivos establecidos (IPCC 2003). La propuesta metodológica para la validación busca establecer una referencia independiente de tipos de uso y cobertura del suelo que pueda ser comparada con la información contenida en los mapas generados. La metodología propuesta (Anexo 10) utiliza una muestra de puntos de validación distribuidos utilizando una estrategia de muestreo estratificado. Se utilizarán entre 500 y 1000 puntos por escena LANDSAT a ser validada. Los estratos a usarse corresponden a las clases de uso y cobertura del suelo de Nivel 1 definidas en la leyenda temática. Adicionalmente, se plantea utilizar como estratos las clases de transición de los mapas de deforestación para los períodos 1990 – 2000 y 2000 – 2008.

El siguiente paso es determinar el tipo de uso y cobertura del suelo real de los puntos de validación que permita la comparación con los resultados del MDH. Se proponen tres estrategias para realizar la atribución de los puntos de validación:

- (i) Utilizar como referencia la misma imagen (LANDSAT o ASTER) que fue utilizada para generar el mapa de uso y cobertura del suelo. La atribución deberá ser hecha por dos intérpretes de forma independiente (con la opción de una tercera atribución en el caso de que las dos primeras no coincidan).
- (ii) Utilizar como referencia imágenes de alta resolución de una fecha cercana a la del mapa que se está evaluando.
- (iii) Visitar el punto de validación en el campo. Esta opción se puede utilizar para validar los mapas correspondientes al año de referencia más reciente (2008).

Se plantea utilizar estas alternativas de forma jerárquica, con la primera opción implementada en todas las imágenes interpretadas, y las dos opciones adicionales implementadas en áreas donde existan imágenes de alta resolución o que puedan ser visitadas en campo con una inversión razonable de recursos.

#### **SCAC:**

- Se ha diseñado una base de datos para sistematizar la información de referencia para los puntos de validación (Anexo 2).

La información de los puntos de referencia puede ser utilizada para construir una matriz de confusión que identifica la concordancia entre las clases representadas en los mapas que están siendo evaluados y las clases atribuidas a los puntos de validación. Esta matriz permite calcular las siguientes métricas de exactitud para los mapas de uso y cobertura del suelo (Congalton & Green 2008):

- **Exactitud Total:** es la suma de la diagonal principal dividido para el total de entradas en la matriz.
- **Exactitud del Productor:** errores de omisión calculados dividiendo el número de puntos interpretados correctamente en cada categoría, para el número total de puntos de referencia en la misma categoría. Esta medida muestra la probabilidad de clasificar correctamente una clase determinada.
- **Exactitud del Usuario,** errores de comisión calculados dividiendo el número de puntos interpretados correctamente en cada categoría, para el número total de puntos clasificados para esa categoría. Esta medida representa la probabilidad de que un punto interpretado representa la categoría correcta.
- **Análisis Kappa,** medida estadística de acuerdo, mas allá de un efecto del azar, entre los puntos interpretados y los puntos de referencia (Congalton & Green 2008). El Análisis Kappa incorpora errores de omisión y comisión (fuera de la diagonal de la matriz de confusión) en una sola medida.

### **3. Recomendaciones**

La presente metodología describe un conjunto de procedimientos para generar información histórica de trayectorias de cambio de uso y cobertura del suelo a nivel nacional de forma sistemática. La metodología contiene procedimientos específicos de documentación de procesos y manejo de información que facilitan la validación externa de los resultados. Adicionalmente, se propone una estrategia robusta para generar estimados cuantitativos de la incertidumbre asociada con la información de uso y cobertura del suelo producida. Sin embargo, la propuesta metodológica debe considerarse como un proceso en desarrollo continuo con espacio para optimizar y mejorar la implementación de procedimientos.

En este contexto, la presente sección identifica recomendaciones relacionadas con aspectos críticos de la metodología. Muchas de estas recomendaciones nacen del proceso de implementación de la metodología en tres sitios piloto en Ecuador (Anexo 11) que permitió afinar los protocolos presentados en este documento e identificar necesidades de investigación y recopilación de datos en el corto y mediano plazo. Las recomendaciones se organizan en dos conjuntos principales. El primero se refiere a procedimientos necesarios para facilitar la línea de producción cartográfica del MDH a nivel nacional. El segundo grupo identifica necesidades de investigación que pueden ayudar a generar productos de uso y cobertura del suelo más robusto.

### 3.1 Implementación de la metodología

- Es necesario desarrollar e implementar un protocolo de capacitación que permita asegurar que el equipo técnico esté al tanto de todos los procedimientos de análisis y documentación de procesos descritos en esta metodología. La capacitación debe incluir un procedimiento de evaluación que permita identificar y solucionar vacíos potenciales de conocimiento. Una estrategia viable es la generación de un banco de pruebas (imágenes originales mas productos procesados) que permita estandarizar el proceso de evaluación del personal técnico.
- Se recomienda un proceso sistemático de comparación de los resultados del MDH con otras bases de datos disponibles a nivel nacional (p.ej. Censo Agrícola 1990 y 2000). Adicionalmente, se deberían explorar estrategias de integración entre el monitoreo de deforestación y otras actividades que están en marcha o en sus inicios (p.ej. IV Censo Nacional Agropecuario, Programa de Regularización y Administración de Tierras Rurales).
- Debe establecerse un proceso intensivo de acceso y sistematización de información de sensores remotos de alta resolución. En algunos casos, estos sensores proveen la mejor alternativa para la caracterización del uso y cobertura del suelo en áreas complejas (Ver siguiente sección).
- Existen muchos procesos en la metodología que pueden ser automatizados total o parcialmente. La automatización debe ser una actividad prioritaria ya que reduce las posibilidades de error de los operadores y optimiza recursos en relación a tiempos de procesamiento. Algunos de los procesos prioritarios que deberían ser automatizados son:
  - \* Procesos de clasificación automática de segmentos, especialmente entrada y salida de datos en el protocolo híbrido (Anexo 9) y la clasificación utilizando el algoritmo ISODATA (Anexo 8).
  - \* Protocolo de atribución de puntos de validación (Anexo 10). Aunque existen herramientas que automatizan parte del proceso, es necesario generar versiones personalizadas que hagan más rápida la asignación de atributos.
  - \* Es necesario contar con una herramienta que facilite el monitoreo de los procedimientos de manejo de información (p.ej. estructura de directorios, uso de convenciones de nomenclatura de archivos).
- Se deben implementar mecanismos de comunicación de los protocolos planteados a otras agencias del gobierno con campos de intervención relacionados al monitoreo de cambios de uso y cobertura del suelo. Esto permitiría

establecer espacios para la retroalimentación y mejoramiento de la metodología.

- Se necesita elaborar un plan de implementación de la metodología que incluya de forma explícita tareas de control y seguimiento de los procesos descritos en el Sistema de Control y Aseguramiento de Calidad (SCAC).
- Se necesita elaborar un plan de implementación de la metodología que incluya de forma explícita tareas de control y seguimiento de los procesos descritos en el Sistema de Control y Aseguramiento de Calidad (SCAC) (Anexo 13).
- Se recomienda implementar un programa de revisión y mejoramiento continuo de los métodos que permita incorporar de forma sistemática las lecciones que se generen en la implementación del MDH a nivel nacional. Adicionalmente, este programa permite explorar alternativas metodológicas que podrían mejorar los estimados de deforestación generados (Ver siguiente sección).

### **3.2 Investigación aplicada al monitoreo de uso y cobertura del suelo**

Existen alternativas metodológicas que podrían servir para optimizar algunas tareas asociadas a la presente propuesta. Los temas principales identificados son:

- Evaluar si la incorporación de procedimientos de calibración radiométrica relativa entre imágenes pertenecientes a distintos años de referencia permite mejorar la coherencia temática de los mapas de uso y cobertura del suelo obtenidos. Existen opciones que implementan procesos de calibración relativa de forma automática Calibración relativa automática (p.ej. Canty & Nielsen 2008) que podrían reducir los recursos requeridos para implementar este proceso.
- Evaluar opciones para mejorar el poder de discriminación del protocolo automático de clasificación de imágenes satelitales (Anexos 8 y 9). La propuesta actualmente utiliza únicamente valores espectrales promedio para cada segmento en el proceso de agrupamiento (Híbrido o ISODATA). Sin embargo la segmentación permite integrar otras variables (p.ej. dispersión de valores espectrales, textura) que potencialmente podrían contribuir a una mejor discriminación entre algunas clases de la leyenda temática.
- Se ha sugerido que la clasificación directa de cambios en imágenes multi – temporales compuestas permite una mejor representación de trayectorias de deforestación (GFC-GOLD 2009). Pruebas preliminares sugieren que esta estrategia presenta retos importantes, especialmente en áreas con mosaicos complejos de cobertura del suelo. Sin embargo, esta estrategia podría funcionar mejor en áreas con condiciones ambientales más homogéneas (p.ej. Amazonía).
- Es posible añadir algunas alternativas de post – procesamiento de los datos obtenidos en la clasificación automática de las imágenes satelitales. Una opción puede ser la clasificación en una segunda etapa de aquellos píxeles pertenecientes a clases espectrales que presentan alto nivel de mezcla de clases de información.
- Se probaron metodologías de detección de cambios (bosque / no bosque) altamente automatizadas. Por ejemplo

ClasLite (Asner 2009) permite detectar procesos de deforestación y degradación (asumiendo una resolución temporal adecuada) en bosques de tierras bajas. Es necesario explorar alternativas metodológicas que permitan utilizar la información generada por estas metodologías. Algunos campos a investigar son:

- \* Usar productos de cambio de cobertura de bosques para validar los mapas de trayectorias de cambio producidos utilizando los procedimientos descritos en esta metodología.
- \* Verificar aplicabilidad de metodologías como ClasLite en paisajes fuera de su área de desarrollo (p.ej. Andes).

Adicionalmente a estas recomendaciones de desarrollo metodológico, es necesario evaluar estrategias para mejorar la cobertura espacial y temporal de los datos de base utilizados para caracterizar deforestación y, potencialmente, degradación. Los problemas de cobertura son particularmente graves en áreas con presencia continua de nubes (p.ej. el Noroccidente del Ecuador) o donde ocurren ecosistemas con variaciones fenológicas importantes (p.ej. Manabí y Loja). A continuación se mencionan algunas alternativas que deberían explorarse.

- En la implementación piloto en Loja, donde existen extensiones importantes de bosques estacionales, se utilizaron imágenes compuestas de época seca y húmeda para mejorar la discriminación de las áreas de bosque. Sin embargo es probable que esta estrategia no pueda ser utilizada en áreas con características similares (p.ej. Manabí) debido a problemas de cobertura de nubes. Estas áreas son prioritarias para evaluar la aplicación de sensores activos como radares de apertura sintética (SAR).
- El mismo criterio se aplica en áreas con alta cobertura de nubes (p.ej. Chocó). Los aspectos más importantes a ser evaluados en aplicaciones SAR son los efectos de la topografía y el contenido temático de los productos resultantes.
- Es necesario explorar la integración de sensores de baja resolución espacial y alta resolución temporal (p.ej. MODIS) dentro del proceso de mapeo de uso y cobertura del suelo. La integración podría darse como parte del pre – procesamiento, para definir estratos mas detallados en las imágenes, o como una ayuda para la asignación de clases temáticas.
- Una estrategia que podría mejorar la cobertura de imágenes, especialmente para el año de referencia 2008 es el uso de productos LANSAT ETM+ sometidos a procesos automáticos de relleno de vacíos de información (Masek 2007).



#### 4. Acrónimos

AND	Autoridad Nacional Designada
ASTER	Radiómetro espacial avanzado de emisiones termales y reflectancia, por sus siglas en inglés
CONDESAN	Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina
ENF	Evaluación Nacional Forestal
GEI	Gases de efecto invernadero
IPCC	Panel Inter – gubernamental de Cambio Climático, por sus siglas en inglés
MDH	Mapa de Deforestación Histórica
LULUCF	Uso del suelo, cambio de uso del suelo y sector forestal, por sus siglas en inglés
MAE	Ministerio del Ambiente del Ecuador
PSB	Programa Socio Bosque
SAR	Radar de Apertura Sintética, por sus siglas en inglés
SCAC	Sistema de Control y Aseguramiento de la Calidad
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
TM	Mapeador temático, por sus siglas en inglés
ETM+	Mapeador temático mejorado, por sus siglas en inglés
UMM	Unidad mínima de mapeo
UNFCCC	Convenio marco de cambio climático de las Naciones Unidas, por sus siglas en inglés
UTM	Proyección Universal Transversa de Mercator

## 5. Bibliografía

Covey R.J, 1999, Remote Sensing in Precision Agriculture, Educational Primer -March 1999, Iowa State University, USA.

Chuvieco, E. 2007, Teledetección Ambiental, Editorial Ariel, Barcelona-España.

Jorgensen P.M., León y otros, 1999, Catalogo de Plantas Vasculares, MO ST Louis Missouri Botanical Garden Press, USA.

Sierra, R. 1999, Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental, Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y Ecociencia, Quito-Ecuador.

## 5. Referencias Bibliográficas

Abrams M, Hook S, Ramachandran B. 2002. ASTER User Handbook: Version 2 Sioux Falls: Jet Propulsion Laboratory, EROS Data Center; 135 p.

Asner G. 2009. Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches. Environmental Research Letters doi: 10.1088/1748-9326/4/3/034009.

Canty MJ, Nielsen AA. 2008. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. Remote Sensing of Environment 112(3):1025-36.

Chuvieco E. 2007. Teledetección ambiental. Segunda ed. Barcelona: Ariel Ciencia. 586 p.

Congalton R, Green K. 2008. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. Second ed. Hoboken: CRC. 183 p.

Furby SL. 2002. Land cover change: specifications for remote sensing Analysis Canberra: Australian Greenhouse Office; Report nr 9. 401 p.

GOFC-GOLD. 2008. Reducing Greenhouse Gas Emissions from Deforestation and Degradation in Developing Countries: A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring, Measuring and Reporting Alberta, Canada: GOFC - GOLD Project Office, Natural Resources Canada; Report nr COP13-2.

GOFC-GOLD. 2009. Reducing Greenhouse Gas Emissions from Deforestation and Degradation in Developing Countries: A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring, Measuring and Reporting Alberta, Canada: GOFC - GOLD Project Office, Natural Resources Canada; Report nr COP14-2.

Gupta R. 2003. Remote Sensing Geology. Second ed. Berlin, New York: Springer. 656 p.

Helder D, Quirk B, Hood J. 1992. A Technique for the Reduction of Banding in Landsat Thematic Mapper Images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 58(10):1425-31.

- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land - Use Change and Forestry (LULUCF) Available from: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Land Use and Forestry (AFOLU) Available from: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.
- Jensen J. 2004. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Third ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 544 p.
- Lu D, Mausel P, Brondizio E, Moran E. 2004. Change detection techniques. International Journal of Remote Sensing 25(12):2365-407.
- Masek J. 2007. White Paper on Use of Gap - Filled Products for the Mid - Decadal Global Land Survey (MDGLS) Biospheric Sciences Branch, NASA GSFC; 13 p. Available from: <http://gls.umd.edu/documents.html>.
2000. Scale dependent pattern metrics and panel data analysis as applied in a multiphase hybrid land cover classification scheme. Proceedings of the 2000 ASPRS Conference.
- Olander LP, Gibbs HK, Steininger M, Swenson JJ, Murray BC. 2008. Reference scenarios for deforestation and forest degradation in support of REDD: a review of data and methods. Environmental Research Letters 3(2).
- Peralvo M. 2008. Generación de un indicador global del estado de conservación de la biodiversidad en el Ecuador Continental: Implementación de la Metodología GLOBI03 - CLUE Quito: Agencia Ambiental Holandesa (PBL), Fundación EcoCiencia; 37 p.
- Song C, Woodcock CE, Seto KC, Lenney MP, Macomber SA. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? Remote Sensing of Environment 75(2):230-44.

### **Equipo actual**

Andrea Araujo [aaaraujo@ambiente.com](mailto:aaaraujo@ambiente.com)

Alicia Gomez [agomez@ambiente.com](mailto:agomez@ambiente.com)

Brigida Rodriguez [brodriguez@ambiente.com](mailto:brodriguez@ambiente.com)

Ma. Fernanda Michelena [mmichelena@ambiente.com](mailto:mmichelena@ambiente.com)

Ma. Alexandra Chacon [mchacon@ambiente.com](mailto:mchacon@ambiente.com)

Mario Jijon [mjijon@ambiente.com](mailto:mjijon@ambiente.com)

Pablo Moncayo [pmoncayo@ambiente.com](mailto:pmoncayo@ambiente.com)

Danilo Granja [dgranja@ambiente.com](mailto:dgranja@ambiente.com)

Franz Betancourt [fbetancourt@ambiente.com](mailto:fbetancourt@ambiente.com)

Jeaneth Delgado [mdelgado@ambiente.com](mailto:mdelgado@ambiente.com)

**Coordinadora del Proyecto Mapa de Deforestación Histórica**

**Ministerio del Ambiente del Ecuador con la cooperación técnica de CONDESAN.**  
La manera de citar este documento es: PERALVO M., DELGADO J., (2010): /Metodología para la generación del Mapa de Deforestación Histórica/, Ministerio del Ambiente y CONDESAN, Quito-Ecuador.

**Proyecto Socio Bosque**  
Luis Cordero 752 y Av. 6 de Diciembre.  
Quito, Ecuador  
Telf: (593) 2-2563485 ext 100  
Fax: (593) 2-2563485 ext 102  
[www.ambiente.gob.ec](http://www.ambiente.gob.ec)  
IMPRESO EN QUITO

Derechos reservados, más se autoriza su utilización citando la fuente.

