



PROTOCOLO DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA V.2

JUAN MANUEL SANTOS CALDERÓN

Presidente de la República de Colombia

GABRIEL VALLEJO LÓPEZ

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

PABLO ABBA VIEIRA SAMPER

Viceministro de Ambiente

ÓMAR FRANCO TORRES

Director General - IDEAM

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

MARÍA SARALUX VALBUENA

Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental– IDEAM

EDITORES

Natalia Córdoba Camacho

Lina Ma. Carreño Correa

DISEÑO DE LA CARÁTULA

Grupo de Comunicaciones – IDEAM

DISEÑO, DIAGRAMACIÓN E IMPRESIÓN

Editorial Scripto Gómez y Rosales Asociados Cia. Ltda

Calle 76 Bis N° 20C – 19

Teléfono: (57-1) 7562003

<http://www.scripto.com.co>

ARCHIVO FOTOGRÁFICO

Sebastián Ramírez Echeverry

Archivo IDEAM

CÍTESE DENTRO DE UN TEXTO COMO:

Galindo *et al.* IDEAM 2014

CÍTESE COMO

Galindo G., Espejo O. J., Rubiano J. C., Vergara L. K., Cabrera E., 2014. Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. V 2.0. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C., Colombia., xx pág.

Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, octubre de 2014, Bogotá D.C., Colombia.

ISBN: 978 958 8067 63 6 - Distribución Gratuita

2014, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el IDEAM.

Este trabajo fue financiado por la Fundación Gordon y Betty Moore, proyecto “Consolidación de un Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC), como soporte a la Política Ambiental y de Manejo en Colombia”, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Patrimonio Natural.

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM**

OMAR FRANCO TORRES
Director General – IDEAM

CLEMENTINA DEL PILAR GONZÁLEZ PULIDO
Secretaria General – IDEAM

CONSEJO DIRECTIVO

GABRIEL VALLEJO LÓPEZ
Ministro de Ambiente
y Desarrollo Sostenible

MARÍA LORENA GUTIÉRREZ BOTERO
Secretaría General
Presidencia de la República

NATALIA ABELLO VIVES
Ministra de Transporte

RAMÓN LEAL LEAL
Director General Asociación
de Corporaciones Autónomas Regionales
y de Desarrollo Sostenible – ASOCARS

SIMÓN GAVIRIA MUÑOZ
Director General
Departamento Nacional
de Planeación- DNP

YANETH GIHA TOVAR
Directora General
Departamento Administrativo de Ciencia,
Tecnología e Innovación -COLCIENCIAS

MAURICIO PERFETTI DEL CORRAL
Director General
Departamento Nacional
de Estadísticas-DANE

CLEMENTINA DEL PILAR GONZÁLEZ PULIDO
Secretaria Técnica del Consejo

DIRECTIVAS

MARÍA SARALUX VALBUENA LÓPEZ
Subdirectora de Ecosistemas e Información
Ambiental

JAIRO CÉSAR FUQUENE RAMOS
Jefe Oficina Asesora de Planeación

MAX ALBERTO TORO BUSTILLO
Subdirector (E) de Estudios Ambientales

BIBIANA LISSETTE SANDOVAL PAEZ
Jefe (E) Grupo de Comunicaciones

NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ
Subdirector de Hidrología

LEONARDO CÁRDENAS CHITIVA
Jefe Oficina de Informática

MARÍA TERESA MARTÍNEZ GÓMEZ
Subdirectora de Meteorología

ADRIANA PORTILLO TRUJILLO
Jefe Oficina Asesora Jurídica

CHRISTIAN FELIPE EUSCATEGUI COLLAZOS
Jefe Oficina Pronósticos y Alertas

MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO
Jefe Oficina Control Interno

AUTORES

Gustavo Galindo García

Oscar Javier Espejo Valero

Juan Carlos Rubiano Rubiano

Lina Katherine Vergara

Edersson Cabrera Montenegro

COORDINACIÓN Y SUPERVISIÓN

Edersson Cabrera Montenegro

Coordinador General

Natalia Córdoba Camacho

Asistente de Coordinación

Lina María Carreño Correa

Apoyo equipo coordinación

Carlos Noguera

Asistente administrativo

María Saralux Valbuena López

Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

Adriana Paola Barbosa Herrera

Coordinadora Grupo de Bosques

Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental

COLABORADORES

Juan Pablo Ramírez Delgado

Cesar Augusto Valbuena Calderón

Kattia Vargas Jurado

Adriana Palacios Manrique

Rosa Helena Lozano Cuevas

Santiago Palacios Noguera

Carol Andrea Franco Aguilera

Edwin Iván Granados

GRUPO DE BosqueS

Adriana Paola Barbosa Herrera

Claudia Patricia Olarte Villanueva

Luis Mario Moreno Amado

Carolina Rozo Mora

AGRADECIMIENTOS

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, agradece al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a la Fundación Gordon y Betty Moore y a Patrimonio Natural, y a las siguientes entidades que contribuyeron al logro de esta publicación, por el apoyo e información suministrada:

Programa SilvaCarbon. Especialmente a Sylvia Wilson, Craig Wayson, Ana Maria Planas y Coral Roig-Sillva por su constante y sincero apoyo.

Universidad de Maryland –Departamento de Ciencias Geográficas. Matt Hansen – Peter Potatov.

Woods Hole Research Center -WHRC. Especialmente a Josef Kellndorfer y Carol Franco por su constante apoyo.

Universidad de Boston. Especialmete a Pontus Olofson (verificar nombre) por constante apoyo.

USAID. Especial agradecimiento a Evan Notman y Daniel Lopez.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica, CIAF - Elena Posada y Mauricio Ramirez.

Proyecto “Consolidación de un Sistema de Monitoreo
de Bosques y Carbono (SMBYC), como soporte a la Política Ambiental
y de Manejo en Colombia”

COMITÉ TÉCNICO

Rodrigo Suárez Castaño

Director de Cambio Climático
Ministerio de Ambiente y Desarrollo
Sostenible

María Claudia García Dávila

Dirección de Bosques, Biodiversidad
y Servicios Ecosistémicos
Ministerio de Ambiente y Desarrollo
Sostenible

María Saralux Valbuena López

Subdirectora Ecosistemas e Información
Ambiental Instituto de Hidrología,
Meteorología y Estudios Ambientales
IDEAM

Max Alberto Toro Bustillo

Subdirector (E) de Estudios Ambientales
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estu-
dios Ambientales – IDEAM

Paulina Arroyo

Oficial Program Andes Amazon Initiative
Fundación Gordon y Betty Moore

Francisco Alberto Galán Sarmiento

Director Ejecutivo
Patrimonio Natural Fondo para la
Biodiversidad y Áreas Protegidas

Coordinación General

Edersson Cabrera Montenegro
Natalia Córdoba Camacho
Lina Ma. Carreño Correa
Carlos Alberto Noguera Cruz

Equipo Técnico Carbono

Juan Fernando Phillips Bernal
Miguel Ángel Peña Hernández

**Equipo Técnico Procesamiento
Digital de Imágenes**

Gustavo Galindo García
Oscar Javier Espejo
Juan Carlos Rubiano Rubiano
Adriana Palacios Manrique
Kattia Vargas Jurado
Rosa Helena Lozano Cuevas
Santiago Palacios Noguera
Cristian Fabián Forero
Cesar Augusto Valbuena Calderón
Juan Pablo Ramírez
Carol Franco Aguilera
Edwin Iván Granados
Sonia Ortiz

**Equipo Técnico Componente
Tecnológico**

María Liseth Rodríguez Montenegro
Xavier Corredor Llano
Emilio José Barrios Cárdenas
Nelly Novoa Castro

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

°C:	Grados centígrados
BA:	Biomasa área
C:	Carbono
cm:	Centímetros
D:	Diámetro normal medido a 1,30 cm del suelo
e.g.:	Significa por ejemplo; del latín <i>exempli gratia</i>
et al.:	Significa <i>con</i> y colaboradores, y otros; del latín <i>et allí</i>
Exp:	Función exponencial
ha:	Hectárea
i.e.:	Significa esto es; del latín <i>id est</i>
IDEAM:	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
kg:	Kilogramo
ln:	Logaritmo neperiano
mm:	Milímetro
REDD:	Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques
t:	Tonelada

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1.OBJETIVO Y ALCANCES DEL PROTOCOLO	15
2. LINEAMIENTOS TÉCNICOS DEFINIDOS PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS Y EL REPORTE DE LOS RESULTADOS	17
2.1 Enfoque a detección directa de cambio vs. comparación de mapas de áreas de Bosque y No Bosque	17
2.3 Manejo de áreas sin información para la cuantificación de la deforestación....	18
2.4 Control de calidad constante.....	18
2.5 Evaluación de la exactitud temática de los resultados.....	18
2.6 Preferencia de uso de Software gratuito y/o libre.....	19
2.6 Prelación a métodos automáticos y semi-automáticos	19
3. CONCEPTOS GENERALES PARA LA APLICACIÓN DEL PROTOCOLO Y EL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES.....	21
3.1 Definición de Bosque y deforestación para el sistema de monitoreo	21
3.3 Herramientas de procesamiento digital de imágenes para la aplicación del protocolo.....	23
4. PROCESO METODOLÓGICO.....	27
4.1 Selección y descarga de imágenes	27
4.2 Pre-procesamiento	28
4.2.1 Apilamiento de las bandas	29
4.3 Procesamiento.....	33
4.4 Evaluación de la exactitud temática del mapa de cambio.....	39
4.5 Reporte de los datos de superficies de Bosque y deforestación	44
LITERATURA CITADA.....	47
GLOSARIO.....	51

INTRODUCCIÓN

Los Bosques cumplen una función importante en la regulación del clima global gracias a que almacenan una mayor cantidad de carbono que cualquier otro bioma terrestre (Houghton, 2005) acumulando aproximadamente 650 billones de toneladas (FAO, 2010); se estima que tan solo las áreas boscosas tropicales de Sur América puede contener 150 a 200 t C/ha¹ (Chave *et al.*, 2008; Saatchi, *et al.*, 2007). Sin embargo, en las últimas décadas la deforestación y degradación de estos ecosistemas ha contribuido significativamente al aumento de emisiones de carbono y otros gases de efecto invernadero - GEI (IPCC, 2007); es así como se calcula que en la década de 2000s, entre el 10 y 20% de las emisiones anuales mundiales de GEI de origen antropogénico pueden ser atribuibles a la deforestación y degradación de los Bosques tropicales (GOFC-GOLD, 2014; Houghton, 2012, Harris *et al.*, 2012; Pan *et al.*, 2011). Adicionalmente, la pérdida y degradación del Bosque conlleva a una reducción en los demás bienes y servicios ambientales que prestan, incluidos la regulación hídrica, la producción de materias primas y alimentos, el mantenimiento y conservación de la biodiversidad, el uso como hábitat y la relación cultural que muchas sociedades han establecido con los Bosques alrededor del mundo (Hassan *et al.*, 2005; Olander *et al.*, 2007; Potapov *et al.*, 2008).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático- CMNUCC durante las Conferencias de las Partes de 2009 y 2010 (COP 15 y 16, respectivamente), y recientemente en Varsovia (COP 19), decidió que los países en desarrollo deben establecer sistemas nacionales de monitoreo forestal que permitan cuantificar las emisiones/absorciones de GEI y los cambios en la superficie de los Bosques y las reservas forestales de Carbono. Así mismo ha dado un reconocimiento especial al rol crítico que juegan los Bosques en la lucha contra el cambio climático; es por esta razón que las partes reunidas en 2005 (COP11) acordaron poner en marcha una iniciativa para mitigar las emisiones potenciales de GEI generadas por los procesos de deforestación y degradación, iniciativa que recibe el nombre de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación -**REDD+**. En el contexto de esta iniciativa, uno de los grandes desafíos que se tiene, es el desarrollo de un Sistema Nacional de Monitoreo Forestal, que sea transparente, robusto y confiable, y consistente con el Inventario Nacional de Emisiones (INGEI), ya que esto implica un sistema que realice

1 Toneladas de carbono por hectárea.

el seguimiento continuo de lo que técnicamente se denomina: i) los datos de actividad (cantidad y ubicación de la deforestación y la degradación), ii) los factores de emisión (contenidos de carbono) y iii) la estimación y manejo de la incertidumbre que dichas estimaciones presenten.

Como parte de este mecanismo resulta fundamental el uso de imágenes y datos provenientes de sensores remotos (GOFC-GOLD, 2014), gracias a que brindan la posibilidad de obtener información de las superficie terrestre con un amplio cubrimiento espacial y en algunos casos temporal. Desde la aparición de las primeras imágenes de sensores remotos hasta la fecha, se han incrementado notoriamente las aplicaciones para el seguimiento de las coberturas de la tierra, incluido el Bosque (Achard & Hansen, 2012) y cada vez se cuenta con mayor número de programas satelitales y aerotransportados que toman y distribuyen los datos de imágenes, así como métodos de procesamiento, programas computacionales y recursos tecnológicos encaminados al monitoreo de las coberturas.

Por otro lado, es necesario contar con información cartográfica, inventarios forestales, metodologías estandarizadas para el procesamiento de datos de sensores remotos y de campo, además, con una capacidad técnica y científica a nivel de país, que responda a las necesidades de las discusiones internacionales, que permita adoptar un manejo adaptativo en todo este proceso, para obtener resultados cada vez más consistentes y costo-eficientes. De esta forma, se busca que estos sistemas de monitoreo, al mismo tiempo que permiten cumplir con los requerimientos de la CMNUCC, se conviertan en una herramienta que apoye la toma de decisiones relacionadas con las políticas ambientales, proporcionando información vital para la planificación y ordenación forestal a nivel nacional y subnacional, y permitiendo generar información para acceder a pagos por resultados REDD+.

Teniendo en cuenta estos antecedentes y en el cumplimiento de las funciones misionales de realizar estudios e investigaciones sobre recursos forestales y efectuar el seguimiento de los recursos biofísicos de la Nación, IDEAM con el apoyo de la Fundación Gordon and Betty Moore puso en marcha en el 2009 el Proyecto "Capacidad Institucional Técnica y Científica para apoyar proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación -REDD- en Colombia". Como parte de los objetivos, el Proyecto se propuso establecer las bases para implementar un sistema de monitoreo de la deforestación desde dos niveles de aproximación, uno Nacional y otro Sub-nacional, consecuente con los lineamientos definidos por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático -CMNUCC- y el Panel Intergubernamental de Cambio Climático -IPCC- y sus órganos subsidarios. En el proyecto se evaluaron diferentes técnicas de procesamiento de datos de sensores remotos para la detección de los cambios de cobertura del Bosque, generando como resultado el "Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia a Nivel Nacional - Escala gruesa y fina" (Cabrera, Galindo, & Vargas, 2011). A partir de la propuesta metodológica de

este protocolo se cuantificó la deforestación histórica nacional a escala fina para los periodos 1990-2000, 2000-2005 y 2005-2010 (Cabrera *et al.*, 2011).

Para dar continuidad al proceso, en 2012 se da inicio al Proyecto “Consolidación del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono en Colombia” en el cual se buscó afianzar los lineamientos técnicos, científicos y tecnológicos para implementar un Sistema de Monitoreo para el país. A partir de la experiencias adquiridas y teniendo en cuenta que la implementación de un sistema de monitoreo requiere de ajustes constantes para optimizar los procesos y lograr resultados cada vez más consistentes y oportunos, se planteó una revisión y ajuste de la primera versión del Protocolo. Como resultado de la revisión se probaron e implementaron nuevos enfoques metodológicos para el procesamiento de las imágenes, mejorando la eficacia y exactitud en la detección de los cambios en la cobertura del Bosque, y reduciendo los tiempos de producción de datos.

Este documento constituye la segunda versión del “Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia a Nivel Nacional” y se enfoca únicamente en la Escala fina del protocolo inicial. En la primera parte se define el objetivo del protocolo y se presentan los lineamientos y consideraciones a tener en cuenta para su implementación. Seguidamente se definen los principales aspectos técnicos que han sido incorporados en esta segunda versión y que constituyen el eje central de la nueva propuesta metodológica. Igualmente y como ayuda para la comprensión y aplicación de la metodología se reseñan algunos conceptos técnicos de los datos y procesos planteados en el protocolo. Finalmente se esquematizan los pasos metodológicos de pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes para la detección de las áreas de cambio del Bosque, el control de calidad y la evaluación temática de los resultados.

1. OBJETIVO Y ALCANCES DEL PROTOCOLO

El objetivo del protocolo en su segunda versión es establecer los pasos metodológicos mínimos necesarios para generar cartografía temática y reportes estadísticos a nivel nacional sobre la extensión, distribución y cambios de la cobertura de Bosque a escala 1:100.000, a partir del procesamiento digital de imágenes de sensores remotos, optimizando los procesos técnicos necesarios para producir la información de una manera más eficaz y oportuna.

Teniendo en cuenta el objetivo del protocolo y el marco técnico en el que fue concebido es necesario tener en cuenta sus alcances, así como algunas consideraciones para su aplicación:

1. El protocolo está diseñado como una herramienta que permite detectar y monitorear los cambios en la extensión de la cobertura de Bosques a nivel nacional a escala 1:100.000, de manera que sea posible identificar las pérdidas de área de esta cobertura por deforestación y, en los casos en que sea detectable, la ganancia por regeneración. En este sentido, el presente protocolo no es en sí una metodología para el seguimiento de las coberturas de la Tierra, sin embargo, su estructura y operatividad permiten su integración con el proceso nacional para la generación de este tipo de información.
2. El público objetivo son los funcionarios de entidades públicas y privadas responsables de la generación de información oficial sobre la distribución, extensión y cambios en la cobertura boscosa a nivel nacional, regional y/o departamental. Su aplicación requiere de profesionales con experiencia en el uso y aplicación de sistemas de información geográfica -SIG- y teledetección.
3. El protocolo se ha diseñado y evaluado para generar información a nivel nacional en una escala 1:100.000, obteniendo resultados satisfactorios. La funcionalidad y eficiencia en otras escalas no está probada y, en caso de implementarse, requiere de validación y ajuste.
4. La aplicación del presente protocolo no se recomienda para las áreas insulares del país, debido a la escala espacial.
5. El Protocolo no se encuentra supeditado al uso específico de ciertos programas computacionales de procesamiento digital de imágenes, se hacen recomen-

daciones de acuerdo con las herramientas disponibles en el momento de la elaboración y de los resultados obtenidos, pero puede implementarse con otro tipo de programas siempre y cuando sean sometidos a prueba con resultados satisfactorios.

6. El protocolo está concebido para el procesamiento de imágenes provenientes de sensores ópticos multiespectrales. Las pruebas y aplicación de la metodología se realizaron con imágenes del programa Satelital Landsat, dada la disponibilidad histórica, la resolución temporal y espacial adecuada para la escala y la facilidad de acceso a los datos. Por estas características y las posibilidades de permanencia de este programa satelital se recomienda su uso en la implementación del protocolo. Sin embargo la propuesta metodológica planteada no está supeditada al uso exclusivo de ese tipo de imágenes, siendo factible el uso de datos de otros sensores que cumplan con la resolución espacial y temporal adecuada para la escala y la aplicación de la metodología. La mayoría de los pasos metodológicos del protocolo pueden y deben ser aplicados a cualquier tipo de imágenes provenientes de sensores remotos ópticos; no obstante se recomienda realizar pruebas preliminares cuando se opte por el uso de otro tipo de imágenes, realizando los ajustes requeridos.
7. El protocolo fue diseñado teniendo en cuenta las herramientas disponibles y métodos de procesamiento de imágenes desarrollados para la detección de cambio a la fecha. Esto significa que puede y debe ser mejorado y modificado periódicamente en la medida en que se cuente con herramientas y métodos que mejoren la eficiencia y exactitud en la generación de resultados.

2. LINEAMIENTOS TÉCNICOS DEFINIDOS PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS Y EL REPORTE DE LOS RESULTADOS

2.1 Enfoque a detección directa de cambio vs. comparación de mapas de áreas de Bosque y No Bosque

Para lograr el objetivo de identificar los cambios de la cobertura del Bosque, el Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia a Nivel Nacional en su primera versión (Cabrera, Galindo, & Vargas, 2011) propuso una metodología basada en la comparación post-clasificación de los mapas de coberturas de *Bosque* y *No Bosque* en las fechas de interés. Estos mapas se obtienen de manera independiente para cada fecha a partir del procesamiento de imágenes de satélite y posteriormente se comparan entre sí; los eventos de deforestación corresponden a las áreas clasificadas en la primera fecha como Bosque y en la siguiente como área sin Bosque.

Este protocolo propone una metodología orientada a la detección directa de cambios, en la que se procesan y comparan simultáneamente las imágenes de satélite de las dos fechas de monitoreo, identificando los cambios en la repuesta espectral que puedan corresponder a una pérdida o ganancia de la cobertura del Bosque. De esta forma se comparan directamente las imágenes y no los mapas de Bosque y No Bosque.

Con este nuevo enfoque se buscan minimizar las falsas detecciones debidas a errores en la interpretación de la cobertura de Bosque de fechas anteriores, ya que es posible verificar directamente sobre las imágenes si ocurrió o no el cambio. Igualmente se disminuyen los errores debidos a procesos cartográficos que pueden llevar a que la coincidencia espacial entre los mapas de las dos fechas no sea exacta, generando falsas detecciones al momento de superponer y cruzar la información.

2.2 Construcción de compuestos de imágenes y series de tiempo

Otra de las modificaciones a la primera versión del protocolo (Cabrera, Galindo, & Vargas, 2011) es la construcción de series de tiempo y compuestos de imágenes en

lugar de seleccionar algunas imágenes individuales de cada fecha para identificar el Bosque. Estos compuestos se obtienen al integrar los datos de las imágenes disponibles para el intervalo de tiempo analizado, que se recomienda sea anual, disponibilidad que depende de la periodicidad programada por las agencias espaciales para la toma de imágenes y de la facilidad para acceder a estos datos.

Este nuevo enfoque disminuye las áreas sin información, ya que existe la posibilidad de que al menos una de las imágenes disponibles en el catálogo o en la serie esté libre de nubes para un pixel dado. Por otro lado, al tener los datos de una serie de tiempo se incluye en el análisis la variabilidad en la respuesta espectral debida a la estacionalidad, de tal forma que los cambios detectados se deban a pérdida de Bosque y no a diferencias en las condiciones de humedad o época del año a la que pertenecen las imágenes seleccionadas; lo anterior resulta especialmente útil en las coberturas boscosas con mayor estacionalidad, tales como Bosques secos o Bosques inundables.

2.3 Manejo de áreas sin información para la cuantificación de la deforestación

Para calcular la superficie de cambio en la cobertura de Bosque y la tasa de deforestación entre dos fechas se tendrá en cuenta únicamente los eventos en los cuales se tiene información de la existencia de Bosque en la primera fecha y de pérdida de Bosque en la segunda, de manera que exista la certeza de que el evento ocurrió en el periodo de tiempo analizado. Las pérdidas de Bosque detectadas luego de una o varias fechas sin información no serán incluidas en el cálculo con el fin de evitar tasas sobrestimadas luego de periodos en los que aumentan las áreas sin información por diferentes factores, como por ejemplo épocas climáticas de alta nubosidad o fallas en los sensores de los programas satelitales que toman las imágenes.

2.4 Control de calidad constante

Durante todo el proceso de generación de los mapas de cambio de la cobertura de Bosque se debe seguir un protocolo de control de calidad temático que evalúe constantemente los productos intermedios que se van generando, con el fin de detectar errores e inconsistencias y verificar su ajuste antes de obtener el producto final que será sometido a la evaluación de exactitud temática.

2.5 Evaluación de la exactitud temática de los resultados

El mapa de cambio de la cobertura de Bosque para cada periodo debe ser evaluado y el resultado reportado junto con el dato de deforestación y regeneración.

2.6 Preferencia de uso de Software gratuito y/o libre

Para el monitoreo de la deforestación se recomienda priorizar el uso de programas de procesamiento de imágenes de carácter libre, de código abierto y/o gratuito², de acuerdo con la disponibilidad y aplicabilidad de los mismos. Los programas libres de código abierto permiten optimizar las tareas de procesamiento, adecuar algoritmos para las necesidades particulares del sistema de monitoreo, mejorando la calidad y tiempo de los procesos computacionales. Estas ventajas traen como resultado un sistema de monitoreo cada vez más eficiente en el reporte de los datos y ubicación de los eventos de deforestación.

Por su parte el uso de programas gratuitos sean o no de libre distribución reducen la dependencia institucional de las licencias de tipo propietario con los costos y limitaciones de uso que conlleva, garantizando la sostenibilidad económica del sistema de monitoreo en el tiempo.

En todo caso los programas seleccionados deberán ser puestos a prueba antes su adopción para el sistema de monitoreo, de forma que se obtengan los resultados esperados sin causar detrimento en la calidad, el tiempo de procesamiento y el esfuerzo necesario para realizar la tarea.

2.6 Prelación a métodos automáticos y semi-automáticos

Los métodos de pre-procesamiento y procesamiento automático reducen los errores aleatorios causados por desatención y falta de experiencia del intérprete. También facilitan el mejoramiento continuo de los resultados de manera estandarizada. Aunque todo procesamiento requiere un proceso de revisión y edición manual, se dará prelación a los procesos que reduzcan la intervención manual.

2 Se entiende por programas de código abierto aquellos cuyo código de programación está disponible para ser modificado o mejorado por cualquier persona, junto con otros criterios de distribución, accesibilidad, usuarios y licenciamiento no restringido que hacen parte de su definición (Open Source Initiative). Los programas libres se definen como aquellos en el que el usuario tiene libertad para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el programa, lo que implica un código de programación disponible (Free Software Foundation). La diferencia entre ambos radica en algunas consideraciones filosóficas. En ambos casos no necesariamente son gratuitos. Por su parte los programas gratuitos en muchos casos no son de código abierto.

3. CONCEPTOS GENERALES PARA LA APLICACIÓN DEL PROTOCOLO Y EL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

3.1 Definición de Bosque y deforestación para el sistema de monitoreo

Al igual que con la primera versión, en el contexto del protocolo la cobertura de Bosque se define como: ***Tierra ocupada principalmente por árboles que puede contener arbustos, palmas, guaduas, hierbas y lianas, en la que predomina la cobertura arbórea con una densidad mínima del dosel de 30%, una altura mínima del dosel (in situ) de 5 m al momento de su identificación, y un área mínima de 1,0 ha. Se excluyen las coberturas arbóreas de plantaciones forestales comerciales, cultivos de palma, y árboles sembrados para la producción agropecuaria.*** Esta definición es consecuente con los criterios definidos por la CMNUCC en su decisión 11/COP.7, con la definición adoptada por Colombia ante el Protocolo de Kyoto (MAVDT, 2002), así como con la definición de la cobertura de Bosque natural incluida en la adaptación para Colombia de la leyenda de la metodología CORINE Land Cover -CLC Colombia-.

Para el presente protocolo la deforestación está definida como: ***La conversión directa y/o inducida de la cobertura de Bosque a otro tipo de cobertura de la Tierra en un periodo de tiempo determinado*** (DeFries *et al.*, 2006; GOFC-GOLD, 2009). Por su parte la regeneración se define como: ***La recuperación de la cobertura de Bosque de zonas donde no estaba presente en fechas anteriores.***

3.2 Datos provenientes de sensores remotos Programa Satelital Landsat

Dentro de las imágenes multispectrales ópticas disponibles a la fecha para la escala del protocolo, con una resolución espacial de 10 a 60 m. y permitiendo unidades de mapeo de 0.5 a 5 ha se encuentran las tomadas por los sensores Landsat 5, 7 y 8,

Terra Aster, IRS AWiFs o LISS III, CBERS, DMC, SPOT HRV y Alos AVNIR 2; en el caso de Landsat y CBERS las imágenes se adquieren sin ningún costo (GOFC-GOLD, 2014). Sin embargo, gracias a la disponibilidad y continuidad en el tiempo del programa, Landsat existe un amplio campo en investigación para el procesamiento y aplicación de metodologías de identificación y detección de cambio de las cobertura con datos de los sensores Landsat, siendo estas imágenes las más utilizadas en el monitoreo de los Bosques.

Las características de resolución espectral, espacial y temporal de las imágenes Landsat, la disponibilidad de datos históricos, las facilidades para su adquisición y la política de toma continua y a largo plazo del programa convierten a estas imágenes en una alternativa adecuada para el sistema de monitoreo de cambio de la cobertura de Bosque, de acuerdo a la escala y métodos de procesamiento propuestos en este protocolo. Las pruebas realizadas para construir este protocolo fueron desarrolladas enteramente con imágenes Landsat.

El propósito del programa Landsat es proveer imágenes de sensores remotos para el monitoreo y gestión de los recursos de la Tierra, adquiriendo imágenes de manera casi ininterrumpida desde 1972. Las plataformas satelitales que han registrado las imágenes de las últimas décadas incluyen: Landsat 5 con los sensores Multispectral Scanner System – MSS y el Thematic Mapper – TM en funcionamiento desde 1984, en el caso de MSS fue apagado en 1995 y reactivado en diciembre de 2012, mientras que el sensor TM tomó datos hasta Noviembre de 2011. Landsat 7 con el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus – ETM+ fue lanzado en 1999 aunque presentó fallas en la toma de imágenes desde Mayo de 2003. El más reciente es el satélite Landsat 8 puesto en órbita en Febrero de 2013 con el sensor Operational Land Imager - OLI, todos con un periodo de revisita de 16 días. Las características de las imágenes tomadas por cada uno de estos sensores se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Características de las imágenes de satélite adquiridas por los sensores del programa Landsat 1 a 8

Sensor	Misión	Banda	Longitud de Onda (μ)	Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica
RBV	1, 2		0.475-0.575	80	6 bit
			0.58-0.68	80	6 bit
			0.69-0.83	80	6 bit
	3		0.505-0.750	30	6 bit
MSS	1 – 5	4 Azul	0.5-0.6	79/82	8 bit
		5 Verde	0.6-0.7	79/82	8 bit
		6 Rojo	0.7-0.8	79/82	8 bit
		7 IR	0.8-1.1	79/82	8 bit
	3	8 TIR	10.4-12.6	240	8 bit

Sensor	Misión	Banda	Longitud de Onda (μ)	Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica
TM	4 – 5	1 Azul	0.45-0.52	30	8 bit
		2 Verde	0.52-0.60	30	8 bit
		3 Rojo	0.63-0.69	30	8 bit
		4 NIR	0.76-0.90	30	8 bit
		5 SWIR 1	1.55-1.75	30	8 bit
		6 TIR	10.4-12.5	120	8 bit
		7 SWIR2	2.8-2.35	30	8 bit
ETM+	7	1 Azul	0.45-0.515	30	8 bit
		2 Verde	0.52-0.60	30	8 bit
		3 Rojo	0.63-0.69	30	8 bit
		4NIR	0.76-0.90	30	8 bit
		5 SWIR 1	1.55-1.75	30	8 bit
		6 TIR	10.4-12.5	60	8 bit
		7 SWIR-2	20.9-2.35	30	8 bit
		8 Pan	0.5 - 0.90	15	8 bit
OLI	8	1Costa/Aero-sol	0.435-0.451	30	12 bit
		2 Azul	0.452-0.512	30	12 bit
		3 Verde	0.533-0.590	30	12 bit
		4Rojo	0.636-0.673	30	12 bit
		5NIR	0.851-0.879	30	12 bit
		6 SWIR 1	1.566-1.651	30	12 bit
		10 TIR 1	10.60-12.36	100	12 bit
		11TIR 2	11.5-12.51	100	12 bit
		7 SWIR-2	2.107-2.294	30	12 bit
		8 Pan	0.503 – 1.384	15	12 bit
		9 Cirrus	1.363-1.384	30	12 bit

Fuente: Recopilado de NASA. Landsat Scientists. <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

3.3 Herramientas de procesamiento digital de imágenes para la aplicación del protocolo

3.3.1 Series de tiempo y compuestos de imágenes

Las imágenes de satélite adquiridas periódicamente permiten detectar la ocurrencia de tres tipos de variaciones en los ecosistemas: i) cambios estacionales o cíclicos (p.ej. debidos a época de lluvias y épocas secas) que afectan la fenología de las plantas y por ende la respuesta espectral en las imágenes, ii) cambios graduales dados por variaciones en la precipitación media o eventos climáticos interanuales y iii) cambios

abruptos naturales o de origen antrópico tales como inundaciones, incendios o eventos de deforestación (Verbesselt *et al.*, 2012); estas variaciones son captadas simultáneamente por los sensores, a la vez que se registran otros efectos originados por errores geométricos, condiciones climáticas y efectos de nubes que pueden afectar las observaciones (Verbesselt, *et al.*, 2010). Particularmente la presencia de nubosidad es uno de los mayores inconvenientes que presentan el uso de datos de sensores remotos ópticos en las zonas húmedas tropicales (Asner, 2001).

Parte de la eficacia de cualquier sistema de monitoreo radica en la capacidad de diferenciar los cambios debidos a estos factores (Verbesselt *et al.*, 2012), en el caso del sistema de monitoreo de Bosques, este debe ser capaz de discriminar las diferencias debidas a cambios fenológicos de los eventos de deforestación, lo cual resulta clave en Bosques estacionales como los Bosques secos. Igualmente importante es el hecho de contar con la menor cantidad posible de áreas sin información, así como disminuir el error asociado a las condiciones atmosféricas. El uso de series de tiempo densas para el análisis de datos de sensores remotos permite incluir estas fuentes de variación y mejorar la disponibilidad de información con la menor cantidad de nubes posible.

Una serie de tiempo puede definirse como una colección de observaciones ordenadas a través del tiempo (Chatfield, 2003), en el caso de las imágenes satelitales dichas observaciones corresponden a valores de reflectancia de las bandas espectrales o valores derivados, tales como los índices de vegetación. De esta forma para cada pixel se tienen los datos de todas las imágenes multiespectrales disponibles en el intervalo de tiempo de la serie.

A partir de la serie construida es posible obtener un compuesto de imágenes mediante la selección o el cálculo de un valor derivado de los datos de la serie original (Colditz & Ressler, 2013); este compuesto es una nueva imagen o *raster* donde cada pixel tiene un valor asignado según el proceso o función estadística aplicada. De esta manera se disminuye la cantidad de área sin información puesto que cada pixel tendrá un valor sí al menos una de las imágenes de la serie no tenía nubes o ruido en dicho pixel.

En el caso de la construcción de un compuesto para detectar cambios en la cobertura del Bosque, es necesario seleccionar un método o estadístico que permita condensar la información de la serie de tal forma que el valor asignado represente el conjunto de los datos, incluida la variación por factores estacionales, permitiendo discriminar los eventos de cambios atribuibles a procesos de deforestación o regeneración.

3.3.2 Normalización radiométrica

Cuando se realizan análisis multitemporales con series de tiempo y compuestos de imágenes de satélite es posible que las respuestas espectrales para una mis-

ma cobertura varíen entre las fechas, limitando la efectividad en la clasificación o detección de cambio. Esta variabilidad es debida a diferencias en las condiciones atmosféricas, en la iluminación del objeto (geometría sol – sensor), la calibración del sensor, distorsiones radiométricas y geométricas durante la adquisición, condiciones de humedad, entre otras (Caprioli, Figorito & Tarantino, 2005; Helmer & Ruefenacht, 2007). El objetivo principal de la normalización es ajustar las señales radiométricas de las imágenes utilizadas de manera que sean consistentes entre sí (Olthof, Pouliot, Fernandes, & Latifovic, 2005; Potapov *et al.*, 2012). Los métodos de normalización pueden ser absolutos o relativos. Los métodos absolutos pocas veces son aplicables ya que requiere de mediciones de las propiedades ópticas de la atmósfera adquiridas “in situ” en el momento en que el sensor toma la imagen. Por su parte la normalización relativa se aplica bajo la premisa de que la relación entre las radiancias registradas por el sensor en dos fechas distintas es espacialmente homogénea y puede ser aproximada por funciones lineales (Caprioli, Figorito & Tarantino, 2005) o por otro tipo de métodos como el ajuste de histogramas, árboles de regresión (Helmer & Ruefenacht, 2007) y técnicas de regresión más robustas (Olthof *et al.*, 2005).

3.3.3. Detección directa de cambio a partir de datos de sensores remotos

Un método de uso común en la detección de cambios de coberturas de la Tierra (incluida el Bosque) con imágenes de satélite es el de la comparación post-clasificación (también llamado clasificación delta), aquí las áreas de cambio se obtienen comparando y comparado los mapas de cobertura obtenidos de manera independiente para cada fecha (Coppin & Bauer, 1996; Hansen & Loveland, 2012; Théau, 2012). Si bien en este método las diferencias radiométricas de las imágenes generan menos impacto, los errores en la detección pueden aumentar ostensiblemente, debido a que la exactitud del mapa de cambio depende de la exactitud de cada mapa por separado, y es aproximadamente igual al producto de la exactitud de cada uno, razón por la cual puede ser considerada como intrínsecamente baja (Coppin & Bauer, 1996; Hansen & Loveland, 2012; Théau, 2012). Aplicar este enfoque para varios periodos de análisis sucesivos en un monitoreo a largo plazo, requiere de una altísima exactitud en la identificación de los objetos (bosque, no Bosque) del mapa de cada fecha, puesto que los errores en la clasificación y registro que estén presentes en los datos iniciales resultan críticos (Coppin & Bauer, 1996), y se acumulan paulatinamente a medida que se incluye el análisis de un nuevo periodo.

En contraste con el anterior, la detección directa de cambios identifica variaciones en la radiancia de las imágenes de dos o más fechas mediante el uso de algoritmos que permiten comparar directamente la información radiométrica y espectral de las imágenes. Existen diversos métodos documentados para detectar cambios de

manera directa: Cálculo de la diferencia o cociente entre valores de las imágenes de una o más bandas o de índices de vegetación derivados (Coppin & Bauer, 1996; Hayes & Sader, 2001; Muchoney & Haack, 1994; Théau, 2012); análisis de vectores de cambio; regresión de imágenes; transformaciones lineales tales como *Tasseled cap* y análisis de componentes principales con matrices de varianza/covarianza o correlación (Coppin & Bauer, 1996; Fung & Ledrew, 1987; Hayes & Sader, 2001; Théau, 2012); clasificación directa multifecha que incluye análisis de compuestos, clasificación de cambio espectral-temporal y análisis de cambio de patrones espectrales, entre otras. Incluso es posible combinar dos o más métodos para mejorar los resultados.

Debido a que el método directo se enfoca en detectar cambios en los valores de radiancia, es necesario aplicar procesos de corrección atmosférica, calibración y ajuste radiométrico para minimizar las diferencias entre las imágenes debidas a condiciones atmosféricas, de brillo, iluminación, efectos de la topografía y distorsiones de otro tipo (Coppin & Bauer, 1996; Hansen & Loveland, 2012; Théau, 2012).

3.3.4 Evaluación de la Exactitud temática

La exactitud temática a nivel cartográfico es definida como el grado en el cual el mapa producido concuerda con la referencia usada para la clasificación. Se han desarrollado diferentes aproximaciones para esta evaluación, entre ellas la construcción de matrices de confusión y cálculos de exactitud total derivados de las matrices, estimación de la exactitud de usuario y exactitud del productor, índices de exactitud media, Índice de clasificación exitosa –CSI Estadístico Kappa y versiones modificadas del estadístico, entre otras (Liu, Frazier, & Kumar, 2007; Olofsson, Foody, Stehman, & Woodcock, 2013). El estadístico Kappa, que es uno de los más utilizados, ha sido cuestionado al punto que algunos autores recomiendan no emplear este coeficiente para reportar la exactitud temática de mapas de cambio (Olofsson *et al.*, 2013).

Debido a que la exactitud se determina a partir de una muestra, esta se encuentra sujeta a una incertidumbre que puede ser representada por el error estándar o un intervalo de confianza. Olofsson *et al.* (2013) recomiendan que una evaluación de exactitud para un mapa de cambio de coberturas debe incluir tres aspectos, o al menos la información necesaria para calcularlos: i) estimaciones de la exactitud del cambio, ii) estimaciones del área de cambio ajustada para eliminar el sesgo producido por errores de clasificación y iii) intervalos de confianza asociados a la estimación de los parámetros de exactitud y área de cambio de cobertura.

4. PROCESO METODOLÓGICO

La propuesta metodológica del protocolo (Figura 1) presenta los pasos mínimos a seguir para detectar los cambios en el área del Bosque ocurridos entre dos fechas. La metodología integra herramientas de pre-procesamiento y procesamiento tradicionales y semi-automatizadas siguiendo los lineamientos técnicos señalados en el Capítulo 3.

El procesamiento se realiza a nivel de escenas y una vez se obtiene el mapa de cambio de cobertura del Bosque de cada escena se integran para generar un mosaico de cubrimiento nacional.

La metodología está diseñada para realizar un seguimiento anual del cambio en la cobertura del Bosque, en este caso cada periodo de análisis incluirá la información de los dos años consecutivos (p.eg 2012-2013; 2013-2014; etc.)

4.1 Selección y descarga de imágenes

Las imágenes Landsat pueden ser seleccionadas y descargadas de manera gratuita del servidor del Earth Resources Observation and Science Center - EROS del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS a través del visualizador Glovis (<http://glovis.usgs.gov/>); igualmente se pueden obtener datos Landsat del programa Global Land Cover Facility de la Universidad de Maryland (<http://glcf.umd.edu/data/>). Para la generación del compuesto de imágenes se debe descargar la mayor cantidad de escenas disponibles con menor cobertura de nubes para los años en los que se identificará el cambio de la cobertura de Bosque.

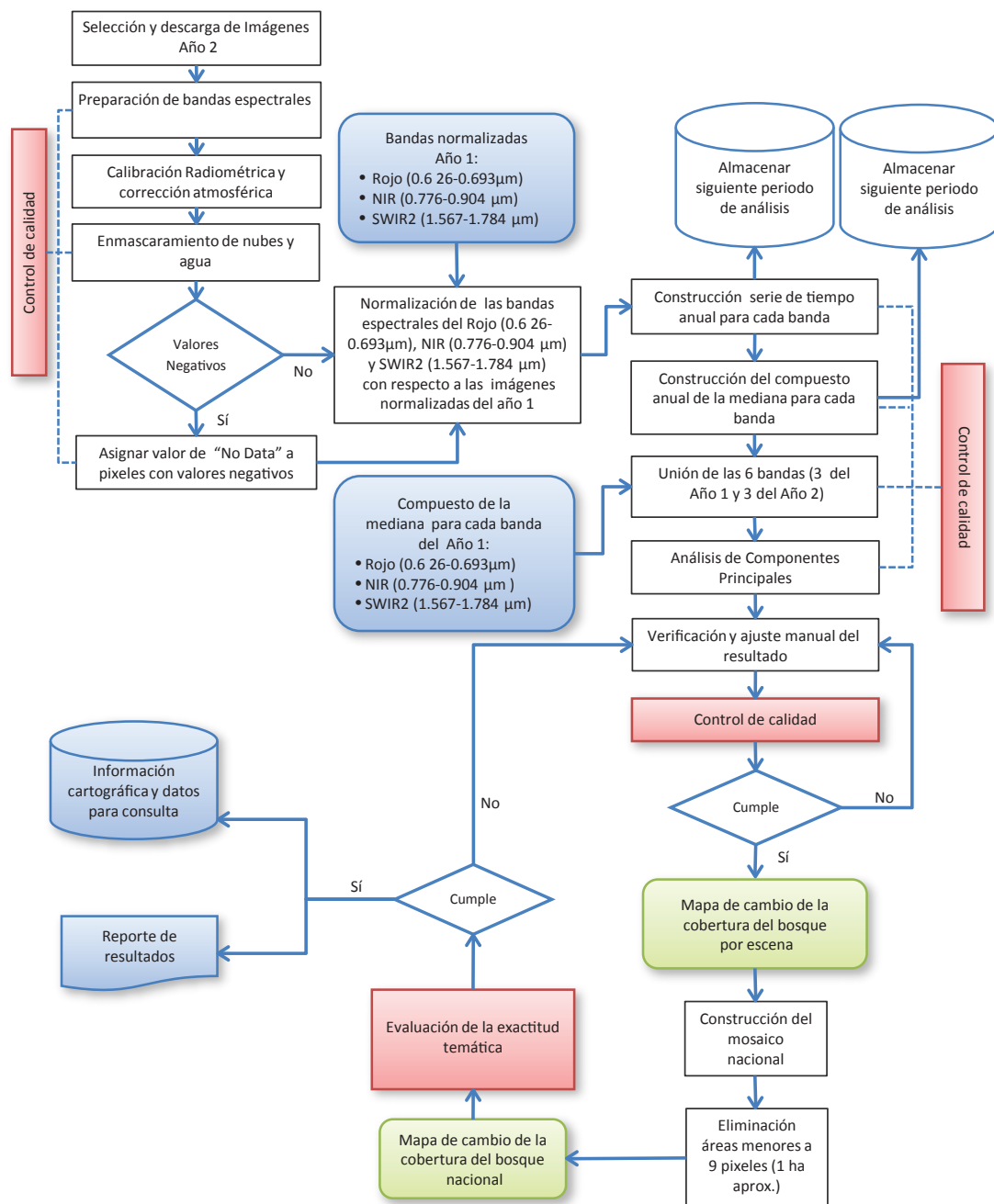


Figura 1. Diagrama del procesos metodológico

4.2 Pre-procesamiento

Las tareas de pre-procesamiento indicadas se implementan para el primer y último año del periodo en el que se identifica el cambio; sin embargo, luego del segundo periodo de monitoreo es necesario procesar únicamente la información del último año, puesto que la del primero se habría generado en el periodo anterior. Así por ejemplo, si se aplica el protocolo por primera vez para el periodo 2012 -2013 será

necesario aplicar todo el proceso a las imágenes de los dos años, mientras que para el periodo 2013 – 2014 la referencia será el compuesto normalizado de 2013 y se deberán procesar todas las imágenes de 2014.

4.2.1 Apilamiento de las bandas

Una vez descargados los datos es necesario reconstruir cada imagen mediante la unión de todas las bandas, descartando las que corresponden a la longitud de onda del Infrarrojo térmico; en el caso de Landsat 8 OLI las capas de Aerosoles y Cirrus pueden también ser excluidas.

Debido a la gran cantidad de imágenes que se requiere para construir el compuesto, se recomienda buscar un mecanismo de automatización, ya sea utilizando las funciones de procesamiento en lotes de los programas especializados o desarrollando códigos de programación en herramientas como Python o R.

4.2.2 Corrección Geométrica

Para la construcción de la serie de tiempo y los compuestos es indispensable tener un co-registro exacto a nivel de pixel entre todas las imágenes adquiridas para cada escena. Los productos Landsat suministrados por el *Earth Resources Observation and Science Center* (EROS) suelen tener una correspondencia exacta de los pixeles, sin embargo se recomienda hacer una revisión de cada imagen y ajustar aquellas que no cumplan esta condición. Este ajuste puede hacerse midiendo la diferencia entre los pixeles y re-proyectando las coordenadas de los extremos de la imagen desplazada en esta misma magnitud (teniendo en cuenta que las imágenes descargadas están en un sistema de proyección con unidades métricas).

Resulta útil mantener el sistema de referencia geográfico UTM con el que se adquieren las imágenes durante todo el proceso hasta llegar al producto final, con el fin de evitar la pérdida del co-registro entre pixeles al aplicar los ajustes geométricos de los modelos de re-proyección cartográfica. El resultado final del proceso, denominado *Mapa final de Cambio de la superficie de Bosque* es el producto que se re-proyecta al Sistema de Referencia oficial del país MAGNA-SIRGAS.

4.2.3 Conversión de los datos a Superficie de reflectancia

Los valores de los pixeles de las imágenes se encuentran generalmente en unidades de niveles digitales y se deben transformar en unidades de energía reflejada, lo que se conoce como calibración radiométrica (Asner *et al.*, 2013). Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información tanto de la superficie

terrestre como de la atmosfera, se requiere aplicar una corrección que minimice los efectos atmosféricos en los valores de cada pixel, obteniendo una imagen de superficie de reflectancia. Esta superficie tiene una mayor consistencia en las respuestas radiométricas dentro y entre imágenes, permitiendo la aplicación de procesos y modelos estándar para todas las escenas y fechas analizadas (Hansen & Loveland, 2012).

Existen diferentes algoritmos y modelos que pueden ser utilizados para la calibración radiométrica y corrección atmosférica, algunos se encuentran incluidos en los programas de procesamiento digital de imágenes o pueden ser implementados por los usuarios mediante tareas de programación. Uno de los modelos de corrección atmosférica más utilizados y que viene incluido en varias herramientas de procesamiento es el de transferencia radiativa S6. Este modelo se utilizó en las pruebas del protocolo con buenos resultados (Figura 2), sin embargo es una buena práctica probar y comparar con otros algoritmos.

Para realizar la conversión de los datos a una superficie de reflectancia resulta útil usar la herramienta gratuita LEDAPS Preprocessing desarrollada por NASA para imágenes Landsat (<http://ledaps.nascom.nasa.gov/tools/tools.html>), la cual implementa el modelo de corrección 6s; sin embargo a la fecha no se encuentra disponible para el procesamiento de imágenes Landsat 8. Para estas últimas se recomienda usar el programa Carnegie Landsat Analysis System Lite- CLASLite, programa gratuito para entidades gubernamentales, no gubernamentales y académicas dedicadas al monitoreo de Bosques cuya licencia debe ser solicitada a la Institución Carnegie para la Ciencia (<http://precoursesurvey.class.claslite.carnegiescience.edu/>).

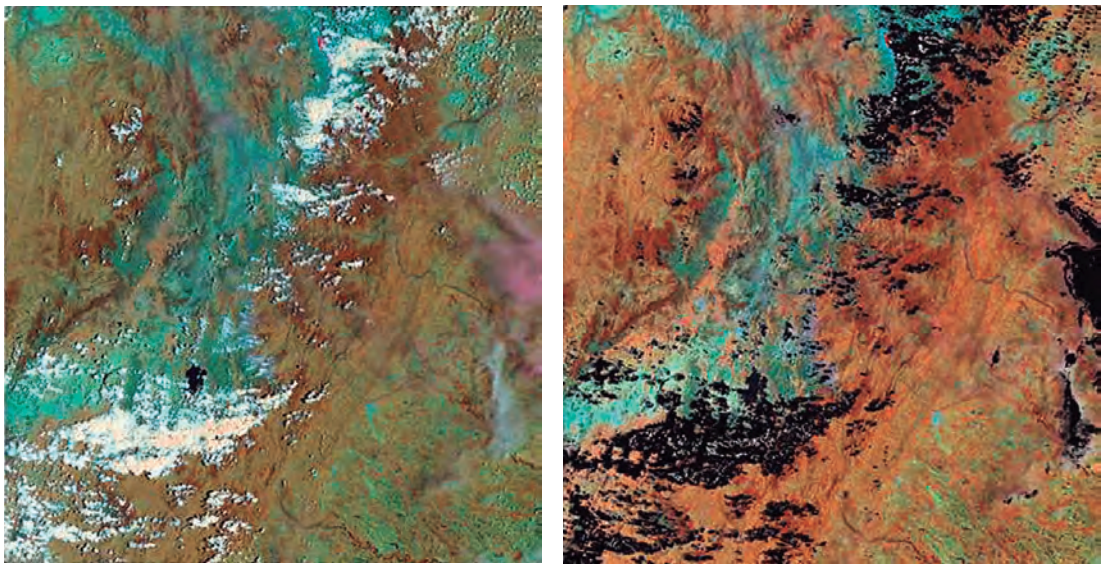


Figura 2. Izquierda: Imagen Landsat Path 7- Row 56 original en combinación RGB 453 vs la imagen reflectancia (Derecha) en la misma combinación de banda con enmascaramiento de las nubes (zonas en color Negro).

4.2.4 Enmascaramiento de nubes y agua

Las imágenes de superficie de reflectancia deben ser depuradas de tal forma que cada escena conserve únicamente los píxeles que contienen información de la cobertura de la Tierra, enmascarando y eliminando las áreas de nubes, bandeamiento, sombras o bruma. Para garantizar la eliminación de estos píxeles resulta apropiado combinar los resultados de las máscaras producidas con diferentes herramientas. Se recomienda el uso de la función *Masking* del módulo *Calibrate Image* de CLASlite, el programa de procesamiento Fmask (Zhu & Woodcock, 2012) diseñado para imágenes Landsat sobre plataforma MatLab y que pueden ser descargada del sitio <http://ftp-earth.bu.edu/public/zhuzhe/> e ImgTools 1.0 (versión beta), desarrollado por el Instituto IMAZON de Brasil (Souza Moreira & Siquiera Nascimento, 2013); los resultados combinados de los tres algoritmos mostraron resultados más satisfactorios que cuando se utilizó un solo algoritmo para enmascarar. (Figura 2).

También puede ser conveniente remover los píxeles de los cuerpos de agua para evitar las falsas detecciones de cambio debidas a las variaciones estacionales del nivel del agua en Bosques inundables; p.ej. CLASlite enmascara simultáneamente las nubes y los cuerpos de agua, mientras que en ImgTools se generan las máscaras de manera independiente.

4.2.5 Normalización radiométrica

La normalización radiométrica entre las imágenes de los dos años de análisis ajusta las señales radiométricas de un año respecto al otro, de forma que sean consistentes y se reduzca la variabilidad debida a diferencias atmosféricas, de iluminación, calibración del sensor, distorsiones geométricas, etc.; permitiendo así que las imágenes sean realmente comparables y los cambios detectados no se deban a este tipo de factores (Olthof *et al.*, 2005; Potapov *et al.*, 2012).

A menos que se cuente con la información de la atmósfera y de la geometría del sensor en el momento de la toma, se debe aplicar un método de normalización relativa entre las imágenes de cada fecha (Caprioli, Figorito & Tarantino, 2005). Una forma de normalizar es ajustando la media y desviación estándar de cada banda de la imagen del segundo año a los valores de la banda respectiva del compuesto de referencia de la primera fecha, para lo cual se recomienda generar códigos de programación o modelos en los programas de procesamiento de imágenes. No es necesario normalizar todas las bandas ya que se ha demostrado que la información relevante de la vegetación para el análisis de cambio se encuentra principalmente en las bandas de la longitud de onda del Infrarrojo cercano NIR, del rojo e Infrarrojo medio de onda corta SWIR (Figura 3).

Para un segundo periodo de análisis en el que se aplique este protocolo se utiliza como referencia el compuesto normalizado generado en el primer periodo. Así por ejemplo, para el periodo 2013 -2014 las imágenes de 2014 se normalizarían tomando como referencia el compuesto normalizado de 2013.

Imagen normalizada del año 1 (referencia)

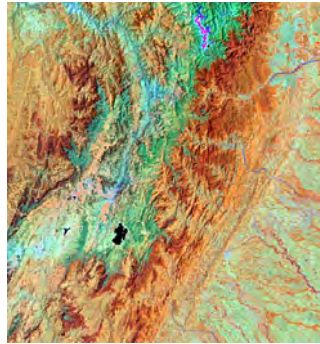
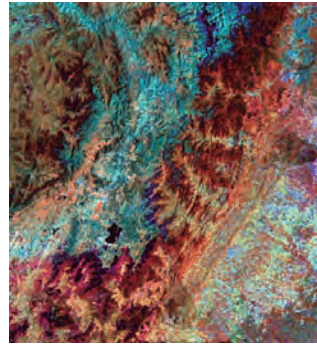
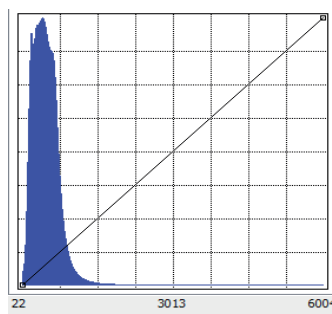


Imagen normalizada del año 2 respecto a la imagen normalizada del año 1

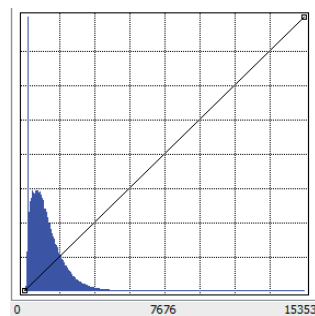


Imágenes normalizadas



Statistics	
min:	23,00
max:	6004,00
mean:	478,59
std. deviation:	263,25

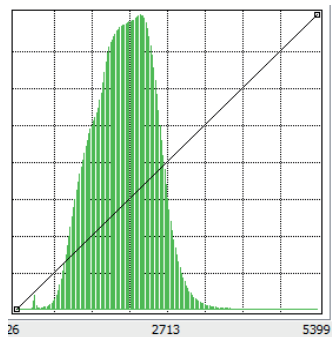
Info	
Input:	
Output:	
Count Out:	
Count In:	



Statistics	
min:	1,00
max:	15353,00
mean:	1148,02
std. deviation:	811,42

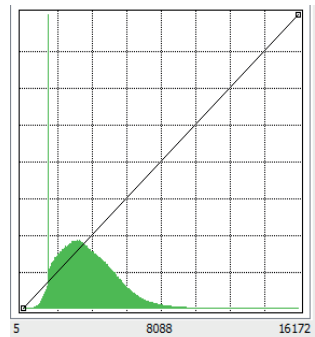
Info	
Input:	
Output:	
Count Out:	
Count In:	

Banda NIR



Statistics	
min:	27,00
max:	5399,00
mean:	1948,40
std. deviation:	522,57

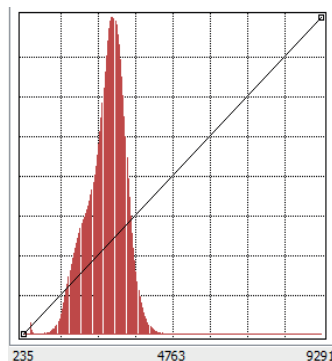
Info	
Input:	1164
Output:	4177
Count Out:	0
Count In:	0



Statistics	
min:	6,00
max:	16172,00
mean:	3665,03
std. deviation:	1621,62

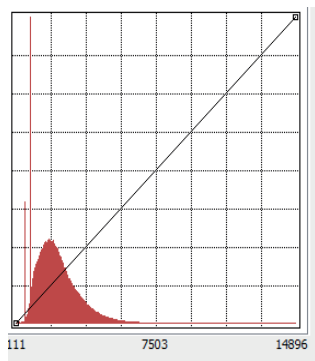
Info	
Input:	
Output:	
Count Out:	
Count In:	

Banda SWIR2



Statistics	
min:	236,00
max:	9291,00
mean:	2759,65
std. deviation:	568,14

Info	
Input:	
Output:	
Count Out:	
Count In:	



Statistics	
min:	112,00
max:	14896,00
mean:	2195,44
std. deviation:	1092,41

Info	
Input:	
Output:	
Count Out:	
Count In:	

Banda Rojo

Figura 3. Histogramas de las bandas espectrales de la imagen de referencia para la normalización, correspondiente al primer año del análisis vs. histogramas de la imagen normalizada correspondiente al segundo año de análisis

4.2.6 Obtención de los compuestos de imágenes

Con las imágenes normalizadas se construye una serie de tiempo anual de cada una de las bandas por separado (Rojo, NIR, SWIR2), uniéndolas todas las fechas anuales disponibles para cada banda mediante una función de apilado (*Layer stack*). También es necesario construir estas series de manera independiente para cada sensor Landsat 5, 7, u 8.

El compuesto de imágenes se genera para cada banda y sensor obteniendo un valor único de cada serie; se recomienda emplear la mediana de la serie, puesto que al ser una medida de tendencia central, elimina los sesgos debidos a valores extremos por cambios estacionales o ruido. En caso de tener compuestos para una misma banda de sensores diferentes, estos se promedian con el objeto de tener un único compuesto de la banda.

De esta forma al finalizar el pre-procesamiento de cada escena se obtiene un compuesto anual de cada banda que corresponde a la mediana de los valores de reflectancia normalizados incluidos en la serie de tiempo (*Figura 4*).

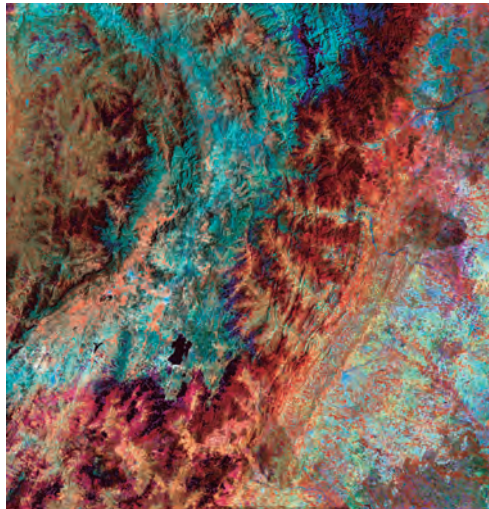


Figura 4. Resultado del compuesto anual de la mediana para la escena Landsat Path 7 Row 56, en combinación RGB (Rojo, NIR, SWIR2), bandas requeridas para el análisis de cambio.

4.3 Procesamiento

4.3.1 Detección de cambio

Para identificar el cambio de la cobertura de Bosque se debe seleccionar un método de detección directa teniendo en cuenta que existe una cantidad notable de procesos y algoritmos ya documentados (ver sección 4.3.3). Los ejercicios realizados

durante el diseño del protocolo mostraron un buen resultado aplicando un análisis de componentes principales con matrices de correlación a los datos fusionados de las dos fechas; en este caso, generalmente los componentes superiores al grado 3 resultaron útiles en la detección de cambio (*Figura 5*).

Es necesario hacer la salvedad de que el protocolo no supedita la detección de cambio a la aplicación de análisis de componentes principales, por el contrario se recomienda realizar pruebas antes de seleccionar un método o incluso combinar dos o más si esto mejora los resultados.

Una vez se aplica el método seleccionado hay que definir el umbral o rango de valores que serán considerados como cambio en la cobertura de Bosque, tanto para la ganancia como para la pérdida. Estos rangos dependen del método seleccionado, de las coberturas presentes en la escena, del tipo de cambio ocurrido (deforestación a pasto, cultivo, etc.), por lo que no es posible generalizar un rango para todas las escenas. La selección del umbral debe realizarse comparando los resultados con las imágenes de superficie de reflectancia (*Figura 5*). Estos umbrales se definen para Bosque estable, no Bosque estable, deforestación y eventualmente regeneración.

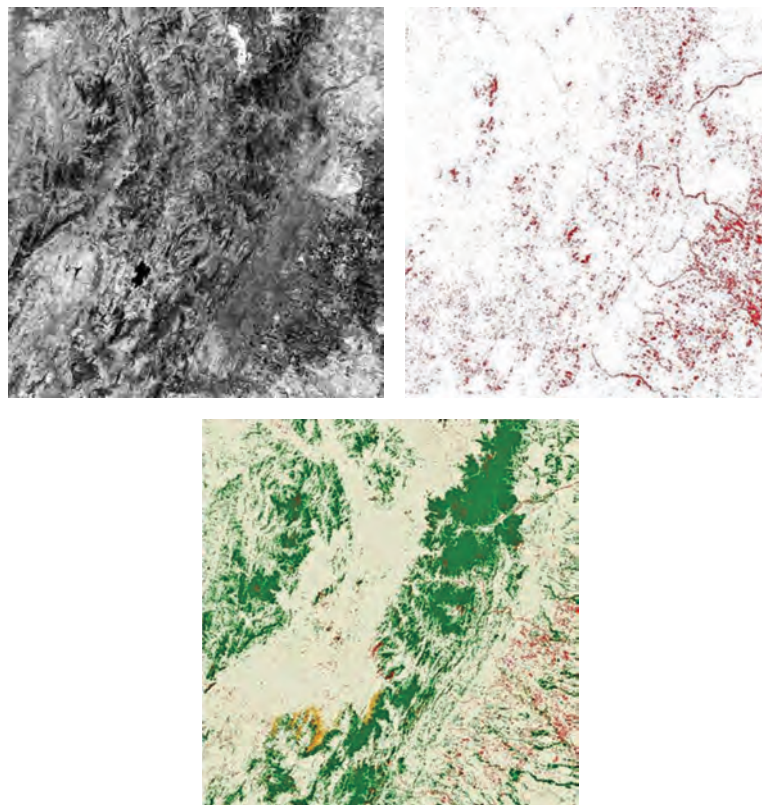


Figura 5. Detección del cambio. Arriba izquierda: Ejemplo del resultado del algoritmo de detección, en este caso análisis de componentes principales. Arriba derecha: Definición de umbral de valores correspondientes a cambio, las áreas rojas corresponden a posibles cambios de la cobertura del Bosque. Abajo: Resultado del mapa de cambio luego de revisar y editar manualmente las áreas identificadas como posible cambio. Las clases de este mapa son Bosque estable (verde), No Bosque estable (marfil), Sin información (naranja) y Deforestación (rojo)

Luego de definir los umbrales se reclasifican los valores de los píxeles al valor de la clase o categoría correspondiente, obteniendo así el mapa preliminar de cambio. La leyenda y los valores asignados en la reclasificación para cada clase son los siguientes (Figura 5):

1. Bosque Estable
2. No Bosque Estable
3. Deforestación
4. Regeneración
5. Sin Información (corresponde a los datos enmascarados)

4.3.2 Verificación visual de los cambios detectados por parte del intérprete

Una vez generado el mapa de cambio el intérprete debe verificar y ajustar los resultados, contrastando el mapa resultante con las imágenes de superficie de reflectancia de las dos fechas. Los errores encontrados se reclasifican a la clase correspondiente.

4.3.3 Control de calidad y ajustes durante el proceso

El proceso de control de calidad implica el seguimiento a cada una de las tareas y productos intermedios requeridos para generar el mapa de cambio. Se recomienda realizar este seguimiento mediante un formulario de control en el que cada intérprete reporte periódicamente las tareas realizadas para cada escena. De esta forma es posible monitorear constantemente el avance de todo el proceso, y, si es el caso, detectar las tareas que están requiriendo más tiempo del estimado, con el objeto de tomar las medidas necesarias para generar el resultado oportunamente. El seguimiento se hace para cada una de las etapas:

1. Descarga de imágenes.
2. Pre-procesamiento de imágenes.
3. Generación del Mapa de cambio primera versión.

¿4. Procesamiento Digital.?

5. Recepción de ajustes y observaciones de control de calidad.
6. Entrega del Mapa de cambio segunda versión.
7. Entrega del mapa final de cambio.

Control de calidad del mapa de cambio por escena: El control de calidad debe ser un proceso iterativo de revisión y ajuste hasta obtener un producto final satisfactorio. Inicialmente se revisa a nivel de escena, de manera que cada versión del Mapa de Cambio entregada por el intérprete debe ser evaluada, generando reportes gráficos, estadísticos y espaciales en los que se muestren los posibles errores en la detección de cambio. Para los reportes se recomienda diseñar procesos automatizados o semi-automatizados que permitan identificar los siguientes aspectos (Figura 6):

1. Áreas de cambio por deforestación y regeneración de la escena evaluada.
2. Polígonos de cambio menores a una hectárea tanto en deforestación como en regeneración, de acuerdo con el área mínima cartografiable y la definición de Bosque.
3. Áreas de revisión, es decir sectores con polígonos de cambio cercanos que deberán ser examinados. Esta agrupación se hace con el propósito de enfocar la revisión hacia las zonas donde se reportan los cambios sin tener que revisar toda la escena.
4. Análisis y reporte estadístico y espacial (mapas) de cada una de las áreas de revisión.

Teniendo en cuenta que el protocolo está orientado a la implementación de un sistema de monitoreo, es necesario verificar la consistencia de los cambios respecto a los reportes de la serie histórica. Algunos ejemplos de las inconsistencias se muestran en la (Tabla 2).

Tabla 2. Ejemplo de algunas inconsistencias en la generación del mapa de cambio y la serie histórica.

Serie histórica	Dato reportado en el periodo de análisis	Resultado
No Bosque Estable	Deforestación	Inconsistencia
Bosque Estable	No Bosque Estable	Inconsistencia

Las inconsistencias deben ser revisadas y corregidas. En caso de que el error se encuentre en la serie histórica, este deberá quedar registrado para realizar los ajustes necesarios en los mapas de las fechas anteriores.

En aras de reducir el sesgo del resultado según el criterio del intérprete, se puede implementar un ejercicio de verificación cruzada en el que la escena es revisada por un intérprete diferente al que la procesó, identificando inconsistencias tanto en las clases de cambio como en las clases estables. Los errores reportados en este ejercicio deberán ser validados por la persona encargada del control de calidad antes de realizar el ajuste definitivo. El mapa de cambio revisado y ajustado a este punto corresponde a la versión final de cada escena.

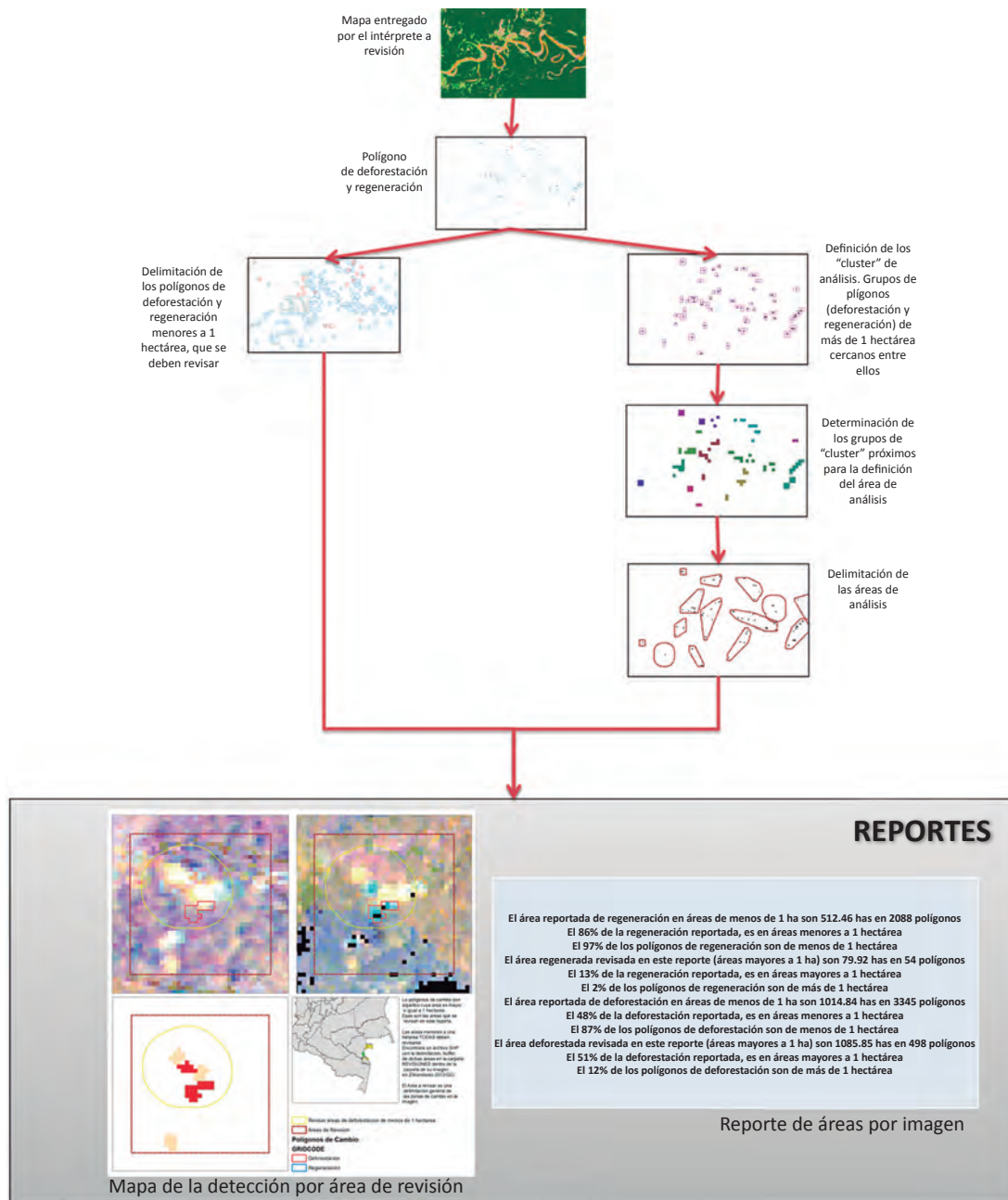


Figura 6. Esquema del proceso de generación de reportes de Control de calidad al mapa de cambio.

Control de calidad del mosaico de cambio: Para construir el mapa de cambio a nivel nacional es necesario comparar y ajustar las áreas comunes entre las escenas vecinas y realizar el empalme de manera que los mapas sean consistentes entre las dos escenas (Figura 7).

Finalmente, se recomienda generar un modelo o código de programación que defina el orden en el cual se deben unir las escenas al construir el mosaico, modelo que debe ser aplicado en cada nuevo periodo de análisis. Esta recomendación se hace

teniendo en cuenta que, dependiendo del algoritmo utilizado por el programa de procesamiento, la posición de cada pixel en el mosaico puede variar ligeramente según del orden en el que se adicionen las escenas.

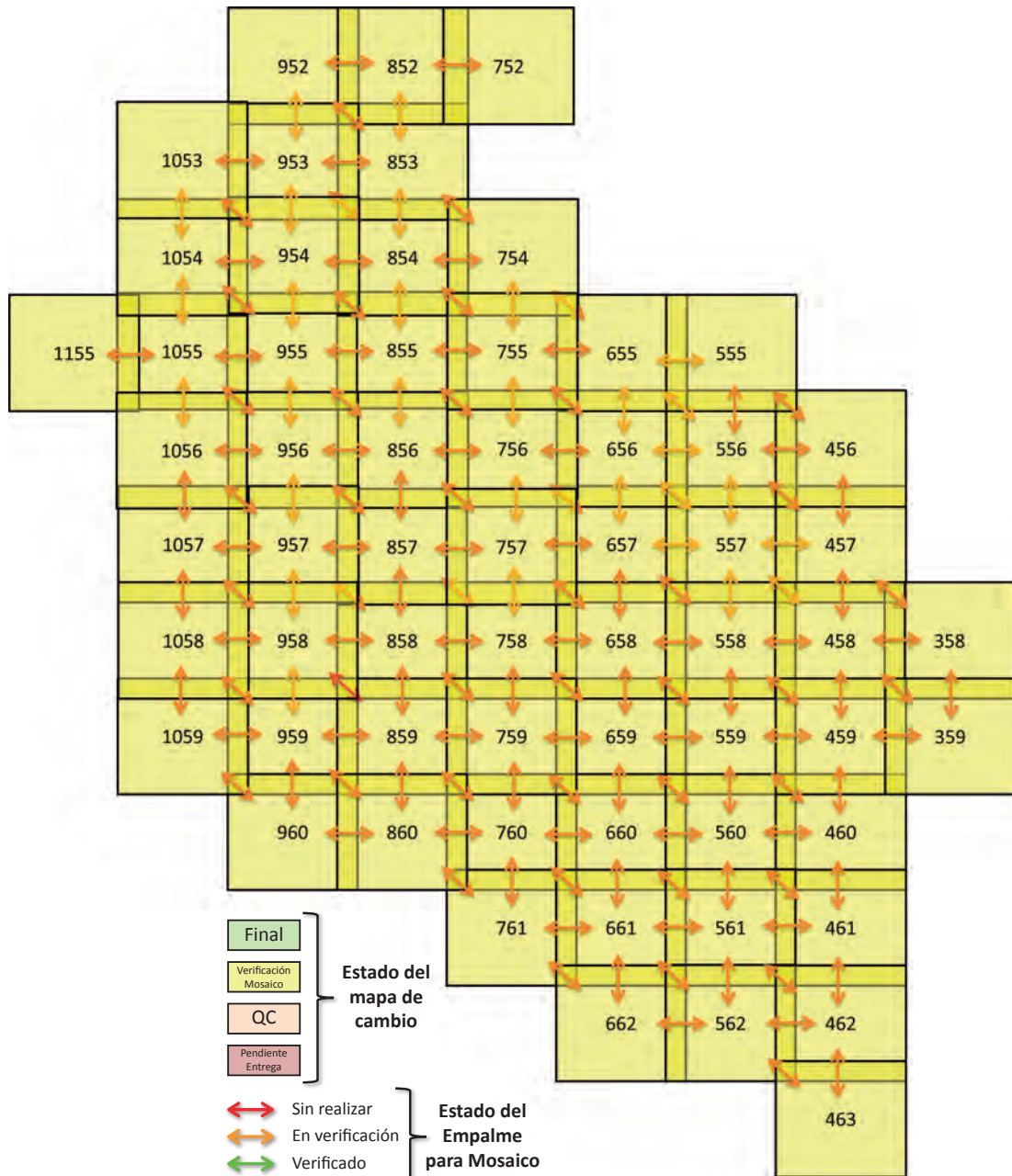


Figura 7. Esquema del proceso de revisión y construcción del mosaico nacional de cambio en las coberturas boscosas.

4.4 Evaluación de la exactitud temática del mapa de cambio

Dentro del rango de índices y métodos documentados para la evaluación, se seleccionó el enfoque propuesto por Olofsson *et al* (2013), en el cual, además de una evaluación de exactitud estadísticamente robusta, se incluye el cálculo de la incertidumbre de los estimadores generando tres resultados: i) estimaciones de la exactitud del cambio, ii) estimaciones del área de cambio ajustada para eliminar el sesgo producido por errores de clasificación y iii) intervalos de confianza asociados a la estimación de los parámetros de exactitud y área de cambio de cobertura; de esta forma el resultado de cambio reportado se hace más transparente y confiable. Para aplicar esta metodología se recomienda tener en cuenta la guía de buenas prácticas asociada al diseño e implementación de un protocolo de evaluación temática de Olofsson *et al.* (2014), dentro de las cuales se incluye:

- Indicar el diseño de muestreo utilizado para la toma de los datos de evaluación
- Implementar un diseño de muestreo probabilístico para dar bases rigurosas a la inferencia basada en muestreos.
- Se recomienda estratificar el muestreo al menos por clases del mapa de cambio para reducir el error estándar de las estimaciones de exactitud de cada clase.
- Utilizar datos de referencia para la evaluación que sean consistentes y representativos del periodo del mapa de cambio. Igualmente utilizar información de mayor calidad que la utilizada para el generar el mapa, o si es la misma garantizar que los procesos de interpretación del muestreo sean mejores que los de generación del mapa.
- Resumir los resultados en una matriz de error expresada en términos de la proporción de área.
- Estimar el área o proporción de la superficie de cada clase del mapa de cambio de acuerdo con los resultados de interpretación del muestreo.
- Estimar los indicadores descriptivos generales: Exactitud total, exactitud de usuario (error de comisión) y productor (error de omisión) del mapa de cambio.
- Usar estimadores de exactitud y área estratificados, donde cada estrato es una clase del mapa de cambio.
- Documentar problemas o limitaciones del método empleado que puedan afectar sustancialmente los resultados.

La evaluación de la exactitud temática deberá ser realizada por una entidad o equipo externo que no esté involucrado en la producción del mapa. El proceso de evaluación de cambio se aplica en tres etapas principales:



Figura 8. Proceso de evaluación temática del cambio de la cobertura de Bosque.

4.4.1 Muestreo

1. Definición del tamaño de muestra: El tamaño de muestra total (n) para la evaluación del mapa se puede calcular utilizando la Ecuación 1. Se sugiere utilizar un muestreo estratificado en el que el tamaño n se distribuya para cada una de las categorías i (n_i) según el área que ocupan en el mapa de cambio, obteniendo así una adecuada representatividad de cada clase.

$$n = \left[\frac{\sum W_i S_i}{S(\hat{\theta})} \right]^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

$S(\hat{\theta})$ = Error estándar esperado de la exactitud general esperada. Atendiendo los principios de robustez, confiabilidad y transparencia requeridos en el establecimiento de un sistema de monitoreo de la cobertura de Bosque, se sugiere usar un error estándar esperado de 0.01.

W_i = Proporción de área cartografiada de la clase, definida por la Ecuación 2

$$W_i = A_{m,i} / A_{tot} \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo, $A_{m,i}$ como el área cartografiada de la clase i y A_{tot} el Área total cartografiada.

S_i = Desviación estándar de la clase i , definida por la Ecuación 3

$$S_i = \sqrt{U_i(1-U_i)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo U_i la exactitud esperada de usuario para la clase i . Para definir esta exactitud resulta conveniente tomar en cuenta que en los mapas de cambios de las coberturas de la tierra, los errores de comisión para las clases de cambio suelen ser más altos que los de las clases estables (Olofsson *et al.* 2014, 2013).

Para el muestreo estratificado, a partir de la muestra total (n) se determinará el número de muestras de cada clase (n_i). Se recomienda que la asignación de (n_i) se haga de manera balanceada, de forma que las clases de cambio (deforestación y regeneración) tengan un tamaño de muestra lo suficientemente grande para obtener un error estándar pequeño en la estimación de la exactitud del usuario, distribuyendo el resto de la muestra proporcionalmente en las clases estables (no Bosque y Bosque estable) en función de su área (Ramírez *et al.*, 2014).

2. Construcción de la muestra. Se generan puntos aleatorios sobre la superficie de cada clase de acuerdo al tamaño (n_i) definido para cada una, con una distancia mínima de separación para garantizar el supuesto de independencia de la muestra, el cual no se cumple si existe autocorrelación espacial.

4.4.2 Interpretación de cambios en los puntos de muestreo

Mediante la revisión visual de imágenes correspondientes a la fecha inicial y final del mapa de cambio, se interpreta la categoría a la que pertenece cada punto y se asigna el valor correspondiente según las cinco clases definidas para el mapa de cambio. Esta interpretación debe ser realizada de manera independiente por al menos tres intérpretes con el fin de cotejar los resultados. Durante este proceso se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Los intérpretes reciben la capa de puntos, pero esta no incluye el valor asignado en el mapa de cambio.
- Los intérpretes no usan el mapa de cambios como elemento para la evaluación, únicamente emplean las imágenes satelitales de las fechas de monitoreo, de esta manera no conocen el valor asignado y por tanto no sesgan su interpretación.
- Las imágenes satelitales para la evaluación deben tener al menos la misma resolución espacial de las imágenes con las que se construyó el mapa base, sin embargo es deseable que sean de una mayor resolución espacial.
- La interpretación de la clase de un único pixel correspondiente al punto de muestreo resulta difícil, por tanto la interpretación se realiza para una zona cuadrada de 1 ha cuyo centro es el punto de muestreo.
- Se estandariza la combinación de bandas RGB para el despliegue de las imágenes y el nivel de mejoramiento. Se sugiere dos desviaciones estándar empleando el histograma local.

Durante esta fase es posible incorporar herramientas que faciliten la recopilación de datos y el uso de condiciones estándar para la interpretación. La aplicación Wild-Life Works Toolbar (<http://www.wildlifeworks.com/redd/resources.php>) que funcio-

na sobre ArcGIS 10x resulta útil para esta tarea. Esta herramienta permite crear una Geodatabase con la capa de puntos y hace un recorrido secuencial para garantizar una interpretación ordenada, completa y con una escala de visualización fija. Esta herramienta tiene incorporadas unas clases predeterminadas que no pueden ser modificadas por lo que se debe estandarizar para todos los intérpretes su equivalencia en las cinco clases del mapa de cambio de Bosque.

4.4.3 Estimación de resultados

1. Consolidación: Los resultados se integran para identificar la coincidencia de la interpretación y determinar el valor final del punto. Una clase es asignada a un punto si al menos dos de los tres interpretaciones coinciden. La clase de los puntos en los que no hubo acuerdo es reasignada por la persona encargada del control de calidad. En este punto se puede construir una matriz de error preliminar para determinar las clases con mayor confusión.

2. Control de calidad de la interpretación: Permite verificar la asignación realizada por los intérpretes, y en caso de ser necesario la redefinición de la clase de un punto; incluso puede resultar útil para identificar inconsistencias sistemáticas en los criterios de interpretación. Adicionalmente con este control es posible realizar un análisis posterior de las áreas con mayor dificultad en la interpretación de los cambios en la cobertura de Bosque.

Con los resultados se determina la necesidad de remplazar los puntos de la muestra por alguna de las siguientes razones.

- No acuerdo entre los intérpretes.
- Áreas sin información en cualquiera de los periodos de evaluación.
- Puntos no clasificados

En consecuencia, los puntos a verificar deberán incluir aquellos sin información, puntos de no consenso en la interpretación, y puntos correspondientes a las clases con mayor confusión según la matriz. (Figura 8).

Durante este proceso de control se reclasifican los puntos interpretados erróneamente y se determina cuales son descartados para la estimación de la exactitud temática. Estos puntos descartados deben ser remplazados por nuevos puntos a los que se aplica todo el proceso de interpretación y control de calidad.

Revisión	Año 1	Año 2
El punto se reportó por dos intérpretes como "sin información" y por un tercero como "Bosque". En el control se confirma que la clase es "Sin información"		
Punto con desacuerdo por parte de los tres intérpretes. El control de calidad determina que es "no Bosque estable"		
Este punto se interpretó como "Deforestación", En el control de calidad se determinó que corresponde a "No Bosque estable" por lo cual es un error de comisión		

Figura 9. Ejemplos del proceso de control de calidad de la interpretación para generar la estimación de la exactitud temática.

3. Matriz de confusión: Una vez realizado el control y ajustes de la interpretación del muestreo, se construye nuevamente la matriz de error convencional, mediante el conteo del número de correspondencias ($n_{i,j}$) entre cada clase del mapa de cambio i vs la clase de referencia asignada en la interpretación j . Posteriormente se construye una matriz de error ajustada al área, calculando la proporción de superficie en la celda i, j mediante el estimado $\hat{p}_{i,j}$ de acuerdo a la Ecuación 4.

$$\hat{p}_{i,j} = w_i \frac{n_{ij}}{n_i} \quad \text{Ecuación 4}$$

4. Cálculo de estimadores e intervalos de confianza: Se calculan los estimadores de exactitud temática y área ajustada, así como sus respectivos intervalos de confianza.

A partir de la matriz de error ajustada a la proporción del área se estiman los valores de exactitud del usuario ($\hat{U}_i$), exactitud del productor ($\hat{P}_j$) y la exactitud general del mapa ($\hat{O}$), según las Ecuaciones 5, 6 y 7.

$$\hat{U}_i = \frac{\hat{p}_{ij}}{\hat{p}_i} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\hat{P}_j = \frac{\hat{p}_{jj}}{\hat{p}_j} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\hat{O} = \sum_{j=1}^q \hat{p}_{jj} \quad \text{Ecuación 7}$$

4.5 Reporte de los datos de superficies de Bosque y deforestación

Para el cálculo y reporte de la cobertura y cambio del Bosque se propone seguir los lineamientos definidos en los indicadores ambientales del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible e IDEAM versión 5 (2014), correspondientes a la *Proporción de la superficie cubierta por Bosque natural*, *Cambio en la superficie cubierta por Bosque natural* y *tasa de deforestación*.

Proporción de la superficie cubierta por Bosque natural: Se refiere a la superficie cubierta por Bosque natural observada para cada año a partir de las imágenes de satélite. En este reporte es necesario tener en cuenta que los datos excluyen la superficie sin información (debido a la presencia de nubes y otros factores que impiden su interpretación), de manera que es posible que para cada periodo se registre una superficie menor a la superficie que en realidad está cubierta por Bosque.

Cambio en la superficie cubierta por Bosque natural (CSBN): Hace referencia a la diferencia entre la superficie de Bosque regenerada y la superficie de Bosque deforestada. Valores negativos representan pérdidas netas de superficie cubierta por Bosque natural, en tanto que valores positivos representan ganancias netas de esta. Se calcula con la Ecuación 8:

$$CSBN = SR_{t1-2} - SD_{t1-2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

SR_{t1-2} es la superficie de Bosque que ha sido regenerada entre los momentos de tiempo $t1$ y $t2$.

SD_{t1-2} es la superficie deforestada entre los momentos de tiempo $t1$ y $t2$.

Tasa de deforestación: Para estimar la tasa anual de deforestación del periodo es necesario calcular la extensión del Bosque en el primer y último año de análisis, a partir de los resultados del Mapa de Cambio de la Cobertura de Bosque, el cual tendrá 5 clases definidas: 1) Bosque Estable, 2) No Bosque Estable, 3) Deforestación, 4) Regeneración y 5) Sin Información. El cálculo del área del Bosque para cada fecha (A_t) se realiza de la siguiente manera:

$$A_{t1} = SBE_{t1-2} + SD_{t1-2} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$A_{t2} = SBE_{t1-2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde,

$SDSBE_{t1-2}$ es la superficie de Bosque que ha permanecido estable entre los momentos de tiempo $t1$ y $t2$.

SD_{t1-2} es la superficie deforestada entre los momentos de tiempo $t1$ y $t2$.

Para calcular la tasa de deforestación se propone el uso de las ecuaciones de la tasa anual de cambio (r) propuestas por Puyravaud, (2003), la cual resulta intuitiva ya que se deriva de la tasa media anual de cambio y tiene una mejor correspondencia matemática con la regla del interés compuesto.

$$r_{t1-2}(\%) = \left[\left(\frac{1}{(t2-t1)} \right) * \ln \left(\frac{A_{t2}}{A_{t1}} \right) \right] * 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde, $t1$ y $t2$ corresponden al año inicial y final respectivamente del periodo de análisis.

A_{t1} y A_{t2} son las áreas de Bosques del año inicial y final respectivamente del periodo de análisis.

LITERATURA CITADA

Achard, F., & Hansen, M. (2012). *Global Forest Monitoring from Earth Observation*. (356 pp.) Florida, EEUU: CRC Press Taylor & Francis.

Asner, G. P. (2001). Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3855–3862.

Asner, G., Tasar, E., Sousan, S., & Knapp, D. (2013). CLASlite Forest monitoring technology. Version 3.1 Use Guide. Standford: Carnegie Institution for Science.

Cabrera, E., Galindo, G., & Vargas, D. (2011). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia nivel nacional escala gruesa y fina. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM (p. 44). Bogotá D.C., Colombia.

Cabrera, E., Vargas, D., Galindo, G., Garcia, M., Ordoñez, M., Vergara, L. K., Pacheco, A.M., Rubiano, J.C. & Giraldo, P. (2011). Memoria técnica de la cuantificación de la deforestación histórica nacional escalas gruesa y fina (p. 106). Bogotá C.D., Colombia
Caprioli, M., Figorito, B., & Tarantino, E. (2005). Radiometric normalization of Landsat ETM+ data for multitemporal analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34.

Chatfield, C. (2003). *The Analysis of Time Series: An Introduction*. Florida, E.E.U.U.: Chapman & Hall/CRC Press.

Chave, J., Olivier, J., Bongers, F., Châtelet, P., Forget, P.-M., van der Meer, P., Norden, N., Riéra, B., Charles-Dominique, P. (2008). Above-ground biomass and productivity in a rain forest of eastern South America. *Journal of Tropical Ecology*, 24(04), 355–366.
Colditz, R. & Ressler, R. (2013). The impact of the day of observation of image composites on adequate time series generation. En Michel, U., Civco, D. L. & Schulz, K (Comps.). *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IV. Proceedings of SPIE Vol. 8893*. Bellingham, E.E.U.U: SPIE. doi:10.1117/12.2029498.
Coppin, P., & Bauer, M. E. (1996). Change detection in forest ecosystems with remote sensing digital imagery digital change detection in temperate forests. *Remote Sensing Reviews*, 13, 207–234.

DeFries, R., Achard, F., Brown, S., Herold, M., Murdiyarso, D., Schalamadinger, B., & De Souza, C. (2006). Reducing greenhouse gas in temperate forests. *Remote Sensing Reviews*, 13, 207–234. Emissions from Deforestation in developing countries: Considerations for monitoring and measuring, report of the Global Terrestrial Observing System (GTOS) Number 46, GOFC-GOLD report 26 (p. 23). Roma, Italia.

FAO. (2010). Global forest resources assessment 2010. Main Report. Fao Forestry Paper 163 (p. 378). Roma, Italia.

Free Software Foundation. What is free Software. Recuperado de: <http://www.fsf.org/about/what-is-free-software>.

Fung, T., & Ledrew, E. (1987). Application of Principal Components Analysis to change detection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(12), 1649–1658. 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, GOFC-GOLD Report version COP14-2. (F. Achard, S. Brown, R. De Fries, G. Grassi, M. Herold, D. Mollicone, Pandey, D. & C. J. Souza, Eds.) (p. 185). Alberta, Canada.

GOFC-GOLD. (2014). A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. GOFC-GOLD Report version (p. 243). Países Bajos: Wageningen University Hansen, M. C., & Loveland, T. R. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 66–74.

Harris, N. L., Brown, S., Hagen, S. C., Saatchi, S. S., Petrova, S., Salas, W., Hansen, M., Potapov, P. & Lotsch, A. (2012). Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. *Science*, 336(6088), 1573–1575.

Hassan, R., Scholes, R., & Ash, N. (2005). Ecosystems and Human Well-being : Current State and Trends , Millennium Ecosystem Assessment Series, Volume 1. Ecosystems and Human Well-being : Current State and Trends (p. 47). Washington, D.C., EEUU.: Island Press.

Hayes, D. J., & Sader, S. A. (2001). Comparison of change detection techniques for monitoring tropical forest clearing and vegetation regrowth in a time series. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(9), 1067–1075.

Helmer, E. H., & Ruefenacht, B. (2007). A comparison of radiometric normalization methods when filling cloud gaps in Landsat imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 33(4), 325–340.

Houghton, R. a. (2005). Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology*, 11(6), 945–958.

Houghton, R.A. (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(6):597–603

IPCC, (2007). *Climate Change 2007 The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, Miller, H. & Z. Chen, Eds.) (p. 996). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

Liu, C., Frazier, P., & Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 606–616.
Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. 2002. Definición de Bosque para proyectos de uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura para el primer período de compromiso. (19 p). Bogotá D.C., Colombia.

Muchoney, D. M., & Haack, B. N. (1994). Change Detection for Monitoring Forest Defoliation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(10), 1243–1251.
NASA, (2014). Landsat Sciencs Recuperado de: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>.

Olander, L., Gibbs, H., Steininger, M., Swenson, J., & Murray, B. C. (2007). Data and methods to estimate national historical deforestation baselines in support of UNFCCC REDD. Durham, USA: Duke University. Recuperado de: <http://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/data-and-methods-to-estimate-national-historical-deforestation-baselines-in-support-of-unfccc-redd-paper.pdf>

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. a. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57.

Olofsson, P., Foody, G. M., Stehman, S. V., & Woodcock, C. E. (2013). Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129, 122–131.

Olthof, I., Pouliot, D., Fernandes, R., & Latifovic, R. (2005). Landsat-7 ETM+ radiometric normalization comparison for northern mapping applications. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 388–398.

Open Source Initiative (2014). The Open Source Definition. Recuperado de: <http://opensource.com/resources/what-open-source>.

- Pan, Y., Birdsey, R. a, Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W., Phillips, O, Shvidenko, A., Lewis, S., Canadell, J., Ciais, P., Jackson, R., Rautiainen, A., Sitch, S. & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–93.
- Potapov, P., Yaroshenko, A., Turubanova, S., Dubinin, M., Laestadius, L., Thies, C., Aksenov, D., Egorov, A., Yesipova, Y., Glushkov, I., Karpachevskiy, M., Kostikova, A., Manisha, A. & Tsybikova, E. (2008). Mapping the World ' s Intact Forest Landscapes by Remote Sensing. *Ecology and Society*, 13(2), 51.
- Potapov, P. V., Turubanova, S. a., Hansen, M. C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L. & Justice, C. O. (2012). Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000–2010, with Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 106–116.
- Puyravaud, J.-P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 593–596.
- Ramírez, S., Ramírez, M., Galindo, G. & Espejo, O. (2014). Evaluación de la exactitud temática del mapa de cambio de Bosque para la región amazónica colombiana en el periodo 2010-2012. En: *Memorias XVI Simposio Internacional SELPER* (Septiembre 29 – octubre 3 de 2014). Medellín, Colombia: SELPER.
- Saatchi, S. S., Houghton, R. a., Dos Santos Alvalá, R. C., Soares, J. V., & Yu, Y. (2007). Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 13(4), 816–837.
- Souza Moreira, C., & Siquieria Nascimento, J. (2013). ImgTools: a software for optical remotely sensed data analysis Carlos. In *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR* (pp. 1571–1578). Foz do Iguaçu - Brasil: INPE.
- Théau, J. (2012). Change Detection. In W. Kresse & D. M. Danko (Eds.), *Springer Handbook of Geographic Information* (Vol. 1, pp. 75–94). Springer.
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 106–115.
- Verbesselt, J., Zeileis, A., & Herold, M. (2012). Near real-time disturbance detection using satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 123, 98–108.
- Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83–94.

GLOSARIO

Banda. Cada uno de los intervalos en los cuales el sensor remoto divide el espectro electromagnético para generar una imagen multi-espectral. Este concepto es aplicado generalmente a imágenes de tipo óptico.

Escena. Porción de las imágenes tomadas por el sensor delimitada por un área generalmente rectangular y fija definida por el distribuidor. Ya que los datos de sensores remotos se toman para grandes áreas o franjas alrededor de la tierra, cada sistema satelital define una grilla que subdivide la superficie terrestre en zonas rectangulares. Cada una de estos rectángulos corresponde a una escena y en muchos tipos de imagen tienen un código establecido que identificará a esa porción de la superficie terrestre. Las imágenes tomadas por el sensor son cortadas y distribuidas siguiendo los límites definidos por estas grillas.

Imagen de satélite. Representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen información reflejada para la superficie de la tierra que luego es enviada a la Tierra y que procesada convenientemente entrega valiosa información sobre las características de la zona que cubre.

Imagen multi-espectral. Se produce por la combinación de imágenes que registran diferentes longitudes de onda o bandas espectrales.

Nivel Digital – ND. Se trata del valor numérico discreto asignado por el sistema formador de imágenes a cada celda, en respuesta a la irradiancia recibida sobre el plano focal del sensor. Se le conoce así mismo como nivel de gris, luminancia, número digital, valor de pixel, etc. Existe una relación lineal entre el ND grabado y la radiancia correspondiente a cada celda de terreno.

Nivel de Reflectancia. Valor numérico que representa una medida de la energía radiante o flujo radiante que es reflejado por un material o una superficie como función de la longitud de onda de dicha energía o flujo.

Píxel. Unidad básica de información gráfica que se refiere a cada uno de los puntos indivisibles que conforman una imagen, es decir, la mínima área de captura en el formato Raster.

Resolución. Nivel de detalle con el que se es posible identificar los elementos sobre las imágenes y se relaciona con la unidad mínima de almacenamiento de datos o píxel.

Resolución espacial. Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen; suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la imagen. Se mide en unidades de longitud definida como el número de píxeles por unidad de medida (milímetros sobre la imagen o metros sobre el terreno) y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.

Resolución espectral. Longitudes de onda en las cuales un sensor es capaz de adquirir información. La fotografía puede ofrecer películas pancromáticas, infrarrojo blanco negro, color natural o infrarrojo color.

Resolución radiométrica. Cantidad de energía que se puede medir en una escala radiométrica en el sensor. En el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris recogido por el mismo. Para evaluar la calidad radiométrica se evalúa un parámetro denominado "bit number".

Resolución temporal. Es una medida de la frecuencia con la que un satélite es capaz de obtener imágenes de una determinada área. También se denomina periodo de revisita. Es útil cuando se quieren realizar estudios multitemporales o evolutivos. Valores radiométricos. Radiación electromagnética reflejada por un elemento de superficie terrestre en un determinado rango del espectro, y se convierte en un valor numérico que depende de la resolución radiométrica.

FE DE ERRATAS

Con el fin de brindar una mayor claridad en algunos de los conceptos y procesos descritos en el texto, se incluyen las siguientes aclaraciones y ajustes en algunos de los apartados del documento.

4. PROCESO METODOLÓGICO

Página 35: Para mayor claridad se presentan a continuación las definiciones de las clases del mapa de cambio listadas en el texto y los códigos numéricos correspondientes que se emplean en el SMByC:

1. Bosque Estable: Superficie que permanece cubierta por bosque natural tanto al inicio como al final del periodo de análisis.
2. Deforestación: Es la conversión directa y/o inducida de la cobertura de bosque a otro tipo de cobertura en un periodo de tiempo determinado.
3. Sin Información: Es la superficie que no fue posible interpretar en el momento de análisis debido a la presencia de nubes, sombras o vacíos en la imagen de satélite.
4. Regeneración: Recuperación de la cobertura de bosque de zonas donde no estaba presente en fechas anteriores.
5. No Bosque Estable: Superficie que permanece con una cobertura distinta a la de bosque natural, tanto al inicio como al final del periodo de análisis.

Página 35: sección 4.3.3 Control de calidad y ajustes durante el proceso. Se omite la línea “¿4. Procesamiento Digital?”. Corresponde a un error de imprenta y no está incluida dentro de las etapas de seguimiento

4.5 Reporte de los datos de superficies de Bosque y deforestación

Páginas 44 – 45, Apartado 4.5. Teniendo en cuenta que la información generada con la implementación del protocolo es el insumo para calcular los indicadores establecidos por el IDEAM: *Proporción de la superficie cubierta por Bosque natural*, *Cambio en la superficie cubierta por Bosque natural* y *Tasa anual de deforestación*, se ajusta y actualiza la información incluida en el apartado 4.5, respecto a las definiciones, fórmulas y notación, acordes con lo establecido para dichos indicadores.

Proporción de la superficie cubierta por bosque natural: Establece la razón entre el área cubierta por bosque natural respecto al área total de la unidad espacial de referencia j , en el tiempo t . Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$PSBN_{jt} = \left(\frac{SCBN_{jt}}{AUER_{jt}} \right) \times 100$$

Donde,

$PSBN_{jt}$: Proporción de la superficie cubierta por bosque natural en la unidad espacial de referencia j , en el tiempo t .

$SCBN_{jt}$: Superficie en hectáreas (ha) cubierta por bosque natural en la unidad espacial de referencia j , en el tiempo t .

$AUER_{jt}$: Superficie en hectáreas (ha) de la unidad espacial de referencia j , en el tiempo t .

La superficie cubierta por bosque natural en la unidad espacial de referencia j , en el tiempo t ($SCBN_{jt}$) se calcula con la siguiente fórmula:

$$SCBN_{jt} = nBN_{jt} * A$$

Donde,

nBN_{jt} : Total de píxeles clasificados como bosque (ver sección 4.3) dentro de la unidad espacial de referencia j en el tiempo t

A : Área en hectáreas de cada pixel

Cambio en la superficie cubierta por Bosque natural: Es el promedio anual de la diferencia entre la superficie de bosque regenerado (ganancia) y la superficie de bosque deforestado (pérdida) en la unidad espacial de referencia j , entre los años $t1$ y $t2$. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$CSBN_{j(t1:t2)} = \frac{SR_{j(t1:t2)} - SD_{j(t1:t2)}}{t2 - t1}$$

Donde,

$CSBN_{j,(t1:t2)}$: Cambio de la superficie cubierta por bosque natural en la unidad espacial de referencia j , ocurrido entre los años $t1$ y $t2$ del periodo de análisis, expresado en hectáreas (ha).

$SR_{j,(t1:t2)}$: Superficie regenerada en la unidad espacial de referencia j entre los años $t1$ y $t2$ del periodo de análisis, expresada en hectáreas (ha).

$SD_{j,(t1:t2)}$: Superficie deforestada en la unidad espacial de referencia j entre los años $t1$ y $t2$ del periodo de análisis, expresada en hectáreas (ha).

$t1$ y $t2$: Año inicial ($t1$) y final ($t2$) del periodo de análisis.

La superficie regenerada en la unidad espacial de referencia j entre los años $t1$ y $t2$ ($SR_{j,(t1:t2)}$) y la superficie deforestada en la unidad espacial de referencia j entre los años $t1$ y $t2$ ($SD_{j,(t1:t2)}$) se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$SR_{j,(t1:t2)} = nR_{j,(t1:t2)} * A$$

$$SD_{j,(t1:t2)} = nD_{j,(t1:t2)} * A$$

Donde,

$nR_{j,(t1:t2)}$: Total de píxeles clasificados como “Regeneración” (ver sección 4.3) dentro de la unidad espacial de referencia j para el periodo $t1:t2$

$nD_{j,(t1:t2)}$: Total de píxeles clasificados como “Deforestación” (ver sección 4.3) dentro de la unidad espacial de referencia j para el periodo $t1:t2$.

A : Área en hectáreas de cada pixel.

Tasa anual de deforestación: Es la variación de la superficie cubierta por bosque natural, en una determinada unidad espacial de referencia j , entre el año inicial $t1$ y el año final $t2$. La fórmula empleada para el cálculo del indicador es la propuesta por Puyravaud (2003):

$$TD_{j,(t1:t2)} = \left(\left(\frac{1}{t2 - t1} \right) * \ln \left(\frac{SCBE_{j,(t1:t2)}}{(SCBE_{j,(t1:t2)} + SD_{j,(t1:t2)})} \right) \right)$$

Dónde,

$TD_{j,(t1:t2)}$: Tasa anual de deforestación de la unidad espacial de referencia j , entre los años $t1$ y $t2$.

$SCBE_{j,(t1:t2)}$: Superficie de bosque estable en la unidad espacial de referencia j entre los años $t1$ y $t2$, expresada en hectáreas (ha).

$SD_{j,(t1:t2)}$: Superficie deforestada en la unidad espacial de referencia j entre los años $t1$ y $t2$ del periodo de análisis, expresada en hectáreas (ha).

$t1$ y $t2$: Años inicial ($t1$) y final ($t2$) del periodo de análisis.

La Superficie deforestada en la unidad espacial de referencia j entre los años $t1$ y $t2$ ($SD_{j,(t1:t2)}$) y la Superficie de bosque estable en la unidad espacial de referencia j entre el año $t1$ y $t2$ ($SCBE_{j,(t1:t2)}$) se calcula con la siguiente fórmula:

$$SD_{j,(t1:t2)} = nD_{j,(t1:t2)} * A$$

$$SCBE_{j,(t1:t2)} = nBE_{j,(t1:t2)} * A$$

Donde,

$nD_{j,(t1:t2)}$: Total de píxeles clasificados como “Deforestación” (ver sección 4.3) dentro de la unidad espacial de referencia j para el periodo $t1:t2$

$nBE_{j,(t1:t2)}$: Total de píxeles clasificados como “Bosque Estable” (ver sección 4.3) dentro de la unidad espacial de referencia j para el periodo $t1:t2$

Para todos los indicadores las unidades espaciales de referencia j corresponden a las unidades de desagregación geográfica nacional, departamental, corporaciones autónomas regionales y otras que se consideren pertinentes, acordes con la escala a la cual se genera la información (1:100.000).