

# Memorias



Sociedad Latinoamericana en  
Percepción Remota y Sistemas  
de Información Espacial  
Capítulo Colombia

**30**  
AÑOS

Medellín, Colombia  
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014



Evaluación de la exactitud temática del mapa de cambio de bosque para la región  
amazónica colombiana en el periodo 2010-2012

Salomón Ramírez<sup>1\*</sup>, Mauricio Ramírez<sup>2\*</sup>

Gustavo Galindo<sup>3+</sup> Oscar Espejo<sup>4+</sup>

\*Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, Centro de Investigación y Desarrollo en  
Información Geográfica – CIAF, Grupo de Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas,  
Carrera 30 No. 48 - 51 Bogotá D.C, Colombia

<sup>1</sup>[salomon.ramirez@igac.gov.co](mailto:salomon.ramirez@igac.gov.co), <sup>2</sup>[hmramirez@Igac.gov.co](mailto:hmramirez@Igac.gov.co)

<sup>+</sup>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Subdirección de  
Ecosistemas e Información Ambiental, Proyecto de Consolidación de un Sistema de  
Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC), como soporte a la Política Ambiental y de  
Manejo en Colombia

<sup>3</sup>[ggalindo@ideam.gov.co](mailto:ggalindo@ideam.gov.co), <sup>4</sup>[oespejo@ideam.gov.co](mailto:oespejo@ideam.gov.co)

**Palabras Clave:** cambio de coberturas terrestres, deforestación, estimación estratificada,  
evaluación exactitud, muestreo estratificado, análisis incertidumbre.

**Resumen:** En el presente estudio fueron aplicadas un conjunto de buenas prácticas para la  
evaluación de exactitud temática de mapas de cambio de cobertura terrestre, propuestas por  
investigadores de la Universidad Boston, en la evaluación de la exactitud de la clasificación  
del mapa de cambio de bosque en la región amazónica de Colombia a escala 1:100.000 para  
el periodo 2010–2012. Los objetivos del estudio comprendieron, además de aplicar las  
buenas prácticas anteriormente enunciadas, estimar la exactitud de la clasificación del mapa  
de cambio mediante medidas de fiabilidad insesgadas a partir de la proporción de área de  
cada clase y contrastar los resultados obtenidos con respecto a las medidas de fiabilidad

estimadas bajo el enfoque de evaluación tradicional basado en la matriz de error de recuentos. En ambos casos, la exactitud general del mapa fue favorable con un valor alrededor del 95%. Sin embargo, se evidenció que bajo el enfoque tradicional las exactitudes del productor para clases estables de bosque/no bosque fueron subestimadas, mientras que la exactitud de la clase de cambio deforestación fue sobreestimada, existiendo una diferencia significativa en esta última. Los resultados sugieren que es incorrecto estimar directamente la exactitud temática del mapa mediante una matriz de error tradicional.

**Key words:** Land cover change, deforestation, stratified estimation, accuracy assessment, uncertainty analysis

**Abstract:** In the present study were applied a set of good practices for the assessment of thematic accuracy of maps of land cover change, proposed by researchers at Boston University, in assessing the accuracy of classification change map forest in the Amazon region of Colombia at 1:100,000 for the period 2010-2012. The objectives of the study, in addition to implementing good practices outlined above, estimating the accuracy of the classification change map using unbiased measures of reliability in terms of proportion of area for each class, and compare the results obtained with respect to the measures estimated under the traditional evaluation approach based on the error matrix of counts. In both cases, the overall accuracy of the map was favorably with a value around 95%. However, it was shown that under the traditional approach of the producer accuracies for stable classes of forest/non-forest were underestimated, while the accuracy of the class deforestation rate

was overestimated, there is a significant difference in the latter. The results suggest that it is incorrect to directly estimate the thematic map accuracy using a traditional error matrix.

## **1. Introducción**

Los cambios en la cobertura terrestre, generan diversos impactos en una amplia variedad de propiedades y procesos del sistema ambiental, los efectos de dichos cambios se perciben en un amplio espectro de subsistemas ambientales. La deforestación actúa como una fuente emisora de carbono hacia la atmósfera, provocando una mayor erosión del suelo, reduciendo la extensión del hábitat, así como la disminución de las especies y contribuyendo al desplazamiento de los asentamientos humanos (Olofsson *et al.* 2013).

Dada la importancia de los efectos causados por el cambio en la cobertura terrestre para el bienestar social, ha aumentado a nivel internacional el interés tanto científico como político en cualificar y cuantificar dichos cambios. En Colombia, el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) inicialmente implemento en el marco del proyecto “Capacidad institucional técnica y científica para apoyar proyectos de reducción de emisiones por deforestación y degradación (REDD) en Colombia”, el monitoreo de bosques y carbono en el país para el periodo comprendido entre 1990 y 2010, dichos resultados son la base del actual Proyecto Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC), que establece porcentajes de deforestación a nivel nacional y mapea las áreas de bosque natural y sus cambios.

Durante la implementación de este proyecto se han adoptado tecnologías de adquisición, procesamiento y análisis de datos satelitales que permiten definir áreas deforestadas

mediante un protocolo de procesamiento digital para la cuantificación de la deforestación a nivel nacional en escala gruesa (1:500.000) y fina (1:100.000), el cual incluye: (i) la selección y descarga de las imágenes; (ii) calibración radiométrica y corrección atmosférica; (iii) corrección geométrica; (iv) clasificación inicial de coberturas Bosque/No Bosque; (v) ajuste temático adicional; (vi) generación del mapa de cambios (deforestación/regeneración); en la cobertura de bosque (vii) detección de tipos de coberturas en áreas de cambios; y finalmente (viii) la evaluación de la calidad temática de los mapas de Bosque/No Bosque y del mapa de Cambio de Bosque (Cabrera *et al.*, IDEAM, 2011).

Una aproximación tradicional bien conocida y frecuentemente usada para realizar la evaluación de calidad temática de los mapas derivados de procesos de clasificación automática, es estimar su exactitud directamente a partir de la proporción de observaciones clasificadas correctamente, mediante un recuento aciertos/desaciertos de las clases en una matriz de error (Chuvieco 2010; Tso & Mather 2009). El principal beneficio de usar esta aproximación como medida de fiabilidad es su simplicidad, siendo fácil de calcular, fácil de entender y útil para interpretar (Pontius & Millones 2011).

Sin embargo, varios estudios sobre cambios en las coberturas de la tierra han mostrado, que es incorrecto estimar directamente la exactitud de un mapa final de cambio, a partir del recuento de observaciones mediante una matriz de error (Abdulaziz *et al.* 2009; Jeon *et al.* 2014; Olofsson *et al.* 2010, 2011; Seto *et al.* 2002). Por lo tanto, los estudios de cambio de coberturas de la tierra habitualmente fallan al evaluar la exactitud de los mapas finales de cambio (Olofsson *et al.* 2014).

Para superar las limitaciones impuestas por el enfoque tradicional de evaluación exactitud temática de mapas de cambio de coberturas de la tierra, investigadores de la Universidad de Boston (Olofsson *et al.* 2014, 2013) proponen seguir una serie de recomendaciones y consideraciones, que han sido aceptadas por la comunidad de sensores remotos como buenas practicas. De acuerdo con estas, una persona o institución independiente al productor debe verificar la exactitud temática de los productos que se generen en la elaboración de mapas de Bosque/No Bosque y del mapa de Cambio de Bosque, abordando principalmente tres componentes: (i) un diseño de muestreo probabilístico; (ii) un diseño de la respuesta que sea coherente con la información de referencia a usar; y (iii) un análisis para estimar la exactitud, a partir una matriz de error construida mediante estimadores insesgados.

En el año 2012 se publicaron los resultados obtenidos en el proyecto SMBYC del IDEAM, donde se presentan tasas de deforestación para Colombia reportadas en el periodo 2010–2012, resultados que muestran que en el país se presentó una reducción de la tasa anual de deforestación, resultados que pretenden servir de herramienta para identificar los posibles factores que influyen en la deforestación y determinar la viabilidad de los procesos de planificación del territorio.

Siguiendo las buenas practicas establecidas por los investigadores de la Universidad de Boston, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – (IGAC) a través del Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), realizó la evaluación de la exactitud temática del mapa de Cambio de Bosque para Colombia para el periodo 2010–

2012, en cabeza del Grupo Interno de Trabajo (GIT) de Sensores Remotos y Aplicaciones Geográficas.

Bajo este contexto, los objetivos del presente trabajo son: (i) aplicar las buenas prácticas enunciadas anteriormente en la evaluación de la exactitud temática de la clasificación del mapa de cambio de bosque/no bosque en la región amazónica de Colombia en el periodo 2010–2012, (ii) estimar la exactitud de la clasificación mediante medidas de fiabilidad insesgadas, y (iii) contrastar los resultados obtenidos con respecto a las medidas de fiabilidad estimadas bajo enfoque de evaluación tradicional.

El resto del artículo está organizado como sigue: En la sección 2 se describe el área de estudio, los datos y los métodos empleados durante el mismo. La sección 3 presenta los resultados de este estudio y su discusión. En la sección 4 se formulan las conclusiones derivadas del estudio.

## **2. Datos y métodos**

### **2.1 Área de estudio**

El estudio fue realizado sobre la porción de área continental, del territorio colombiano, correspondiente a la región Amazónica biogeográfica (Figura 1). La Amazonia colombiana se encuentra localizada al suroriente del país, con una extensión de 461.147 km<sup>2</sup> (Cabrera *et al.*, IDEAM, 2011), conformada por los departamentos de Amazonas, Guainía, Guaviare, y Vaupés, y parte de los departamentos de Caquetá, Cauca, Nariño, Meta, Putumayo y Vichada.



Figura 1. Área de estudio

En esta región, no existen accidentes geográficos notables, siendo bastante homogéneo su relieve. La mayor parte de la región presenta un régimen de lluvias monomodal, recibiendo entre 3.000 y 4.500 mm por año con frecuencias anuales entre 200 y 220 días de lluvia, donde los meses de diciembre y enero son los más lluviosos. La distribución de la temperatura media del aire es muy uniforme, con valores entre 24 °C y 28 °C. (IDEAM 2001, 2005).

## 2.2 Datos

Los datos usados en el estudio corresponden a: (i) el mapa de cambio de Bosque/No Bosque a nivel nacional en escala fina (1:000.000) para el periodo 2010-2012, recortado a la extensión geográfica cubierta por la región biogeográfica amazónica colombiana (Figura 2). Mapa elaborado por el proyecto REDD del IDEAM en el marco del SMBYC aplicando métodos de procesamiento digital automático y semiautomático. Este mapa corresponde a una estructura de datos raster, con 4 bits de profundidad, tamaño de pixel 30 metros. Las áreas del mapa se encuentran discriminadas en: 39,496,586 Ha (418,602,964 pixeles) de Bosque estable (BQ), 5,592,161 Ha (59,268,293. pixeles) de No Bosque estable (NB), 139,077 Ha (1,474,004 pixeles) de Deforestación (DF) y 76 Ha (807 pixeles) de Regeneración (RG); el área restante corresponde a zonas sin información (SI) que comprenden 886,799 Ha.

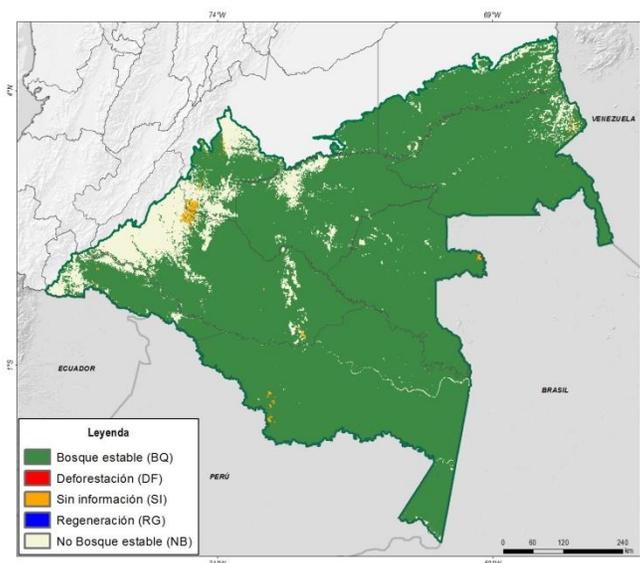


Figura 2. Mapa de cambio Bosque/No Bosque de la amazonia colombiana para el periodo 2010-2012

(ii) Como fuentes de datos de referencia se emplearon las imágenes del sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) del satélite Landsat 7 (Figura 3), utilizadas en la elaboración del mapa de bosque/No Bosque tanto para el periodo 2010 como para el periodo 2012, con cobertura del 100% del territorio evaluado, con las siguientes características: tamaño de pixel de 30 metros, 6 canales espectrales con profundidad de pixel de 16 Bits, cuyos niveles digitales corresponden a valores de reflectancia.

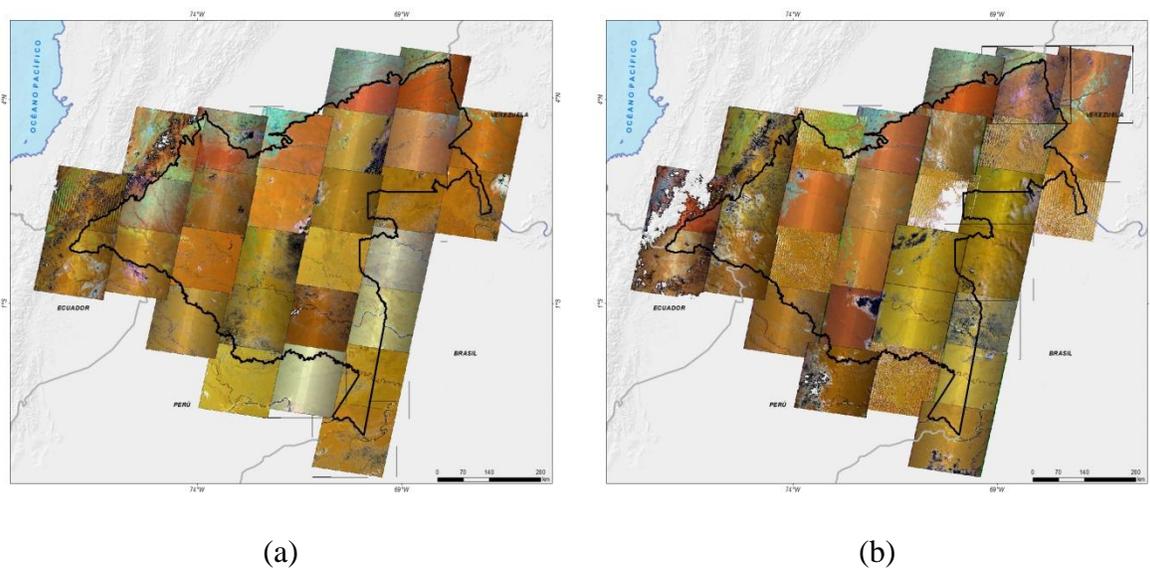


Figura 3. Imágenes del sensor ETM+ del satélite Landsat 7: (a) año 2010 y (b) año 2012

### 2.3 Metodología

El estudio fue abordado siguiendo las buenas practicas propuestas por Olofsson et al.(2013, 2014) mediante el desarrollo de 3 fases metodológicas, cada una de las cuales comprendió una serie de pasos, que se describen a continuación y se presentan en la Figura 4.

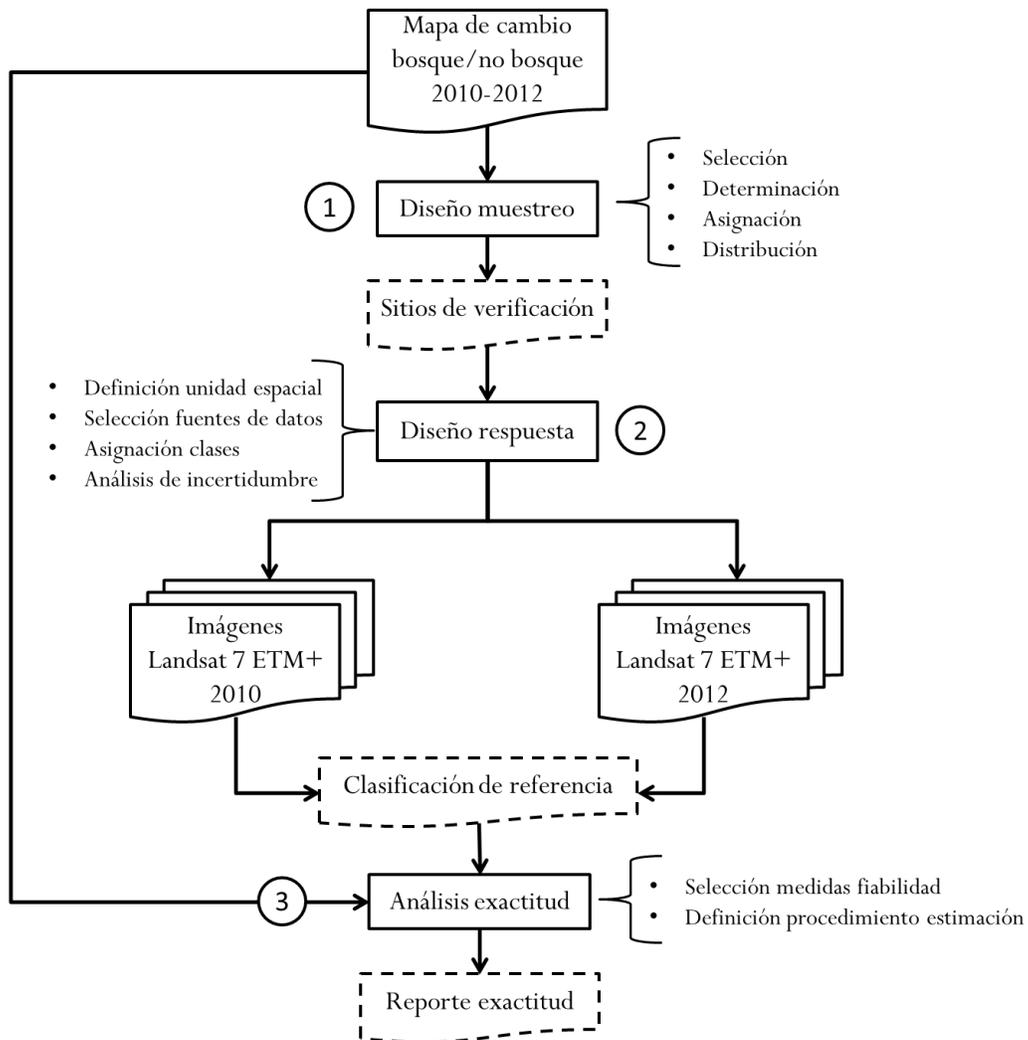


Figura 4. Diseño metodológico

En la primera fase, se implementó un diseño de muestreo probabilístico sobre el mapa de cambio a evaluar, que incluyó:

(i) Selección del tipo de muestreo; para lo cual se consideró por lo general las clases de cambio ocupan una pequeña porción del territorio, siendo necesario identificarlas y asignarles un tamaño de muestra lo suficientemente grande como para obtener un error estándar pequeño en la estimación de la exactitud del usuario, por lo tanto se eligió el

diseño estratificado, por permitir asignar un tamaño de muestra a cada clase, que garantice la obtención de una estimación exacta en cada una de ellas. Durante el estudio tan solo se consideraron tres estratos, correspondientes a las clases del mapa: BQ, DF y NB; excluyendo así la clase RG debido a su baja proporción con respecto al área de estudio, lo que dificulta asignar un tamaño de muestra representativo para obtener un error estándar pequeño.

(ii) Determinación del tamaño de la muestra; de acuerdo con el tipo de muestreo elegido previamente se aplicó la Ecuación 1 (Cochran, 1977), para la cual se tiene que  $W_i$  es la proporción de área mapeada de la clase  $i$ , siendo  $W_i = A_{m,i} \div A_{tot}$ , con  $A_{m,i}$  como el área mapeada de la clase  $i$  y  $A_{tot}$  el área total de las clases evaluadas en el mapa;  $S_i$  es la desviación estándar de la clase  $i$ , siendo  $S_i = \sqrt{U_i(1 - U_i)}$ , con  $U_i$  como la exactitud esperada de usuario para la clase  $i$  y  $S(\hat{O})$  es el error estándar esperado de la exactitud general.

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

Considerando los principios orientadores del establecimiento de un sistema de monitoreo de la cobertura forestal (sólido, robusto, confiable y transparente), para la exactitud general del mapa se asumió un error estándar esperado de 0.01. Por otra parte, en base a las experiencias de diversos estudios sobre cambios en las coberturas de la tierra (*Abdulaziz et al. 2009; Jeon et al. 2014; Olofsson et al. 2010, 2011, 2014, 2013; Seto et al. 2002*), que han mostrado que los errores de comisión para las clases de cambio son más altos que los cometidos en las clases estables, se asumió una exactitud de usuario para la clase de cambio

correspondiente a deforestación de 0.60, mientras que para las clases estables esta fue asumida de 0.95 para Bosque y 0.90 para No Bosque, obteniendo así un tamaño de muestra (n) de 524 unidades espaciales.

(iii) Distribución espacial de los sitios de verificación; la cual se realizó de manera aleatoria para cada estrato, con una distancia mínima de separación entre sitio y sitio de verificación de 1 Km, para garantizar el supuesto de independencia de la muestra (Congalton & Green 2008). Al estrato de cambio deforestación se asignó un tamaño de muestra de 50 sitios de verificación, siguiendo la regla general propuesta por Congalton (1991) que indica que para áreas inferiores a 404,685.642 Ha dicho tamaño parece ser apropiado; el resto de la muestra se distribuyó balanceadamente entre los estratos estables en función de su área, con una asignación de 414 sitios de verificación para Bosque y 60 para No Bosque.

Durante la segunda fase, se implementó el diseño de un protocolo de respuesta basado en las fuentes de datos de referencia, para garantizar la representatividad tanto espacial como temporal en la clasificación de cada sitio de evaluación, el cual comprendió:

(i) Definición de la unidad espacial a evaluar, siendo elegida una superficie cuadrada (polígono) de 1 Ha, cuya superficie correspondía a una misma clase a evaluar del mapa, equivalente a la unidad mínima de mapeo empleada en la elaboración del mapa.

(ii) Selección de las fuentes de datos usadas para determinar la clasificación de referencia, correspondiendo estas a las mismas imágenes empleadas para la elaboración de los mapas de Bosque/No Bosque tanto para el año 2010 como para el año 2012 (ver Datos).

(iii) Asignación de etiquetas de referencia; considerando que las fuentes de datos utilizadas tanto para la elaboración del mapa como para la clasificación de referencia son las mismas, para garantizar que su calidad de fuera más alta que la del mapa, la asignación de las etiquetas de clase a cada unidad de evaluación, se realizó mediante interpretación visual por parte de tres intérpretes aislados entre sí, cada uno de los cuales realizó la interpretación de manera independiente, de la totalidad de unidades espaciales evaluadas, asignando la clase correspondiente a la superficie predominante en dicha unidad. Se realizó un entrenamiento previo con cada intérprete, para unificar los conceptos deforestación y bosque, así como su identificación en las imágenes de satélite empleadas para los años de referencia (Figura 5), puesto que la interpretación visual, en ocasiones puede resultar subjetiva dependiendo de la experticia de cada intérprete.

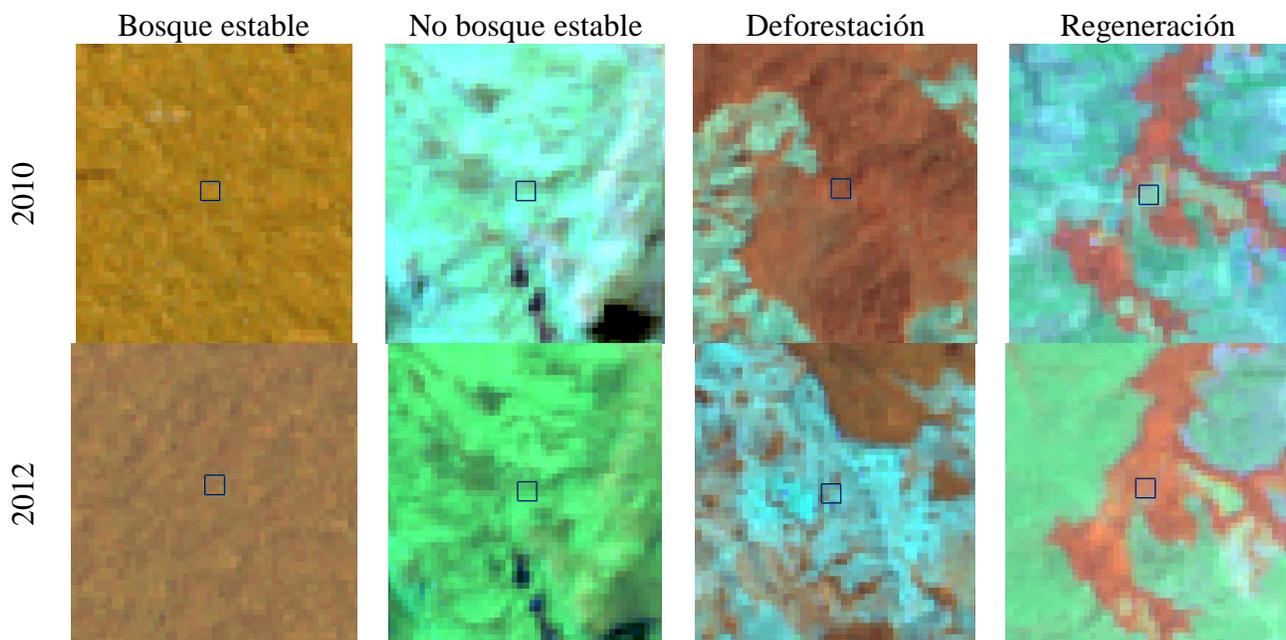


Figura 5. Identificación visual de clases estables y de cambio sobre imágenes Landsat 7 en composición RGB453 para el periodo 2010-2012

(iv) Análisis de incertidumbre de la clasificación de referencia, considerando que es humano errar y que este aspecto de la conducta humana se extiende a la clasificación de referencia (Tso & Mather 2009), esta está sujeta a incertidumbre, por lo tanto una vez se contó con la clasificación de la totalidad de unidades evaluadas, fue llevada a cabo una evaluación de la variabilidad de la interpretación a partir de niveles de acuerdo, puesto que pequeños errores en el conjunto de datos de referencia pueden dar lugar a grandes sesgos en los estimadores de exactitud de la clasificación (Olofsson *et al.* 2014).

La variabilidad en la interpretación es entendida, como la diferencia entre la clase de referencia asignada a la misma unidad espacial por diferentes intérpretes. Dado que es probable la existencia de desacuerdos entre los intérpretes cuando evalúan la misma unidad de muestreo y teniendo en cuenta que en este caso se contó con tres intérpretes se definieron los siguientes niveles de acuerdo: (1) desacuerdo total, cuando ninguno de los intérpretes coincidió en la clase de referencia asignada, (2) parcialmente de acuerdo, cuando tan solo dos intérpretes coincidieron en la clase de referencia asignada; y (3) totalmente de acuerdo, cuando los tres intérpretes coincidieron en la clase de referencia asignada. En todos los casos en que por lo menos dos intérpretes coincidieron, se asumió dicha clase como clase de referencia, mientras que aquellos casos en que existió desacuerdo total, este fue resuelto mediante reinterpretación de dichas unidades de la muestra por parte de los mismos intérpretes.

La tercera fase consistió en la implementación de un protocolo análisis, que abarcó:

(i) Selección de las medidas a utilizar para expresar la exactitud del mapa; siendo estas la exactitud del usuario ( $\hat{U}_i$ ) dada por la Ecuación 2, la exactitud del productor ( $\hat{P}_j$ ) dada por la Ecuación 3, y la exactitud general del mapa ( $\hat{O}$ ) dada por la Ecuación 4; donde  $\hat{p}$  es un estimador insesgado de la proporción de superficie en la celda  $i, j$  de la matriz de error (Ecuación 5).

$$\hat{U}_i = \frac{\hat{p}_{ij}}{\hat{p}_i} \quad (2)$$

$$\hat{P}_j = \frac{\hat{p}_{jj}}{\hat{p}_j} \quad (3)$$

$$\hat{O} = \sum_{j=1}^q \hat{p}_{jj} \quad (4)$$

$$\hat{p}_{i,j} = w_i \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (5)$$

Adicionalmente, para efectos de comparación también se realizó la estimación de las medidas de fiabilidad de manera directa a partir de la matriz tradicional de recuentos (Ecuaciones 6-8).

$$U_i = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (6)$$

$$P_j = \frac{n_{jj}}{n_j} \quad (7)$$

$$O = \frac{\sum_{j=1}^q n_{jj}}{n} \quad (8)$$

(ii) Definición del procedimiento para estimar las medidas seleccionadas; siendo este llevado a cabo mediante la construcción de una matriz de error tradicional a partir del

recuento ( $n_{ij}$ ) de las unidades de la muestra en cada celda  $i, j$  de la matriz de error. Posteriormente, se calcularon las proporciones de área en cada celda  $i, j$  de la matriz de error. Finalmente, se estimó la exactitud de usuario ( $\hat{U}_i$ ), la exactitud del productor ( $\hat{P}_j$ ) y la exactitud general del mapa ( $\hat{O}$ ).

### 3 Resultados y discusión

En la Tabla 1, se resume la información considerada durante el cálculo del tamaño de la muestra de validación y su asignación a cada estrato, donde se incluye para cada clase  $i$  considerada en la evaluación, el área en el mapa expresada en hectáreas (Ha), la proporción de área mapeada ( $W_i$ ), la exactitud esperada de usuario ( $U_i$ ), la desviación estándar esperada ( $S_i$ ) y el tipo de asignación considerado para cada estrato.

Al respecto, se descartó el tipo de asignación proporcional, puesto que la asignación de las unidades de la muestra a la clase de cambio no era lo suficientemente grande, como para obtener un error estándar pequeño en la estimación de la exactitud del usuario; por otra parte también se descartó la asignación equitativa, puesto que se evidenció un desbalance en la muestra asignada a cada estrato, siendo esta subasignada para las clases estables y sobreasignada para la clase de cambio.

Tabla 1. Asignación de tamaño de la muestra a los estratos

| Clases | Área Ha    | $W_i$ | $U_i$ | $S_i$ | Proporcional | Equitativo | Balanceado |
|--------|------------|-------|-------|-------|--------------|------------|------------|
| BQ     | 39,496,586 | 0.873 | 0.95  | 0.30  | 458          | 175        | 414        |
| DF     | 139,077    | 0.003 | 0.60  | 0.46  | 2            | 174        | 50         |
| NB     | 5,592,161  | 0.123 | 0.90  | 0.30  | 64           | 175        | 60         |
| Total  | 45,227,825 |       |       |       | 524          | 524        | 524        |

En este sentido, se eligió el tipo de asignación balanceado, por permitir asignarle a la clase cambio un tamaño de muestra lo suficientemente grande y distribuir el resto de la muestra proporcionalmente en las clases estables en función de su proporción de área.

Tan pronto como se obtuvo la totalidad de la clasificación de referencia, por parte de los tres intérpretes elegidos, se llevó a cabo el análisis de incertidumbre de la clasificación, resolviendo los desacuerdos totales mediante reinterpretación de dichas unidades. En la Figura 5, se muestra la distribución espacial de las unidades evaluadas y el nivel de acuerdo final entre los intérpretes.

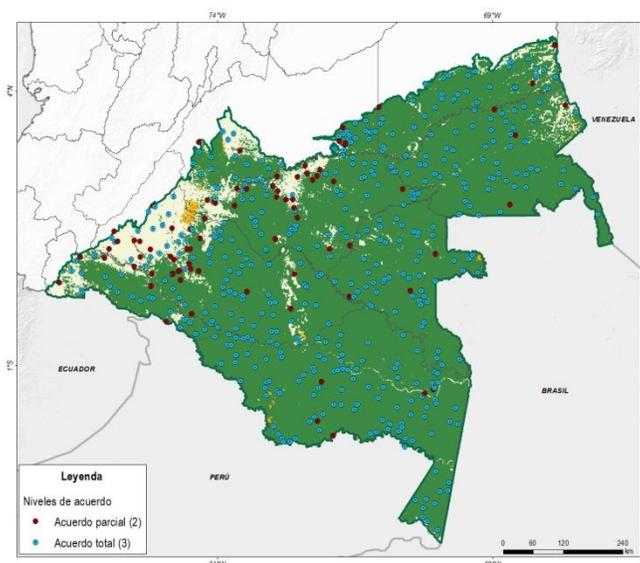


Figura 5. Niveles de acuerdo de la clasificación de referencia

Mediante el análisis de incertidumbre de la interpretación, se evidenció que 16 unidades clasificadas como Bosque estable, 34 unidades clasificadas como Deforestación y 30 unidades clasificadas como No Bosque estable, tuvieron un acuerdo parcial, es decir tan solo dos intérpretes estuvieron de acuerdo en la asignación de la clase de referencia, lo cual sugiere que pudieron existir dificultades durante su interpretación y por lo tanto la

existencia de una alta incertidumbre asociada a las mimas, mientras que las 444 unidades restantes tuvieron una baja incertidumbre, al existir un acuerdo total por parte de los interpretes en la asignación de la clase de referencia.

En la Tabla 2, se presenta la matriz de error construida mediante los recuentos de la muestra, donde las filas corresponden a las clases del mapa y las columnas a las clases de referencia. Adicionalmente se presentan las medias de fiabilidad correspondientes a las exactitudes de usuario, productor y general estimadas de manera directa sobre los recuentos de las clases. En términos generales, se observa que se obtuvieron unas exactitudes favorables.

Tabla 2. Matriz de error tradicional y medidas de fiabilidad

| Clase | BQ  | DF | NB | Total | Usuario | Productor | General |
|-------|-----|----|----|-------|---------|-----------|---------|
| BQ    | 411 | 0  | 3  | 414   | 0.993   | 0.958     | 0.952   |
| DF    | 4   | 43 | 3  | 50    | 0.860   | 0.977     |         |
| NB    | 14  | 1  | 45 | 60    | 0.750   | 0.882     |         |
| Total | 429 | 44 | 51 | 524   |         |           |         |

Sin embargo, al contrastar los resultados obtenidos por la evaluación tradicional (Tabla 2), con respecto a los obtenidos a partir de la proporción de área (Tabla 3), se observa que en el primer caso las exactitudes del productor para clases estables fueron subestimadas y la exactitud de la clase de cambio fue sobreestimada, existiendo una diferencia significativa en esta última. De acuerdo con Olofsson *et al.* (2013), esta diferencia se explica por la variación en los pesos de estimación asociados con cada estrato, donde la baja exactitud del productor para la clase deforestación (56%), es una alerta de que el error de omisión asociado a esta clase es problemático.

Tabla 3. Matriz de error de la proporción de área y medias de fiabilidad

| Clase | BQ    | DF    | NB    | Total | Usuario | Productor | General |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|---------|
| BQ    | 0.867 | 0.000 | 0.006 | 0.873 | 0.993   | 0.968     | 0.962   |
| DF    | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.003 | 0.860   | 0.562     |         |
| NB    | 0.029 | 0.002 | 0.093 | 0.124 | 0.750   | 0.934     |         |
| Total | 0.896 | 0.005 | 0.099 | 1     |         |           |         |

En este sentido, a pesar de la alta exactitud general del mapa es probable que el área estimada de deforestación sea diferente a la real, por alto error de omisión en la clasificación asociado a esta clase.

Por otra parte, a pesar de que se obtuvo una mejor exactitud general del mapa de cambio, en función de la proporción de área (96%), este valor no presenta una diferencia significativa con respecto al obtenido mediante la matriz de error tradicional (95%). Mientras que el índice de acuerdo Kappa si presenta una diferencia significativa siendo para el primer caso del 82% y para el segundo del 86%.

#### **4 Conclusiones**

Mediante la aplicación de buenas prácticas en los procesos de validación de cartografía temática de cambio de la cobertura de la tierra derivados de los sistemas de monitoreo de la cobertura forestal, se pueden identificar problemas en los protocolos de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación y establecer unas mejoras en los mismos, para consolidarlos como sistemas sólidos, robustos, confiables y transparentes.

Los resultados obtenidos en este trabajo, sugieren que es incorrecto estimar directamente la exactitud temática de un mapa de cambio, mediante una matriz de error tradicional, siendo las estimaciones de exactitud para algunas clases sobreestimadas y para otras subestimadas.

Desde el punto de vista práctico este trabajo brinda una aproximación metodológica para la evaluación de la exactitud temática de los mapas de cambio de la cobertura terrestre, la cual puede ser aplicada en otros procesos similares de validación de cartografía temática.

Se considera que en trabajos futuros se debe ajustar el área estimada de cada clase y determinar su intervalo de confianza.

### **Agradecimientos**

Los autores expresan su agradecimiento los profesionales especializados: Andrés Felipe Espejo Delgado, René Pinzón Corredor y Osman Javier Roa Melgarejo, adscritos al Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), quienes realizaron la interpretación visual de las unidades evaluadas en el presente estudio. También se hace extensivo el agradecimiento al profesor Johan Pontus Olofsson (PhD), adscrito al Departamento de la Tierra y del Medio Ambiente, de la Universidad de Boston por sus orientaciones y al Ing. Ederson Cabrera Coordinador del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC).

### **Referencias bibliográficas**

- Abdulaziz, A. M., Hurtado, J., J. M., & Al-Douri, R. (2009). Application of multitemporal Landsat data to monitor land cover changes in the Eastern Nile Delta region, Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, 30(11), 2977–2996.
- Cabrera, E., Galindo, G., Carcía, M. C., & Vargas, D. M. (2011). *Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia, Nivel Nacional Escala Gruesa y Fina* (p. 44). Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Cabrera, E., Vargas, D. M., & Galindo, G. (2011). *Memoria Técnica de la cuantificación de la deforestación histórica nacional: escalas gruesa y fina* (p. 106). Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales - IDEAM..
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio* (1ra ed., p. 590). Barcelona, España: Ariel Ciencia.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques* (3rd ed., p. 448). New York, US: John Wiley & Sons, Inc.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37, 35–46. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579190048B>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2008). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices* (Second., p. 210). CRC Press.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2001). La atmósfera, el tiempo y el clima. In P. LEYVA (Ed.), *El medio ambiente en Colombia* (pp. 34–113). Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2005). *Atlas climatológico de Colombia* (p. 218). Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.

Jeon, S. B., Olofsson, P., & Woodcock, C. E. (2014). Land use change in New England: a reversal of the forest transition. *Journal of Land Use Science*, 9(1), 105–130.

Olofsson, P., Foody, G. M., & Herold, M. (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.

Olofsson, P., Kuemmerle, T., Griffiths, P., Knorn, J., Baccini, A., Gancz, V., ... Woodcock, C. E. (2011). Carbon implications of forest restitution in post-socialist Romania. *Environmental Research Letters*, 6, 045202.

Olofsson, P., Torchinava, P., Woodcock, C. E., Baccini, A., Houghton, R. A., Ozdogan, M., ... Yang, X. (2010). Implications of land use change on the national terrestrial carbon budget of Georgia. *Carbon Balance and Management*, 5, 4.

Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407–4429.

Seto, K. C., Woodcock, C. E., Song, C., Huang, X., Lu, J., & Kaufmann, R. K. (2002). Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing*, 23(10), 1985–2004.

Tso, B., & Mather, P. (2009). *Classification methods for remotely sensed data* (2nd ed., p. 347). New York, US: CRC Press.