

ANÁLISIS DE CAMBIOS EN LA OCUPACIÓN DEL SUELO OCURRIDOS EN SABANAS DE COLOMBIA ENTRE 1987 Y 2001, USANDO IMÁGENES LANDSAT

SANTANA, L. M.^a y SALAS, J.^b

^a Departamento de Geografía, Universidad del Valle.
Calle 13 No 100-00. A.A. 25360, Cali, Colombia.

^b Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.

Calle Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares, Madrid, España.

^aluima67@yahoo.com ^blusanta@univalle.edu.co ^bjavier.salas@uah.es

RESUMEN

El análisis de los cambios de ocupación del suelo es de gran importancia, ya que provee información fundamental para la gestión y planificación del territorio a diferentes escalas y para la realización de estudios ambientales, riesgos y catástrofes naturales, etc. Este trabajo analiza la aplicación de dos enfoques para valorar los cambios de ocupación ocurridos en un sector de sabanas colombianas entre 1987 y 2001, mediante la comparación a posteriori de dos imágenes Landsat (TM y ETM+) clasificadas. El primero corresponde al método tradicional (tabulación cruzada); en el segundo se interpretan los cambios significativos ocurridos, utilizando los valores de cambio observados y esperados entre las clases. Se obtuvo un mapa dinámico de ocupación del suelo, donde se destacan las zonas estables y las que sufrieron cambios significativos; los resultados indican que el método por tabulación cruzada sobrevalora la ocurrencia de cambios.

Palabras claves: sabanas colombianas, detección de cambios a posteriori, cambios significativos, imágenes Landsat TM y ETM+.

ANALYSIS OF LAND USE CHANGES IN COLOMBIAN SAVANNAH BETWEEN 1987 AND 2001, USING LANDSAT IMAGERY

ABSTRACT

Land cover/use change detection is very important, since it provides fundamental information for the management and planning of the territory at different scales and for the accomplishment of environmental, risk and catastrophic studies. This work analyzes the application of two approaches to assess land cover/use changes within a sector of the Colombian savannah, between 1987 and

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

2001, using post-classification comparison of two Landsat images (TM and ETM+). The first one corresponds to the traditional method or by cross-tabulation matrix, and the second one analyzes the significant changes, using the observed and expected ones for values of change. A dynamic map of land cover/use was obtained, representing non-change zones and the areas where significant changes took place; the statistics of the areas indicate that the cross-tabulation overestimates the occurrence of changes.

Keywords: Colombian savannah, post-classification change detection, significative changes, Landsat TM and ETM+ images.

1. Introducción

En los últimos años se ha visto con mayor preocupación cómo las cubiertas de la tierra vienen sufriendo cambios en su estado, composición y extensión, como resultado de las actividades del hombre y de la ocurrencia de fenómenos naturales. Dichos cambios, entre otras consecuencias, intervienen en la erosión del suelo, incrementan el agua de escurrimiento e inundaciones, provocan cambios en la biodiversidad (Mas, 1999) y alteran procesos que generalmente tienen consecuencias en el clima (Zhan *et al.*, 2002). La detección de cambios de la ocupación del suelo es de gran importancia, ya que provee información fundamental para la gestión y planificación del territorio a diferentes escalas, y para la realización de estudios ambientales, riesgos y catástrofes naturales (Serra *et al.*, 2003).

Los cambios en el mosaico del paisaje son el resultado de interacciones complejas entre factores físicos, biológicos, económicos, políticos y sociales. Considerando la influencia de los humanos, varias causas determinan la modificación y conversión de las clases de ocupación del suelo en un área determinada. Una es la visión económica, en donde los cambios se dan hacia usos que generan mayor rentabilidad (Mertens y Lambin, 2000). Otras están motivadas por el aumento de la población y la consecuente necesidad de espacio, bienes y servicios; por la escasez de recursos, aunado, en muchos casos, con la mala distribución de la tierra y con la pobreza; y por las pocas oportunidades de trabajo en actividades de los sectores secundario y terciario.

Los Llanos Orientales colombianos, con cobertura predominante de sabanas, a pesar de ser una región de baja densidad de población, han sufrido una rápida conversión de las especies nativas por pastos introducidos y por actividades agrícolas, proceso común en regiones similares de Brasil y Venezuela (Ferreira y Huete, 2004; López-Hernández *et al.*, 2005). Las razones que motivan la mayor proporción de cambios en las sabanas colombianas, aun cuando no están documentadas, son económicas; se ha visto que la productividad del ganado de carne se incrementa con la introducción de pastos mejorados, por su mayor producción de biomasa. De igual modo, las explotaciones agrícolas se realizan con fines predominantemente comerciales, estando la agricultura de subsistencia relegada a huertos caseros. No obstante, no existen estudios que hayan aplicado imágenes de sensores remotos para la discriminación de las clases de ocupación presentes en el espacio y en el tiempo, y por tanto no existen estadísticas sobre cambios de ocupación del suelo.

Son muchas las técnicas de detección de cambios específicas existentes, sin embargo, la mayoría de los autores consultados las enmarcan en dos grupos generales: (1) los basados en la

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

categorización espectral de las imágenes de entrada y (2) los que involucran simultáneamente imágenes o bandas de diferentes fechas, con las cuales se obtienen los cambios por técnicas diversas (Lowell, 2001; Serra *et al.*, 2003; Coppin *et al.*, 2004). Para van Oort (2006) en el primer procedimiento inicialmente se asignan las clases y luego se determina el cambio, de allí la denominación "detección de cambio a posteriori"; y en el segundo, primero se determina el cambio y luego se asignan las clases, aunque no siempre se logra la denominación, sobre todo cuando se trata de cambios sutiles.

Ambos grupos de técnicas tienen ventajas y desventajas y por tanto no existe un método adecuado para todas las condiciones, sino que depende de los objetivos planteados, del tipo de imágenes a utilizar, de las características de la zona de estudio y de la experiencia y conocimiento local del analista (Lu *et al.*, 2004). El mapa o imagen final de cambios, independiente del método que se utilice, probablemente tendrá errores que son inherentes a los procesos utilizados para su creación (Lowell, 2001). No obstante, la comparación a posteriori es aún el método más popular de detección de cambios (Foody, 2002; Lu *et al.*, 2004; Pontius Jr. y Lippitt, 2006).

Numerosos son los ejemplos de estudios realizados sobre detección de cambios de ocupación del suelo, utilizando desde la interpretación visual hasta métodos automatizados. En condiciones de sabanas y selva tropical, Guerra *et al.* (1998) analizaron los cambios ocurridos en un sector de la Sierra de Purima, Venezuela, con 6 clases de ocupación del suelo, y utilizando la diferencia normalizada del índice SAVI modificado, obtenido de imágenes Landsat TM. Para identificar los cambios, el histograma que resultó de la resta de los índices fue segmentado, basado en la relación, determinada en parcelas de campo, entre los tipos de vegetación y el índice. La cartografía de los cambios fue realizada por medio de la clasificación no supervisada de los índices de las dos fechas. Señalan como aspecto importante, la capacidad del método para detectar cambios en áreas poco intervenidas y con diferencias radiométricas menores.

Mas (1999), en una zona costera del estado de Campeche, México, comparó la eficiencia de 6 métodos de detección de cambio, utilizando imágenes Landsat MSS: (1) diferencias de bandas, (2) diferencia de NDVI, (3) análisis de componentes principales selectivo, (4) clasificación multitemporal no supervisada, (5) comparación a posteriori de imágenes clasificadas, y (6) combinación de diferencia de bandas y análisis de componentes principales. Con 6 a 10 clases de ocupación del suelo, y considerando una condición binaria (cambio/no cambio), las mejores fiabilidades se obtuvieron con el método de comparación a posteriori de imágenes clasificadas.

Slater y Brown (2000) propusieron un procedimiento basado en interpretación visual para hacer seguimiento de los cambios ocurridos en "áreas ambientalmente sensibles", con ocupación mayormente de pastos y cultivos, en Inglaterra. Con la superposición en pantalla de imágenes (Landsat TM y/o ERS1-SAR) y un mapa vectorial de ocupación del suelo de la situación anterior, bien co-registrados, realizaban la actualización del último a través de la digitalización en pantalla de los cambios observados en las imágenes. La creación de un nuevo mapa de ocupación, acorde con la fecha de las imágenes, permitía realizar análisis espaciales y obtener matrices de transición entre fechas, obteniendo fiabilidades por encima de 97%.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

Otros trabajos están enfocados hacia aplicaciones más específicas, como valoración de efectos de incendios (Rogan y Yool, 2001; García-Haro *et al.*, 2001), análisis urbano (Li y Yeh, 1998; Sunar, 1998; Yang y Lo, 2002), mortalidad de bosques (Liu *et al.*, 2006); cambios ambientales como degradación (Huete *et al.*, 2003), desertización (Geerken y Ilaoui, 2004), sequías (Bayarjargal *et al.*, 2006) e inundaciones (Liu *et al.*, 2002). En Suramérica, la mayoría de los estudios de detección de cambios se han concentrado especialmente en el seguimiento de los procesos de deforestación (Roberts *et al.*, 1998; Maldonado *et al.*, 2002; Alves, 2002; Morton *et al.*, 2005).

Un aspecto muy poco estudiado en la detección de cambios es su significación estadística. Aplicar métodos que diferencien los cambios significativos de los irreales o debidos al azar ha sido un vacío en los trabajos realizados. Así, Pontius Jr. *et al.* (2004) propusieron un método basado en la matriz de transición, que busca detectar los cambios significativos entre las clases de ocupación, al comparar los cambios observado y esperado para un grado de persistencia dado. En la literatura consultada no se encontró trabajos que hayan aplicado este método de detección de cambios, excepto los estudios de caso utilizados por los autores para ilustrar la propuesta.

El método aplicado en este trabajo, para valorar los cambios ocurridos en un sector de sabanas colombianas entre 1987 y 2001, es la comparación a posteriori mediante (1) tabulación cruzada, y (2) interpretación de cambios significativos. Su selección se explica básicamente porque se disponía de clases categóricas de ocupación del suelo, derivadas del procesamiento digital de imágenes Landsat TM y ETM+ respectivamente. Por tanto, los objetivos de este trabajo son: (1) detectar y documentar la dinámica de las clases de ocupación del suelo ocurridos en un sector de sabanas colombianas, entre 1987 y 2001, destacando los cambios totales, netos, intercambios, áreas estables y las trayectorias; (2) determinar, a partir de la matriz de transición, cuáles son los cambios significativos que han tenido lugar y su trayectoria; y (3) realizar, mediante la integración de los resultados en un SIG, un mapa dinámico en el que se incluyan las persistencias y transiciones no significativas, y los cambios significativos ocurridos.

2. Metodología

2.1. Zona de estudio y datos usados

El área de estudio se encuentra ubicada en los "Llanos Orientales colombianos", a 140 km. al Este de la ciudad de Bogotá, y a 55 km. al Este de la ciudad de Villavicencio, capital del Departamento del Meta ([figura 1](#)). Geográficamente se localiza entre los 3° 38' y 4° 26' Latitud Norte y 72° 15' y 73° 15' Longitud Oeste, cubriendo una extensión aproximada de 9900 km². El clima imperante está caracterizado por una temperatura más o menos homogénea durante todo el año, con un promedio de 26°C, y una oscilación mensual inferior a 6°C; la altitud varía desde los 175 a 370 m. La distribución de las lluvias es de tipo bimodal, con un período de sequía que se extiende desde final de noviembre hasta inicios de abril (Rippstein *et al.*, 2001); la precipitación promedio anual es del orden de 2200 mm.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

En la zona de estudio se encuentran cuatro unidades fisiográficas mayores: (1) piedemonte aluvial, ubicado al occidente, (2) llanura aluvial de desborde reciente, franja pequeña ubicada al norte del río Meta, (3) altillanura estructural erosiva Plio-Pleistocénica, localizada al sur del río Meta y (4) valles aluviales de ríos meándricos (Botero, 1999).

La Altillanura, que cubre la mayor parte del área, se subdivide, de norte a sur, en tres paisajes fisiográficos: altillanuras casi plana, moderadamente disectada y fuertemente disectada (lomas y colinas). Los suelos, en general, están caracterizados por su alta meteorización, por ser muy profundos, tener texturas medias a livianas, con buen nivel de infiltración, y por ser muy fuertemente ácidos, de baja a muy baja fertilidad y de alta concentración de hierro y aluminio intercambiables. Por sectores, aparecen petroplintita y corazas petroféricas (compuestos férricos endurecidos). En el piedemonte y planicie, en cambio, el relieve es plano, en sectores plano cóncavo, lo que ocasiona un drenaje pobre; los suelos presentan mejores condiciones químicas que los de la altillanura. En los valles se encuentran suelos poco desarrollados, donde el alto contenido de humedad producto de las inundaciones frecuentes a ocasionales es la característica más sobresaliente (Botero, 1999; Rippstein et al., 2001).

Las clases de ocupación del suelo del área están determinadas por las condiciones climáticas, edáficas e hidrológicas. En la altillanura predominan las sabanas nativas abiertas combinadas con bosque de galería, pero en la mayor parte de las zonas planas éstas han sido sustituidas por pastos introducidos. En la llanura de desborde, con suelos mal drenados, aparecen sabanas adaptadas a excesiva humedad con manchas ocasionales de palma Moriche (*Mauritia flexuosa*); en el piedemonte, se encuentran enclaves importantes de pastos introducidos y cultivos (Botero, 1999). El mayor grado de intervención humana ocurre en el piedemonte, seguido por la altillanura plana.

Para detectar los cambios ocurridos entre 1987 y 2001 se utilizaron mapas de ocupación del suelo resultado de las mejores clasificaciones de las imágenes Landsat TM y ETM+, respectivamente, obtenidas mediante procedimiento descrito en Santana (2007). El co-registro de las imágenes arrojó un error menor de 0,5 píxel (menor a 12,5 m.). No se realizó corrección atmosférica porque no se disponía de información de la atmósfera en las fechas de toma de ambas imágenes, y debido a que de acuerdo con Song *et al.* (2001) y con Foody *et al.* (1996) esta corrección no es necesaria cuando la detección de cambios se hace con imágenes clasificadas individualmente. En cuanto a las clases de ocupación del suelo presentes en las imágenes clasificadas ([tabla 1](#)), la clasificación de 1987 consta de siete categorías: cuerpos de agua, agricultura, pasto introducido, pasto nativo, suelo desnudo, bosque de galería y palma de aceite; la de 2001, utiliza ocho: las siete anteriores, más la categoría caucho.

Para la imagen TM, la fiabilidad global e índice Kappa obtenidos fueron 92,5% y 0,868, respectivamente, y para la ETM+ fueron 88,2% y 0,86, respectivamente; superando, en ambos casos, el 85% de fiabilidad mínima recomendada por Foody (2002) para la clasificación de imágenes. A las dos clasificaciones seleccionadas se les aplicó un filtro de moda (3x3), procedimiento recomendado para eliminar el efecto de "sal y pimienta" (Chuvieco, 2002), obteniéndose así los mapas de ocupación del suelo para cada fecha.

2.2. Obtención de cambios de ocupación, por medio de imágenes clasificadas

La superposición de los mapas de ocupación del suelo de cada fecha permitió obtener una matriz de transición o de cambio, donde, en la diagonal aparecen las persistencias o áreas estables entre las fechas, y por fuera de la diagonal se encuentran las transiciones de las clases entre 1987 y 2001. El área total, por clase de ocupación del suelo, para cada fecha, se obtiene de la sumatoria de las filas y columnas. La pérdida de una clase es el resultado de restar la persistencia al total de 1987; de igual modo, la ganancia, para una clase, resulta de restar la persistencia al total de 2001.

Con la información de la matriz de transición se calcularon los cambios totales, netos y los intercambios. Para cada clase de ocupación, el cambio total es la sumatoria de las pérdidas y ganancias, el cambio neto es la diferencia absoluta entre pérdidas y ganancias, y el intercambio (identificado cuál de los valores de pérdida y ganancia es menor) es igual al doble de ese valor mínimo (Pontius Jr. *et al.*, 2004). Para toda el área analizada, el cambio total, cambio neto total e intercambio total es igual a la mitad de la sumatoria de los cambios por categorías. La importancia del intercambio aumenta en los casos en donde se dan estadísticas globales del área ocupada por una o varias clases de ocupación del suelo, en diferentes fechas, pero sin mostrar las persistencias, tal como la información aportada por la FAO (FAO, 2006); en esos casos, es imposible determinar, de la extensión reportada para una clase de ocupación dada, cuánta es producto de ganancias, de pérdidas o de intercambio.

2.3. Detección de cambios significativos

Para la obtención de los cambios significativos, se adoptó, como se dijo previamente, la metodología propuesta por Pontius Jr. *et al.* (2004). Desde este enfoque, a los porcentajes de superficie de las clases de ocupación del suelo presentes en la matriz de transición, obtenida de la tabulación cruzada, se les adicionan tres nuevos valores: (1) el esperado, (2) la diferencia entre el valor observado menos el esperado, que muestra la proporción de la transición según el cambio total, siendo generalmente mayor en las clases más extensas; y (3) el cociente logrado al dividir el valor primero entre el segundo, el cual muestra la fuerza de la transición. Los dos últimos valores, son las bases de la prueba Chi cuadrado y ofrecen suficiente información crítica para determinar qué transición es significativa.

Adicionalmente, la matriz de transición se analiza considerando dos puntos de vista: desde las ganancias y desde las pérdidas. En el primero, se asume que en la diagonal el valor esperado es igual al observado, y que la proporción total de área y la ganancia en cada categoría, de la clasificación del 2001, son constantes. Asimismo, que el porcentaje de ganancia observado por categoría al final de cada columna es distribuido para las otras categorías de la misma columna, según la proporción que ellas ocupaban en 1987, obteniéndose así la superficie esperada. La ganancia esperada por categoría de la columna, Ge_c , se logra mediante la fórmula 1.

$$Ge_c = (Gc_+) \left(\frac{F_{i+}}{\sum_{f=1, f \neq c}^n F_{i+}} \right) \quad (1)$$

donde G_{c+} corresponde a la ganancia observada para una clase, F_{i+} es la proporción total de cada categoría en 1987 (fila), y $\sum_{f \neq c} F_{i+}$ corresponde a la sumatoria de los totales de las clases de ocupación del suelo de 1987, contenidos en las filas, pero de clases distintas a la de la columna para la que se calcula la ganancia esperada.

Con la superficie observada y esperada se consigue una diferencia (en % del área total) y un cociente (magnitud más allá del azar). Si la diferencia entre el porcentaje observado y esperado es positiva, la categoría de 1987 perdió más que lo esperado en un proceso aleatorio de ganancia; si es negativo, la categoría de 1987 perdió menos.

Desde el punto de vista de las pérdidas, al igual que para las ganancias, se asume que en la diagonal el valor esperado es igual al observado y que las proporciones y pérdidas de cada categoría, en la clasificación de 1987, son constantes. De igual modo, el porcentaje de pérdida observado para cada categoría de 1987 (final de la fila) es distribuido para las otras categorías de la misma fila, según la proporción que esas otras categorías ocupan en la clasificación de 2001, obteniendo así el valor esperado. La pérdida esperada por categoría de la fila (Pe_f) se obtiene a partir de la ecuación 2.

$$Pe_f = (Pf_+) \left(\frac{C_{j+}}{\sum_{c=1, c \neq f}^n C_{j+}} \right) \quad (2)$$

donde Pf_+ corresponde a la pérdida observada por categoría, C_{j+} es la proporción total de cada categoría en 2001 (columna), y $\sum_{c \neq f} C_{j+}$ corresponde a la sumatoria de los totales de las clases de ocupación del suelo de 2001, presentes en las columnas, pero de clases distintas a la fila para la que se calcula la pérdida esperada.

Finalmente, desde las pérdidas y ganancias, las transiciones significativas serán aquellas que muestren mayores diferencia y cociente entre los valores observado y esperado; no obstante, la experiencia del analista y su conocimiento de la zona de estudio son importantes para establecer el umbral de selección de los cambios significativos, frente a los que son por errores o por el azar. En este estudio se seleccionaron transiciones con diferencia entre el porcentaje de área observado y esperado mayor que |0.4|, para ser consideradas como significativas; es decir, dando más prioridad a la extensión de cambio que a la magnitud o fuerza con que ocurre el cambio representado por el cociente.

2.4. Obtención del mapa dinámico de ocupación del suelo entre 1987 y 2001

Dado que no todos los programas de procesamiento digital de imágenes, o versiones de los mismos, ofrecen la posibilidad de obtener una imagen producto de la superposición de dos mapas, con todas las transiciones posibles, en esta investigación se realizó una suma de ambos, mediante el programa Easi Modelling de PCI Geomatica. Reconociendo que el mapa de 1987 contiene siete clases de ocupación del suelo (identificadas de 1 a 7) y el de 2001 ocho (identificadas de 1 a 8), se

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

diseñó una expresión matemática (ecuación 3) que posibilitara la identificación inequívoca de cada una de las unidades espaciales resultantes (Prenzel y Treitz, 2006).

$$\text{Mapa dinámico}_{1987-2001} = (\text{mapa } 1987 * 1) + (\text{mapa de } 2001 * 10) \quad (3)$$

Así, se obtuvo una matriz de transición similar a la presentada en la [tabla 2](#), la que contiene 56 combinaciones posibles que identifican a las diferentes unidades del mapa dinámico. Los códigos de la diagonal identifican unidades que no sufrieron cambios entre 1987 y 2001. Fuera de la diagonal aparecen las transiciones entre las diferentes clases de ocupación, de las cuales se seleccionaron aquellas que resultaron ser significativas en el proceso anterior; las demás ocurrieron por error, por el azar u ocupan un área tan pequeña que pueden considerarse poco importantes. Por ejemplo, las transiciones de cuerpos de agua (identificadas con los números 21, 31, 71 y 81) son irreales, por la imposibilidad de tal conversión; en sentido similar, las transiciones de la palma de aceite (17, 27, 37, 47, 57, 67 y 87) no son reales, ya que por conocimiento de la zona se sabe que las áreas de palma no fueron reemplazadas por otras clases. Claro, algunas de las transiciones denotan más los problemas de confusión entre las clases de ocupación en las clasificaciones de las imágenes Landsat.

El mapa resultante fue convertido a un formato compatible con ArcGis, por ser más fácil su edición y presentación. Luego se procedió a identificar: (1) sólo los cambios que resultaron ser significativos, designando la clase de procedencia y la de destino; (2) las áreas estables y (3) las transiciones no significativas o producto de errores de confusión o de georreferenciación. Para la designación final de las unidades de las transiciones no significativas primó: (1) el estado de las unidades en la imagen de 2001 (por ejemplo, si una zona con pasto nativo en la imagen de 1987 desaparece por la migración de un río, la transición se identificará como agua por ser la clase presente en la imagen del 2001) y (2) la realidad sobre las confusiones, a partir del conocimiento de la zona adquirido durante el trabajo de campo y de la inspección visual de las imágenes y del mapa dinámico; esto teniendo en cuenta que, en la comparación de mapas, el análisis visual es una técnica válida (Lu *et al.*, 2004; Foody, 2006) considerada como más versátil que cualquier método automático (Hagen-Zanker, 2006). La agrupación de las unidades similares permitió obtener un mapa dinámico de las clases de ocupación del suelo, para el período analizado, donde se destacan las estables o sin cambios significativos y las que sufrieron cambios significativos. Finalmente se realizó el inventario de las diferentes unidades del mapa dinámico.

3. Resultados y discusión

3.1. Cambios de ocupación obtenidos mediante tabulación cruzada

Los porcentajes totales para cada una de las clases de ocupación para 1987 y 2001 y las transiciones se muestran en la [tabla 3](#). Se aprecia que en 1987 el pasto nativo es la clase más extensa (70,88% del área total), seguido por bosque de galería (14,78%) y pasto introducido (7,92%). Para 2001, el pasto nativo sigue siendo la clase mayoritaria con el 37%, pero seguido de cerca por pasto introducido que cubre el 35%; en tercer lugar aparece el bosque de galería con cerca de 14%; y la agricultura (con predominio de arroz) con 7%, y suelo desnudo con cerca de 5% aparecen en cuarto

y quinto lugar por extensión. En términos de persistencia, la clase más estable fue la palma de aceite con 89% respecto al área que ocupaba en 1987, seguido por bosque de galería con 76%, pasto introducido con 62%, pasto nativo con 48% y agricultura con 36%. El que el bosque de galería sea una de las dos clases proporcionalmente más estables ([figura 2](#)), es un aspecto muy importante por lo que ésta clase representa para los procesos ecológicos y para el mantenimiento de la biodiversidad de la región.

En cuanto a las transiciones entre clases mostradas por la matriz, la más extensa se da entre pasto nativo a introducido con cerca de un 27% del área total, conversión predominante en la altillanura plana ([figura 3](#)); le sigue, muy distante, la conversión de pasto nativo a agricultura, con un 3,9%. Otras transiciones con importancia práctica, aunque no tan extensas, son (1) la ganancia de área de palma de aceite sobre zonas previamente cubiertas con pasto nativo, conversión que ocurre exclusivamente en el paisaje de piedemonte ([figura 4](#)); (2) la ganancia de suelo desnudo, producto de la erosión, sobre áreas que estaban inicialmente cubiertas de pastos nativo e introducido, especialmente en la altillanura moderadamente disectada ([figura 5](#)); (3) la ligera ganancia de bosque de galería sobre el pasto nativo, especialmente en la altillanura fuertemente disectada; y (4) las pérdidas de bosque de galería con ganancia de pasto introducido y agricultura, ocurridas mayormente en el piedemonte.

También hay transiciones fruto de los problemas de confusión que presentaron las clases de ocupación en las clasificaciones de las imágenes. La clase agricultura aparece con pérdidas y ganancias en casi todas las demás; pero la agricultura involucra suelo arado, cultivos de arroz en vigor bajo riego, cultivos en secano y terreno inundado para siembra de arroz, y por tanto existe confusión con otras clases de ocupación. De modo similar, existe agua limpia y con alta carga de sedimentos, que se confunden respectivamente con quemas y terrenos inundados para arroz. Los pastos nativos que crecen en los valles aluviales, donde existe mayor humedad, tienen un alto verdor y por tanto se comportan espectralmente de forma similar a bosque de galería, palma de aceite y cultivos de arroz en vigor. Además se debe tener en cuenta la migración que han tenido los cauces de los grandes ríos; por tanto, que aparezca en la matriz que el agua (2001) ha sustituido a pasto introducido, pasto nativo, suelo desnudo y bosque de galería se explica porque los cauces hoy discurren por zonas que en 1987 se encontraban con dichas clases de ocupación.

La [tabla 4](#), obtenida de la matriz de transición, resume el comportamiento dinámico de la zona de estudio para el período analizado. El área ha sufrido un cambio total (mitad de la sumatoria de pérdida y ganancia) cercano al 48% y el 52% mantuvo las mismas clases de ocupación; el intercambio total fue de 13% y el cambio neto total fue de 35%. Las clases que sufrieron mayores cambios totales fueron, en su orden, pasto nativo con 39%, pasto introducido con 33%, agricultura con 8%, suelo desnudo con 7% y bosque de galería con algo más de 6% del área total. El cambio neto negativo más importante corresponde a la clase pasto nativo, con cerca de 34%, seguido muy de lejos por bosque de galería con un valor por debajo del 1%. Los cambios netos positivos mayores corresponden a las clases pasto introducido con 27%, agricultura con 5% y suelo desnudo con 2% del área total. El intercambio se da con mayor magnitud en pasto introducido (6%), seguido muy de cerca por bosque de galería y pasto nativo (5,5%) y suelo desnudo (5%).

El cambio neto muestra el estado final de cada una de las clases de ocupación del suelo y de la zona analizada, por cuanto representa la diferencia entre el cambio total y el intercambio. El valor

de intercambio de bosque de galería permite visualizar la importancia de este concepto, propuesto por Pontius Jr. *et al.* (2004), por cuanto esta clase tuvo un cambio neto muy bajo (-0,81%) a pesar de que el cambio total fue de algo más del 6%, lo que se explica por la doble transición de pérdida y ganancia expresada por el intercambio, que prácticamente cubre el cambio total de esta clase.

3.2. Interpretación de los cambios significativos.

Los resultados del análisis de la matriz de transición, desde el punto de vista de las ganancias, se muestran en la [tabla 5](#). Para cada una de las clases se incluyen cuatro valores, los que corresponden, en su orden, a: (1) porcentaje observado, (2) porcentaje esperado si el cambio fuese por el azar, (3) diferencia del observado menos esperado, y (4) el cociente de la diferencia de observado menos esperado dividido por el esperado, que expresa la fuerza del cambio. Si las ganancias ocurriesen por el azar, el valor observado menos esperado (valor subrayado) sería igual a cero. Como se aprecia en la tabla, muchas de las transiciones no tienen dicho valor, por tanto es necesario interpretar si las transiciones representan cambios significativos o importantes entre las clases de ocupación del suelo.

De acuerdo con la [tabla 5](#), el aumento de extensión de agricultura ha ocurrido por reemplazar a suelo desnudo (diferencia de 0,55) en una magnitud de 3 veces lo esperado por el azar, pero no sustituye de forma significativa a pasto nativo (diferencia de -0,74 y cociente de -0,16). Claro, la primera transición se debe a los problemas de confusión comentados, ya que muchas áreas clasificadas como suelo desnudo son, en realidad, suelo arado para la agricultura. El pasto introducido reemplaza de forma significativa al nativo (diferencia de 3,33 y magnitud 0,14 veces el azar), en una proporción bastante considerable, pero no al bosque de galería (diferencia de -3,02 y cociente de -0,62). El pasto nativo sustituye al introducido (diferencia de 0,78) en una magnitud 1,05 veces al azar, pero no reemplaza al bosque de galería (diferencia de -1,0 y cociente de -0,7). Sin embargo, la ganancia significativa de pasto nativo sobre introducido no es real debido a que se trata de (1) la confusión en la discriminación entre ambas clases de pasto, y (2) la existencia de una gran finca en la altillanura plana, la que para 1987 se encontraba con pasto introducido y para el 2001 aun estando en pasto introducido aparece quemada ([figura 3](#)) y, por ser las quemadas subclases del pasto nativo, esta finca quedó clasificada en la imagen de 2001 como pasto nativo. La ganancia de suelo desnudo ocurre de forma significativa en reemplazo del pasto introducido (diferencia de 0,57) en una magnitud 1.61 veces el azar, pero no sustituye al bosque de galería (diferencia de -0,54 y cociente -0,82); la primera transición se explica en buena medida por el deterioro del pasto introducido a raíz del sobrepastoreo o falta de adecuadas prácticas de gestión.

Al considerar el total de pérdidas, y teniendo en cuenta que las ganancias significativas mostradas por agricultura frente a suelo desnudo son irreales, es claro que cuando clases distintas a pasto nativo ganan de forma significativa, lo hacen sustituyendo a pasto nativo (diferencia total de 2,2, aunque en una magnitud baja, 0,06 veces el azar); si las clases de ocupación que ganan de forma significativa son distintas a pasto introducido, las otras clases lo reemplazan (diferencia de 1,07 y cociente de 0,54), pero todas las clases que han aumentado su extensión de forma significativa no reemplazan a bosque de galería (diferencia de -4,5 y cociente de -0,56). Por tanto, las clases que pierden de forma significativa son pasto nativo y en menor magnitud pasto introducido.

Los resultados de la matriz de transición desde el punto de vista de las pérdidas se muestran en la [tabla 6](#). Incluye, para cada clase de ocupación, los mismos cuatro valores mencionados en el análisis anterior. Como se aprecia en la tabla, en muchas de las transiciones el valor observado menos esperado (valor subrayado) es distinto a cero, valor propio del azar, por tanto es necesario interpretar dichas transiciones. Igual que en el análisis anterior, se seleccionaron diferencias entre observado y esperado mayor que $|0,4|$, dando prioridad a la extensión del cambio respecto a su magnitud.

Cuando el pasto introducido pierde superficie, es reemplazado de forma significativa por suelo desnudo (diferencia de 0,7), en una magnitud tres veces mayor que el azar; pero el bosque de galería no sustituye a pasto introducido de forma significativa (diferencia de -0,62 y cociente de -0,95). Cuando la clase que pierde es pasto nativo, el pasto introducido lo reemplaza de forma significativa (diferencia de 6,24 y cociente de 0,3), pero no es reemplazado por bosque de galería (diferencia de -5,65 y cociente de -0,7); en cambio, si la clase de ocupación que pierde extensión es suelo desnudo, éste es sustituido por agricultura (diferencia de 0,56 en una magnitud de más de tres veces el azar), pero no por pasto nativo (diferencia de -0,5 y cociente de -0,55); y cuando es bosque de galería la clase que pierde superficie, es reemplazado de forma significativa primero por agricultura y luego por pasto introducido, pero no por pasto nativo (diferencias y cocientes de 0,61 y 2, 0,4 y 0,27, -1,14 y -0,75, respectivamente). Considerando la ganancia total para una clase respecto a las demás tenemos que: (1) cuando clases distintas a pasto introducido pierden superficie, esta última las reemplaza (diferencia de 6,72 y cociente de 0,28); (2) si las consideradas son distintas a agricultura, ésta las sustituye (diferencia de 1,31 y cociente de 0,26); y (3) si las clases que pierden son distintas a suelo desnudo, éste las suplanta. En otras palabras, el mayor nivel de ganancia significativa corresponde a pasto introducido, seguido por agricultura y por suelo desnudo; no obstante, las clases bosque de galería (diferencia de -6,7 y cociente de -0,71) y pasto nativo (diferencia de -2,35 y cociente de -0,46) no sustituyen de forma significativa a las demás clases de ocupación.

La pérdida de suelo desnudo y su reemplazo por agricultura, similar a los resultados del análisis realizado desde las ganancias, se debe a los problemas de confusión entre estas dos clases de ocupación. La pérdida significativa de bosque de galería con la ganancia de agricultura, es una transición que ocurre mayoritariamente en el piedemonte, pero en el valle del río Meta su ocurrencia es debido a la confusión entre el bosque de galería y el arroz bajo riego. Además, la pérdida de bosque de galería y la ganancia de pasto introducido es una sustitución que tuvo lugar en el piedemonte, altillanura fuertemente disectada y en el valle y planicie aluviales, en una extensión menor que la anterior, aunque con una magnitud (cociente) ligeramente mayor.

En definitiva, las transiciones o cambios significativos corresponden a (1) la sustitución del pasto nativo por el introducido, (2) la aparición de suelo erosionado en zonas previamente ocupadas por pasto introducido, y (3) el cambio de bosque de galería por agricultura y por pasto introducido. Es sobre estas transiciones que se deben concentrar los mayores esfuerzos de gestión e investigación. En términos más específicos, es necesario indagar sobre las consecuencias que dichos cambios tienen en (1) la producción de biomasa para el ganado, (2) el mantenimiento de la biodiversidad, especialmente de la macro y mesofauna, (3) la conservación, características físicas y químicas de los suelos, (4) el mantenimiento del régimen hidrológico en la zona, y (5) fijación de carbono atmosférico en el suelo. Estos cambios determinan, también, la necesidad de diseñar e

implementar planes, proyectos y acciones de gestión para el control de la erosión de los suelos y para la sostenibilidad de los usos del suelo, especialmente cultivos y pastoreo.

3.3. Mapa dinámico de ocupación del suelo entre 1987 y 2001

La superposición de los mapas de ocupación del suelo de 1987 y 2001 permitió obtener unas unidades que incluyen las áreas estables o sin cambios significativos y las que sufrieron cambios significativos, con cuya agrupación se logró un mapa dinámico de ocupación del suelo para dicho período.

Para cartografiar las áreas estables, las que no sufrieron cambios significativos y las que sufrieron cambios significativos (a partir de la [tabla 2](#) y de la interpretación de las tablas 5 y 6), las unidades que aparecen en la diagonal (estables) y las transiciones que resultaron significativas se asignaron al mapa dinámico de forma directa; no obstante, para aquellas transiciones que resultaron con cambios no significativos, o producto de las confusiones presentes en las clasificaciones de origen, la asignación se basó en: (1) el conocimiento de la zona, (2) la distribución de las clases en el mapa de ocupación de la última fecha (2001), y (3) la inspección visual de las imágenes, práctica reconocida como válida en la comparación de mapas categóricos (Lu *et al.*, 2004; Foody, 2006; Hagen-Zanker, 2006). En la [tabla 7](#) aparecen las asignaciones finales de dichas transiciones, además de las áreas estables, con cambios significativos y las transiciones inexistentes; ello permitió obtener el mapa de áreas estables o sin cambios significativos ([figura 6](#)) y el de cambios significativos ([figura 7](#)).

Las estadísticas de las áreas estables o sin cambios significativos y de las que sufrieron cambios significativos se encuentran en la [tabla 8](#). Como se ve, los cambios significativos suman un área equivalente al 30,4% del área total estudiada. La sustitución del pasto nativo por introducido ocupa cerca de un 27% del área total (88% de todo el cambio); la conversión de bosque de galería por pasto introducido y por agricultura corresponde al 1,86 y 0,91% del área total, respectivamente, y el cambio de pasto introducido a suelo desnudo ocurrió en algo menos de 1%. Las áreas estables o sin cambios significativos representan el 69,6% del área de estudio. Las clases de ocupación con mayor proporción de área estable son el pasto nativo (35% del área total), bosque de galería (14%), pasto introducido (10%) y suelo desnudo (5,2%).

En síntesis, para el período analizado, las clases de ocupación han permanecido estables o sin cambios significativos en un 70% de toda el área y el 30% restante sufrieron cambios significativos. Sin duda que este resultado es más cercano a la realidad, pues el 48% de cambio total calculado inicialmente mediante el método tradicional o tabulación cruzada está sobrevalorado, a causa de los errores presentes en la clasificación y por los derivados de la georreferenciación; recordemos que un error de georreferenciación del orden de 0.2 píxel produce errores en la detección de cambios del orden de 10% (Townshend *et al.*, 1992; Dai y Khorram, 1998).

Aun cuando estos resultados no pueden ser comparados con estudios previos, porque no existen en la región, es claro que el proceso de conversión de los pastos nativos a introducidos detectado en este sector de sabanas de Colombia es similar a los informados para Brasil, Venezuela y Colombia por varios autores (Chapuis-Lardy *et al.*, 2002; da Silva *et al.*, 2004; Fisher y Thomas,

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", GeoFocus (Artículos), n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

2004), cambio motivado por una mayor producción de biomasa, para elevar la productividad del ganado.

Los resultados permiten también llamar la atención sobre la forma como frecuentemente se presentan los cambios de ocupación de suelo por medio de la matriz de transición, en los que se asume de forma inconsciente que los mapas o clasificaciones de imágenes son perfectamente fiables; sin embargo los errores son inherentes a la producción de mapas (Lowell, 2001; Pontius Jr. y Lippitt, 2006), lo cual es equiparable a la clasificación digital de imágenes. Existe cierto consenso en que la debilidad más crítica de la detección de cambios con imágenes clasificadas viene dada por la dependencia de las fiabilidades de las clasificaciones individuales de las imágenes; no obstante, para este caso, las dos clasificaciones utilizadas mostraron una fiabilidad por encima de 85%, valor considerado como óptimo por varios autores.

La interpretación de los cambios significativos y su posterior representación en mapas dinámicos de ocupación del suelo permite (1) disminuir problemas de las clasificaciones derivados de píxeles o áreas mal clasificadas, a raíz de las confusiones entre las clases de ocupación, y (2) conocer cuáles son los cambios más importantes, sobre los cuales los investigadores y planificadores deben enfocar sus trabajos, los que conducirán a establecer una mayor interrelación entre patrones y procesos ecológicos y una mejor gestión.

La metodología implementada coincide con el estudio de Yang y Lo (2002) en el sentido de combinar la comparación a posteriori de imágenes clasificadas y técnicas de SIG, pero se diferencia en que: (1) en este caso el mapa dinámico de ocupación del suelo se basó en los cambios significativos y (2) la reclasificación se realizó después de la superposición, previo a la obtención del mapa dinámico, mientras dichos autores la realizaron antes de superponer los mapas de ocupación de suelo de cada fecha.

4. Conclusiones

La detección de cambios por el método de tabulación cruzada muestra, además de transiciones reales, otras que son debidas a problemas de georreferenciación, de fiabilidad de las clasificaciones usadas o que son poco importantes por la extensión que ocupan. Frente a esto, los resultados de la detección basada en un enfoque novedoso como es el de cambios significativos, y que constituye la aportación principal del trabajo, permitió: (1) disminuir o eliminar los problemas de confusión entre las clases de ocupación mencionados, (2) conocer la naturaleza, trayectoria y ubicación de los cambios de ocupación más importantes y (3) conocer la naturaleza y extensión de las clases de ocupación estables o que no sufrieron cambios significativos en el período. Es sobre los cambios significativos que deben enfocarse los mayores esfuerzos de gestión, planificación e investigación, por cuanto es clara la influencia de los cambios de ocupación sobre los procesos ecológicos, conservación de la biodiversidad, aportación y "consumo" de dióxido de carbono atmosférico, erosión de los suelos, desertización, disponibilidad de agua, etc.

Durante el período analizado, la zona de estudio sufrió cambios significativos en un 30% del total del área, extensión 39% inferior al 48% de cambio total obtenido por el método tradicional de tabulación cruzada. El restante 70% no sufrió cambios significativos. La conversión de pasto

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

nativo a introducido fue el cambio significativo más extenso, 26,7% del área total; le siguen la eliminación del bosque de galería para implantación de pasto introducido y agricultura en 1,86% y 0,9%, respectivamente, y la conversión de pasto introducido a suelo desnudo (erosionado) en un 0,9% del área total.

En el mapa dinámico, la asignación final de las transiciones que no resultaron ser significativas se basó en la incorporación del conocimiento de la zona y el análisis visual de las imágenes y mapas de ocupación del suelo, dando preponderancia a la clase de ocupación presente en la imagen de 2001. Esto facilita que para estudios de cambios subsiguientes se pueda partir de este mapa, y no de otros que traen un error acumulado en las clases de ocupación del suelo. Futuros trabajos deberán avanzar en obtener estadísticas y distribución de los cambios de ocupación ocurridos en las últimas décadas en todos los Llanos Orientales de Colombia, e investigar sobre las consecuencias de dichos cambios sobre la diversidad biológica, procesos edáficos e hidrológicos y sobre procesos que involucran la tierra - atmósfera. Para la detección de cambios de ocupación del suelo a partir de imágenes clasificadas, se recomienda la aplicación del enfoque de cambios significativos en vez de tabulación cruzada, dado que este último sobredimensiona los cambios.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Nathalie Beaulieu, del Centro Internacional de Agricultura Tropical –CIAT-, por los aportes realizados para la realización de este trabajo, así como a los dos evaluadores anónimos por sus acertados comentarios y sugerencias.

Referencias bibliográficas

- Alves, D.S. (2002): "Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazônia", *International Journal of Remote Sensing*, 23 (14), pp. 2903-2908.
- Bayarjargal, Y.; Karnieli, A.; Bayasgalan, M.; KhudulmuR, S.; Gandush, C. y Tucker, C.J. (2006): "A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis", *Remote Sensing of Environment*, 105, pp. 9-22.
- Botero, P.J. (1999): Paisajes fisiográficos de Orinoquia – Amazonia (ORAM) Colombia. *Análisis Geográficos*, Nos. 27 y 28, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Santafé de Bogotá, Colombia.
- Chapuis-Lardy, L.; Brossard, M.; Lopes Assad, M.L. y Laurent, J.Y. (2002): "Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil". *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 92, pp. 147-158.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Editorial Ariel. Barcelona, España.
- Coppin, P.; Jonckheere, I.; Nackaerts, K. y Muys, B. (2004): "Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review", *International Journal of Remote Sensing*, 25 (9), pp. 1565-1596.
- Dai, X. y Khorram, S. (1998): "The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 (5), pp. 1566-1577.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

da Silva, J.E.; Resck, D.V.S.; Corazza, E.J. y Vivaldi, L. (2004): "Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the "Cerrado" region, Brazil", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103, pp. 357-363.

FAO. (2006). Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005. Hacia la ordenación forestal sostenible. Documento de trabajo No. 147 (Montes). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. (Disponible en www.fao.org/forestry/site/2620/en/page.jsp, septiembre 18 de 2007).

Ferreira, L.G y Huete, A.R. (2004). "Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices", *International Journal of Remote Sensing*, 25 (10), pp. 1837-1860.

Fisher, M.J. y Thomas, R.J. (2004): "Implications of land use change to introduced pastures on carbon stocks in the Central Lowlands of Tropical South America", *Environment, Development and Sustainability*, 6, pp. 111-131.

Foody, G.M.; Palubinskas, G.; Lucas, R. M.; Curran, P.J. y Honzak, M. (1996): "Identifying Terrestrial Carbon Sinks: Classification of Successional Stages in Regenerating Tropical Forest from Landsat TM Data", *Remote Sensing of Environment*, 55, pp. 205-216.

Foody, G.M. (2002): "Status of land cover classification accuracy assessment", *Remote Sensing of Environment*, 80, pp. 185-201.

Foody, G.M. (2006): "What is the difference between two maps? A remote sensor's view", *Journal of Geographical Systems*, 8, pp. 119-130.

García-Haro, F.J.; Gilabert, M.A. y Meliá, J. (2001): "Monitoring fire-affected areas using Thematic Mapper data", *International Journal of Remote Sensing*, 22 (4), pp. 533-549.

Geerken, R. y Iliwi, M. (2004): "Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation", *Remote Sensing of Environment*, 90, pp. 490-504.

Guerra, F.; Puig, H. y Chaume, R. (1998). "The forest-savanna dynamics from multi-date Landsat - TM data in Sierra Parima, Venezuela", *International Journal of Remote Sensing*, 19 (11), pp. 2061-2075.

Hagen-Zanker, A. (2006): "Map comparison methods that simultaneously address overlap and structure", *Journal of Geographical Systems*, 8, pp. 165-185.

Huete, A.R.; Miura, T. y Gao, X. (2003): "Land Cover conversion and degradation analyses through coupled soil-plant biophysical parameters derived from Hyperspectral EO-1 Hyperion", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (6), pp. 1268-1276.

Li, X. y Yeh, A.G.O. (1998): "Principal component analysis of stacked multi-temporal images for the monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River Delta", *International Journal of Remote Sensing*, 19 (8), pp. 1501-1518.

Liu, D.; Kelly, M. y Gong, P. (2006): "A spatial-temporal approach to monitoring forest disease spread using multi-temporal high spatial resolution imagery", *Remote Sensing of Environment*, 101, pp. 167-180.

Liu, Z.; Huang, F.; Li, L. y Wan, E. (2002): "Dynamic monitoring and damage evaluation of flood in north-west Jilin with remote sensing", *International Journal of Remote Sensing*, 23 (18), pp. 3669-3679.

López-Hernández, D.; Hernández-Hernández, R. M. y Brossard, M. (2005). Historia del uso reciente de tierras de las Sabanas de América del Sur. Estudios de casos en Sabanas del Orinoco. *Interciencia*, 30 (10), pp. 623-630.

Lowell, K. (2001): "An area-based accuracy assessment methodology for digital change maps", *International Journal of Remote Sensing*, 22 (17), pp. 3571-3596.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

- Lu, D.; Mausel, P.; Brondizio, E. y Moran, E. (2004): "Change detection techniques", *International Journal of Remote Sensing*, 25 (12), pp. 2365-2407.
- Maldonado, F.D.; Dos Santos, J.R. y de Carvalho, V.C. (2002): "Land use dynamics in the semi-arid region of Brazil (Quixaba, PE): characterization by principal components analysis (PCA) ", *International Journal of Remote Sensing*, 23 (23), pp. 5005-5013.
- Mertens, B. y Lambin, E.F. (2000): "Land cover change trajectories in Southern Cameroon", *Annals of the Association of American Geographers*, 90 (3), pp. 467-494.
- Mas, J.F. (1999): "Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques", *International Journal of Remote Sensing*, 20 (1), pp. 139-152.
- Morton, D.C.; Defries, R.S.; Shimabukuro, Y.E.; Anderson, L.O.; Del Bon Espirito-Santo, F.; Hansen, M. y Carroll, M. (2005): "Rapid assessment of annual deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS data", *Earth Interactions*, vol. 9, paper no. 8, pp. 1-22.
- Pontius Jr., R.G. y Lippitt, C.D. (2006): "Can error explain map differences over time?", *Cartography and Geographic Information Science*, 33 (2), pp. 159-171.
- Pontius Jr., R.G.; Shusas, E. y Mceachern, M. (2004): "Detecting important land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101, pp. 251-268.
- Prenzel, B.J. y Treitz, P. (2006): "Spectral and spatial filtering for enhanced thematic change analysis of remotely sensed data", *International Journal of Remote Sensing*, 27 (5), pp. 835-854.
- Rippstein, G.; Escobar, E.; Toledo, J. M.; Fisher, M. y Mesa, E. 2001. Caracterización de comunidades vegetales en el Centro de Investigación Agropecuaria Carimagua en Meta, Colombia. En *Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. Rippstein, G.; Escobar, G. y Motta, F. (Eds.). Centro Internacional de Agricultura Tropical -CIAT-. Cali, Colombia.
- Roberts, D.A.; Batista, G.T.; Pereira, J.; Waller, E.K. y Nelson, B.W. (1998): "Change identification using multitemporal spectral mixture analysis: applications in eastern Amazonia", En *Remote sensing change detection: Environmental monitoring applications and methods*. Ed. Elvidge C. y Lunetta R. (Ann Arbor: Ann Arbor Press), pp. 137-161.
- Rogan, J. y Yool, S.R. (2001): "Mapping fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo Mountains, Arizona and New Mexico", *International Journal of Remote Sensing*, 22 (16), pp. 3101-3121.
- Santana, L.M. (2007): "*Cartografía de la ocupación del suelo y detección de cambios entre 1987 y 2001 en sabanas colombianas, utilizando imágenes Landsat*", tesis doctoral, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Madrid, España.
- Serra, P.; Pons, X. y Sauri, D. (2003): "Post-classification detection with data from different sensors: some accuracy considerations", *International Journal of Remote Sensing*, 24 (16), pp. 3311-3340.
- Slater, J. y Brown, R. (2000): "Changing landscapes: monitoring Environmentally Sensitive Areas using satellite imagery", *International Journal of Remote Sensing*, 21 (13 y 14), pp. 2753-2767.
- Song, C.; Woodcock, C.E.; Seto, K.C.; Pax-Lenney, M. y Macomber, S.A. (2001): "Classification and change detection Using Landsat TM Data: When and how to correct atmospheric effects?", *Remote Sensing of Environment*, 75, pp. 230-244.
- Sunar, F. (1998): "An analysis of changes in a multi-date data set: a case study in the Ikitelli area, Istanbul, Turkey", *International Journal of Remote Sensing*, 19 (2), pp. 225-235.
- Townshend, J.R.G.; Justice, C.O.; Gurney, C. y McManus, J. (1992): "The impact of misregistration on change detection", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30 (5), pp. 1054-1060.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

van Oort, P.A.J. (2006): "Interpreting the change detection error matrix", *Remote Sensing of Environment*, 108 (1), pp. 1-8, doi:10.1016/j.rse.2006.10.012.

Yang, X. y Lo, C.P. (2002): "Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area", *International Journal of Remote Sensing*, 23 (9), pp. 1775-1798.

Zhan, X.; Sohlberg, R.A.; Townshend, J.R.G.; Dimiceli, C.; Carroll, M.L.; Eastman, J.C.; Hansen, M.C. y Defries, R.S. (2002): "Detection of land cover changes using MODIS 250 m data", *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 336-350.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

TABLAS

Tabla 1. Descripción de las clases de ocupación del suelo presentes en la zona de estudio.

| Clase de ocupación del suelo/(abreviatura) | Descripción |
|--|---|
| Cuerpos de agua (Agua) | Incluye ríos procedentes de la cordillera y otros formados en la altillanura, además de pequeñas lagunas y esteros formados por la dinámica natural de los ríos meándricos. |
| Agricultura (Agri) | Áreas destinadas a cultivos, especialmente arroz bajo riego, en el piedemonte. También incluye tierras en preparación para siembra (arado o en fangueo) y cultivos en seco. Sobre la Altillanura se cultiva piña, yuca y maíz, a orillas de los valles y esteros con fines de subsistencia. |
| Pastos introducidos (Pint) | Se trata de gramíneas foráneas adaptadas a suelos ácidos y de baja fertilidad. Las principales especies encontradas, tanto en la altillanura como en el piedemonte, son <i>Brachiaria decumbens</i> , <i>B. humidicola</i> , <i>B. dictyoneura</i> , <i>Melinis minutiflora</i> , y <i>Panicum maximum</i> . |
| Pastos nativos (Pnat) | Esta categoría se encuentra mayormente en la altillanura y comprende los géneros <i>Andropogon</i> , <i>Asistida</i> , <i>Axonopus</i> , <i>Paspalum</i> , <i>Panicum</i> , y <i>Trachypogon</i> . En el piedemonte, donde existe mayor humedad, también se encuentran los géneros <i>Hymenachne</i> , <i>Leersia</i> , <i>Oryza</i> , y <i>Cyperus</i> . Estas especies son normalmente quemadas durante el período de sequía, para un mayor aprovechamiento por parte del ganado. |
| Suelo desnudo (Suel) | A esta clase pertenecen áreas que se encuentran descubiertas, como producto de la erosión hídrica, especialmente en la altillanura; también se incluyen las vegas de los ríos, con islas y playones, los caminos en tierra y poblados. |
| Bosque de galería (Fore) | Franjas de bosque, con amplitud variable y altura de árboles de hasta 20 m., ubicadas en forma continua o interrumpida en los valles y esteros. Las especies dominantes son <i>Schefflera morototoni</i> , <i>Pouteria</i> sp., <i>Calliandra</i> sp. <i>Ceiba pentandra</i> , <i>Spondias mombim</i> , <i>Annona</i> sp. e <i>Inga</i> sp. En algunos sectores, especialmente en los bordes de lagunas y esteros existen comunidades de palmas de las especies <i>Mauritia flexuosa</i> , <i>Mauritia minor</i> , y <i>Mauritiella</i> sp. |
| Palma de aceite (Palm) | Plantaciones comerciales, en el piedemonte, de palma <i>Elais guineensis</i> para producción de aceite. |
| Caucho (Cauc) | Áreas demostrativas de caucho (<i>Hevea brasiliensis</i>), que fueron plantadas como alternativa de utilización de los suelos de la altillanura. |

Fuente: Adaptado de Botero (1999) y Rippstein et al. (2001).

Tabla 2. Matriz con códigos que identifican las diferentes unidades cartográficas producto del cruce de los mapas de ocupación del suelo de 1987 y 2001.

| 1987 | 2001 | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Agua | Agri | Pint | Pnat | Suel | Fore | Palm | Cauc |
| Agua | 11 | 21 | 31 | 41 | 51 | 61 | 71 | 81 |
| Agri | 12 | 22 | 32 | 42 | 52 | 62 | 72 | 82 |
| Pint | 13 | 23 | 33 | 43 | 53 | 63 | 73 | 83 |
| Pnat | 14 | 24 | 34 | 44 | 54 | 64 | 74 | 84 |
| Suel | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | 85 |
| Fore | 16 | 26 | 36 | 46 | 56 | 66 | 76 | 86 |
| Palm | 17 | 27 | 37 | 47 | 57 | 67 | 77 | 87 |

En la diagonal se encuentran las persistencias. Fuente: Elaboración propia.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Matriz de transición (en porcentaje del área total) obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de ocupación del suelo de 1987 y 2001.

| 1987 | 2001 | | | | | | | | Total 1987 |
|------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------------|
| | Agua | Agri | Pint | Pnat | Suel | Fore | Palm | Cauc | |
| Agua | 0,34 | 0,34 | 0,16 | 0,06 | 0,17 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 1,12 |
| Agri | 0,10 | 0,88 | 0,63 | 0,35 | 0,25 | 0,13 | 0,06 | 0,00 | 2,40 |
| Pint | 0,01 | 0,52 | 4,89 | 1,52 | 0,92 | 0,03 | 0,04 | 0,00 | 7,92 |
| Pnat | 0,16 | 3,94 | 26,71 | 34,36 | 2,89 | 2,46 | 0,34 | 0,02 | 70,88 |
| Suel | 0,09 | 0,74 | 0,99 | 0,41 | 0,47 | 0,07 | 0,03 | 0,00 | 2,80 |
| Fore | 0,12 | 0,91 | 1,86 | 0,39 | 0,12 | 11,22 | 0,16 | 0,00 | 14,78 |
| Palm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,08 | 0,00 | 0,09 |
| Total 2001 | 0,82 | 7,33 | 35,26 | 37,09 | 4,80 | 13,97 | 0,71 | 0,02 | |

En la diagonal se encuentran las persistencias, y el sombreado representa las transiciones más extensas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Resumen de los resultados de la tabulación cruzada entre los mapas de ocupación del suelo de 1987 y 2001 (valores en porcentaje del área total).

| Clases de ocupación | 1987 | 2001 | Estable | Ganancia | Pérdida | Cambio total | Intercambio | Cambio neto |
|-------------------------------|-------|-------|---------|----------|---------|--------------|-------------|-------------|
| Agua | 1,12 | 0,82 | 0,34 | 0,48 | 0,78 | 1,26 | 0,96 | - 0,30 |
| Agricultura | 2,40 | 7,33 | 0,88 | 6,45 | 1,52 | 7,97 | 3,04 | + 4,93 |
| Pasto introducido | 7,92 | 35,26 | 4,89 | 30,37 | 3,03 | 33,4 | 6,06 | + 27,34 |
| Pasto nativo | 70,88 | 37,09 | 34,36 | 2,73 | 36,52 | 39,25 | 5,46 | - 33,79 |
| Suelo desnudo | 2,80 | 4,80 | 0,47 | 4,33 | 2,33 | 6,66 | 4,66 | + 2,00 |
| Bosque de galería | 14,78 | 13,97 | 11,22 | 2,75 | 3,56 | 6,31 | 5,50 | - 0,81 |
| Palma de aceite | 0,09 | 0,71 | 0,08 | 0,63 | 0,01 | 0,64 | 0,02 | + 0,62 |
| Caucho | | 0,02 | | 0,02 | | 0,02 | | + 0,02 |
| Estabilidad y cambios totales | | | 52,24 | 47,76 | 47,75 | 47,76 | 12,85 | 34,91 |

Fuente: Elaboración propia.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

Tabla 5. Análisis de la matriz de transición, desde el punto de vista de las ganancias, para obtención de cambios significativos.

| 1987 | 2001 | | | | | | | | Total 1987 | Pérdida |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| | Agua | Agri | Pint | Pnat | Suel | Fore | Palm | Cauc | (Fi+) | (Pi) |
| Agua | 0,34 | 0,34 | 0,16 | 0,06 | 0,17 | 0,05 | 0 | 0 | 1,12 | 0,78 |
| | <i>0,34</i> | <i>0,07</i> | <i>0,37</i> | <i>0,11</i> | <i>0,05</i> | <i>0,04</i> | <i>0,01</i> | <i>0,00</i> | <i>0,98</i> | <i>0,64</i> |
| | <u>0,00</u> | <u>-0,27</u> | <u>-0,21</u> | <u>-0,05</u> | <u>0,12</u> | <u>0,01</u> | <u>-0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>0,14</u> | <u>0,14</u> |
| | (0,00) | (-3,59) | (-0,57) | (-0,43) | (2,41) | (0,38) | (-1) | (-1) | (0,14) | (0,22) |
| Agri | 0,10 | 0,88 | 0,63 | 0,35 | 0,25 | 0,13 | 0,06 | 0,00 | 2,40 | 1,52 |
| | <i>0,01</i> | <i>0,88</i> | <i>0,79</i> | <i>0,23</i> | <i>0,11</i> | <i>0,08</i> | <i>0,02</i> | <i>0,00</i> | <i>2,11</i> | <i>1,23</i> |
| | <u>0,09</u> | <u>0,00</u> | <u>-0,16</u> | <u>0,12</u> | <u>0,14</u> | <u>0,05</u> | <u>0,04</u> | <u>0,00</u> | <u>0,29</u> | <u>0,29</u> |
| | (7,58) | (0,00) | (-0,20) | (0,56) | (1,34) | (0,68) | (2,96) | (-1) | (0,14) | (0,24) |
| Pint | 0,01 | 0,52 | 4,89 | 1,52 | 0,92 | 0,03 | 0,04 | 0,00 | 7,92 | 3,03 |
| | <i>0,04</i> | <i>0,52</i> | <i>4,89</i> | <i>0,74</i> | <i>0,35</i> | <i>0,26</i> | <i>0,05</i> | <i>0,00</i> | <i>6,85</i> | <i>1,96</i> |
| | <u>-0,03</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,78</u> | <u>0,57</u> | <u>-0,23</u> | <u>-0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>1,07</u> | <u>1,07</u> |
| | (-0,74) | (-0,01) | (0,00) | (1,05) | (1,61) | (-0,88) | (-0,20) | (-1) | (0,16) | (0,54) |
| Pnat | 0,16 | 3,94 | 26,71 | 34,36 | 2,89 | 2,46 | 0,34 | 0,02 | 70,88 | 36,52 |
| | <i>0,34</i> | <i>4,68</i> | <i>23,38</i> | <i>34,36</i> | <i>3,16</i> | <i>2,29</i> | <i>0,45</i> | <i>0,01</i> | <i>68,68</i> | <i>34,32</i> |
| | <u>-0,18</u> | <u>-0,74</u> | <u>3,33</u> | <u>0,00</u> | <u>-0,27</u> | <u>0,17</u> | <u>-0,11</u> | <u>0,01</u> | <u>2,20</u> | <u>2,20</u> |
| | (-0,54) | (-0,16) | (0,14) | (0,00) | (-0,08) | (0,08) | (-0,24) | (0,41) | (0,03) | (0,06) |
| Suel | 0,09 | 0,74 | 0,99 | 0,41 | 0,47 | 0,07 | 0,03 | 0,00 | 2,80 | 2,33 |
| | <i>0,01</i> | <i>0,19</i> | <i>0,92</i> | <i>0,26</i> | <i>0,47</i> | <i>0,09</i> | <i>0,02</i> | <i>0,00</i> | <i>1,96</i> | <i>1,49</i> |
| | <u>0,08</u> | <u>0,55</u> | <u>0,07</u> | <u>0,15</u> | <u>0,00</u> | <u>-0,02</u> | <u>0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>0,84</u> | <u>0,84</u> |
| | (5,62) | (2,99) | (0,07) | (0,56) | 0,00 | (-0,23) | (0,70) | (-1) | (0,43) | (0,56) |
| Fore | 0,12 | 0,91 | 1,86 | 0,39 | 0,12 | 11,22 | 0,16 | 0,00 | 14,78 | 3,56 |
| | <i>0,07</i> | <i>0,98</i> | <i>4,88</i> | <i>1,39</i> | <i>0,66</i> | <i>11,22</i> | <i>0,09</i> | <i>0,00</i> | <i>19,28</i> | <i>8,06</i> |
| | <u>0,05</u> | <u>-0,07</u> | <u>-3,02</u> | <u>-1,00</u> | <u>-0,54</u> | <u>0,00</u> | <u>0,07</u> | <u>0,00</u> | <u>-4,50</u> | <u>-4,50</u> |
| | (0,67) | (-0,07) | (-0,62) | (-0,7) | (-0,82) | 0,00 | (0,72) | (-1) | (-0,23) | (-0,56) |
| Palm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,08 | 0,00 | 0,09 | 0,01 |
| | <i>0,00</i> | <i>0,01</i> | <i>0,03</i> | <i>0,01</i> | <i>0,01</i> | <i>0,00</i> | <i>0,08</i> | <i>0,00</i> | <i>0,14</i> | <i>0,06</i> |
| | <u>0,00</u> | <u>-0,01</u> | <u>-0,03</u> | <u>-0,01</u> | <u>-0,01</u> | <u>0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>-0,05</u> | <u>-0,05</u> |
| | (-1) | (-1) | (-1) | (-1) | (-1) | (2,44) | (0,00) | (-1) | (-0,36) | (-0,84) |
| Total 2001 | 0,82 | 7,33 | 35,26 | 37,09 | 4,8 | 13,97 | 0,71 | 0,02 | | |
| | <i>0,82</i> | <i>7,33</i> | <i>35,26</i> | <i>37,09</i> | <i>4,8</i> | <i>13,97</i> | <i>0,71</i> | <i>0,02</i> | | |
| | <u>0</u> | <u>0</u> | | |
| | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | | |
| Ganancia | 0,48 | 6,45 | 30,37 | 2,73 | 4,33 | 2,75 | 0,63 | 0,02 | | |

El número en negrilla representa el porcentaje respecto a toda la imagen; en itálica es el valor esperado si el cambio fuese al azar; subrayado es la diferencia entre el valor observado y el estimado y en paréntesis el observado menos estimado dividido por el estimado.

Los cambios más destacados por encima y por debajo del azar aparecen en celdas con sombreado.

Área total: 979.473,75 Has.

Fuente: Elaboración propia.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

Tabla 6. Análisis de la matriz de transición, desde el punto de vista de las pérdidas, para obtención de cambios significativos.

| | 2001 | | | | | | | | Total 1987 | Pérdida |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 1987 | Agua | Agri | Pint | Pnat | Suel | Fore | Palm | Cauc | (Fi+) | (Pi) |
| Agua | 0,34 | 0,34 | 0,16 | 0,06 | 0,17 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 1,12 | 0,78 |
| | <i>0,34</i> | <i>0,06</i> | <i>0,28</i> | <i>0,29</i> | <i>0,04</i> | <i>0,11</i> | <i>0,01</i> | <i>0,00</i> | <i>1,12</i> | <i>0,78</i> |
| | <u>0,00</u> | <u>0,28</u> | <u>-0,12</u> | <u>-0,23</u> | <u>0,13</u> | <u>-0,06</u> | <u>-0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> |
| | (0,00) | (4,90) | (-0,42) | (-0,79) | (3,50) | (-0,54) | (-1) | (-1) | (0,00) | |
| Agri | 0,10 | 0,88 | 0,63 | 0,35 | 0,25 | 0,13 | 0,06 | 0,00 | 2,40 | 1,52 |
| | <i>0,01</i> | <i>0,88</i> | <i>0,58</i> | <i>0,61</i> | <i>0,08</i> | <i>0,23</i> | <i>0,01</i> | <i>0,00</i> | <i>2,40</i> | <i>1,52</i> |
| | <u>0,09</u> | <u>0,00</u> | <u>0,05</u> | <u>-0,26</u> | <u>0,17</u> | <u>-0,10</u> | <u>0,05</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> |
| | (6,44) | (0,00) | (0,09) | (-0,42) | (2,18) | (-0,43) | (4,15) | (-1) | (0,00) | |
| Pint | 0,01 | 0,52 | 4,89 | 1,52 | 0,92 | 0,03 | 0,04 | 0,00 | 7,92 | 3,03 |
| | <i>0,04</i> | <i>0,34</i> | <i>4,89</i> | <i>1,74</i> | <i>0,22</i> | <i>0,65</i> | <i>0,03</i> | <i>0,00</i> | <i>7,92</i> | <i>3,03</i> |
| | <u>-0,03</u> | <u>0,18</u> | <u>0,00</u> | <u>-0,22</u> | <u>0,70</u> | <u>-0,62</u> | <u>0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> |
| | (-0,74) | (0,52) | (0,00) | (-0,12) | (3,10) | (-0,95) | (0,20) | (-1) | (0,00) | |
| Pnat | 0,16 | 3,94 | 26,71 | 34,36 | 2,89 | 2,46 | 0,34 | 0,02 | 70,88 | 36,52 |
| | <i>0,48</i> | <i>4,26</i> | <i>20,47</i> | <i>34,36</i> | <i>2,79</i> | <i>8,11</i> | <i>0,41</i> | <i>0,01</i> | <i>70,88</i> | <i>36,52</i> |
| | <u>-0,32</u> | <u>-0,32</u> | <u>6,24</u> | <u>0,00</u> | <u>0,10</u> | <u>-5,65</u> | <u>-0,07</u> | <u>0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> |
| | (-0,66) | (-0,07) | (0,30) | (0,00) | (0,04) | (-0,70) | (-0,18) | (0,72) | (0,00) | |
| Suel | 0,09 | 0,74 | 0,99 | 0,41 | 0,47 | 0,07 | 0,03 | 0,00 | 2,80 | 2,33 |
| | <i>0,02</i> | <i>0,18</i> | <i>0,86</i> | <i>0,91</i> | <i>0,47</i> | <i>0,34</i> | <i>0,02</i> | <i>0,00</i> | <i>2,80</i> | <i>2,33</i> |
| | <u>0,07</u> | <u>0,56</u> | <u>0,13</u> | <u>-0,50</u> | <u>0,00</u> | <u>-0,27</u> | <u>0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> |
| | (3,48) | (3,12) | (0,15) | (-0,55) | (0,00) | (-0,80) | (0,73) | (-1) | (0,00) | |
| Fore | 0,12 | 0,91 | 1,86 | 0,39 | 0,12 | 11,22 | 0,16 | 0,00 | 14,78 | 3,56 |
| | <i>0,03</i> | <i>0,30</i> | <i>1,46</i> | <i>1,53</i> | <i>0,20</i> | <i>11,22</i> | <i>0,03</i> | <i>0,00</i> | <i>14,78</i> | <i>3,56</i> |
| | <u>0,09</u> | <u>0,61</u> | <u>0,40</u> | <u>-1,14</u> | <u>-0,08</u> | <u>0,00</u> | <u>0,13</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> |
| | (2,54) | (2,00) | (0,27) | (-0,75) | (-0,40) | (0,00) | (4,45) | (-1) | (0,00) | |
| Palm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,08 | 0,00 | 0,09 | 0,01 |
| | <i>0,00</i> | <i>0,00</i> | <i>0,00</i> | <i>0,00</i> | <i>0,00</i> | <i>0,00</i> | <i>0,08</i> | <i>0,00</i> | <i>0,09</i> | <i>0,01</i> |
| | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,01</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> | <u>0,00</u> |
| | (-1) | (-1) | (-1) | (-1) | (-1) | (-6,11) | (0,00) | (-1) | (0,00) | |
| Total 2001 | 0,82 | 7,33 | 35,26 | 37,09 | 4,80 | 13,97 | 0,71 | 0,02 | | |
| | <i>0,92</i> | <i>6,02</i> | <i>28,54</i> | <i>39,44</i> | <i>3,80</i> | <i>20,67</i> | <i>0,59</i> | <i>0,01</i> | | |
| | <u>-0,10</u> | <u>1,31</u> | <u>6,72</u> | <u>-2,35</u> | <u>1,00</u> | <u>-6,70</u> | <u>0,12</u> | <u>0,01</u> | | |
| | (-0,11) | (0,22) | (0,24) | (-0,06) | (0,26) | (-0,32) | (0,20) | (0,39) | | |
| Ganancia | 0,48 | 6,45 | 30,37 | 2,73 | 4,33 | 2,75 | 0,63 | 0,02 | | |
| | <i>0,58</i> | <i>5,14</i> | <i>23,65</i> | <i>5,08</i> | <i>3,33</i> | <i>9,45</i> | <i>0,51</i> | <i>0,01</i> | | |
| | <u>-0,10</u> | <u>1,31</u> | <u>6,72</u> | <u>-2,35</u> | <u>1,00</u> | <u>-6,70</u> | <u>0,12</u> | <u>0,01</u> | | |
| | (-0,18) | (0,26) | (0,28) | (-0,46) | (0,30) | (-0,71) | (0,24) | (0,39) | | |

El número en negrilla representa el porcentaje respecto a toda la imagen; en itálica es el valor esperado si el cambio fuese al azar; subrayado es la diferencia entre el valor observado y el estimado y en paréntesis el observado menos estimado dividido por el estimado.

Los cambios más destacados por encima y por debajo del azar aparecen en celdas con sombreado.

Área total: 979.473,75 Has.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Asignación final de las transiciones que resultaron no significativas, en el mapa dinámico de ocupación del suelo entre 1987 y 2001.

| 1987 | 2001 | | | | | | | |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|
| | Agua | Agri | Pint | Pnat | Suel | Fore | Palm | Cauc |
| Agua | P | Pnat | Pnat | Pnat | Agua | Agua | N.E. | T.I. |
| Agri | Agua | P | Pint | Agri | Suel | Fore | Palm | T.I. |
| Pint | Agua | Pint | P | Pint | T.S. | Palm | Palm | T.I. |
| Pnat | Agua | Agri | T.S. | P | Pint | Fore | Palm | Cauc |
| Suel | Agua | Suel | Suel | Pnat | P | Fore | Palm | T.I. |
| Fore | Agua | T.S. | T.S. | Fore | Suel | P | Fore | T.I. |
| Palm | T.I. | T.I. | T.I. | T.I. | T.I. | Palm | P | T.I. |

P= persistencia, T.S.= transición significativa, y T.I.= transición inexistente. Fuente: Elaboración propia.

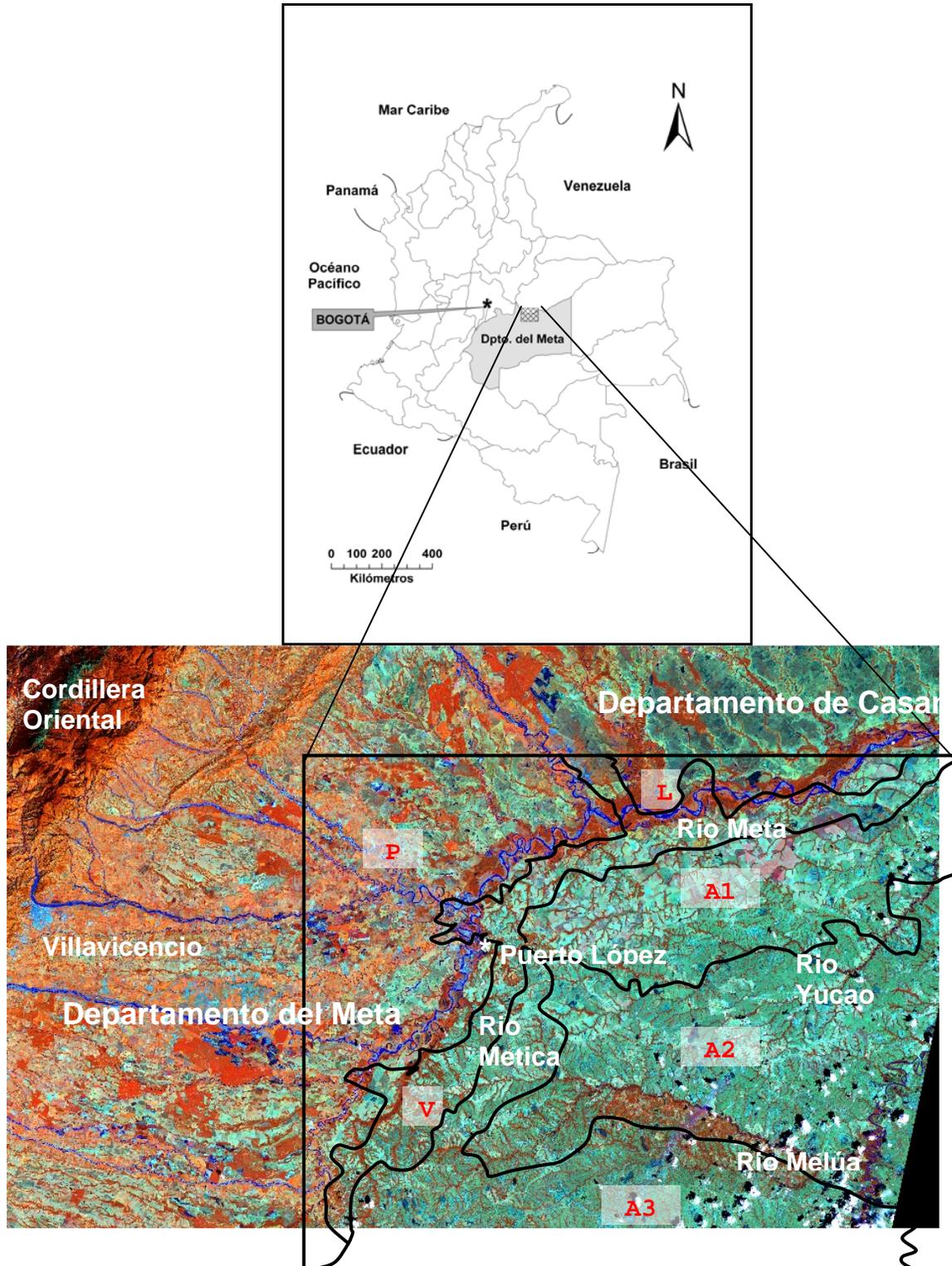
Tabla 8. Áreas ocupadas por las clases estables y las que sufrieron cambios significativos entre 1987 y 2001.

| Clases estables o sin cambios significativos | | % |
|--|----------|-------|
| Agua | | 1,04 |
| Agricultura | | 5,17 |
| Pasto introducido | | 10,45 |
| Pasto nativo | | 35,33 |
| Suelo desnudo | | 2,56 |
| Bosque de galería | | 14,44 |
| Palma de aceite | | 0,59 |
| Caucho | | 0,02 |
| | Subtotal | 69,6 |
| Cambios significativos | | % |
| Bosque de galería a agricultura | | 0,91 |
| Pasto nativo a pasto introducido | | 26,71 |
| Bosque de galería a pasto introducido | | 1,86 |
| Pasto introducido a suelo desnudo | | 0,92 |
| | Subtotal | 30,40 |

Fuente: Elaboración propia.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

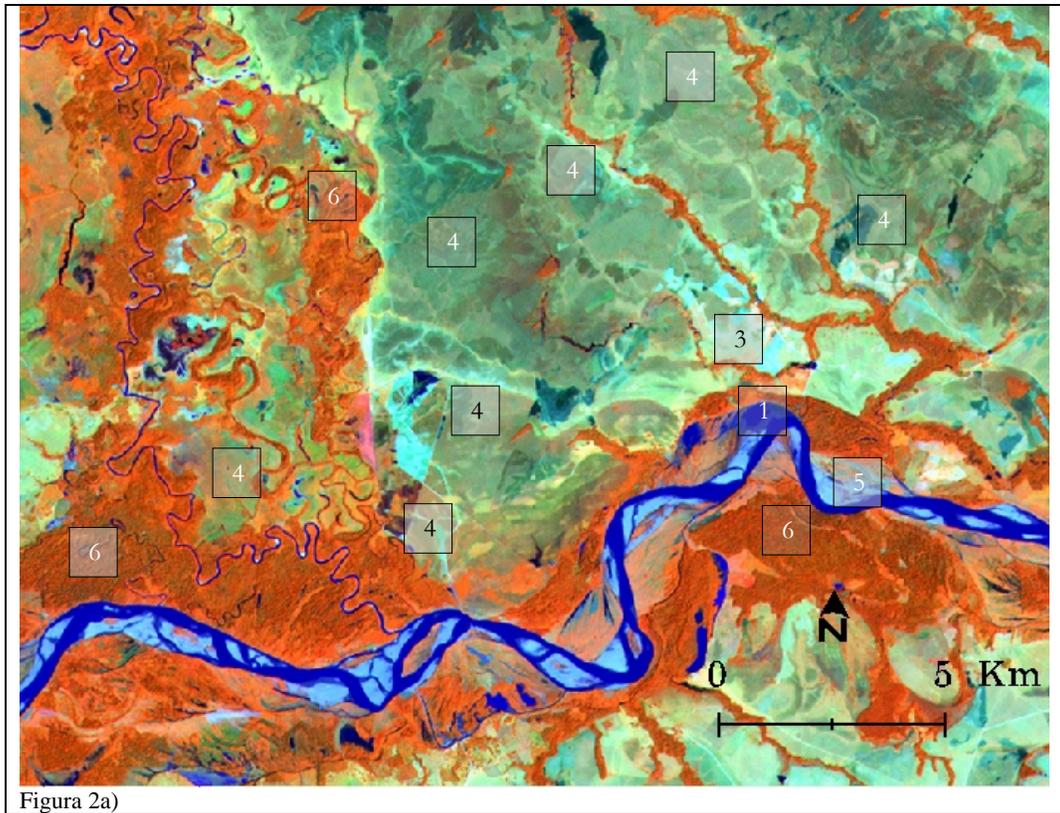
FIGURAS



Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en Colombia y paisajes fisiográficos presentes: Altillanura plana (A1), Altillanura moderadamente disectada (A2), Altillanura fuertemente disectada (A3), Piedemonte (P), Llanura aluvial de desborde (L) y Valles aluviales (V), sobre composición en color 4-5-3 de la imagen Landsat ETM+.

Fuente: Elaboración propia con ArcMap 8.1.



Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

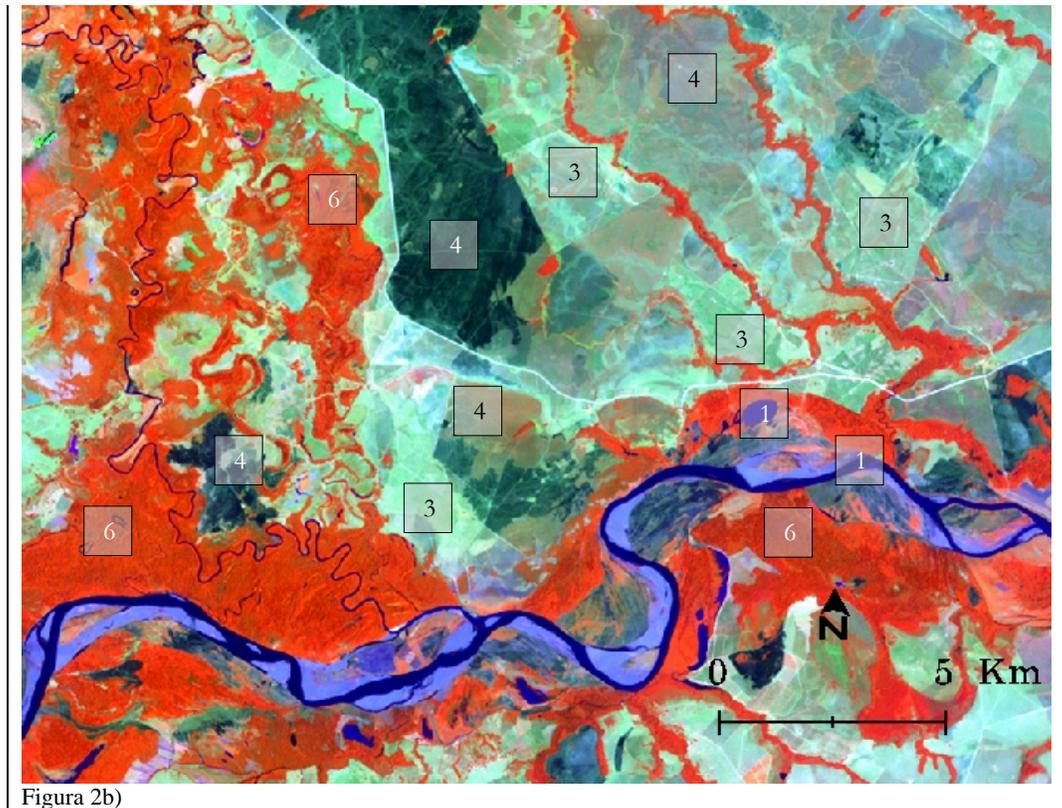
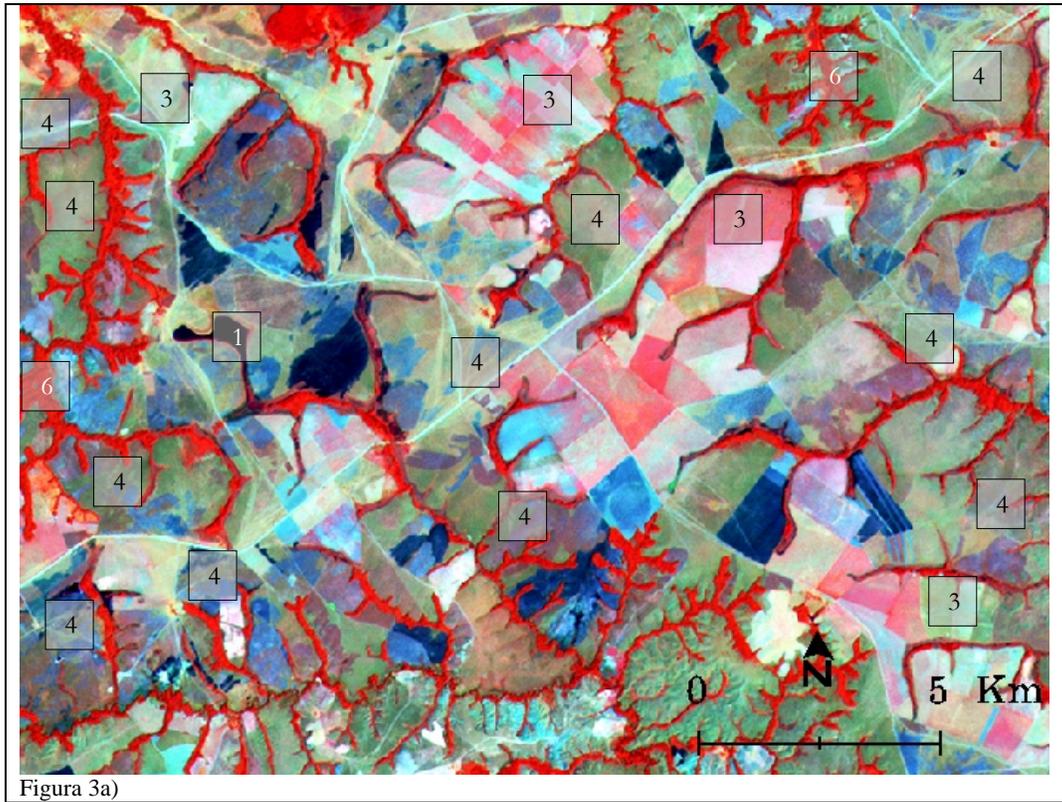


Figura 2. Estabilidad y cambios en la ocupación del suelo en un sector de la planicie y valles aluviales entre 1987 (a) y 2001 (b), sobre composiciones en color 4-5-3 de imágenes TM y ETM+, respectivamente. (1= agua, 3= pasto introducido, 4= pasto nativo, 5= suelo desnudo (islotes y playones) y 6= bosque de galería; las tonalidades oscuras, distintas del agua, evidencian diferentes estadio de quema del pasto nativo).

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

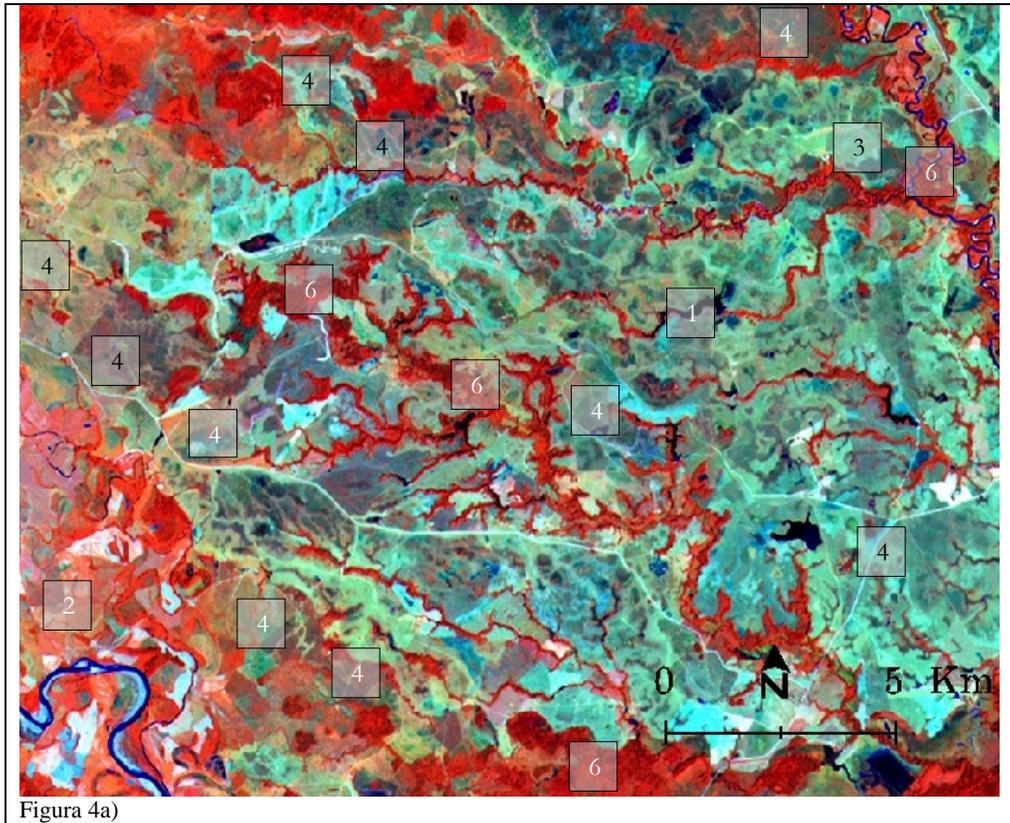


Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157



Figura 3. Estabilidad y cambios en la ocupación del suelo en un sector de la altillanura plana entre 1987 (a) y 2001 (b), sobre composiciones en color 4-5-3 de imágenes TM y ETM+, respectivamente. (1= agua, 2= agricultura, 3= pasto introducido, 4= pasto nativo, 6= bosque de galería, y 8= caucho; las tonalidades oscuras, distintas del agua, evidencian diferentes estadios de quema del pasto nativo, excepto mancha grande ubicada en el centro de la imagen b).

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157



Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

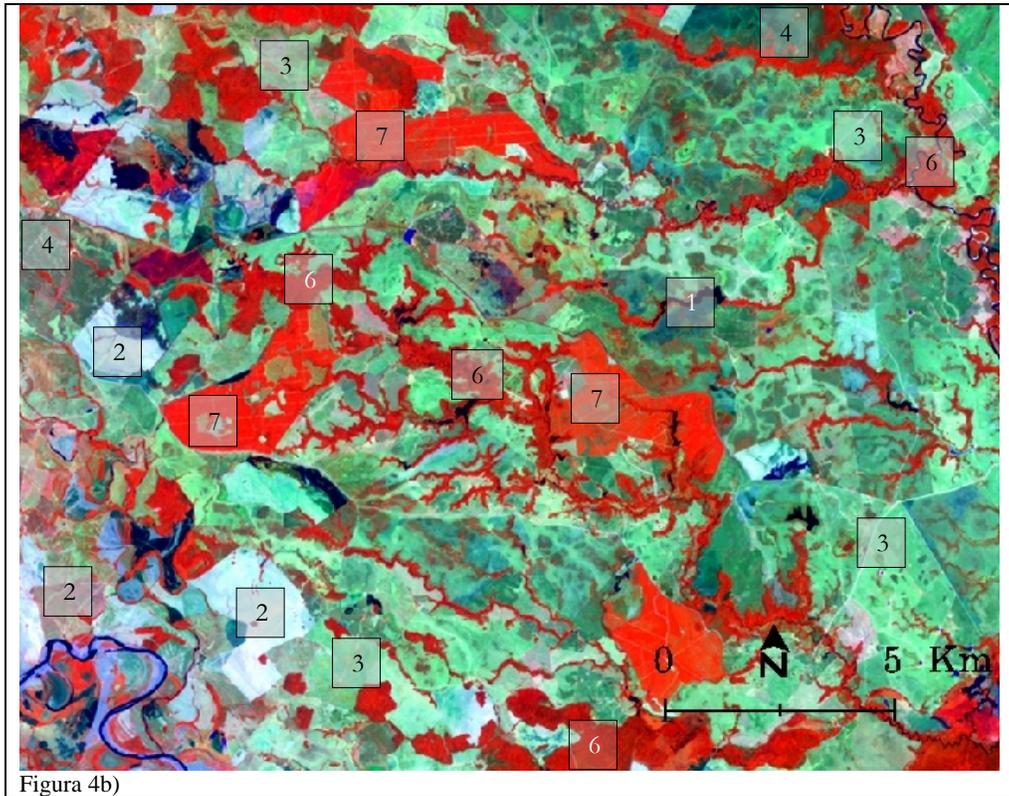
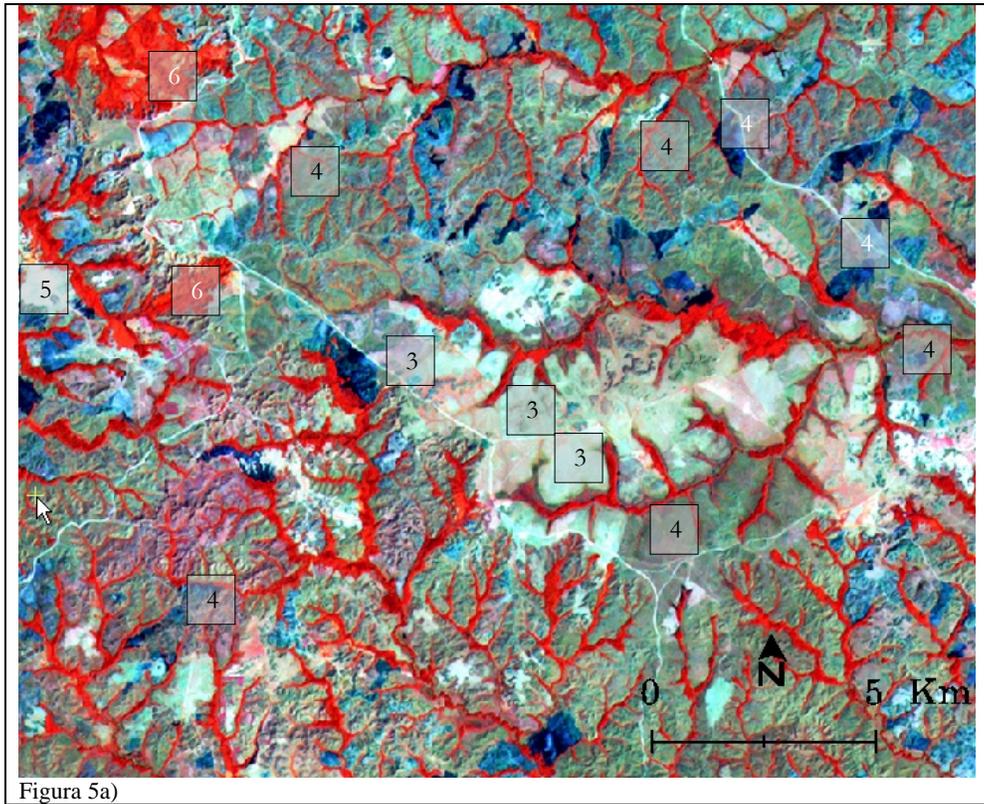


Figura 4. Estabilidad y cambios en la ocupación del suelo en un sector del piedemonte entre 1987 (a) y 2001 (b), sobre composiciones en color 4-5-3 de imágenes TM y ETM+, respectivamente. (1= agua, 2= agricultura, 3= pasto introducido, 4= pasto nativo y quemas, 6= bosque de galería, y 7= palma de aceite).

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157



Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

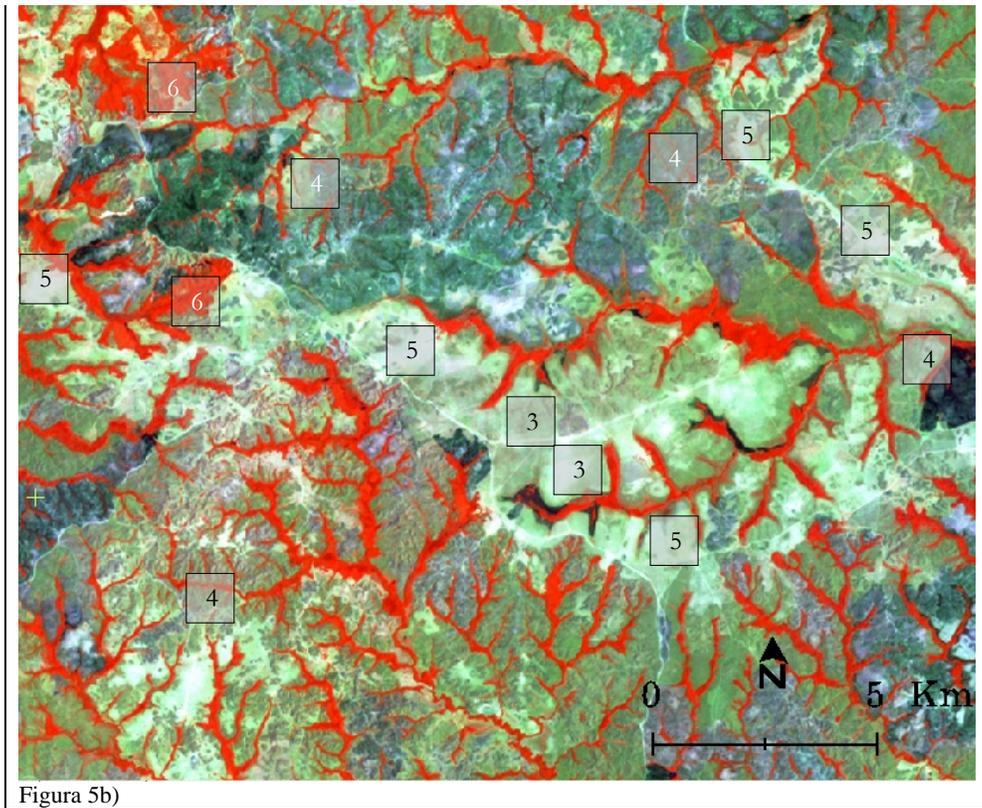


Figura 5. Estabilidad y cambios en la ocupación del suelo en un sector de la altillanura moderadamente disectada entre 1987 (a) y 2001 (b), sobre composiciones en color 4-5-3 de imágenes TM y ETM+, respectivamente. (3= pasto introducido, 4= pasto nativo, 5= suelo desnudo, y 6= bosque de galería; las tonalidades oscuras evidencian diferentes estadio de quema del pasto nativo).

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

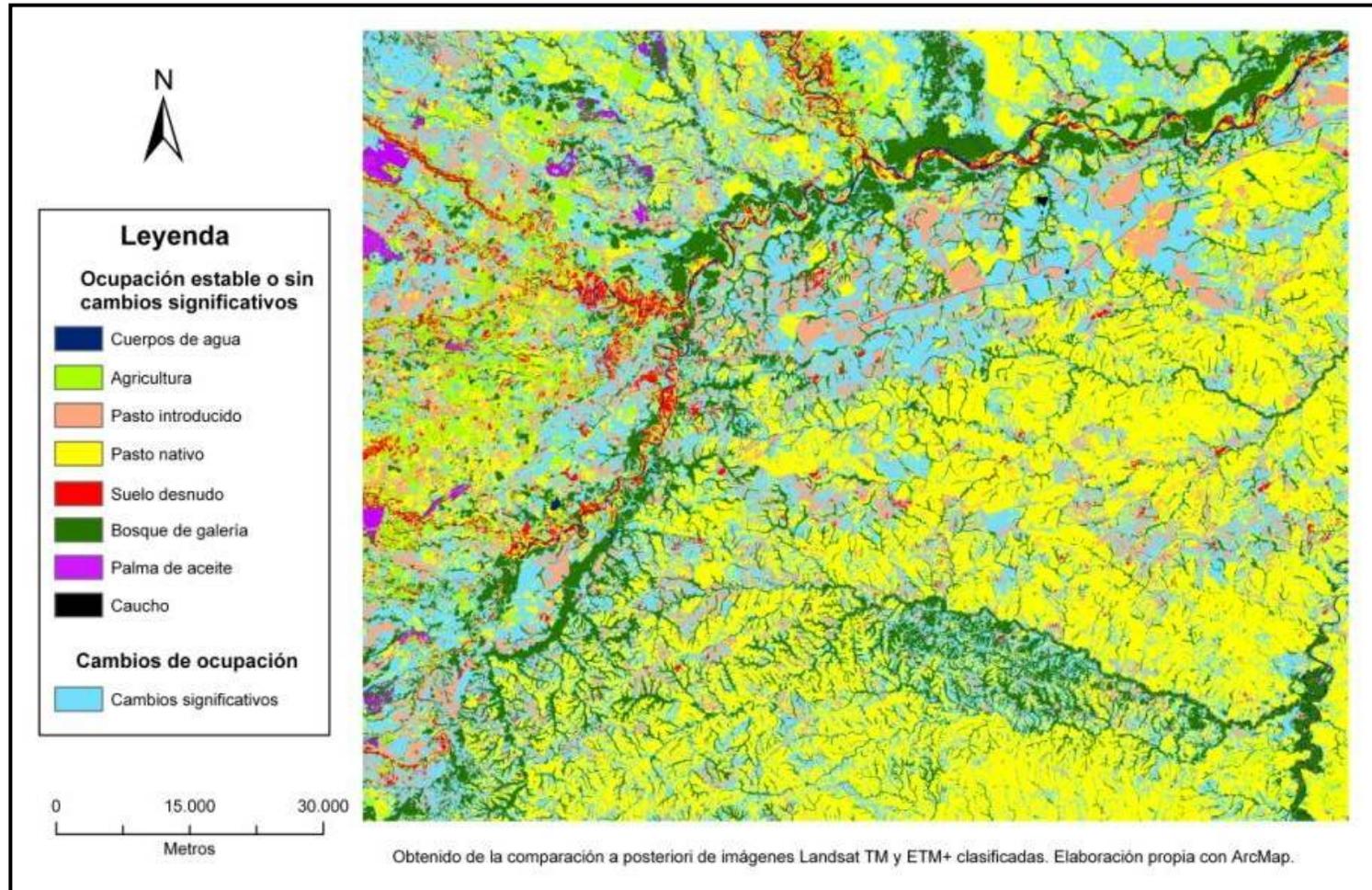


Figura 6. Mapa dinámico de ocupación del suelo, donde se destacan las zonas estables o sin cambios significativos.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157

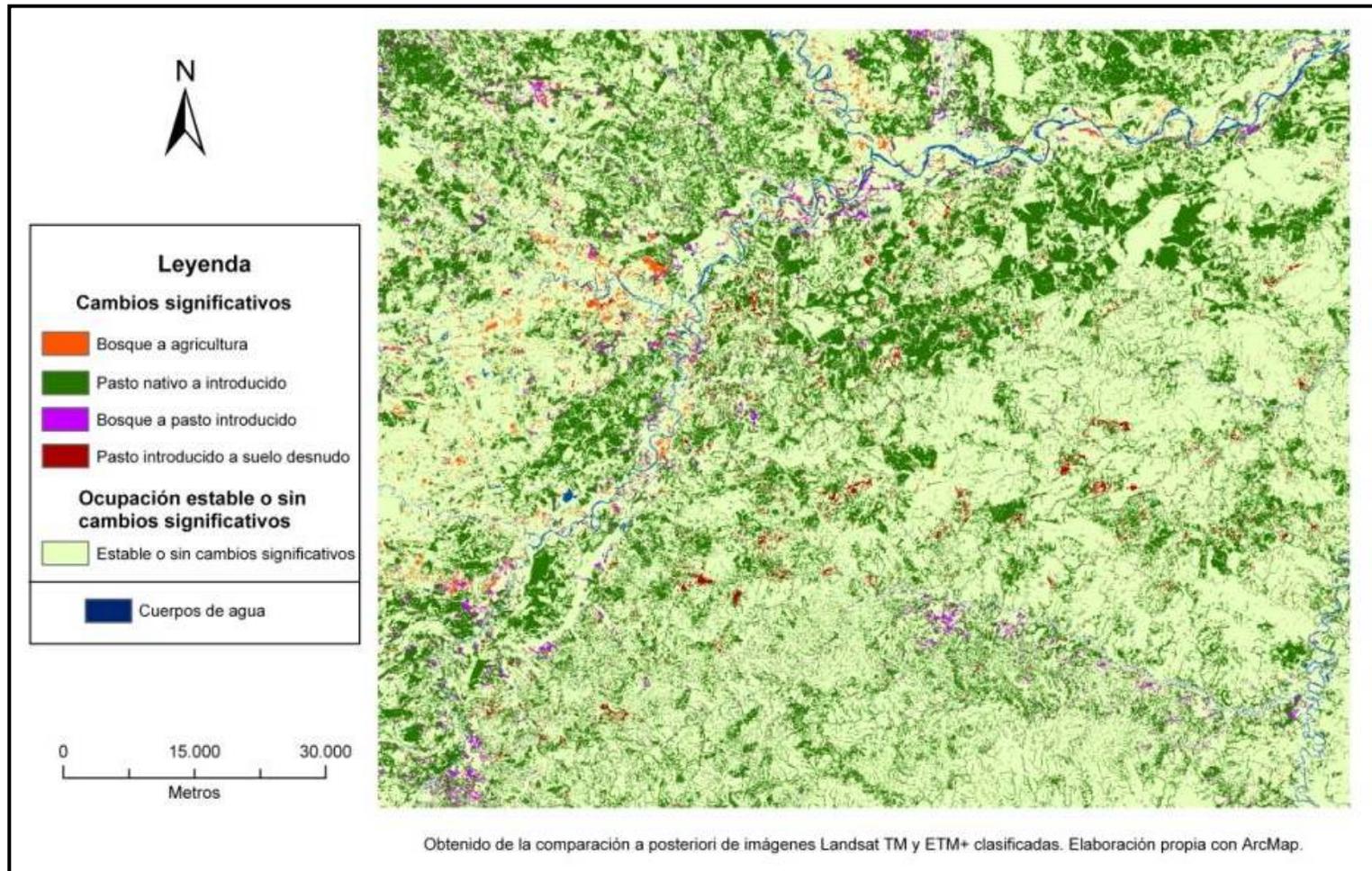


Figura 7. Mapa dinámico de ocupación del suelo, donde se destacan las zonas que sufrieron cambios significativos.