

12

Transformación de la cobertura forestal en el Valle del Magdalena Medio en el período 1987-2001

Transformación de la cobertura forestal en el Valle del Magdalena Medio en el período 1987-2001

Autores: Natalia Rodríguez & Andrés Etter.¹

Resumen

Este estudio analiza la dinámica de transformación de la cobertura forestal en el Valle del Magdalena Medio entre 1987-2001, en un área de 13.500 km² mediante un análisis multitemporal para determinar los patrones, tasas y factores de transformación de las coberturas durante este período. El análisis utilizó imágenes Landsat y cartografía básica, y el método de regresión logística para analizar la relación entre la presencia de bosques y los procesos de deforestación y regeneración con variables independientes. A lo largo de las tres fechas estudiadas se observa un decrecimiento de los bosques y se evidencia la dominancia de los pastos en las tres fechas. Entre 1987-2001 se deforestaron aproximadamente 10.000 ha/año. La regeneración de bosques para el período de 1987-1991 fue 8 veces mayor (34.600 ha/año) que entre 1991-2001 (4.200 ha/año). Entre 1987-2001 el área de bosques en la región disminuyó en 101.806 has. Los principales factores de disminución del área de bosque en el período de 1987-2001 están relacionados con el aumento de la población y la ampliación de la frontera agrícola, además de los conflictos armados de la región. El desempeño de los modelos fue bajo (ROC: 0,66-0,75), en especial para explicar los procesos de regeneración y deforestación. La presencia de bosque, la regeneración y deforestación presentan una relación negativa con la fertilidad del suelo y la altitud; y positiva con la pendiente y la distancia a vías, asentamientos y ríos.

Palabras clave:

Transformación del paisaje, análisis multitemporal, cobertura forestal, regeneración de bosque, deforestación, análisis de regresión logística.

Abstract

This study analyze the forest cover change in the Middle Magdalena Valley between 1987-2001; in a 13.50 Km² area, using a multitemporal change cover analysis to determine patterns, rates and factors in this period. We used Landsat images and basic cartography, and the logistic regression analysis to analyze the relation between the forest presences, deforestation and regeneration process with independents variables. During the three years, the forest decrease and the grassland was the dominant cover. In 1987-2001 the deforestation had a 10.000 ha/year rate. The regeneration in 1987-1991 (34.600 ha/year) was eight times higher than 1991-2001 (4.200 ha/year). In 1987-2001 the forest reduces its area in 101.806 has. The main factors in the decrease of the forest area in this period, are related with the population growth and the enlargement of the agriculture front, in addition with the armed conflict in the region. The fulfillment of the models were low (ROC 0,66-0,75) the most in regeneration and deforestation. The forest presences, regeneration and deforestation show a negative relation with the soil fertility and elevation, and the slope and distance to rows, settlements and rivers show a positive relation.

Key words

Land cover change, multitemporal analysis, forest cover, forest regeneration, deforestation, logistic regression analysis.



Introducción

La transformación de los ecosistemas es el resultado de la ocupación y el uso del paisaje por las comunidades humanas a diferentes escalas espaciales y temporales. Esta presión sobre los ecosistemas naturales no va a disminuir en un futuro cercano debido al acelerado crecimiento de la población humana y la economía global, que están incrementando la demanda de alimentos y otros recursos generando el avance de la frontera de producción agropecuaria sobre los bosques (Vitousek et al. 1997; Angelsen & Kaimowitz, 2001; Etter et al., 2006c).

La transformación genera cambios en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas naturales alterando los bienes y servicios que estos prestan. Las principales consecuencias de estas transformaciones son los cambios climáticos, el aumento en la emisión de gases de efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad por la reducción y fragmentación de hábitats y por la reducción de sus tamaños poblacionales; la disminución del abastecimiento de madera, y la degradación y contaminación de suelos y aguas que generan cambios significativos en ecosistemas acuáticos (Meyer & Turner II, 1992; Vitousek et al., 1997; Viña & Cavelier, 1999; Angelsen & Kaimowitz, 2001; Linkie et al., 2004).

Gran parte de estos problemas surgen por la deforestación, lo cual ha incrementado el interés y la priorización de estudios que involucren el monitoreo y la comprensión de las dinámicas de

transformación del paisaje y las fuerzas direccionadoras biofísicas, sociales y económicas que los explican. (Lepers et al., 2005).

Entre 1980 y 2000 los trópicos experimentaron la mayor reducción en las áreas de bosques, en particular en países de América Latina como lo indica el estudio de Lepers et al. (2005). Los estudios de Etter y Van Wyngaarden (2000) y Etter et al. (2008) para Colombia elaboran análisis a nivel nacional de la transformación del paisaje desde antes de la llegada de los españoles, mostrando cómo amplias áreas de la región Andina y Caribe han sido afectadas por las actividades humanas de manera marcada desde hace más de 500 años. A partir del siglo XX en particular después de 1950 la transformación se ha expandido hacia zonas húmedas de tierras bajas debido a las migraciones de la población humana (Etter et al., 2006c). Estos estudios muestran que la deforestación ha sido acelerada, espontánea y sin planeación, y enfatizan el efecto transformador de la ganadería, que ha generado la implantación de pastos introducidos, con consecuentes bajos niveles de regeneración de la vegetación secundaria (Etter et al., 2005).

Los Andes colombianos y valles intercordilleranos son considerados como áreas de alta prioridad para la conservación por los altos niveles de biodiversidad y endemismo, tasas de transformación aceleradas y altos valores en términos de servicios ambientales (Dinerstein et al., 1995). Desde la década de los 60

se han incrementado las amenazas por la colonización agropecuaria y ganadera, y la plantación de cultivos ilegales (Cavelier & Etter, 1995; Etter, 1998), siendo la región del Magdalena Medio una de las áreas más transformadas. Dinerstein et al. (1995) la han catalogado como un área de amenaza crítica por la pérdida de hábitat, fragmentación, degradación y la alta tasa de cambio; consecuencias de la construcción de vías para la comunicación entre el interior del país y la costa Caribe, en combinación con actividades petroleras, ganaderas y de cultivos ilícitos, que presionan los remanentes de bosque. A esto se agregan los recurrentes conflictos sociales y políticos en los que la lucha por los recursos naturales ha generado enfrentamientos entre Estado, guerrilla y paramilitares (Márquez, 2001).

Franco (2004), realizó un análisis multitemporal de los bosques del Carare - Opón, donde analizó los cambios en la cobertura forestal de esta zona por medio de una clasificación digital de imágenes satelitales en diferentes escalas (región, municipio, vereda, geoforma y cuencas), concluyendo de manera general que las áreas de cambio de cobertura forestal no están concentradas en alguna región específica, ya que se evidencian cambios y áreas en equilibrio en todos los sectores y paisajes.

El conocimiento acerca de las causas de los procesos de deforestación y regeneración de los bosques, permite entender las relaciones entre actividades humanas y patrones de dirección

y transformación del paisaje, facilitando la identificación y la formulación de planes de manejo para mantener áreas claves para la conservación. Existe un vacío de estos estudios a escala intermedia que se ubiquen entre las aproximaciones globales/continentales y los estudios locales, ya que las características ecosistémicas, biofísicas, socioeconómicas y culturales muestran variaciones a escala regional (Margules & Pressey, 2000; Nagendra et al., 2003; Etter et al., 2006a, c).

Este estudio contribuye a la comprensión de la dinámica de la cobertura forestal en la región del Valle del Magdalena Medio, por medio de un análisis de transformación multitemporal, para cuantificar los cambios en esta área (13.500 km²). Para estudiar la presencia de bosque y los procesos de deforestación y regeneración se aplicó un modelo de regresión logística con información sobre variables biofísicas y socioeconómicas disponibles. Se concluye identificando las áreas más dinámicas y estables del paisaje en esta región.

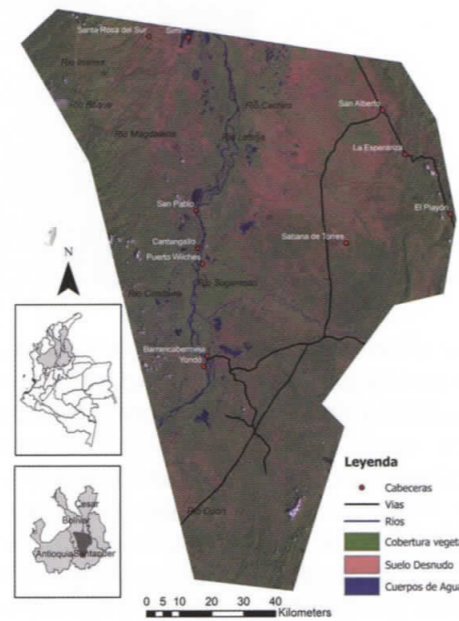
Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio comprende 13.500 km², y se encuentra localizada en la cuenca media del valle del río Magdalena, abarcando parte de los departamentos de Santander, Bolívar, Cesar, Norte de Santander y Antioquia (Figura 1). Pre-

Figura 1.
Área de estudio.
Valle del
Magdalena Medio.

Fuente:
Elaboración propia
a partir de la
imagen Landsat
ETM+ 2001
Path_8/Row_55.



senta elevaciones que van desde 50-100 m en el valle y 1.700 m en la Serranía de San Lucas (Cordillera Central) y 1.500 m en la Cordillera Oriental. El clima presenta oscilaciones de temperatura media entre 23-30°C y una precipitación que varía entre 2.500 mm en las partes altas y 1000 mm en el valle (CORMAGDALENA; Universidad Nacional de Colombia, 2002). Los suelos de la región tienen una relación marcada con las características topográficas, presentándose Inceptisoles y Entisoles en las pendientes, suelos con características vérticas en las terrazas, y Entisoles e Inceptisoles en las planicies aluviales. (CORMAGDALENA; Universidad Nacional de Colombia, 2002). Las actividades agropecuarias más comunes son la ganadería y los cultivos agroindustriales de palma africana; la extracción y refinación de petróleo es la actividad económica más importante.

Elaboración de mapas multitemporales de coberturas

Se usaron imágenes Landsat (TM y ETM+) pertenecientes al Path_8/Row_55 de los años 1987, 1991 y 2001, con una resolución de 28,5 m (se descargaron de la página Global Land Cover Facility de

la Universidad de Maryland) siendo estas imágenes las que estaban disponibles al momento de hacer la descarga. Con el fin de poder analizar los cambios multitemporales se georreferenciaron todas las imágenes tomando como base la imagen del año 1987. Esto se realizó por el proceso de georreferenciación imagen a imagen con el software ArcGis 9.2 con un error RMS de 0.4 (RMS= root mean square).

Se realizó una clasificación supervisada de las imágenes por el método del paralelepípedo en el software Envi 4.1. Para hacer la clasificación se seleccionaron sitios de muestreo representativos de las clases de coberturas en las imágenes que se estudiaron (Jensen, 2005), los cuales se tomaron de la imagen por medio de polígonos. Las clases resultantes fueron Bosque, Vegetación Secundaria, Cultivo de Palma, Pastos, Pastos Inundables, Pastos Secos, Cuerpos de Agua, Suelo Desnudo, Nubes y Sombras. Estos fueron reclasificados uniendo los pastos y el suelo desnudo en una sola clasificación de Pastos, al igual que las Nubes y Sombras. Esta última categoría se eliminó de todas las imágenes, puesto que la presencia de nubes en las imágenes altera las firmas espectrales en las imágenes de satélite y genera problemas en la clasificación (Jensen, 2005). Las coberturas se

simplificaron a 5 clases: Bosque, Vegetación Secundaria, Cuerpos de Agua, Cultivo de Palma y Pastos. La clasificación de las coberturas se realizó primero en categorías específicas para evitar errores de aproximación, los cuales se redujeron al ser agrupadas posteriormente.

Para validar la clasificación se realizó una matriz de confusión que permite determinar la precisión de la clasificación con respecto a las muestras tomadas para cada clase. Se obtuvo una precisión de 86%, 91% y 94% y un coeficiente Kappa de 0.82, 0.89 y 0.93 de cada imagen 1987, 1991 y 2001 respectivamente.

A partir de los mapas se realizaron las matrices de cambio de los períodos estudiados (1987-1991 y 1991-2001) utilizando la función "Tabulate area" de ArcGis 9.2. Para la determinación de las áreas estables durante todo el período se realizaron cálculos entre los mapas con el software ArcGis 9.2. La tasa anual de cambio fue calculada de acuerdo a Puyravaud (2003):

$$Tasa = \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \right) \ln \left(\frac{Ai_2}{Ai_1} \right)$$

Donde Ai_1 es la cobertura de la clase i en el tiempo inicial (t_1) y Ai_2 es la cobertura de la clase i en el tiempo final (t_2).

Construcción de variables dependientes e independientes

Para realizar la modelación estadística, los mapas de los diferentes años se remuestrearon a una grilla común de 1 ha de resolución espacial. Después se construyeron mapas binarios (1-0) de bosque-no bosque para cada fecha, con los cuales se construyeron los mapas de deforestación (bosque a no bosque) y regeneración (no bosque a bosque) para los períodos de 1987-1991 y 1991-2001 por medio de ArcGis 9.2, y se calcularon las matrices de cambio de cada período.

Para analizar los efectos de factores biofísicos y económicos en la presencia, deforestación y regeneración de bosque se construyeron mapas con base en la misma grilla de 1 ha, para la pendiente, distancia a vías, distancia a ríos, distancia a cabeceras y fertilidad de suelo. (Tabla 1).

Tabla 1.
Variables explicativas.

| VARIABLE | FUENTE | UNIDADES |
|--------------------------------|--|---|
| Fertilidad de suelo | IGAC, 1983 Mapa de suelos | Categorica: 1 = Baja, 2 = Media 3 = Alta |
| Distancia Vías 1987 1991 | IGAC, 2000 Mapas topográficos 1:100.000 | Continua: m |
| Distancia Cabeceras | | Continua: m |
| Distancia Ríos | | Continua: m |
| Pendiente | SRTM | Continua: grados |
| Altitud | | Continua: msnm |

Las variables independientes se estandarizaron dividiendo cada grilla entre la raíz cuadrada de la media (siglas en inglés RMS root mean square) (Etter et al., 2005).

$$RMS = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2}{n}}$$

Donde x es el valor de la celda y n el número total de celdas.

$$Logit(y) = B_0 + B_1*(Altitud) + B_2*(D\ Cab) + B_3*(D\ rios) + B_4*(D\ Vias) + B_5*(Pendiente) + B_6*(Fertilidad\ suelo)$$

Donde Logit (y) es la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente medida en un rango entre 0-1 (deforestación, regeneración y presencia de bosques) resultado de la linealización de la ecuación de regresión logística; y B el coeficiente de cada variable (Eastman, 2003).

La validación de las predicciones de cada modelo se realiza en la función "Logistigreg" de IDRISI mediante el uso del área bajo la curva ROC (Relative Operating Characteristics), la cual compara la probabilidad de una ocurrencia diferente en un modelo predicho a la ocurrencia actual de los datos observados, en términos de positivos verdaderos y positivos falsos

Modelación – Análisis de regresión logística

Con las variables dependientes (presencia de bosque, deforestación y regeneración) y las variables independientes (fertilidad del suelo, altitud, pendiente, distancias a vías, cabeceras y ríos) se aplicó un modelo de regresión logística mediante la función "logisticreg" del Software Idrisi GIS 32, que utiliza el siguiente modelo matemático:

(errores). Cuando el valor ROC es cercano a 1 la predicción es perfecta y cuando se acerca a 0,5 la predicción es equivalente al azar, siendo el valor de 0,7 el valor mínimo aceptable para una modelación (Etter et al., 2006b; Eastman, 2003).

Resultados y discusión

Cambios en la cobertura, deforestación y regeneración del bosque

Al observar las tres fechas estudiadas el valle del Magdalena Medio no presenta una transformación uniforme en el período de estudio (Figura 2), lo que se puede explicar en las ca-

racterísticas socioeconómicas de la región del Magdalena Medio, dentro de las que se encuentran diferentes actividades de desarrollo económico e infraestructura, como la ganadería, los cultivos de palma y la extracción de petróleo, que han impedido la regeneración del bosque en las zonas bajas y con pendientes suaves; y la presencia de grupos armados ilegales que genera por una parte abandono de tierras y migración de los campesinos a las ciudades; y por otra parte, la siembra de cultivos ilícitos en las áreas de ocupación de estos grupos generando deforestación.

Los conflictos inherentes de esta región determinan los patrones del paisaje, ya que debido a estas características socioeconómicas la presencia y permanencia de bosque en los tres años de estudio se concentra principalmente en la Serranía de San Lucas y en el flanco occidental de la Cordillera Oriental en áreas de pendientes fuertes, donde se dificulta el establecimiento de la ganadería, cultivos agroindustriales e infraestructura vial (Dávalos, 2001); en las zonas bajas se encuentran áreas de bosque pero menos distribuidas. Para el año 1987 el bosque se presenta también en áreas de baja accesibilidad en la zona sur (Figura 3).

Figura 3. Mapa de coberturas por año. Fuente: Elaboración propia.

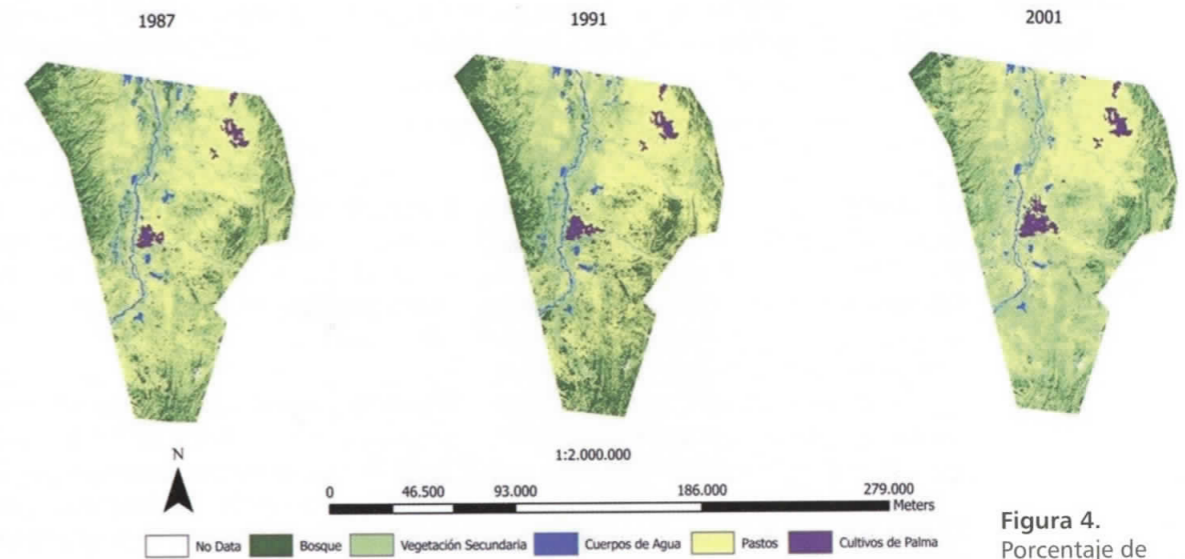
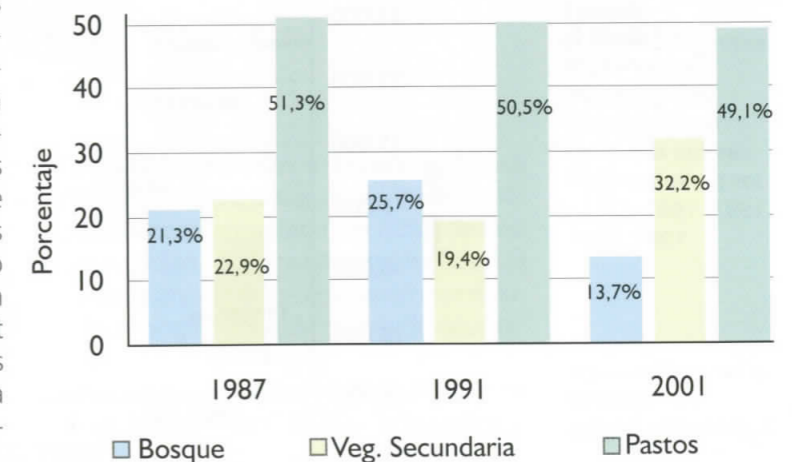


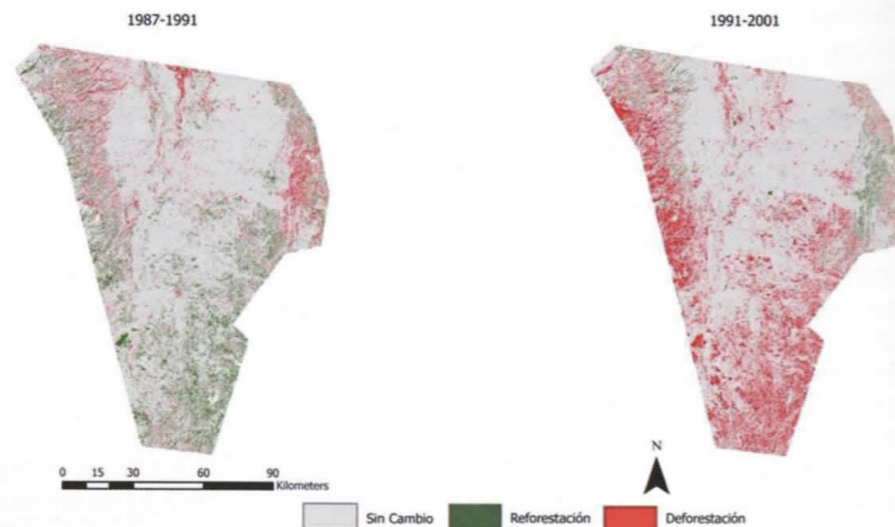
Figura 4. Porcentaje de Bosque, Vegetación secundaria y Pastos por año. Fuente: Elaboración propia.



La dominancia y establecimiento de los pastos en zonas bajas y de pendientes moderadas en la región (Figura 4), responde a la actividad económica principal que es la ganadería extensiva, ya que las planicies y terrazas aluviales facilitan el establecimiento de los pastos y el ganado. Debido a esto las áreas de pastos y vegetación secundaria son las coberturas dominantes de reemplazo de bosque. Lo anterior concuerda con los resultados encontrados por Etter et al., (2006c) en los bosques tropicales de zonas bajas, en donde se encuentra que desde la década de los 40 los pro-

Figura 2. Mapa de deforestación y regeneración de bosque para los períodos de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



cesos de deforestación muestran una rápida disminución del bosque, y son cambiados principalmente por pastos introducidos para la ganadería.

Los cultivos de palma en el período de estudio se presentan en zonas bajas, con pendientes suaves, buena accesibilidad y suelos fértiles. Las condiciones de clima, suelo y relieve del Valle del Magdalena

Medio, han generado el aumento de los cultivos de palma en el período de estudio que pasaron de 19.509 ha en 1987 a 30.535 ha en el 2001 (Tabla 2), ya que el cultivo de palma africana ha tomado una gran importancia dentro de la producción nacional de oleaginosas por los altos índices de productividad por unidad de superficie que presenta esta palma (Guerra, 1983).

Tabla 2.
Áreas (ha) de las coberturas de los años 1987, 1991 y 2001.

| COBERTURA/ÁREA (ha) | 1987 | 1991 | 2001 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| Bosque | 285.389 | 343.922 | 183.583 |
| Veg. Secundaria | 306.952 | 260.155 | 432.346 |
| Cuerpos Agua | 40.469 | 36.418 | 35.252 |
| Pastos | 687.441 | 676.669 | 658.130 |
| Cultivo Palma | 19.595 | 22.682 | 30.535 |
| Total | 1'339.846 | 1'339.846 | 1'339.846 |

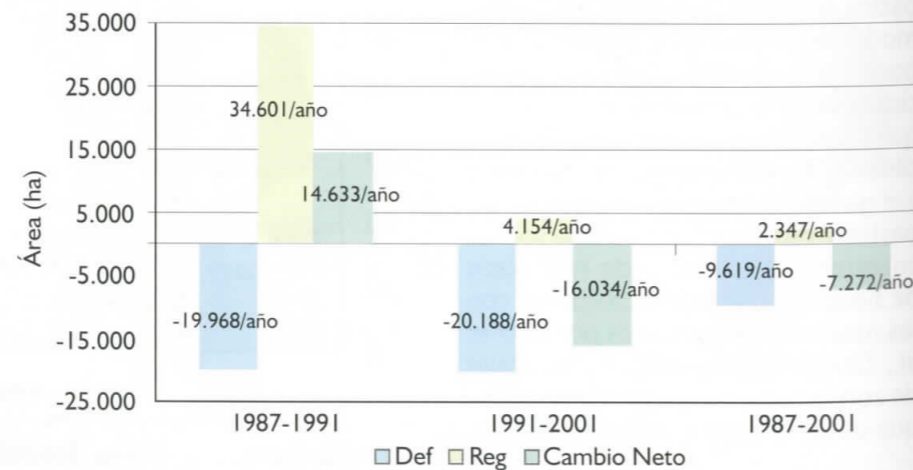
Las diferencias en las áreas de cuerpos de agua se pueden explicar porque las imágenes fueron tomadas en diferentes períodos climáticos. Para poder realizar un análisis de los cuerpos de agua es necesario contar con imágenes tomadas en la misma época, y preferiblemente en los dos períodos (invierno y verano), con el fin de que sean comparables.

El año con mayor área de bosque encontrado en el área de estudio fue 1991 (Tabla 2), como resultado de la regeneración aparente de la vegetación secundaria presente en 1987 que se transformó en un 29% a bosque. Esto indica que en

el período de 1987-1991 los procesos de regeneración fueron más altos que los procesos de deforestación presentando una tasa de 4,6% de transformación (Figura 5).

Sin embargo este resultado puede estar sesgado por la imagen obtenida para 1991, la cual presenta brumas que alteran la información de las coberturas para este año, y generan el resultado de una aparente regeneración en el período de 1987 a 1991, resultado no esperado debido al aumento de la población y de la producción agropecuaria y agroindustrial en la región.

Figura 5.
Tasa anual de deforestación, regeneración y cambio neto para los períodos 1987-1991, 1991-2001 y 1987-2001.



Fuente:
Elaboración propia.

Al excluir los datos de 1991, se obtiene una disminución del área de bosque, en el período de 1987 a 2001 de 101.806 ha, la cual se puede explicar en el aumento de la población, diferentes producciones agropecuarias, la ampliación de la frontera agrícola (colonización), además de la explotación aurífera en el sur de Bolívar (Fonseca et al., 2005), la cual se desarrolla principalmente en zonas altas y de piedemonte, lo que generó una alta deforestación de bosque en la Serranía de San Lucas, debido a que este proceso productivo va acompañado por la explotación inadecuada de bosque con fines maderables, además del incremento en la siembra de cultivos ilegales lo que ha hecho que la deforestación aumente, con una tasa

de transformación negativa para el bosque.

Las tasas de cambio encontradas coinciden con lo encontrado por Etter et al. (2006b) para el Caquetá, donde la máxima tasa de deforestación fue de 4,1% para el período de 1996-1999, pero difieren de lo encontrado por Franco (2004) en la zona del Carare-Opón en el período de 1991-2002, ya que la cobertura boscosa aumentó 11.600 ha presentando una tasa de crecimiento de cobertura forestal de un 15%.

A lo largo de los 13 años estudiados se encuentran áreas estables de cobertura de bosque, pastos, vegetación secundaria y cultivos de palma (Figura 6).

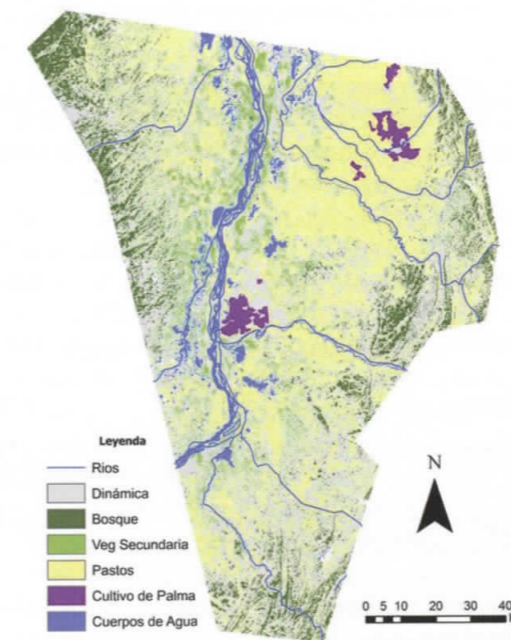


Figura 6.
Áreas de coberturas estables a través del período de estudio (1987-2001).

Fuente:
Elaboración propia.

El bosque estable a través del período de estudio se encuentra concentrado en las zonas de pendientes fuertes; en la parte norte en zonas altas (Serranía de San Lucas) y en la parte sur en zonas con accesibilidad baja. El bosque dinámico se presenta en toda el área de estudio.

Los pastos estables se encuentran en zonas bajas, existen áreas dispersas de pastos en la

Serranía de San Lucas en la zona norte. Los pastos estables a través de los tres años de estudio no se encuentran en zonas de baja accesibilidad, ni de pendientes fuertes. Las áreas dinámicas de pastos tienen una distribución amplia por toda el área de estudio.

Los cultivos de palma estables se dan en zonas bajas, con buena accesibilidad, pendientes suaves y en suelos fértiles.

La vegetación secundaria que permanece estable en el período de estudio, se presenta en zonas bajas con pendientes suaves y accesibles. En cambio la vegetación secundaria dinámica se encuentra dispersa por toda el área de estudio. Sin embargo, este resultado no se debería encontrar al ser una cobertura intermedia entre la cobertura boscosa y la cobertura de pastos, presente en los paisajes altamente transformados en la mayoría de bosques de tierras bajas de Colombia (Etter et al. 2005). Al revisar las matrices de confusión y errores de clasificación de las imágenes se evidencian porcentajes altos de comisión, pixeles que son clasificados como vegetación secundaria que no le pertenecen a esta cobertura, esto genera errores en la clasificación que pueden ser causa de este resultado. Sin embargo, al

Tabla 3.

Valores de ROC para los modelos de deforestación, regeneración y presencia de bosque en 1987, 1991 y 2001.

| MODELO | ROC |
|----------|-------|
| Def87-91 | 0,661 |
| Def91-01 | 0,701 |
| Reg87-91 | 0,669 |
| Reg91-01 | 0,701 |
| Bos87 | 0,745 |
| Bos91 | 0,757 |
| Bos01 | 0,735 |

Los valores de ROC menor a 0,75 indican una capacidad de discriminación de los modelos entre regular y muy baja correspondiendo las mejores a las predicciones de presencia-ausencia de bosques. Por lo tanto, las variables utilizadas en el análisis (fertilidad del suelo, pendiente, altitud y accesibilidad) sólo explican de manera parcial la presencia de bosque, los procesos de regeneración y deforestación en el valle del Magdalena Medio. Los estudios de Etter et al. (2005, 2006c, d) sobre los patrones espaciales y temporales de deforestación con va-

encontrarse la vegetación secundaria en las riberas del río Magdalena, es posible que sea una cobertura diferente a las que se establecieron en este estudio.

Variables explicativas

Los valores ROC obtenidos para los modelos de deforestación, regeneración y presencia de bosques para 1987, 1991 y 2001, se presentan en la Tabla 3. Los modelos de presencia de bosque tienen una mejor predicción que los de deforestación y regeneración ya que presentan los valores más altos de ROC, siendo más alto el modelo de predicción de presencia de bosque de 1991, seguido del modelo de 1987 y de 2001. El modelo con menor predicción es la deforestación de 1987-1991.

riables de fertilidad de suelo y accesibilidad, muestran una alta correlación, por lo que la presencia de valores bajos en este estudio se puede deber a problemas con la clasificación de las imágenes y la calidad de la información colectada de las variables independientes.

Las relaciones encontradas entre las variables de fertilidad del suelo, pendiente, altitud y distancia a vías, ríos y cabeceras, al igual que las encontradas en estudios anteriores en la literatura se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

Comparación de la relación de las variables explicativas obtenidas en este estudio, con otros estudios, para la regeneración.

| VARIABLES | REGENERACIÓN | | BOSQUE | | DEFORESTACIÓN | |
|----------------------|--------------|--|--------|--|---------------|--|
| | R. E. | R. L. | R. E. | R. L. | R. E. | R. L. |
| Fertilidad del suelo | - | - Etter et al., 2006b,c,d | - | - Etter et al., 2006b,c,d | - | + Etter et al., 2006b,c,d |
| Pendiente | + | + Etter et al., 2006d; Southworth & Tucker, 2001 | + | + Etter et al., 2006d; Southworth & Tucker, 2001 | + | - Etter et al., 2006d; Southworth & Tucker, 2001 |
| D_vías | + | + Etter et al., 2006b,c | + | + Nagendra et al., 2003; Viña et al., 2004 | + | - Nagendra et al., 2003; Viña et al., 2004; Etter et al., 2006b,c,d; Southworth & Tucker, 2001 |
| D_ríos | + | | + | | | |
| D_cabeceras | +/- | | + | | -/+ | |
| Altitud | - | + Nagendra et al. 2003 | - | + Nagendra et al. 2003 | - | - Nagendra et al., 2003; Southworth & Tucker, 2001 |

R.E.: Relación encontrada en este estudio

R.L.: Relación encontrada en la literatura

La relación negativa entre la fertilidad del suelo y todos los procesos, podría explicarse por la gran deforestación de esta área antes de la fecha de estudio, siendo en las zonas menos fértiles donde está el bosque presente, debido a los intensos procesos agropecuarios (ganadería extensiva y pastos, además de cultivos de oleaginosas) (Estrada, 1985; CAJSC, 1993).

Los resultados de este estudio sugieren que los procesos de regeneración tienden a ocurrir en áreas con baja calidad del suelo, coincidiendo con los resultados de Etter et al. (2006b) en el Caquetá.

La altitud también presenta una relación negativa con la deforestación y la regeneración de bosques, al igual que la presencia de bosques, se dan en las zonas bajas. Este resultado difiere de lo esperado para la presencia de bosque y la regeneración, ya que la elevación es una limitante al acceso del bosque (Nagendra et al., 2003).

Franco (2004), sin embargo en el análisis para las geformas encontró que

la mayor cantidad de pérdida de área forestal ocurrió en las zonas de colinas y terraza disectadas bajas. Esta zona mostró ser una de las más dinámicas, ya que allí apareció la mayor cantidad de bosque. Respecto al bosque original, la mayor pérdida ocurrió en la zona de llanura aluvial, pero también se ganó el mayor porcentaje de bosques nuevos. Las áreas constantes de cobertura forestal se presentaron en las zonas de montaña.

Con la pendiente se presenta una relación positiva, en las áreas con mayores pendientes se presenta el bosque, favoreciendo los procesos de regeneración, debido a que estas son más difíciles de acceder, a la vez que en las áreas de menor pendiente la producción ganadera es muy fuerte y no permiten la ocurrencia de la regeneración. De la misma manera la deforestación se da en zonas de fuertes pendientes ya que allí es donde se encuentra el bosque y donde es posible deforestar, puesto que en zonas bajas ya no hay espacio para las actividades productivas las cuales necesitan desplazarse a nuevas áreas (Estrada, 1985).

La deforestación en el período de 1987-1991 presenta una relación positiva con la distancia a vías y ríos, y negativa con las cabeceras. Lo que indica que la deforestación se dio en este período lejos de las vías y ríos, pero cerca de las cabeceras. Entre 1991-2001 la relación de la deforestación es positiva con la accesibilidad, dándose la deforestación en las zonas más alejadas por el aumento de los cultivos ilegales, que se establecen en zonas lejos de las vías, cabeceras y ríos (Etter et al., 2005), y por la deforestación generada en los períodos anteriores en las áreas más accesibles.

Sólo la relación negativa de las cabeceras con la deforestación en 1987-1991, coincide con lo reportado por Etter et al. (2006c) para las zonas bajas de Colombia y por Etter et al. (2006b) para la Amazonía Colombiana, en donde la accesibilidad promueve la deforestación por el incremento en el acceso a la frontera forestal.

Al igual que los resultados de Etter et al. (2006b, c) la regeneración del bosque en el período de 1987-1991 para el Magdalena Medio presenta una relación positiva con las variables de accesibilidad, ya que para este período las zonas inaccesibles presentan las condiciones adecuadas para la regeneración del bosque. En el período de 1991-2001 la relación positiva se mantiene con los ríos y vías, pero no con las cabeceras, en donde la relación es negativa.

Para la presencia de bosque la relación con la accesibilidad es positiva con los tres años, presentándose el bosque en las zonas inaccesibles por los fuertes procesos de deforestación de períodos anteriores en las zonas cercanas a vías, ríos y cabeceras, que permiten el transporte de los productos agrícolas y pecuarios (Estrada, 1985), siendo lo esperado ya que la accesibilidad en la frontera agrícola aumenta la probabilidad de deforestación de los bosques (Etter et al., 2005; 2006b,c).

La accesibilidad es una causa directa de la transformación del paisaje, ya que un

mayor acceso al bosque y a los mercados acelera la deforestación. En este sentido las vías, ríos y ferrocarriles facilitan este acceso (Angelsen & Kaimowitz, 1999). En esta área se presentan la Troncal de la Paz construida en los 1990 y el ferrocarril del Atlántico en 1955, Kalmanovitz (1982) señala que en la zona norte (Bolívar, Cesar, Antioquia y los Santanderes) el área de pastos pasó de 7,94 millones de hectáreas en 1950 a 11,6 millones en 1972, aumento que representa un 46,6% sobre su superficie original.

Existen otros direccionadores de la transformación que por su difícil medición en el tiempo y en el espacio no han sido analizados cuantitativamente, pero que debido a su importancia es necesario hacer mención. Algunos de estos son la tenencia de la tierra, el crecimiento de la población que aumenta la expansión de las tierras agrícolas, el conflicto armado, y las economías ilegales, los cuales han cambiado el uso del paisaje en la región generando abandono de tierras y desplazamiento hacia zonas que no presentan valores de tierra altos para la actividad agropecuaria (Dávalos, 2001; Etter et al. 2005; 2006c).

El valle del Magdalena Medio es una zona de procesos socio-políticos y económicos complejos que generan patrones diferentes a los esperados teniendo en cuenta los estudios de Nagendra *et al.*, 2003; Viña *et al.*, 2004; Etter *et al.*, 2005, 2006b, c, d, ya que las fuerzas armadas ilegales y los cultivos de coca, dirigen la deforestación hacia áreas inaccesibles para ocultarse y dificultar el proceso del erradicación por parte del Estado.

Conclusiones

La zona del valle del Magdalena Medio ha sido fuertemente transformada a través de su historia de colonización, condición que configura su distribución espacial actual, generando cambios en las áreas de cobertura presentes en

esta y presentando una alta dinámica entre la cobertura boscosa, pastos y vegetación secundaria. Las áreas que aún mantienen una cobertura de bosque son en general áreas inaccesibles, con pendientes fuertes en zonas bajas y con baja fertilidad, respondiendo a procesos sociales, políticos y económicos locales, y a condiciones como el conflicto arma-

do y los bajos niveles de gobernabilidad en gran parte de la región.

Realizar estudios de cambios de cobertura en zonas tropicales es difícil por la poca información disponible para esta región y la baja calidad de esta, limitando el análisis y la utilización de variables que permitan explicar en un mayor grado la dinámica de transformación.

Referencias bibliográficas

- ANGELSEN, A., & Kaimowitz, D. (2001). Introduction: The role of agricultural technologies in tropical deforestation. En A. Angelsen, & D. Kaimowitz (Edits.), *Agricultural technologies and tropical deforestation* (págs. 1-17). Wallingford, UK: CABI Publishing. CIFOR.
- ANGELSEN, A., & Kaimowitz, D. (1999). Rethinking the causes of deforestation: lessons from economic models. *The World Bank Research Observer*, 14 (1), 73-98.
- CAJSC, Comision Andina de Juristas Seccional Colombia. (1993). *Nordeste Antioqueño y Magdalena Medio*. (C. Marín, Ed.) Bogotá: Informes regionales de derechos humanos.
- CAVELIER, J., & Etter, A. (1995). Deforestation of montane forests in Colombia as a result of illegal plantations of opium (*Papaver somniferum*). En S. Churchill, H. Balslev, E. Forero, & J. Luteyn (Edits.), *Biodiversity and conservation of Neotropical montane forests* (págs. 541-550). New York: The New York Botanical Garden.
- CORMAGDALENA; Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Humanas. (2002). Documento final de síntesis de caracterización de la cuenca del Rio Grande de la Magdalena. Bogotá: CORMAGDALENA.
- DÁVALOS, L. 2001. The San Lucas mountain range in Colombia: how much conservation is owed to the violence? *Biodiversity and Conservation*, 10, 69-78.
- DINERSTEIN, E., Olson, D., Graham, D., Webster, A., Primm, S., Bookbinder, M., y otros. (1995). *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. Washington, DC: The World Bank in association with World Wildlife Fund.
- EASTMAN, R. 2003. *IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and image processing*. MA, USA: Clark Labs. Clark University Worcester.
- ESTRADA, M. 1985. *Confrontación agraria en el Magdalena Medio*. Bucaramanga, Santander, Colombia: Ediciones Biblioteca Gabriel Turbay.
- ETTER, A. 1998. Bosque húmedo tropical. En I. d. Humboldt, M. Chávez, & N. Arango (Edits.), *Información Nacional sobre el estado de la biodiversidad - 1997*. Colombia. Tomo I (págs. 106-133). Bogotá: Instituto Humboldt, PNUMA, Ministerio del Medio Ambiente.

- ETTER, A., & McAlpine, C. (2008). Modeling unplanned land cover change across scales. A Colombian case study. En R. Aspinall, & M. Hill, Land use change. Science, policy and management (págs. 81-98). Boca Raton, US: CRC Press. Taylor & Francis Group.
- ETTER, A., & van Wyngaarden, W. (2000). Patterns of landscape transformation in Colombia, with emphasis in the Andean Region. *Ambio*, 29, 432-439.
- ETTER, A., McAlpine, C., Phinn, S., Pullar, D., & Possingham, H. (2006a). Characterizing a tropical deforestation wave: a dynamic spatial analysis of a deforestation hotspot in the Colombian Amazon. *Global Change Biology*, 12, 1409-1420.
- ETTER, A., McAlpine, C., Phinn, S., Pullar, D., & Possingham, H. (2006b). Unplanned land clearing of Colombian rainforests: spreading like disease? *Landscape and Urban Planning*, 77, 240-254.
- ETTER, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2005). Modeling the age of tropical moist forest fragments in heavily-cleared lowland landscapes of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 208, 249-260.
- ETTER, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2006c). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, 79, 74-87.
- ETTER, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., & Possingham, H. (2006d). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114, 369-386.
- FONSECA, D., Gutiérrez, Ó., & Rudqvist, A. (2005). Cultivos de uso ilícito en el sur de Bolívar: aproximaciones de la economía política. Bogotá: PNUD-Asdi.
- FRANCO, R. (2004). Análisis satelital multitemporal de los bosques del Carare - Opón (Primera Edición). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico.
- GUERRA DE LA ESPRIELLA, A. (1983). El nuevo cultivo de Colombia y los aceites y grasas comestibles: la contratación del desarrollo para la producción de aceite de palma. Bogotá: Fedepalma.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. (1983). Mapa general de suelos de Colombia (1:1 500 000). Bogotá: IGAC.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. (2000). Mapas topográficos (1:1 500 000). Bogotá: IGAC.
- JENSEN, J. (2005). Introductory digital image processing a remote sensing perspective. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- KALMANOVITZ, S. (1982). El desarrollo de la agricultura en Colombia. Bogotá: Carlos Valencia Editores.
- LEPERS, E., Lambin, E., Janetos, A., Defries, R., Achard, F., Ramankutty, N., y otros. (2005). A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981- 2000. *BioScience*, 55 (2), 115-124.
- LINKIE, M., Smith, R., & Leader-Williams, N. (2004). Mapping and predicting deforestation patterns in the lowlands of Sumatra. *Biodiversity and Conservation*, 13, 1809-1818.
- MARGULES, C., & Pressey, R. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405, 243-253.
- MÁRQUEZ, G. (2001). De la abundancia a la escasez: La transformación de ecosistemas en Colombia. En G. Palacio (Ed.), *Naturaleza en disputa. Ensayos de historia ambiental en Colombia 1850-1995* (pág. 480). Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Instituto Colombiano de Antropología e Historia, Icanh.
- MEYER, W., & Turner II, B. (1992). Human population growth and global land-use/cover change. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23, 39-61.
- NAGENDRA, H., Southworth, J., & Tucker, C. (2003). Accessibility as a determinant of landscape transformation in western Honduras: linking pattern and process. *Landscape Ecology*, 18, 141-158.
- PUYRAVAUD, J. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177, 593-596.
- SOUTHWORTH, J., & Tucker, C. (2001). The influence of accessibility, local institutions, and socioeconomic factors on forest cover change in the Mountains of Western Honduras. *Mountain Research and Development*, 21 (3), 276-283.
- UNIVERSITY OF MARYLAND. (s.f.). Global Land Cover Facility. Recuperado el junio de 2008, de <http://www.landcover.org>
- U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey. (s.f.). Order SRTM Elevation data from the USGS. Recuperado el Junio de 2008, de <http://edcns17.cr.usgs.gov/srtmbil/>
- VIÑA, A., & Cavelier, J. (1999). Deforestation rates (1938-1988) of tropical lowland forests on the Andean foothills of Colombia. *Biotropica*, 31 (1), 31-36.
- VIÑA, A., Echavarría, F., & Rundquist, D. (2004). Satellite change detection analysis of deforestation rates and patterns along the Colombia - Ecuador border. *Ambio*, 33 (3), 118-125.
- VITOUSEK, P., Mooney, H., Lubchenco, J., & Melillo, J. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277 (494).