



Universidad Militar Nueva Granada

Especialización en Geomática

Facultad de Ingeniería

Bogotá

Proyecto de Tesis

Modelo de cambio de cobertura proyectado al año 2030, municipio de la Hormiga, Putumayo,
Colombia

Camilo Andrés Acuña Caro

Código: 3101226

unomas2@gmail.com

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	4
2. Formulación del Problema.....	4
3. Estado del Arte.....	5
4. Objetivo general.....	5
5. Zona de estudio.....	6
6. Datos.....	6
6.1. Metodología.....	7
6.1.1. Identificación y clasificación de coberturas a partir de imágenes LANDSAT, de manera visual, de acuerdo con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia.....	7
6.1.1.1. Identificación de las escenas requeridas:.....	7
6.1.1.2. Descarga de imágenes:.....	8
6.1.1.3. Composición de imágenes:.....	8
6.1.1.4. Corte de las imágenes.....	8
6.1.1.5. Filtros de mejoramiento.....	8
6.1.1.6. Interpretación visual de Las imágenes.....	8
6.1.2. Identificación de las variables a incluir en el modelo como aquellas que influyen en la transformación del paisaje, como acceso a vías, acceso a ríos, infraestructura, etc.....	8
6.1.3. Modelo de simulación del cambio de uso del suelo y cobertura (Land Use Change and Land Cover – LUCC).....	8
6.1.3.1. Calibración del modelo Land Use Land Cover Change (LULCC).....	8
6.1.3.2. Construcción de un modelo de simulación del cambio de uso del suelo y cobertura:9	
6.2. Dinámica EGO.....	10
7. Resultados.....	10
7.1. Coberturas.....	10
7.2. Variables del Modelo.....	14
7.2.1. Accesibilidad.....	15
7.2.2. Pozos Petroleros.....	16
7.2.3. Sísmica.....	16

7.3. Modelo de simulación del cambio de uso del suelo y cobertura (Land Use Change and Land Cover – LUCC)	18
8. Conclusiones	23
9. Referencias	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona de estudio	6
Figura 2. Imágenes Landsat usadas para la interpretación de coberturas	7
Figura 3: Software Dinamica EGO.....	10
Figura 5. Coberturas y áreas para el año 1989.....	11
Figura 6. Porcentajes de ocupación de cada tipo de cobertura para el año 1989.....	12
Figura 7. Porcentajes de ocupación de cada tipo de cobertura para el año 1989.....	12
Figura 8. Coberturas y áreas para el año 2014.....	13
Figura 9. Transición de cobertura entre los años 1989 y 2014.....	14
Figura 10. Mapa de variables usadas para el modelo de cambio de cobertura.....	17
Figura 11. Mapa de variables usadas en el modelo de cambio de cobertura, incluidas en las coberturas de 1989.....	18
Figura 12. Mapa de proyección de coberturas para el año 2030	21
Figura 13. Porcentajes de ocupación de cada tipo de cobertura para el año 2030.....	22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Imágenes Landsat usadas en el modelo.....	6
Tabla 2. Pérdida y ganancia por tipos de cobertura entra 1989 y 2014	13
Tabla 3. Clases de cobertura.....	19
Tabla 4. Matriz de transición 1989 – 2014.....	19
Tabla 5. Análisis multitemporal 1989 -2030	22

1. Introducción

El cambio de uso y cobertura a causa de actividades antrópicas afectan la biofísica, la biogeoquímica, y la biogeografía de la superficie terrestre y afectan la atmósfera (WIREs Clim Change, 2011), en detrimento del medio ambiente y la salud humana. En la actualidad sabemos que gran parte de las áreas naturales han sido erradicadas, las consecuencias han sido ampliamente estudiadas y las herramientas para su análisis están cada vez más al alcance de la investigación y del conocimiento público.

El estudio del cambio de cobertura a través del tiempo es importante para una adecuada planeación y utilización de los recursos naturales. La percepción remota se ha convertido en una herramienta ampliamente reconocida para detectar, analizar y modelar los procesos físicos que afectan al planeta, mediante la manipulación de información espacial geográficamente referenciada (Mallupattu & Reddy, 2013). Los estudios de cambio de cobertura a partir de la percepción remota y los sistemas de información geográfica han estado predominantemente enfocados en cuanto, donde, y que tipo de cambio de cobertura y uso del suelo ha ocurrido (Weng, 2001), y en cómo estos resultados se convierten en una base para la toma de decisiones. Los modelos espaciales son necesarios para la comprensión de la dimensión temporal, y son probablemente la forma más concisa y útil para entender la dinámica espacial (Cabral, et.al, 2015).

2. Formulación del Problema

La deforestación está estrechamente relacionada con fenómenos socioeconómicos y su localización depende de variables geográficas, políticas y económicas. En Colombia las principales causas de la deforestación son la expansión de la frontera agropecuaria, especialmente para ganadería extensiva, siembra de cultivos ilícitos, tala ilegal, minería e infraestructura, exploración y explotación de hidrocarburos, incendios forestales y presión por el crecimiento poblacional (García, 2001).

Según el botánico Jesús Orlando Rangel, docente de la Universidad Nacional y uno de los más reconocidos investigadores en este campo la deforestación avanza en Colombia como una epidemia. "Son no menos de 470 mil hectáreas de bosques talados al año, un ritmo de destrucción que podría arrasar la cobertura boscosa total del país en menos de 146 años". Estas cifras se basan en imágenes satelitales, registro de datos y modelos matemáticos. Se pierden 321.000 hectáreas anuales por el avance de la frontera agrícola, 30.000 más por la siembra de cultivos ilícitos y 128.000 hectáreas adicionales por el consumo directo de madera, que se saca luego de tumbar ilegalmente árboles nativos (<http://www.eltiempo.com/>).

Esta tesis busca analizar las causas y el avance del cambio de cobertura en un período de 20 años a partir de 1989, y cuál sería el escenario de deforestación en los próximos 20 años, teniendo en cuenta los patrones espaciales multitemporales del paisaje, en una zona del departamento del Putumayo donde en las últimas 3 décadas se ha incrementado este problema, y la pérdida de cobertura natural ha sido muy evidente.

3. Estado del Arte

En el año 2009 se llevó a cabo una investigación (Mas Jean .F, et. al, 2010) para evaluar mapas de uso y cobertura obtenidos mediante dos modelos, DINAMICA y Land Change Modeler, usando índices de similaridad e índices de fragmentación, teniendo en cuenta que para medir los efectos de la fragmentación es necesario incorporar índices que incluyan los patrones espaciales y no solo la ubicación de las coberturas.

En el año 2012, se realizó un estudio para modelar los cambios futuros en la cobertura usando los métodos BAU (Business as Usual) que muestran escenarios pesimistas y los escenarios optimistas usando el modelo MCA (Markov Cellular Automata) en el distrito de Paxkeng en la República Democrática de Lao. Los escenarios observados son usados para entender las implicaciones del manejo de los bosques en los cambios de cobertura futuros.

En el año 2000 se realizó Weng, 2002, realizó una investigación sobre la dinámica del cambio de cobertura combinando el uso de la percepción remota, los sistemas de información geográfica (SIG) y tecnologías para el modelamiento estocástico. El estudio demostró que la integración de estas herramientas es un enfoque efectivo para analizar la dirección, tasa y patrones y procesos espaciales de cambio de uso del suelo.

4. Objetivo general

Identificar y analizar el cambio de cobertura en... desde el año 1989 hasta el año 2015, y crear un escenario de proyección de cambio al año 2030, que demuestre el alcance de la deforestación en la región.

4.1. Objetivos específicos

- Realizar una clasificación de las coberturas presentes en la zona para cada año, mediante la identificación a partir de imágenes LANDSAT, usando como referencia la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, y una posterior generalización a 8 tipos de cobertura base que servirán para el análisis.
- Determinar las variables a implementar dentro del modelo de cambio de cobertura Land Use Land Cover Change (LULCC), del software Dinámica EGO, que influyan en el cambio de uso del suelo.
- Generar un mapa proyectado de coberturas del área de estudio al año 2030, mediante el uso del modelo LULCC de Dinámica EGO, el cual será el escenario futuro tendencial de cambio de uso del suelo, basado en los patrones de la dinámica del paisaje de los últimos 20 años.

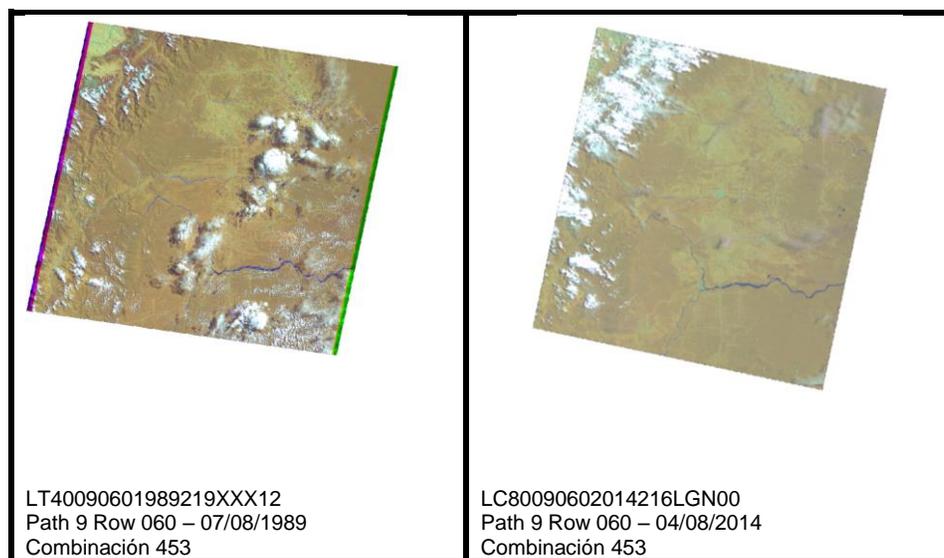


Figura 2. Imágenes Landsat usadas para la interpretación de coberturas

Fuente: <http://www.usgs.gov/>

- Capa de vías, cartografía escala 1:100000 del IGAC.
- Capa de drenajes, cartografía escala 1:100000 del IGAC.
- Capa de pozos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).
- Capa de líneas de sísmica de la ANH.

6.1. Metodología

6.1.1. Identificación y clasificación de coberturas a partir de imágenes LANDSAT, de manera visual, de acuerdo con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia.

Para la realización del estudio utilizaron imágenes del satélite Landsat, debido a que este presenta imágenes desde 1982 hasta la actualidad y para el estudio se requiere que estas sean aproximadamente desde 1989 en adelante. También es importante que las imágenes pertenezcan al mismo sensor, ya que se cuenta con la misma resolución espacial y espectral, lo cual minimiza errores en el procesamiento y la clasificación.

A continuación se presentan explicados los pasos a seguir en la metodología que se va a emplear para el análisis de las imágenes y la identificación y clasificación de cobertura.

6.1.1.1. Identificación de las escenas requeridas:

Para la identificación de las escenas a descargar se estableció una ventana cartográfica, la cual se obtuvo con el área del bloque del proyecto. Esta ventana se intersectó con la grilla de imágenes Landsat, con esto se establecieron el path y row necesarios para la identificación de las escenas requeridas. Fue identificada una escena para descargar: 9-60 para Landsat

6.1.1.2. Descarga de imágenes:

La descarga de imágenes Landsat se realizara a través de la página del Earth Explorer – USGS con el path y row previamente identificados. Se buscaran imágenes con poca presencia de nubes en el área de la ventana cartográfica y que coincidan con los años establecidos.

6.1.1.3. Composición de imágenes:

Los archivos que se descargan traen las bandas separadas, por lo cual es necesario componerlas para obtener una imagen multiespectral. Se va a realizar la composición de las imágenes usando las bandas: 1, 2, 3, 4, 5 y 7, las cuales corresponden al espectro visible (azul-verde-rojo) e infrarrojo (cercano-medio-lejano).

6.1.1.4. Corte de las imágenes

Cuando ya se tengan las imágenes armadas, estas se cortaran al área de la ventana cartográfica establecida, para posteriormente realizar la interpretación.

6.1.1.5. Filtros de mejoramiento

Para la correcta visualización de las imágenes cortadas es importante la realización de filtros de mejoramiento, los cuales permitirán una mejor diferenciación de coberturas de la tierra.

6.1.1.6. Interpretación visual de Las imágenes

Con las imágenes armadas y cortadas, se realizara la interpretación visual de cada una, teniendo como referencia la leyenda nacional de coberturas de la tierra (IDEAM, 2010).

6.1.2. Identificación de las variables a incluir en el modelo como aquellas que influyen en la transformación del paisaje, como acceso a vías, acceso a ríos, infraestructura, etc.

6.1.3. Modelo de simulación del cambio de uso del suelo y cobertura (Land Use Change and Land Cover – LUCC)

6.1.3.1. Calibración del modelo Land Use Land Cover Change (LULCC)

El software Dinamica EGO reconoce y genera mapas raster en tres formatos: ERMapper, Geotiff, y ArcView ASCII. Los sistemas de coordenadas aceptados para la transformación al formato ERMapper son: Geodetic (WGS 84, SAD69, Corrego Alegre) y UTM (WGS84, SAD 69, Corrego Alegre). Cuando un sistema de coordenadas es distinto a los mencionados, Dinamica asume la proyección LOCAL y el datum WGS84 por defecto.

Por lo tanto, es necesario preparar previamente la base de datos que se utilizará con una herramienta SIG y luego exportar los mapas en uno de los tres formatos mencionados anteriormente. La referencia espacial utilizada es Bogotá Transverse Mercator que corresponde al sistema de coordenadas UTM, compatible con el modelo:

6.1.3.2. Construcción de un modelo de simulación del cambio de uso del suelo y cobertura:

El modelo de simulación se divide en 5 pasos así:

- Cálculo de las matrices de transición

A partir de las áreas ocupadas por cada tipo de cobertura DINAMICA genera una matriz de transición que describe los cambios de un sistema a través de periodos discretos de tiempo, es decir, el porcentaje de área que será cambiado a otro estado (a un tipo de uso del suelo o cobertura diferente al original).

- Cálculo de rangos para categorizar variables

Dinamica EGO aplica un método geo-estadístico de pesos de evidencia (Goodacre *et al.* 1993; Bonham-Carter, 1994) para producir un mapa de probabilidades de transición, el cual muestra las áreas donde el cambio es más propenso a ocurrir (Soares-Filho *et al.* 2002, 2005).

- Cálculo de los coeficientes de pesos de evidencia

Los primeros rangos de la matriz presentan una relación positiva, favoreciendo la deforestación, en cambio, los rangos finales presentan valores negativos, por lo que repelen la deforestación. Los rangos intermedios presentan valores cercanos a cero, lo que significa que éstos no tienen ningún efecto sobre la deforestación.

- Análisis de correlación entre mapas

El único supuesto del método de pesos de evidencia es que los mapas a ser utilizados como insumos (*i.e.* las coberturas espaciales) sean espacialmente independientes.

- Ejecución del modelo de simulación LUCC y ubicación de cambios

En este paso se cargan el paisaje inicial, las variables seleccionadas, el archivo con los pesos de evidencia, y la matriz de transición, para que ejecute el modelo en pasos equivalentes a un año.

Dinamica EGO usa como regla Autómata Celular Local una herramienta de transición compuesta por dos funciones de transición complementarias, especialmente diseñadas para reproducir los patrones espaciales de cambio.

El modelo crea un mapa de probabilidades y genera una trayectoria de cambio de coberturas y deforestación, un paso o iteración por año, teniendo en cuenta la relación entre las variables, y los patrones de cambio de cobertura para generar un mapa final con la proyección esperada.

6.2. Dinámica EGO

El software DINAMICA EGO, es un entorno para el geoprocesamiento de objetos, que simula la dinámica de un sistema ambiental y reproduce la forma en que los patrones espaciales evolucionan para proyectar las probables consecuencias ecológicas de la dinámica del paisaje (Soares-Fihlo, et. al, 2009) **(Figura .4)**.

DINAMICA opera sobre una plataforma basada en lenguaje C++ y Java. Genera análisis de algoritmos espaciales disponibles en todas las herramientas GIS, además emplea otros algoritmos propios para las simulaciones (Soares-Fihlo, et. al, 2009).

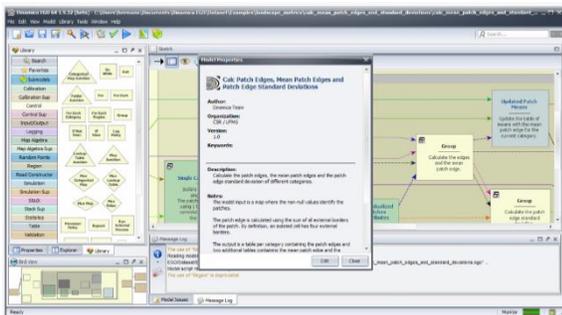


Figura 3: Software Dinamica EGO

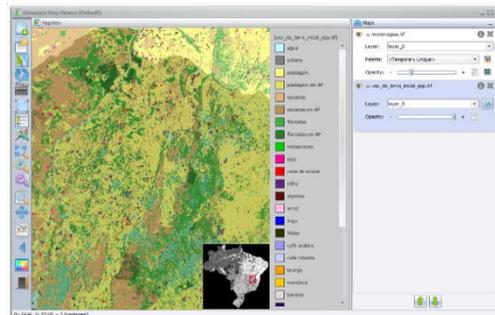


Figura 4: Mapa generado en Dinamica EGO

7. Resultados

7.1. Coberturas

A partir de la interpretación de las coberturas observadas en las imágenes satelitales mediante la identificación visual, se obtuvieron los mapas de cobertura de los años 1989 y 2014, capas que más adelante son usadas para la implementación del modelo de cambio de coberturas proyectado al 2030.

En el año 1989 se encuentran 7 tipos de coberturas, de las cuales el bosque denso es la más extensa ocupando un área de 7899.65 ha que representan un 45% del paisaje, seguida por pastos limpios que representa el 22% del paisaje, en una extensión de 3830.36 ha. La siguiente cobertura es la vegetación secundaria baja con 2841.43 ha que representan el 16% de la totalidad del paisaje. El resto de coberturas ocupan menos del 20% del paisaje **(Figura .5 y Figura .6)**

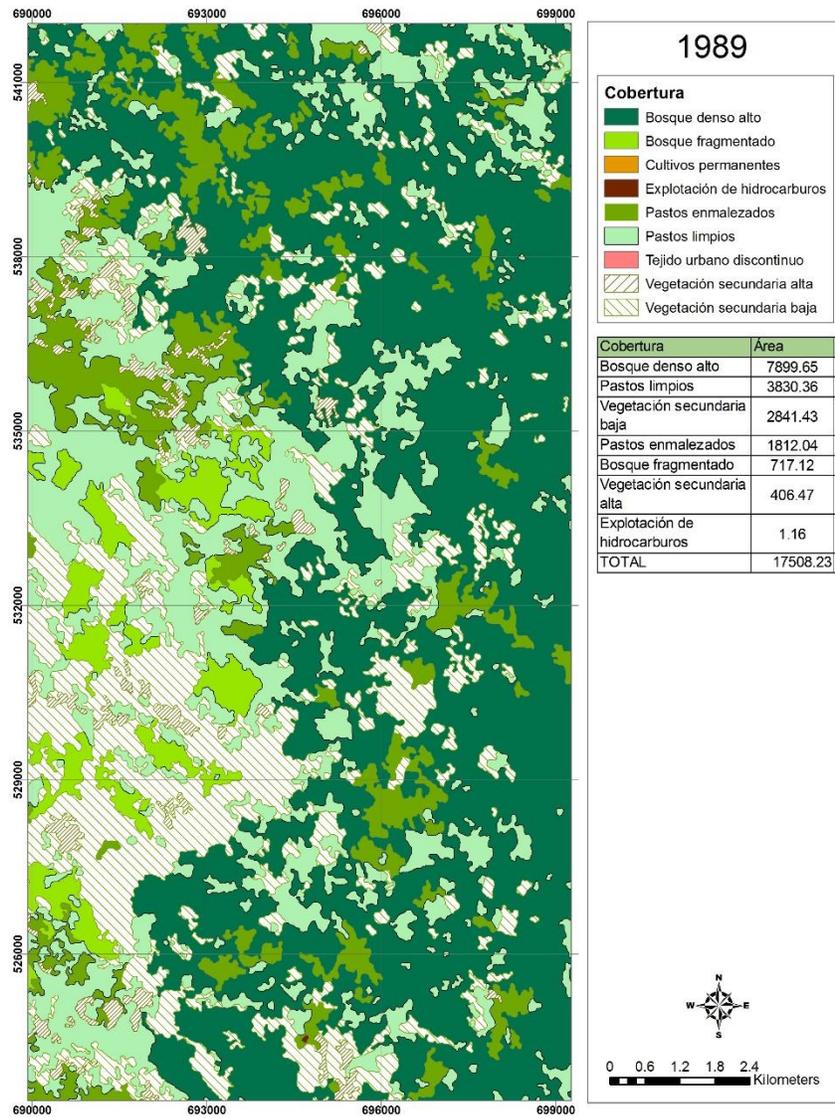


Figura 5. Coberturas y áreas para el año 1989.

En el año 2014 se encuentran 9 tipos de coberturas, es decir aparecen dos nuevas coberturas, cultivos permanentes con una extensión 116.03 ha y tejido urbano discontinuo con un área de 2.14, que tienen un porcentaje de ocupación del territorio de 0.66% y 0.01% respectivamente. El mayor cambio se presenta en las coberturas presentes en el mapa de 1989.

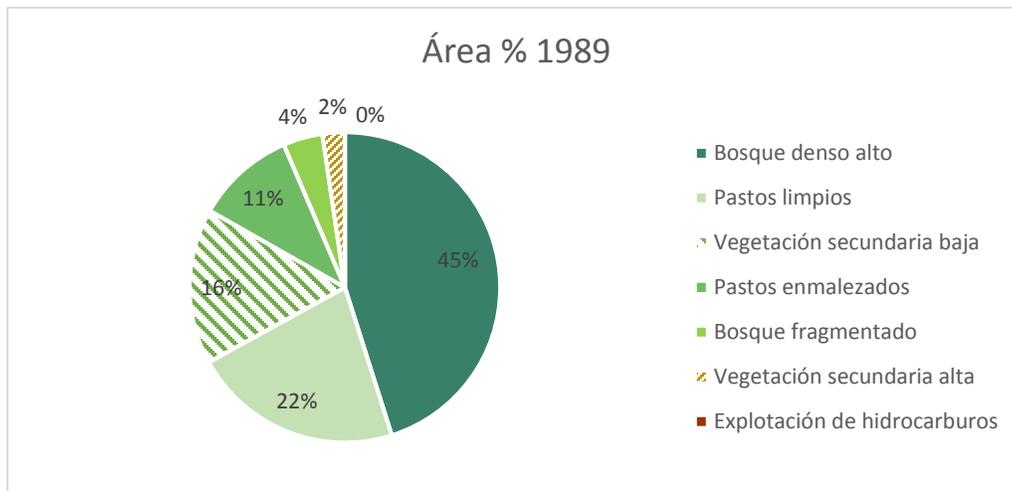


Figura 6. Porcentajes de ocupación de cada tipo de cobertura para el año 1989

El bosque denso alto que ocupaba la mayor extensión en 1989, en el año 2014 se ocupa en séptimo lugar con un área de tan solo 62.53 ha, lo cual implica la pérdida de 7837 ha de bosque húmedo y ahora solo representa el 0.36% del total del paisaje. En esta caso los pastos enmalezados pasan a ser la cobertura más extensa ocupando un área de 6718 ha que representan un 39% del paisaje, seguida por pastos limpios que representan el 35% del paisaje, en una extensión de 6161.84 ha. La siguiente cobertura es la vegetación secundaria baja con 2461.43 ha que representan el 14% de la totalidad del paisaje y aunque se mantiene más estable que otras coberturas tiene una pérdida de 380 ha. El resto de coberturas ocupan menos del 20% del paisaje (**Figura .7 y Figura .8**)

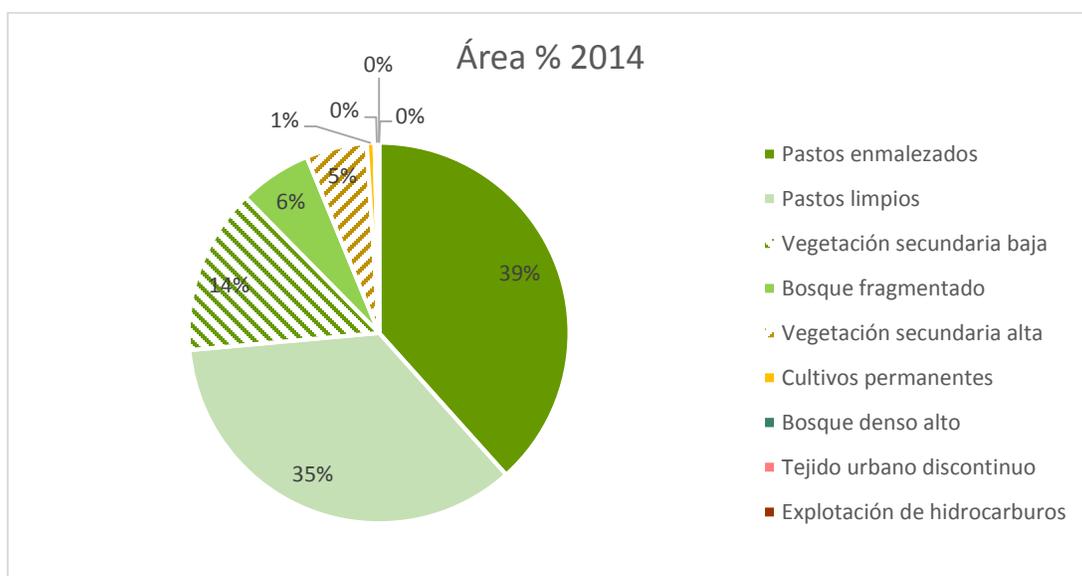


Figura 7. Porcentajes de ocupación de cada tipo de cobertura para el año 1989

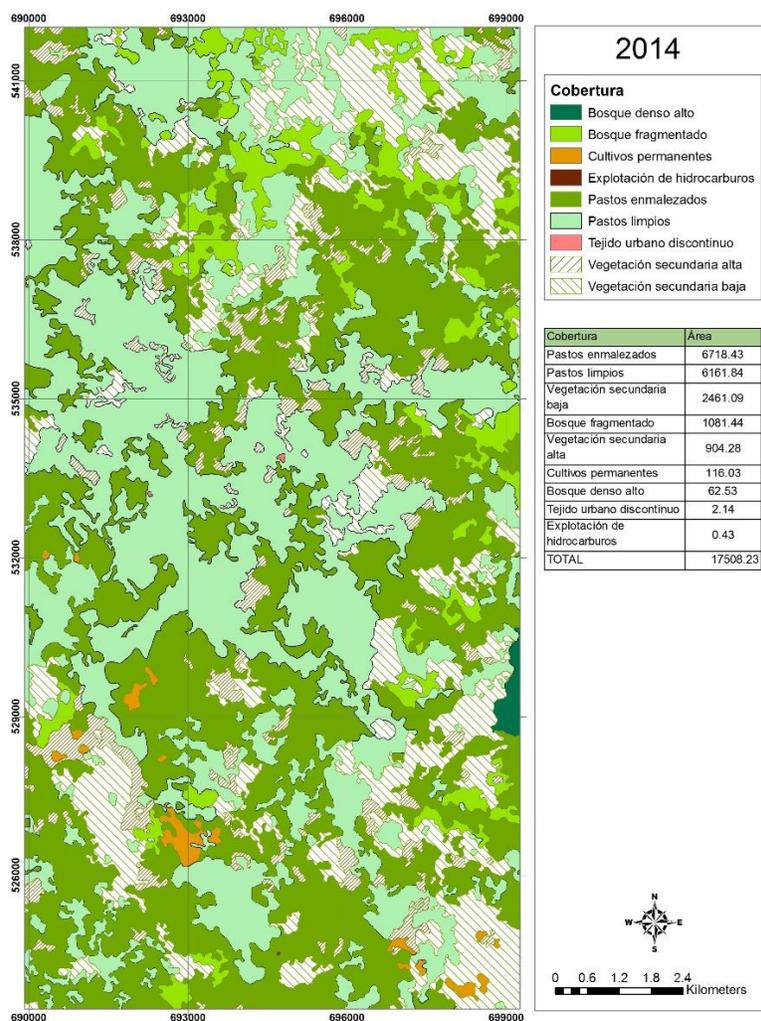


Figura 8. Coberturas y áreas para el año 2014

En la **Tabla 2.** se presenta la pérdida y ganancia de cobertura para cada cobertura por unidad de área en este caso hectáreas:

Tabla 2. Pérdida y ganancia por tipos de cobertura entra 1989 y 2014

Cobertura	1989	2014	Pérdida	Ganancia
Bosque denso alto	7899.65	62.53	7837.12	0.00
Bosque fragmentado	717.12	1081.44	0.00	364.32
Explotación de hidrocarburos	1.16	0.43	0.73	0.00
Pastos enmalezados	1812.04	6718.43	0.00	4906.40
Pastos limpios	3830.36	6161.84	0.00	2331.48
Vegetación secundaria alta	406.47	904.28	0.00	497.81
Vegetación secundaria baja	2841.43	2461.09	380.34	0.00
Cultivos permanentes	0.00	116.03	0.00	116.03
Tejido urbano discontinuo	0.00	2.14	0.00	2.14

En la **Figura 9** se representa la transición de los cambios en la cobertura de manera visual, en diferentes tonos de verde se muestran los cambios de coberturas naturales que forman parches continuos de vegetación, esto con el fin de ratificar los cambios en el paisaje natural de la región anteriormente expuestos.

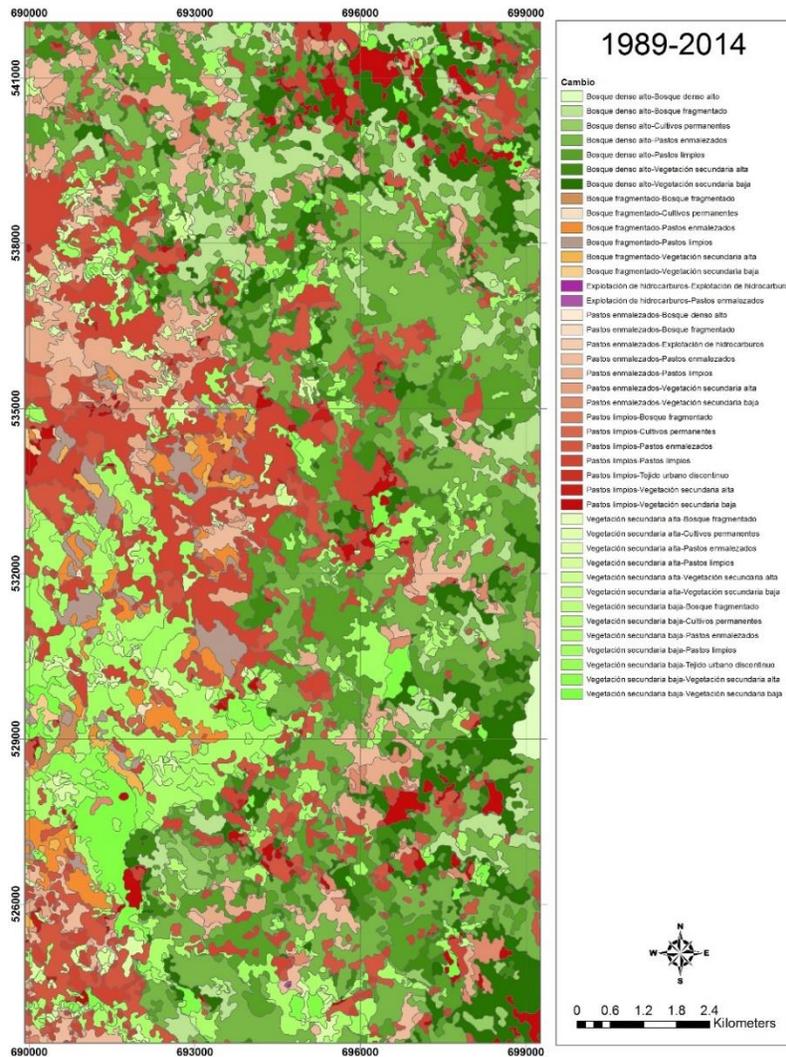


Figura 9. Transición de cobertura entre los años 1989 y 2014

7.2. Variables del Modelo

Las variables del modelo son aquellos elementos espaciales que influyen en el cambio de cobertura, en el caso de este estudio estas variables se presentan en capas ya sea con geometría como punto, línea o polígono, o como matrices de píxeles con diferentes valores. Dicho de otra manera son características del paisaje que pueden ser representadas de forma gráfica, tienen atributos y valores de coordenadas que las ubican en un determinado espacio geográfico.

En el caso de este estudio, se eligieron algunos elementos que interactúan con el paisaje del área, e influyen con la dinámica de los ecosistemas, de manera negativa y positiva. En esta región los cambios siempre han seguido una trayectoria de deforestación principalmente, y la pérdida de bosque nativo ha sido muy evidente.

7.2.1. Accesibilidad

Esta variable hace referencia a la distancia entre las vías fluviales o terrestres a las coberturas definidas en el área de estudio (**Figura 10, Figura 11**).

En los municipios de la Hormiga y San Miguel (Valle del Guamuez), la accesibilidad está dada principalmente por medio de las vías terrestres, sin embargo las vías fluviales o drenajes dobles también juegan un papel importante en la movilidad. Históricamente, en el área de estudio la accesibilidad se encuentra directamente relacionada con procesos sociales y económicos de la región, tales como la agricultura y la ganadería.

Estas actividades son un proceso continuo que inducen a la apertura de nuevas vías terrestres como resultado de la necesidad de transportar productos y de la movilidad de la comunidad, lo que conduce a procesos de deforestación de los bosques densos altos de la región. Adicionalmente, la construcción de vías, especialmente aquellas que conectan municipios, corregimiento o veredas, propician la consolidación de nuevos territorios sociales paralelo a estas, acelerando y ampliando los procesos de deforestación y transformación de los ecosistemas. Por otro lado, de acuerdo a González et al 2011, las empresas dedicadas a la explotación petrolera son consideradas uno de los principales agentes de la deforestación en Colombia, ya que pueden determinar procesos de pérdida de cobertura natural.

Aunque en el área de estudio, históricamente los ecosistemas han presentado deterioro como resultado de las actividades agropecuarias; las actividades petroleras tienen un efecto directo e indirecto sobre los bosques, específicamente debido a las alteraciones ecológicas por la construcción de vías terrestres que tienen como finalidad permitir el acceso en el campo petrolero con fines operativos (González et al 2011).

Con relación a la accesibilidad por vía fluvial, en el área de estudio se encuentran dos drenajes dobles que en términos sociales y económicos, son importantes elementos de comunicación, debido a que algunas comunidades se movilizan por medio de estos o transportan los productos de la región. Adicional, algunas comunidades están localizadas sobre los ejes fluviales, con el fin de aprovechar la facilidad de comunicación, intercambio, y transporte.

Lo anterior conlleva a procesos de transformación, especialmente de los bosques de galería ubicados sobre los bordes de las vías fluviales, y por tanto a la degradación de los ecosistemas y afectación de la calidad de los servicios ambientales que estos prestan.

De esta manera la accesibilidad, tanto terrestre como fluvial, permite evidenciar que las áreas con mayor facilidad de acceso presentan a su vez mayor transformación del territorio, debido a la fragmentación de las coberturas boscosas como resultado de los procesos de deforestación.

La fragmentarse de los bosques, según Saunders et al. 1991, es la división de un hábitat continuo en pequeñas fracciones, reemplazando el ecosistema original por ambientes construidos por el hombre; como son pastizales, cultivos, carreteras, etc. Dicha fragmentación conduce a la pérdida

de conectividad de los bosques, lo cual desencadena una serie de afectaciones ecológicas y sociales.

De esta manera, los procesos de fragmentación, son considerados uno de los principales procesos causantes de cambios físicos y bióticos, que contribuyen al deterioro en la composición, estructura y funcionalidad del ecosistema que ha sido alterado (Fahrig 2003). Adicional, siendo en este caso la fragmentación resultado de la apertura de vías, conduce al ahuyentar de las poblaciones de fauna al encontrar en estas una barrera física que impide su paso.

7.2.2. Pozos Petroleros

La implementación de pozos petroleros genera diferentes impactos ambientales y sociales, entre los cuales se encuentran aquellos asociados con los cambios de cobertura.

Históricamente, en el área de estudio las actividades agropecuarias han generado procesos de transformación del paisaje, conduciendo a la degradación de las coberturas boscosas de la región. Por lo tanto, la actividad petrolera que se evidencia en la zona de estudio, específicamente aquella relacionada con la construcción de pozos, se construyeron principalmente sobre coberturas ya transformadas, como pastos, lo cual no representó ningún proceso de deforestación para la región (**Figura 10, Figura 11**).

Por otro lado, la construcción de estos pozos es considerada una actividad puntual, que indica que los cambios de coberturas se restringen estrictamente a las áreas establecidas para su ejecución, evitando afectaciones sobre coberturas boscosas que sobre pasen dichos espacios.

7.2.3. Sísmica

Esta variable hace referencia al método geofísico que busca determinar en la profundidad del suelo la ubicación de las rocas porosas que almacenan los hidrocarburos.

Para el desarrollo de esta actividad se trazan unas líneas de manera paralela y perpendicular, formando entre ellas una cuadrícula que permite determinar los sitios de perforación (**Figura 10, Figura 11**). Estas cuadrillas, permiten el desplazamiento del personal que labora en el proyecto, con un ancho determinado por la corporación o determinado en las medidas de manejo ambiental. Por otro lado, durante la formación del cuadrante, se revisa que este tenga una distancia aceptable a elementos socio-ambientales como casas, nacederos, lagunas y morichales, entre otros; sin embargo se evidencian algunos cambios en el paisaje.

La transformación en el paisaje, como resultado de la implementación de las líneas, se refiere básicamente a dos aspectos; cambios en las coberturas y en algunos casos a procesos de deforestación.

Con relación al primero, hace referencia al resultado de la instalación de la cuadrilla sobre coberturas transformadas, debido a que aun cuando no se generan procesos de pérdida de cobertura natural, se evidencian importantes cambios en las coberturas al cruzar dichas líneas sobre estas.

Respecto a los procesos de deforestación, aunque se consideran de baja magnitud debido a que las líneas buscan intervenir el menor espacio posible, pueden conducir a proceso de pérdida de conectividad por la degradación que se genera en los bosques al abrir camino entre este para la instalación de las líneas de perforación.

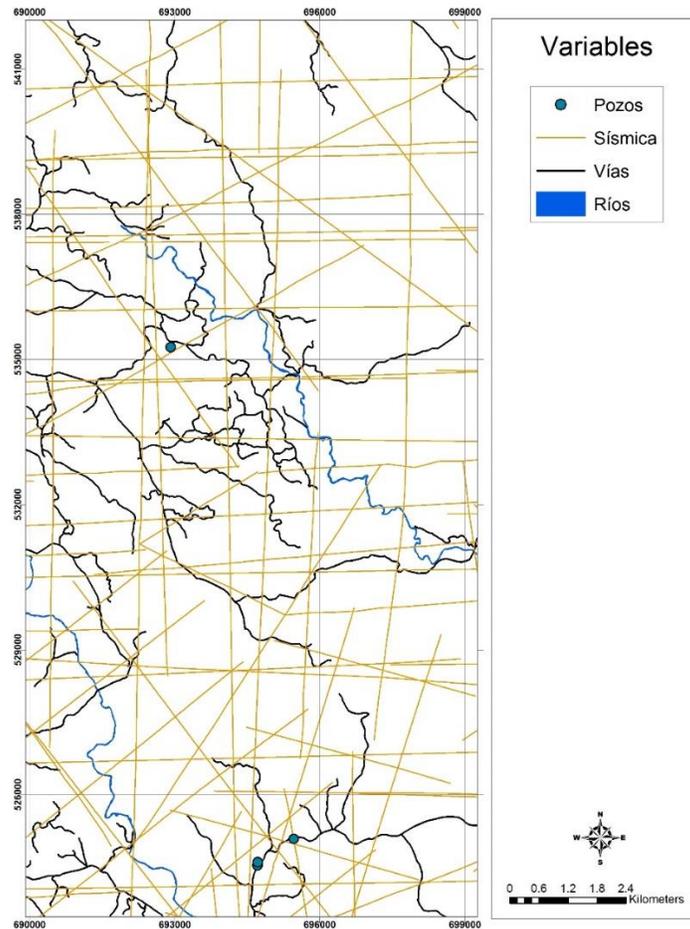


Figura 10. Mapa de variables usadas para el modelo de cambio de cobertura

En el mapa de variables y coberturas del año 1989 (**Figura .10**), se muestra donde están ubicadas las variables sobre cada tipo de cobertura, aunque no existe una certeza de en qué época fueron construidas las vías o las líneas de sísmica, sin embargo se puede apreciar de manera rápida que si han existido procesos de fragmentación de bosques, en los cuales han estado presentes y han influido estos elementos.

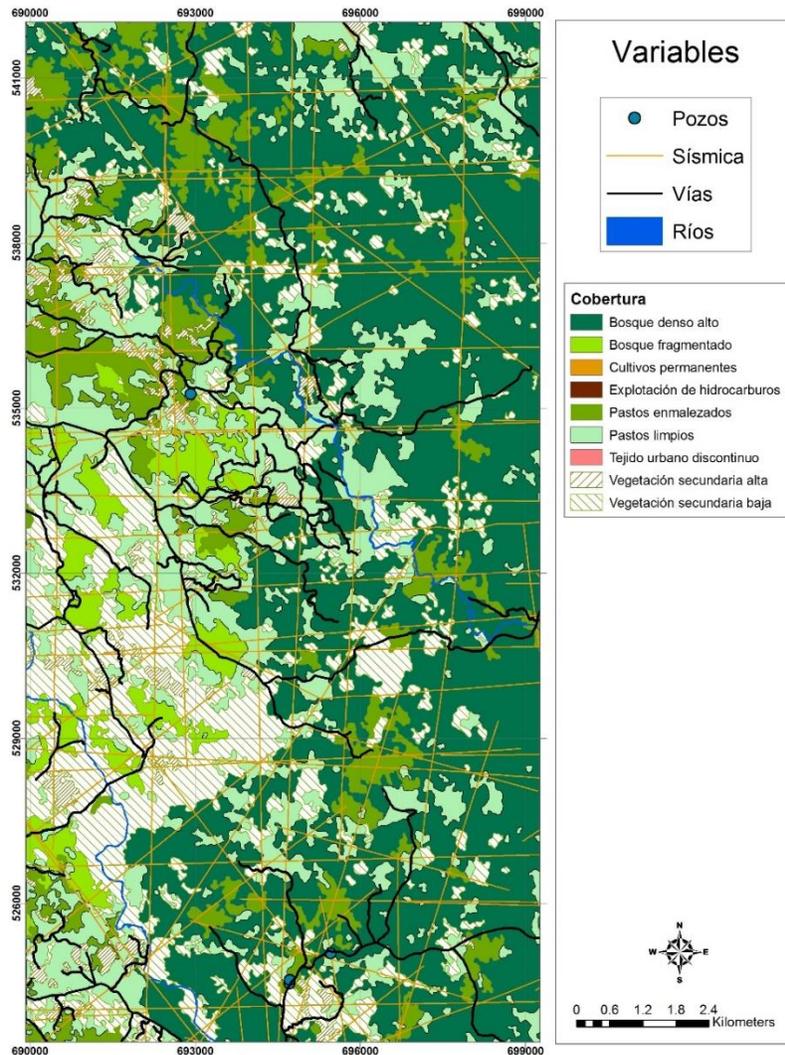


Figura 11. Mapa de variables usadas en el modelo de cambio de cobertura, incluidas en las coberturas de 1989

7.3. Modelo de simulación del cambio de uso del suelo y cobertura (Land Use Change and Land Cover – LUCC)

Dinamica EGO considera al mapa de 1989 como el paisaje inicial y el del 2014 como el paisaje final, tomando en cuenta que un paisaje puede ser entendido como un arreglo bi-dimensional de clases de uso del suelo.

Los mapas del paisaje tiene las siguientes clases (**Tabla 3**); el nulo es representado por 0:

Tabla 3. Clases de cobertura

Cobertura	Código
Bosque denso alto	1
Bosque fragmentado	2
Vegetación secundaria alta	3
Vegetación secundaria baja	4
Pastos limpios	5
Pastos enmalezados	6
Explotación de hidrocarburos	7
Cultivos permanentes	8
Tejido urbano discontinuo	9

Los códigos de los mapas son los valores de píxel de cada mapa raster. El modelo toma los códigos de los mapas, ya que no reconoce explícitamente los nombres, y realiza una matriz de transición en el período de tiempo seleccionado para determinar cuál es la tasa de cambio de cada cobertura y así poder replicar estos patrones en la simulación (**Tabla 4**).

La matriz de transiciones es pasada al modelo de simulación y se analiza el mapa del paisaje (tipo de uso y cobertura) para contar el número de celdas y calcular la tasa bruta, en términos de cantidad de celdas a ser cambiadas (*i.e.* deforestadas) (Soares-Fihlo, et. al, 2009). Esta matriz también se asemeja mucho al análisis multitemporal de la **Figura 8**, pues reproduce a partir de valores de píxel estos cambios.

Tabla 4. Matriz de transición 1989 – 2014

1989 Cód.	2014 Cód.	Tasa de cambio %
1	2	0.121
1	4	0.010
1	5	0.386
1	6	0.245
1	8	0.068
1	9	0.163
2	4	0.008
2	5	0.426
2	6	0.385
2	8	0.104
2	9	0.040

1989 Cód.	2014 Cód.	Tasa de cambio %
3	5	0.714
4	1	0.000
4	2	0.014
4	3	0.000
4	5	0.379
4	6	0.465
4	8	0.015
4	9	0.126
5	2	0.007
5	4	0.003
5	6	0.515
5	7	0.001
5	8	0.021
5	9	0.111
6	2	0.004
6	4	0.006
6	5	0.399
6	8	0.116
6	9	0.098
7	2	0.014
7	4	0.007
7	5	0.428
7	6	0.345
7	8	0.049
7	9	0.158

Esta matriz de transición, en conjunto con los paisajes inicial y final, y las variables anteriormente mencionadas son las entradas del modelo, lo cual arroja como resultado un mapa del año 2030 que reproduce los patrones esperados para el paisaje (**Figura .11**) en esa ventana de tiempo de 15 años.

Según los resultados arrojados por el modelo, en el año 2030 la cobertura con mayor extensión sería pastos limpio con 6597 ha que representan el 38% de la totalidad del paisaje, seguido por pastos enmalezados con 31% y 5485 ha. Las siguientes coberturas importantes son vegetación secundaria baja que ocupa un 17% del paisaje, y 3011 ha de área, bosque fragmentado con 1126 ha o 7% del territorio, y vegetación secundaria alta que representa el 6% del total distribuida en 1091 ha.

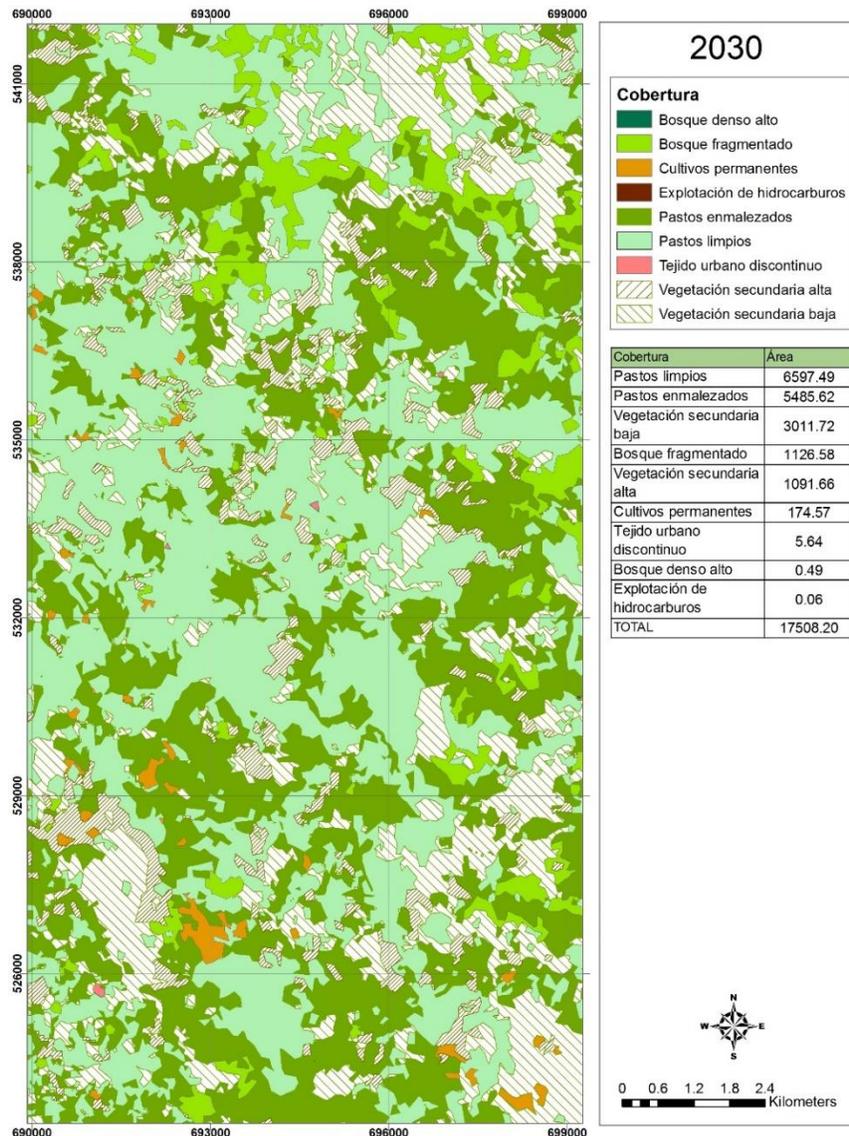


Figura 12. Mapa de proyección de coberturas para el año 2030

Finalmente se realizó un análisis de cambio de cobertura para los dos períodos de tiempo, a partir de las áreas que ocupa cada clase o tipo de cobertura (**Tabla .5**). El cambio más evidente y de mayor atención en este estudio es el Bosque denso alto, debido a la importancia que presenta para los ecosistemas de la región. El departamento del Putumayo posee una gran diversidad florística y de fauna que le dan una riqueza incalculable, y además hace parte de la gran planicie amazónica, región con un alto endemismo y biodiversidad en especies.

Esto implica la pérdida total del equilibrio ecosistémico de la región en zonas que deberían estar dedicadas enteramente a la conservación, sin embargo las actividades económicas como la

ganadería extensiva, la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas y la explotación de hidrocarburos han estado siempre presentes en esta zona.

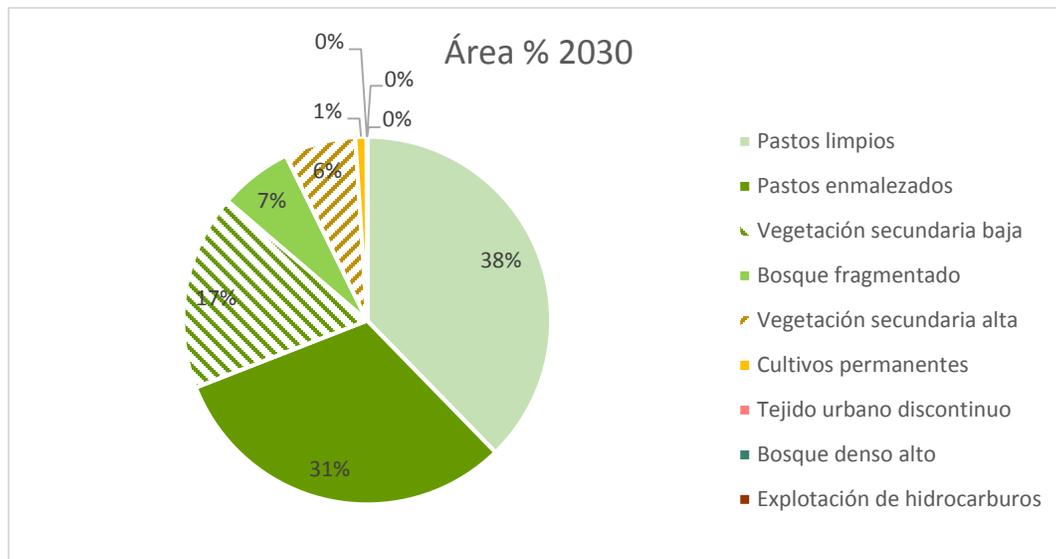


Figura 13. Porcentajes de ocupación de cada tipo de cobertura para el año 2030

El comportamiento de las coberturas en el primer período de tiempo, 1989-2014 muestra una clara tendencia hacia el reemplazo de bosques por pastos, en una extensión de 8000 ha aproximadamente. La única ganancia para la cobertura natural es un aumento en la vegetación secundaria alta, pero en un período de 23 años no parece ser un cambio significativo.

Tabla 5. Análisis multitemporal 1989 -2030

Cobertura	Año		
	1989	2014	2030
Bosque denso alto	7899.65	62.53	0.49
Bosque fragmentado	717.12	1081.44	1126.58
Cultivos permanentes	0.00	116.03	174.57
Explotación de hidrocarburos	1.16	0.43	0.06
Pastos enmalezados	1812.04	6718.43	5485.62
Pastos limpios	3830.36	6161.84	6597.49
Tejido urbano discontinuo	0.00	2.14	5.64
Vegetación secundaria alta	406.47	904.28	1091.66
Vegetación secundaria baja	2841.43	2461.09	3011.72
TOTAL	17508	17508	17508

El modelo analiza estas trayectorias de cambio y arroja como resultado un comportamiento muy enfocado hacia el crecimiento de los pastos limpios y la degradación total del bosque denso, en caso de que las condiciones actuales se mantengan hasta esa fecha.

Por otra parte es necesario analizar el caso del bosque fragmentado, porque aunque tenga una gran extensión, también es indicador de la deforestación, debido a que su causa es el hecho de que en un momento anterior era un bosque denso, y es un rastro de las zonas donde se llevan a cabo prácticas ilegales o inadecuadas como la tala indiscriminada.

8. Conclusiones

- El estudio de los cambios de cobertura merece una especial atención puesto que los estudios multitemporales generados a partir de los mismos, son un indicador no solo de la situación actual respecto al correcto uso del suelo, sino de la historia y el contexto del territorio que ha traído consigo este tipo de cambios la mayoría de las veces en detrimento de los recursos naturales.
- Los sensores remotos son una base importante para el análisis de imágenes satelitales, que a su vez permite detectar cambios no solo ambientales sino geofísicos y socioeconómicos, que pueden agilizar la toma de decisiones respecto a la planeación del territorio.
- Estas conclusiones e investigaciones acerca de la dinámica terrestre deben apuntar a la toma de decisiones y a acciones concretas, y además ser incluidas como herramienta de gestión y legislación.
- Los modelos de simulación ambiental son herramientas indispensables en la investigación puesto que permiten simular el comportamiento de sistemas complejos a partir de datos de tipo físico, químico, biológico e hidrológico y ayudan a comprender las complejas interrelaciones existentes entre los mismos.
- La combinación de sensores remotos y modelos ambientales son un instrumento poderoso para cualquier estudio acerca de la dinámica de la superficie terrestre y la atmósfera, de manera podamos mejorar el conocimiento y comprender los procesos y fenómenos, sino que podamos adelantarnos a posibles desastres, o riesgos, por causas naturales y antrópicas.

9. Referencias

Balué .A Gustavo, de Almeida Cláudia .M., Spinelli .A Luciana. 2011. Modelagem da paisagem no Parque Estadual Carlos Botelho (SP) e Entorno. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos - SP, Brasil.

Cabral .P, Geroyannis .H, Gilg .J.P, and Painho .M. 2010. Analysis and modeling of land-use and land-cover change in Sintra-Cascais area. Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação – Universidade Nova de Lisboa, Portugal. École des Hautes Études en Sciences Sociales - CAMS (UMR 8557 CNRS), France.

Carvalho de Lima Thiago, Guilen-Lima .M. Carolina, Silva .O Marianne, Soares-Filho Britaldo. DINAMICA EGO e Land Change Modeler para simulação de desmatamento na Amazonia brasileira: análise comparativa. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

De Carvahlo .X Arimatea, Amaral Silvana, Balué .A Gustavo., Vieira .M Antonio. 2009. Redes neurais para a seleção de variáveis ambientais no processo de modelagem de distribuição de espécies na região Norte do Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 5531-5538.

Fahrig, Lenore. 2003. EFFECTS OF HABITAT FRAGMENTATION ON BIODIVERSITY. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. Vol. 34: 487-515 (Volume publication date November 2003). First published online as a Review in Advance on August 14, 2003.

Fava e Silva .J, Eckhardt. R. R, Rempel .C. 2013. Modelagem dinâmica espacial da cobertura florestal nativa do município de Roca Sales - RS Centro Universitário Univates – UNIVATES. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE

García Romero, Helena. 2013. Deforestación en Colombia: Retos y perspectivas. FEDESARROLLO.

González J.J., Etter A.A., Sarmiento A.H., Orrego S.A., Ramírez C., Cabrera E., Vargas D., Galindo G., García M.C. Ordoñez M.F. 2011. Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia. IDEAM, Bogotá D.C., Colombia. 64 p

Lepers. E, Lambin E.F, Janetos A.C., Defries .R, Achard.P , Ramankutty .N, and Scholes J.R. 2005. A Synthesis of Information on Rapid Land-Cover Change for the Period 1981–2000. *Vol. 55 No. 2 Bioscience* 115.

Leydimere .J .C, Costa .M.H., Soares-Filho .B and Coe .M.T. 2013. Large-scale expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario. *Environ. Res. Lett.* 8 (2013) 024021 (10pp). The Woods Hole Research Center, 149 Woods Hole Road, Falmouth, MA 02540-1644, USA.

Mas. Jean. F. and Vega .Ernesto. 2012. Assessing yearly transition probability matrix for land use / land cover dynamics. Symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences, Florianopolis- SC Brazil, July 10-13.

Mas. Jean. F, Pérez .V Azucena, and Clarke Keith. 2010. Assessing Simulated Land Use/Cover Maps Using Similarity and Fragmentation Indices. ASPRS 2010. Annual Conference. San Diego, California. April 26-30, 2010.

Pascoal Junior. P.S, Santos Damascena.L, and Uchôa de Lima .C.C. 2013. Avaliação multitemporal da dinâmica de uso e ocupação do solo nas imediações do estuário da RESEX Marinha Baía do Iguape: Realidade e Perspectivas para o gerenciamento. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

Pe'er G, Zurita GA, Schober L, Bellocq MI, Strer M, et al. (2013) Simple Process-Based Simulators for Generating Spatial Patterns of Habitat Loss and Fragmentation: A Review and Introduction to the G-RaFFe Model. PLoS ONE 8(5): e64968. doi:10.1371/journal.pone.0064968.

Praveen Kumar Mallupattu and Jayarama Sreenivasula Reddy. 2013. "Analysis of Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing Data and GIS at an Urban Area, Tirupati, India," The Scientific World Journal, vol. 2013, Article ID 268623, 6 pages, 2013. doi:10.1155/2013/268623.

Praveen Kumar Mallupattu and Jayarama Sreenivasula Reddy. 2013. Analysis of Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing Data and GIS at an Urban Area, Tirupati, India The ScientificWorld Journal. Volume 2013, Article ID 268623, 6 pages

Tejaswi, Giri. 2007. Manual on deforestation, degradation, and fragmentation using remote sensing and gis prepared by strengthening monitoring, assessment and reporting on sustainable forest management in asia (gcp/int/988/jpn).

Courage Kamusoko , Katsumata Oono , Akihiro Nakazawa , Yukio Wada , Ryuji Nakada , Takahiro Hosokawa , Shunsuke Tomimura , Toru Furuya , Akitaka Iwata , Hiromichi Moriike , Takashi Someya , Takashi Yamase, Mitsuru Nasu, Yoshitaka Gomi, Takio Sano, Takao Isobe and Khamma Homsysavath. Spatial Simulation Modelling of Future Forest Cover Change Scenarios in Luangprabang Province, Lao PDR in www.mdpi.com/journal/forests.

Roger A. Pielke, Sr., Andy Pitman, Dev Niyogi, Rezaul Mahmood, Clive McAlpine, Faisal Hossain, Kees Klein Goldewijk, Udaysankar Nair, Richard Betts, Souleymane Fall, Markus Reichstein, Pavel Kabat and Nathalie de Noblet. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Clim Change* 2011, 2:828–850. doi: 10.1002/wcc.144.

Saunders et al. 1991. Biological Consequences of Ecosystem Fragmentation: A review. *Conservation Biology*, Vol. 5, No.1 (Mar 1991). 18-32.

Soares-Filho .B.S., Assunção Renato M., And Pantuzzo Alexandre E.. 2001. Modeling the Spatial Transition Probabilities of Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier. *December 2001 / Vol. 51 No. 12. BioScience* 1059.

Soares-Filho, B.S., Pennachin, C.L., Cerqueira (2002), "G. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier". *Ecological Modelling*, Vol. 154(3): 217:235.

Soares-Filho, B.S. 2009. Modelling Environmental Dynamics with DINAMICA EGO. Belo Horizonte.

Weng, Qihao. 2001. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Department of Geography, Geology, and Anthropology, Indiana State University, Terre Haute. IN 47809, USA. Journal of Environmental Management* (2002) 64, 273–284.

<http://www.usgs.gov/>