

Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México

Recibido: 11 de abril de 2015. Aceptado en versión final: 30 de agosto de 2015.
Publicado en línea (pre-print): 27 de abril de 2015.

Michelle Farfán Gutiérrez*
Gerardo Rodríguez-Tapia**
Jean-François Mas***

Resumen. El análisis jerárquico de intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo es un marco cuantitativo de análisis espacial anidado que permite estimar los cambios en tres niveles de orden, intervalo de tiempo, categoría y transición, a partir de una matriz de cambio. Se presenta su aplicación para dos periodos de tiempo 2000-2004 y 2004-2008 en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, área de estudio altamente heterogénea en términos de los tipos de vegetación y usos del suelo. Se usó cartografía del INEGI a escala 1:50 000 actualizada mediante una imagen Landsat ETM+ del 2000 e imágenes SPOT para 2004 y 2008. El análisis permitió conocer en qué intervalo de tiempo la tasa anual general de cambio es más rápida, cuáles son las categorías más activas y cuáles son latentes; cuáles son las ca-

tegorías objetivo para las transiciones activas, y si el patrón de cambio es estable en el tiempo. Se observó una mayor tasa anual de cambio entre 2000 y 2004 en comparación con el periodo 2004-2008. A nivel de categorías, se encontraron altas tasas de deforestación de las selvas tropicales hacia usos agropecuarios, y latencia en bosques templados con baja intensidad de transición hacia usos agropecuarios. En particular la actividad ganadera arraigada en la región aparece como factor promotor del proceso de deforestación, que en la praxis sobre el terreno se expresa diferencialmente en selvas y bosques.

Palabras clave: intensidad, cambio, deforestación, reserva, biosfera.

* División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Zona Centro, 36000, Guanajuato, Gto. E-mail: farfanmichel@gmail.com

** Unidad de Geomática, Instituto de Ecología (IE), Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, México, D. F. E-mail: gerardo@ecologia.unam.mx

*** Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán. E-mail: jfmas@ciga.unam.mx

Cómo citar:

Farfán G., Michelle, G. Rodríguez-Tapia y J.-F. Mas (2016), "Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 90, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 89-104, dx.doi.org/10.14350/rig.48600.

Hierarchical analysis of the intensity of change of land use/cover change and deforestation (2000-2008) in the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Mexico

Abstract. Hierarchical intensity analysis of land cover/use change is a quantitative framework of nested spatial analyses that allows the estimation of changes using a change matrix at three levels of order: time interval, category, and transition. The intention of this article is to present the advantages of this framework in analyzing the dynamics of land use/cover change using the change matrix, which has been commonly used for this purpose. However, even though the change matrix identifies some key patterns, it does not indicate whether the observed patterns have derived from processes that are systematically more or less intense than a random or uniform process. Among the most important considerations in intensity of change analysis is the use of a hierarchical order that starts at the time interval level, then takes into account the level of categories and culminates at level of transitions. Thus, the areas of each category at the start and end times serve to establish a uniform basis for the comparison between the expected and observed changes. In this way it is possible to define more clearly the patterns of change between time intervals and identifying potential drivers of the process. We present apply this analysis for two time periods (2000-2004 and 2004-2008) in the Biosphere Reserve Sierra de Manantlán (BRSM), a highly heterogeneous area in terms of vegetation type and land use, which was declared as a reserve in the last decade of the twentieth century. We used the cartography from INEGI at a 1:50,000 scale, updated by means of a Landsat ETM+ image for the year 2000, and SPOT 5 images for 2004 and 2008. Our analysis has allowed us to determine the time interval in which the general annual change rate was higher; which categories were most active and which latent; which categories were targets of active transitions; and if the pattern of change remained stable through time. We observed a fast annual rate of change between 2000 and 2004, with an absolute change of 70.936 hectares in comparison to the period 2004-2008, which showed a slower

rate of change, of 2,194 ha in absolute terms. These results show a deceleration in the overall process of transformation of land use, which could be related to the publication and implementation of the BRSM management plan in 2000, which may have restricted land-use change in the core zones.

At the category level, we found high rates of deforestation of tropical forests to agricultural and livestock production uses, and latency in temperate forests with a slower intensity of transition towards these uses. In this regard, the temperate forests are latent coverages that do not fall in the change intensively in the overall dynamics of change and could mean they are in a state of minor disturbance. However, there might be a degradation process, since in the case of introduction of cattle, this grazing free mainly in the rainy season directly affecting the temperate forest understory.

In terms of change rate, the tropical forests had an estimated -1% per year rate. In contrast, forests showed lower rates of change of -0.5% per year. The land uses change rates such as irrigated agriculture, induced pasture, urban areas and iron mine were above 1% per year, indicating an increase in its surface in both periods. An intensive process of change observed in both periods at the category level is the loss of tropical dry forest. The areas of higher change are located in the buffer and influence zones, where the management plan does not regulate land use. In particular, long-established livestock production activity in the region appears as the driving factor of deforestation, affecting both tropical and temperate forests though at different rates. Finally, the cartography derived from the analysis of intensity of change is a contribution for decision-making concerning the management of the BRSM with emphasis in the buffer zone.

Key words: Intensity, change, deforestation, reserve, biosphere.

INTRODUCCIÓN

El análisis de intensidad de cambio es un marco de análisis cuantitativo jerárquico que permite conocer los cambios en cantidad y magnitud entre categorías dentro de un intervalo de tiempo (Aldwaik y Pontius, 2012). Su expresión parte del cálculo de una matriz de cambio en la que el número de filas es igual al número de columnas. Este nuevo enfoque fue presentado por primera vez por Pontius *et al.* (2004) y desde entonces ha sido utilizado para estimar la intensidad de la dinámica de cambio

en diversas áreas de estudio y a diferentes escalas (Manandhar *et al.* 2010, Pontius *et al.* 2013). Dada la diversidad de estudios publicados hasta ahora en revistas anglosajonas, el propósito de este artículo es exponer sus ventajas para analizar la dinámica de cambio de cobertura/uso de suelo partiendo de la matriz de cambio, que ha sido utilizada comúnmente para dicho propósito. Sin embargo, si bien la matriz de cambio permite identificar algunos patrones clave, no permite determinar si los patrones observados que podrían haber derivado de procesos que son sistemáticamente más o menos

intensos que un proceso aleatorio o uniforme (Pontius *et al.*, 2004). Dentro de las consideraciones más importantes del análisis de intensidad de cambio, puede destacarse el uso de un orden jerárquico que inicia a nivel del intervalo de tiempo, después a nivel de categorías y termina a nivel de transiciones. Por tanto, las áreas de las categorías al tiempo inicial y final sirven para establecer una línea de base uniforme para la comparación entre los cambios observados y los esperados. De esta manera es posible definir de manera más clara el patrón de cambio entre intervalos de tiempo y aproximarnos a los posibles impulsores del proceso. Este enfoque de análisis se implementó en un área protegida, la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM), decretada en la última década del siglo XX (Ceballos *et al.*, 2010). Los objetivos del estudio se enfocaron a determinar la intensidad de los cambios ocurridos en las coberturas forestales y los usos de suelo a un nivel jerárquico y en un orden creciente de detalle. Es decir, se analizaron los cambios a nivel del intervalo total de tiempo (2000-2008), a nivel de los subintervalos de tiempo (2000-2004, 2004-2008), a nivel de categorías y a nivel de la intensidad con la que ocurrieron las transiciones. Finalmente, se propone un conjunto

de factores que potencialmente promueven el proceso de deforestación en la RBSM.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

Localización geográfica y zonificación

La RBSM fue decretada por el Ejecutivo Federal en marzo de 1987 (INE, 2000). Está localizada entre los 19°26'47" y 19°42'05" latitud norte, y 103°51'12" y 104°27'05" longitud oeste (Figura 1) y su territorio comprende parte de los estados de Jalisco y Colima, al occidente de México. En este estudio se definió un área que incluye el polígono de la RBSM (1 396 km²), más su zona de influencia (ZI), con una extensión total de 4 576 km².

Relieve y tipos de vegetación

La RBSM destaca por un gradiente altitudinal que va de los 400 a los 2 900 msnm, asociado a una diversidad litológica y a una complejidad geomorfológica como principales factores diferenciadores del paisaje (Pérez *et al.*, 2008; INE, 2000). Las partes altas y templadas de la RBSM están compuestas por bosques de coníferas, de encinos y latifoliadas; en altitudes medias y bajo condiciones subhúmedas

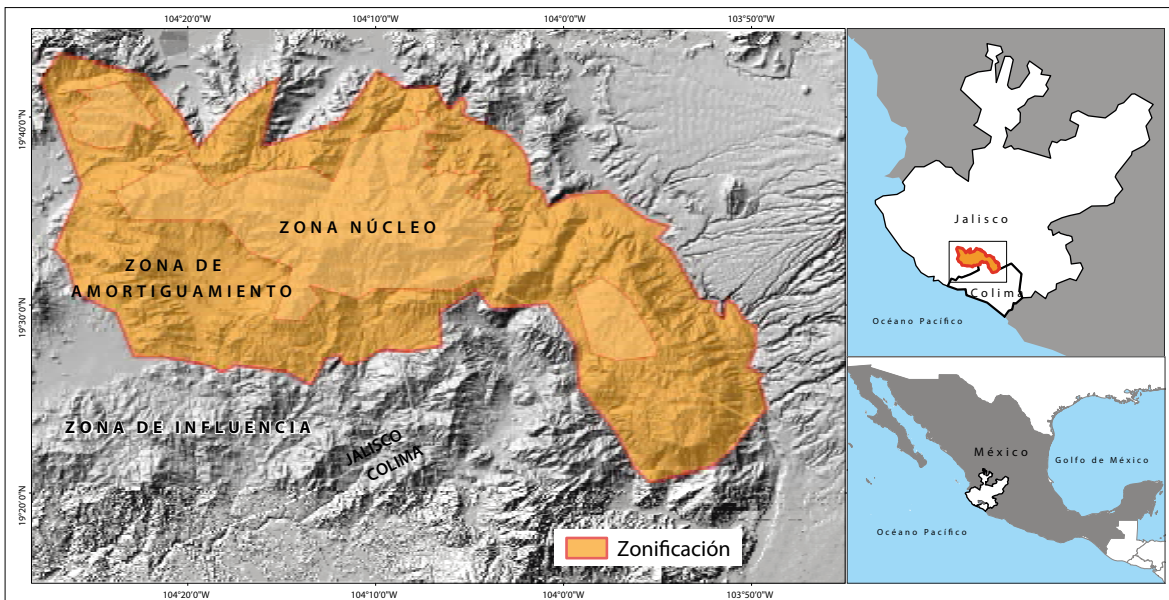


Figura 1. Localización del área en estudio.

abundan los pinares y el bosque mesófilo de montaña; en las laderas por debajo de los 1 000 msnm, con un clima subhúmedo, se desarrollan selvas bajas caducifolias y, finalmente, en las laderas bajas de las montañas y en algunas mesetas altas se localizan terrenos de cultivo. La variación del relieve en combinación con el clima, caracterizado por una marcada estacionalidad entre la temporada de lluvias y la de secas, hace posible una gran diversidad vegetal con un registro de más de 2 700 especies de plantas vasculares (INE, 2000).

MATERIALES

El área en estudio se delimitó utilizando la zonificación del decreto como Reserva de la Biosfera (*Ibid.*) en conjunto con las cartas de uso de suelo y vegetación (1:50 000) de INEGI (1971). Esta información fue incorporada dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis (Versión 9.3). Para actualizar la información de INEGI fue empleada una imagen Landsat ETM+ del 2000, con una resolución espacial de 30 metros. Este insumo fue proporcionado por el Inventario Forestal Nacional 2000-2001 y se emplearon seis bandas que corresponden al espectro visible y al infrarrojo (1, 2, 3, 4, 5 y 7) generando compuestos en falso color, que sirvieron como base para la identificación visual de los tipos de coberturas y usos del suelo. Para las siguientes fechas (2004 y 2008) se emplearon imágenes SPOT 5 con nivel de procesamiento 2A (Cuadro 1), con una resolución espacial de 10 m. Todos los insumos cartográficos se proyectaron en UTM zona 13 norte, datum WGS84.

MÉTODOS

Actualización de los tipos de vegetación y uso de suelo

Se actualizó la cartografía de vegetación y uso de suelo, utilizando la leyenda propuesta por Farfán (2009), que homologa sistemas previos de clasificación de los tipos de vegetación y uso de suelo para la RBSM. Se cartografiaron 13 categorías de vegetación y uso del suelo (Figura 2), que fueron

actualizadas para las fechas 2000, 2004 y 2008 con la técnica de clasificación visual interdependiente propuesta por la FAO (2001). Esta consiste en que los polígonos de una primera fecha sirvan de referencia para interpretar las imágenes de las demás fechas, modificando solo los segmentos en donde se visualicen cambios. Es un método fiable debido a que reduce al mínimo errores de posición y de clasificación (Ramírez y Zubieta, 2005).

Estimación de la tasa de cambio

Se calcularon las tasas de deforestación con la siguiente ecuación (1) utilizada por la FAO (1996):

$$t = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1} \right)^{1/n} \quad (1)$$

Donde t es la tasa de cambio, S_1 y S_2 son las superficies de uso del suelo en la fecha inicial y final, respectivamente. La variable n equivale a la duración del periodo evaluado. Un valor negativo de t indica una disminución de la cobertura y por el contrario, si t es mayor que cero, hay un aumento de la misma.

Monitoreo espacio-temporal de la dinámica de cambio de cobertura/uso del suelo

La cartografía vectorial actualizada (2000-2008) fue transformada a formato raster con una resolución de celda de 30 m, la cual fue utilizada para calcular las matrices de transición para dos periodos 2000-2004 y 2004-2008. Este análisis consiste en la sobreposición cartográfica y una tabulación cruzada empleando dos fechas (fecha 1 y fecha 2), para definir un primer intervalo de tiempo (Eastman *et al.*, 1995; Bocco *et al.*, 2001). Como resultado se obtuvo una matriz, que es una tabla de arreglos simétricos que contiene en el eje horizontal las categorías de vegetación y uso del suelo para la primera fecha, mientras que en el eje vertical tiene la información proveniente de la siguiente fecha (Cuadro 2). La diagonal de la matriz, representa la superficie de cada categoría de vegetación y uso de suelo que permaneció sin cambios durante el periodo considerado, mientras que en el resto de las celdas muestra la superficie que experimentó un

Cuadro 1. Imágenes satelitales empleadas para actualizar la cobertura y uso del suelo.

| Imagen multiespectral | Fecha | Resolución espacial (en metros) | Resolución espectral |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Landsat ETM+ | 23/mayo/2000 7/junio/2000 | 30 | 7 bandas + 1 pancromática |
| SPOT 5 | 21/enero/2004 24/diciembre/2008 | 10 | 4 bandas + 1 pancromática |

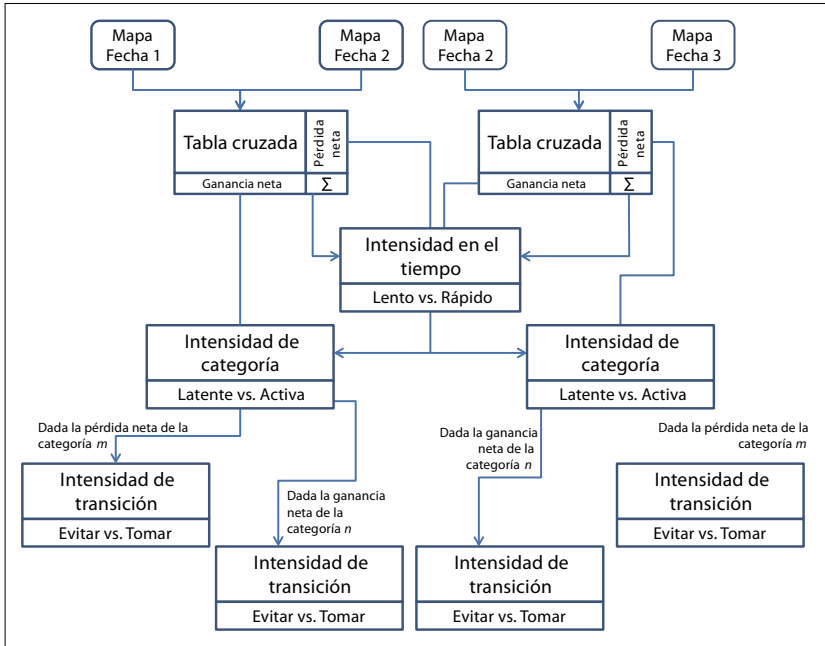


Figura 2. Análisis de intensidad de la dinámica de cambio a nivel creciente de detalle: intervalo, categoría y transición (adaptada de Aldwaik y Pontius, 2012).

Cuadro 2. Matriz que muestra la estimación del intercambio (Int), cambio total (Ct), cambio neto (Cn), ganancia (G_{ij}) y pérdida (L_{ij}) entre categorías (Cat) de la fecha 1 a la fecha 2 (adaptada de Pontius *et al.*, 2004).

| | | Fecha 2 | | | | Suma total fecha 1 (P _{i+}) | Pérdida (L _i) | Cambio total (Ct) | Cambio neto (Cn) | Intercambio (Int) |
|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | Cat 1(j) | Cat 2 | Cat 3 | Cat _j | | | | | |
| Fecha 1 | Cat 1(i) | P ₁₁ | P ₁₂ | P ₁₃ | P _{1j} | P ₁₊ | P ₁₊ -P ₁₁ | = L + G | = Ct-Int | = 2*min(L,G) |
| | Cat 2 | P ₂₁ | P ₂₂ | P ₂₃ | P _{2j} | P ₂₊ | P ₂₊ -P ₂₂ | | | |
| | Cat 3 | P ₃₁ | P ₃₂ | P ₃₃ | P _{3j} | P ₃₊ | P ₃₊ -P ₃₃ | | | |
| | Cat _i | P _{i1} | P _{i2} | P _{i3} | P _{ij} | P _{i+} | | | | |
| | Suma total fecha 2 (P _{+j}) | P ₊₁ | P ₊₂ | P ₊₃ | P _{+j} | 1 | | | | |
| Ganancia (G _j) | P ₊₁ -P ₁₁ | P ₊₂ -P ₂₂ | P ₊₃ -P ₃₃ | | | | | | | |

cambio hacia algún otro tipo de categoría. A partir de la matriz de cambio se estimó el cambio total, el cambio neto, la ganancia, la pérdida y la estimación del intercambio entre coberturas (*swap* en inglés) de cada una de las coberturas hacia otras categorías, principalmente usos de suelo (Cuadro 2).

Las matrices de transición terminan con una columna al final que es la suma de las superficies de todas las categorías en la fecha 1 (P_{i+}) y con un renglón hasta abajo que es de igual manera, la suma total para las categorías de la fecha 2 (P_{+j}). De acuerdo con Pontius *et al.* (2004) se agregaron en este análisis columnas y filas que representan la ganancia, la pérdida y el intercambio entre categorías (Cuadro 2).

El intercambio es el proceso en que la pérdida de una determinada categoría en un lugar está acompañada por su ganancia simultánea en otra ubicación. Por ejemplo, cuando la deforestación de un bosque va acompañada de su reforestación en otro lugar dentro del mismo periodo de tiempo. El intercambio entre categorías (Int) se calcula como dos veces el valor mínimo de las ganancias y las pérdidas,

$$\text{Int} = 2 \times \text{MIN} (P_{i+} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj}) \quad (2)$$

Por otra parte, se estima la ganancia (G_j), como la diferencia del área total de la categoría j en la fecha 2 (P_{+j}) y la persistencia expresada en la diagonal de la matriz (P_{jj}),

$$G_j = (P_{+j}) - (P_{jj}) \quad (3)$$

Finalmente, la pérdida (L_{ij}) es la diferencia entre el área total de una categoría i en la fecha 1 (P_{i+}) y la persistencia,

$$(P_{ij}), L_{ij} = (P_{i+}) - (P_{jj}) \quad (4)$$

Para calcular el cambio total a nivel de categoría (Ct) se suma el cambio neto (Cn) y el intercambio (Int), o bien, se realiza la suma de las ganancias (G_j) y las pérdidas (L_i).

Análisis jerárquico de intensidad del cambio de cobertura/uso de suelo

El análisis de intensidad de cambio está definido dentro de un marco teórico matemático que en términos generales compara la intensidad de cambio uniforme, definido como un cambio distribuido uniformemente a nivel de intervalo, de categoría o de transición, que sirve de referencia para comparar el cambio observado a los mismos niveles jerárquicos. Este enfoque permite identificar cambios sistemáticos independientes de cualquier nivel de persistencia (Figura 2). Si los patrones de cambio derivados del análisis dentro de un intervalo de tiempo persisten en los siguientes intervalos de tiempo, entonces el proceso de cambio es estacionario (Aldwaik y Pontius, 2012).

Los niveles jerárquicos del análisis se muestran en el diagrama de flujo de la Figura 3. La notación matemática empleada para las ecuaciones correspondientes se define en el Cuadro 3.

El primer nivel del análisis estima la intensidad de cambio a nivel de intervalo de tiempo entre

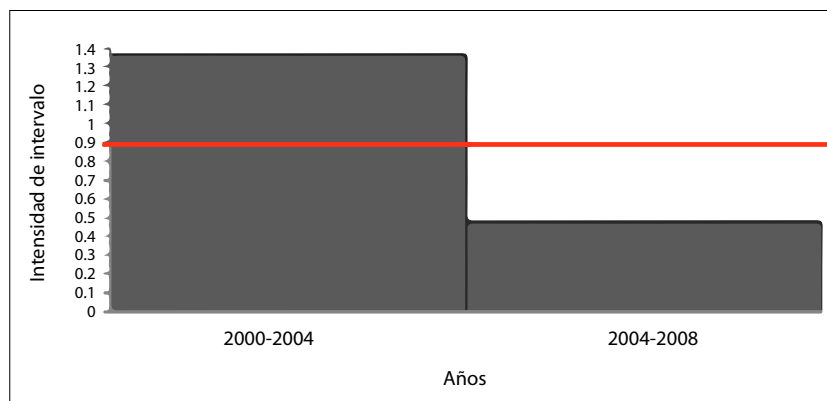


Figura 3. Intensidad de cambio a nivel de intervalo de tiempo. Si el periodo se extiende por arriba de la línea de intensidad uniforme, entonces es un periodo activo (2000-2004), de lo contrario es latente (2004-2008).

Cuadro 3. Notación matemática de las ecuaciones a nivel jerárquico de análisis, intervalo, categoría y transición

| | |
|----------|---|
| T | Número de puntos en el tiempo, equivalente a 3 para nuestro caso de estudio |
| Y_t | Año al tiempo t |
| t | Índice para el intervalo de tiempo inicial $[Y_t, Y_{t+1}]$, donde t tiene un rango de 1 hacia $T-1$ |
| J | Número de categorías |
| i | Índice para la categoría del inicio del intervalo |
| j | Índice para la categoría al final del intervalo |
| m | Índice para la categoría que pierde en la transición seleccionada |
| n | Índice para la categoría que gana en la transición seleccionada |
| C_{ij} | Número de píxeles en la transición de la categoría i a la categoría j durante el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ |
| S_t | Cambio anual durante el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ |
| U | Cambio anual uniforme durante la extensión $[Y_1, Y_3]$ |
| G_{ij} | Intensidad en la ganancia anual de la categoría j durante el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ relativo al tamaño de la categoría j al tiempo $t + 1$ |
| L_{ii} | Intensidad de pérdida anual de la categoría i durante el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ relativo al tamaño de la categoría i al tiempo t |
| R_{in} | Intensidad de transición anual de la categoría i a la categoría n durante el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ relativo al tamaño de la categoría i al tiempo t donde $i \neq n$ |
| w_m | Intensidad anual uniforme de transición de todas las categorías diferentes de n hacia la categoría n durante el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ relativo al tamaño de las categorías diferentes de n al tiempo t |
| Q_{mj} | Intensidad de transición anual de la categoría i a la categoría m durante el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ relativo al tamaño de la categoría j al tiempo $t+1$ donde $j \neq m$ |
| V_{nm} | Intensidad de transición anual uniforme desde todas las categorías que no son m hacia la categoría j durante el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ relativo al tamaño de todas las categorías que no son m en el tiempo $t+1$ |

la fecha 1 y la fecha 2. Esta estimación permite saber cómo la tasa de cambio anual varía entre los intervalos de tiempo, y puede ser rápida o lenta. Después de calcular la intensidad de cambio anual para cada intervalo de tiempo (ecuación 5), se compararon las tasas observadas con respecto a una tasa uniforme que existiría si los cambios anuales fueran distribuidos de manera uniforme en todo el periodo de tiempo (ecuación 6).

$$S_t = \frac{\text{área de cambio durante el intervalo } [Y_t, Y_t + 1] / \text{área de estudio}}{\text{duración del intervalo } [Y_t, Y_t + 1]} \times 100 \quad (5)$$

$$U = \frac{\text{área de cambio durante todos los intervalos} / \text{área de estudio}}{\text{duración de todos los intervalos}} \times 100 \quad (6)$$

A nivel de categorías, se estimó cómo las ganancias y las pérdidas cambian en relación con el área de la categoría, considerando respectivamente su área al inicio y al final del periodo (ecuaciones 7 y 8). También se comparó la intensidad del cambio anual observado a nivel de las categorías con la correspondiente intensidad uniforme de cambio anual que se produciría si el cambio durante cada intervalo se asignara de manera uniforme en el área en estudio. Por tanto, si la intensidad de cambio de la categoría es mayor al cambio uniforme, entonces la categoría es activa durante el intervalo. Por el contrario, si la intensidad de cambio es menor a éste, entonces la categoría es latente. De la ecuación (6) se obtiene la intensidad uniforme para el intervalo de tiempo t a nivel de categoría, por lo tanto la ecuación (4) vincula el análisis a nivel de intervalo con el análisis a nivel de categoría.

$$G_{tj} = \frac{\text{área de ganancia neta de la categoría } j \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duración de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área de la categoría } j \text{ al tiempo } Y_t + 1} \times 100 \quad (7)$$

$$L_{ti} = \frac{\text{área de pérdida neta de la categoría } i \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duración de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área de la categoría } i \text{ al tiempo } Y_t + 1} \times 100 \quad (8)$$

Finalmente, el análisis a nivel de transición entre coberturas, examina cómo la superficie de la transición varía dentro del intervalo de tiempo en relación con la superficie de las categorías disponibles para que ésta ocurra, teniendo en cuenta el tamaño de todas las categorías que conforman el paisaje. Para definir el análisis de intensidad a este nivel, es útil considerar la transición de una particular categoría m hacia otra categoría diferente n , que es la categoría blanco. Para esto, son importantes ciertos supuestos con respecto al lugar donde puede ocurrir la transición de m hacia n . Primero se definirá el patrón de transición de ganancia de la categoría n . Por ejemplo, si la categoría n existe en el momento inicial, a continuación, la categoría n no puede ganar en ese lugar. Cuando la categoría n gana, tiene que hacerlo a partir de los lugares que inicialmente no son categoría n . Si la categoría n gana de manera uniforme a través del paisaje, entonces ganará de otras categorías en proporción al área inicial de dichas categorías.

La ecuación (9) estima la intensidad de cambio a nivel de transición de cada categoría i hacia la categoría n , donde $i \neq n$ y genera la intensidad J-1 por intervalo de tiempo. La ecuación (10) genera la intensidad uniforme para la categoría n , que define la intensidad de la transición anual hacia la categoría n asumiendo que la categoría n gana de manera uniforme a través del paisaje.

$$R_{tin} = \frac{\text{área de transición de } i \text{ hacia } n \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duración de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área de la categoría } i \text{ al tiempo } Y_t} \times 100 \quad (9)$$

$$W_{tm} = \frac{\text{área de ganancia neta de la categoría } n \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duración de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área que no pertenece a la categoría } n \text{ al tiempo } Y_t} \times 100 \quad (10)$$

Ahora consideremos la pérdida de la categoría m . Dada la pérdida observada de la categoría m las ecuaciones (11) y (12) identifican las categorías que intensivamente son evitadas *versus* aquéllas que son las categorías blanco para la transición. La ecuación (11) estima la intensidad observada de la transición de la categoría m para cada categoría j , donde $j \neq m$ y genera la intensidad J-1 por intervalo de tiempo, lo que se entiende como la intensidad para cada categoría diferente de m para el intervalo de tiempo.

$$Q_{mj} = \frac{\text{área de transición de } m \text{ hacia } j \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duración de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área de la categoría } j \text{ al tiempo } Y_t + 1} \times 100 \quad (11)$$

$$V_{tm} = \frac{\text{área de pérdida neta de la categoría } m \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duración de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área que no pertenece a la categoría } m \text{ al tiempo } Y_t + 1} \times 100 \quad (12)$$

La ecuación (12) genera como resultado para la categoría m la intensidad uniforme en la transición anual de la categoría m hacia todas las demás categorías al final del tiempo de cada intervalo. Esta intensidad uniforme retrata la situación en la que la categoría m pierde hacia otras categorías, donde todas las categorías diferentes de m ganan de la categoría m en proporción a su tamaño relativo al final del periodo.

Si la intensidad de la transición observada es mayor que la intensidad uniforme, entonces la categoría se dirige a la transición de forma preferencial. En contraparte, si la intensidad de la transición observada es menor que la intensidad uniforme para ésta, entonces la categoría evita esa transición. Para facilitar el cálculo de las ecuaciones antes descritas se utilizó la utilería en línea publicada por Aldwaik y Pontius (2012), en el sitio en línea [<https://sites.google.com/site/intensityanalysis/home>]

RESULTADOS

Tasas de cambio

Las tasas estimadas para los usos de suelo como son agricultura de riego, pastizal inducido, zonas

urbanas y mina de hierro fueron superiores al uno por ciento por año, que indican un aumento en su superficie en ambos periodos; por el contrario, para las coberturas forestales las tasas calculadas indican una pérdida de superficies. En particular para las selvas tropicales, fueron los tipos de vegetación a una tasa estimada de -1% por año. En contraste, los bosques presentaron tasas menores de cambio de -0.5 %/año.

Intensidad jerárquica del cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación

Primer nivel: intervalo de tiempo

A nivel de intervalo de tiempo, se estimó que durante el primer periodo (2000-2004) hubo un cambio en 70 936 ha, en contraste con el segundo periodo en el que disminuyó el cambio a 2 194 ha. El cambio anual en porcentaje durante el primer periodo fue más rápido en comparación con el cambio anual observado durante el segundo periodo (2004 al 2008), (Figura 3). Estos resultados muestran una desaceleración en el proceso general de transformación del uso del suelo, lo cual podría estar relacionado con la publicación en el 2000 del plan de manejo de la RBSM, que pudo haber fortalecido la gestión de su zonificación, el cual dio un ordenamiento territorial a la Sierra de Manantlán en zonas de aprovechamiento y en zonas de conservación estricta, como las zonas núcleo. Las cuales pueden contener mejor los presos de deforestación.

Segundo nivel: ganancias y pérdidas entre categorías

Durante el primer periodo (2000-2004) se estimó una pérdida de 2 206 ha de selva baja caducifolia y de 491 ha de selva mediana subcaducifolia. El bosque mixto de encino y pino perdió 377 ha, así como el bosque mixto de encino y mesófilo de montaña con 118 ha. Los usos de suelo tuvieron ganancias importantes. La agricultura de temporal ganó 2 117 ha, seguido del pastizal inducido con 1 881 ha y finalmente la agricultura de riego con 1 103 ha (Figura 4). Se estimó en el primer periodo (2000-2004) que la selva baja caducifolia tuvo un cambio neto que indica pérdida de cobertura (Cuadro 4), de la misma manera la selva

mediana subcaducifolia y en menor medida el bosque mixto de encino y pino, con porcentajes de intercambio menores al 0.05%, por lo que el proceso neto es de pérdida para dichas coberturas forestales

En el segundo periodo (2004-2008) se estimó una pérdida de 797 ha de selva baja subcaducifolia, así como una pérdida de 377 ha de bosque mixto de encino y pino y 118 ha de bosque mixto de encino y mesófilo de montaña. Las coberturas que ganaron en superficie fueron los usos de suelo, principalmente la agricultura de temporal con 2 117 ha, seguido del pastizal inducido con 1 881 ha y finalmente la agricultura de riego con 715 ha (Cuadro 5). En relación con la velocidad del cambio, las tasas estimadas para los usos de suelo como son agricultura de riego, pastizal inducido, zonas urbanas y mina de hierro fueron superiores al uno por ciento por año, que indican un aumento en su superficie en ambos periodos. Por el contrario para las coberturas forestales las tasas calculadas indican una pérdida de superficies. En particular para las selvas tropicales, fueron los tipos de vegetación a una tasa estimada de -1% por año. En contraste, los bosques presentaron tasas menores de cambio de -0.5 %/año.

A nivel de categorías el análisis de intensidad muestra que durante el primer periodo (2000-2004) las categorías activas son la selva mediana subcaducifolia y la selva mediana subcaducifolia, mientras que los bosques aparecen como latentes.

Para el segundo periodo (2004-2008) la intensidad del cambio a nivel de las categorías forestales indicó latencia para los bosques mixtos y una condición activa para la selva baja caducifolia. La selva mediana subcaducifolia no presentó cambios detectables a nivel de intensidad de categoría en el segundo intervalo de tiempo

Un proceso de cambio intensivo observado en los dos periodos de tiempo a nivel de categoría es el de la selva baja caducifolia. Las áreas de cambio se ubican en la zona de amortiguamiento e influencia, en donde el plan de manejo no restringe su aprovechamiento. Si se compara el cambio entre selvas y bosques existe un proceso de cambio y deforestación contrastante.

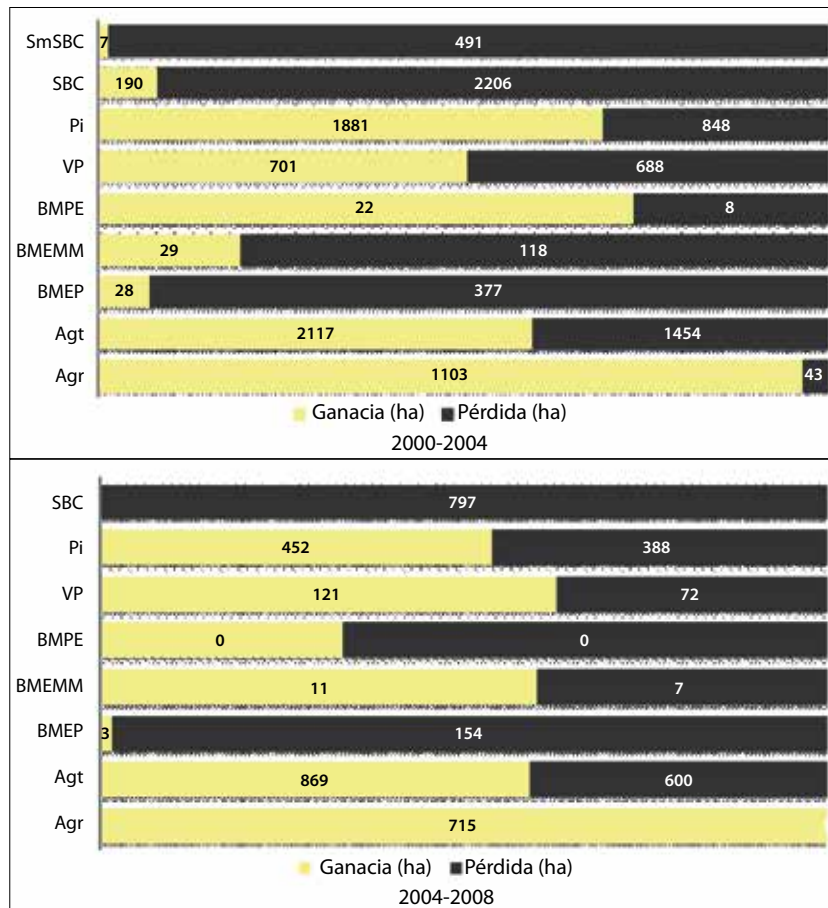


Figura 4. Superficies estimadas para cada uno de los periodos considerados (2000-2004 y 2004-2008).

Cuadro 4. Estimaciones de los cambios en términos de proporción de superficie en porcentaje para las 13 categorías en el primer periodo de tiempo (2000-2004).

| Categorías | Pérdida | Ganancia | Cambio total | Cambio neto | Intercambio |
|---|---------|----------|--------------|-------------|-------------|
| | (%) | | | | |
| Agricultura de riego | 0.04 | 0.96 | 1.00 | 0.93 | 0.07 |
| Agricultura de temporal | 1.27 | 1.85 | 3.12 | 0.58 | 2.54 |
| Bosque mixto de encino y pino | 0.33 | 0.02 | 0.35 | -0.30 | 0.05 |
| Bosque mixto de encino y bosque mesófilo de montaña | 0.10 | 0.02 | 0.13 | -0.08 | 0.05 |
| Bosque de mixto pino y encino | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 |
| Vegetación perturbada | 0.60 | 0.61 | 1.21 | 0.01 | 1.20 |
| Pastizal inducido | 0.74 | 1.64 | 2.38 | 0.90 | 1.48 |
| Selva baja caducifolia | 1.93 | 0.17 | 2.09 | -1.76 | 0.03 |
| Selva mediana sub. | 0.43 | 0.01 | 0.44 | -0.42 | 0.01 |
| Mina (área sin vegetación) | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| Sin vegetación aparente | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Zona urbana | 0.0 | 0.13 | 0.14 | 0.12 | 0.02 |

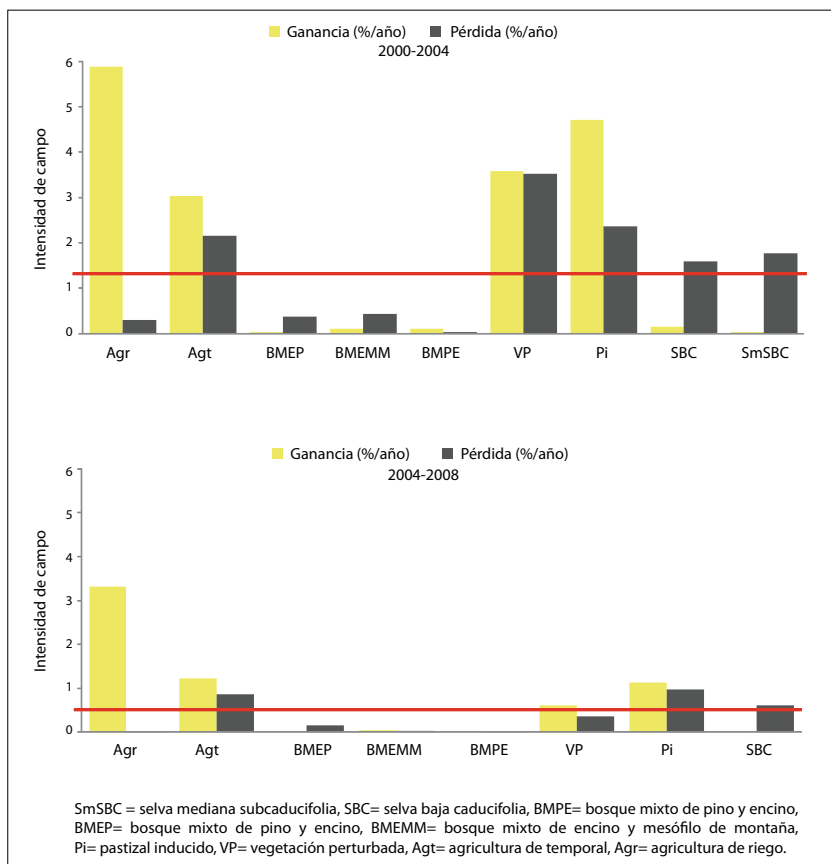


Figura 5. Intensidad del cambio en términos de ganancia y pérdida de las categorías durante los periodos de 2000-2004 y 2004-2008. Las unidades son porcentaje anual (%/año) de ganancia de la categoría en el último año; las pérdidas son el porcentaje anual en términos de la fecha inicial del intervalo. Si la categoría se extiende por arriba de la línea de intensidad uniforme, es activa en el periodo, si está por debajo, entonces es latente.

Cuadro 5. Estimaciones de los cambios en términos de proporción de superficie en porcentaje para las 13 categorías en el segundo periodo de tiempo (2004-2008).

| Categorías | Pérdida | Ganancia | Cambio total | Cambio neto | Intercambio |
|--|---------|----------|--------------|-------------|-------------|
| | % | | | | |
| Agricultura de riego | 0.02 | 1.42 | 1.43 | 1.40 | 0.04 |
| Agricultura de temporal | 1.16 | 1.50 | 2.66 | 0.34 | 2.32 |
| Bosque de encino | 0.21 | 0.00 | 0.22 | -0.21 | 0.00 |
| Bosque mixto de encino y mesófilo de montaña | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.03 |
| Bosque de pino | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Matorral | 0.19 | 0.10 | 0.28 | 0.09 | 0.20 |
| Pastizal inducido | 0.41 | 0.76 | 1.18 | 0.35 | 0.83 |
| Selva baja caducifolia | 1.61 | 0.00 | 1.62 | -1.61 | 0.00 |
| Selva mediana sub. | 0.23 | 0.00 | 0.23 | -0.22 | 0.01 |
| Mina (área sin vegetación) | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Sin vegetación aparente | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Zona urbana | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.00 |

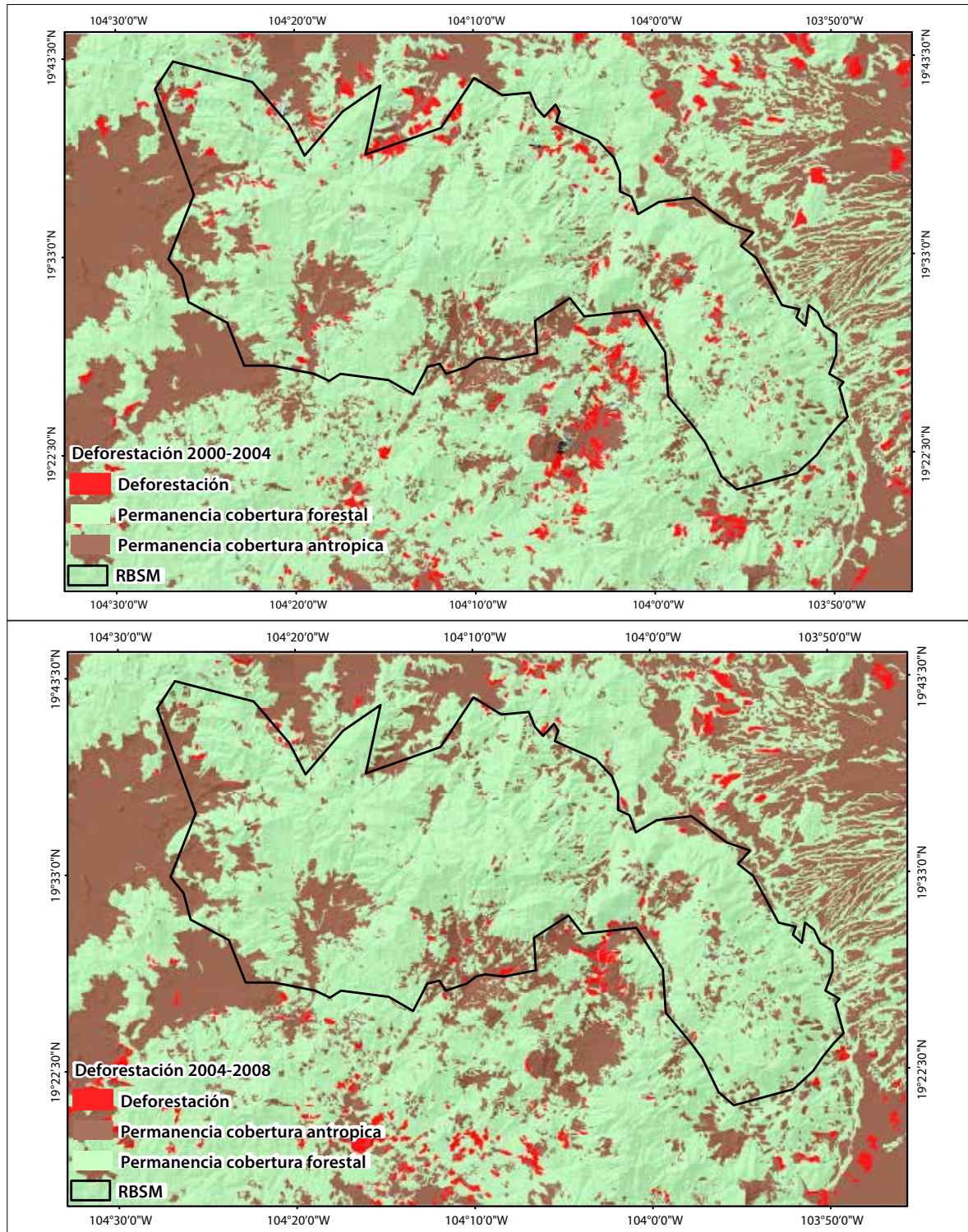


Figura 6. Localización de las áreas deforestadas para los dos periodos de tiempo analizados. El patrón que se observa está próximo a la zona de influencia y de amortiguamiento de la RBSM.

Tercer nivel: transiciones y categorías blanco

Del análisis de intensidad de transición y de las matrices se determinó que la transformación de las selvas bajas caducifolias fue principalmente hacia un proceso de expansión de la frontera agrícola y los pastizales; mientras que los bosques mixtos de encino y pino, y de encino y mesófilo de montaña fueron transformados en menor intensidad hacia el pastizal inducido y agricultura de temporal (Figura 7). Los bosques de la RBSM son coberturas latentes que no entran en el intercambio de manera intensiva hacia la dinámica total de

cambio y podría significar que están en un estado de menor perturbación (Figura 8). Sin embargo, podría existir un proceso de degradación, ya que en el caso de introducción del ganado, éste pastorea de manera libre principalmente en la época de lluvias afectando directamente el sotobosque.

DISCUSIÓN

En este trabajo se implementó un método novedoso enfocado en el análisis de la dinámica de cambio

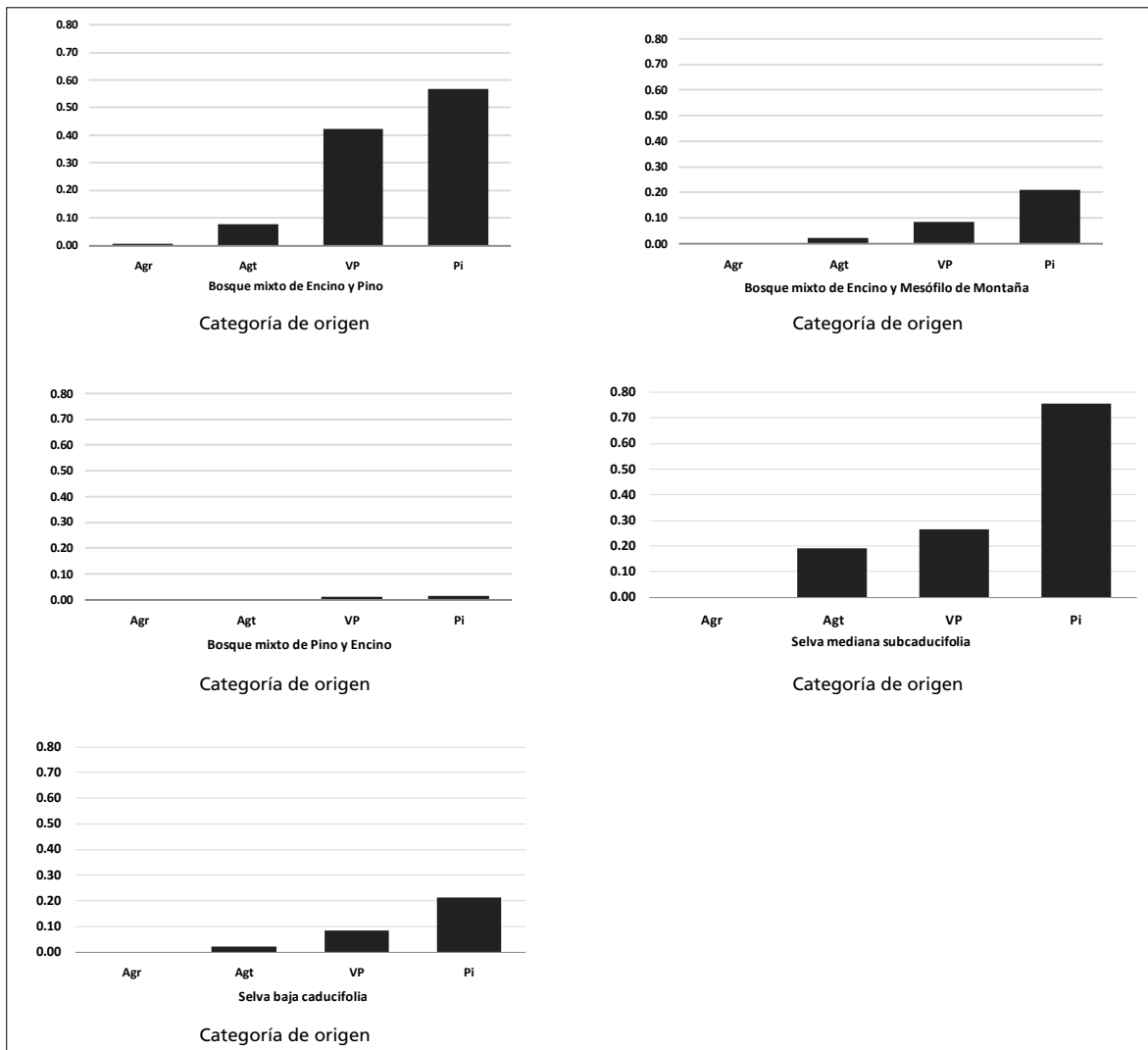


Figura 7. Análisis de intensidad a nivel de transición para el primer periodo de tiempo. Las barras indican cuáles fueron las categorías de destino (2000-2004).

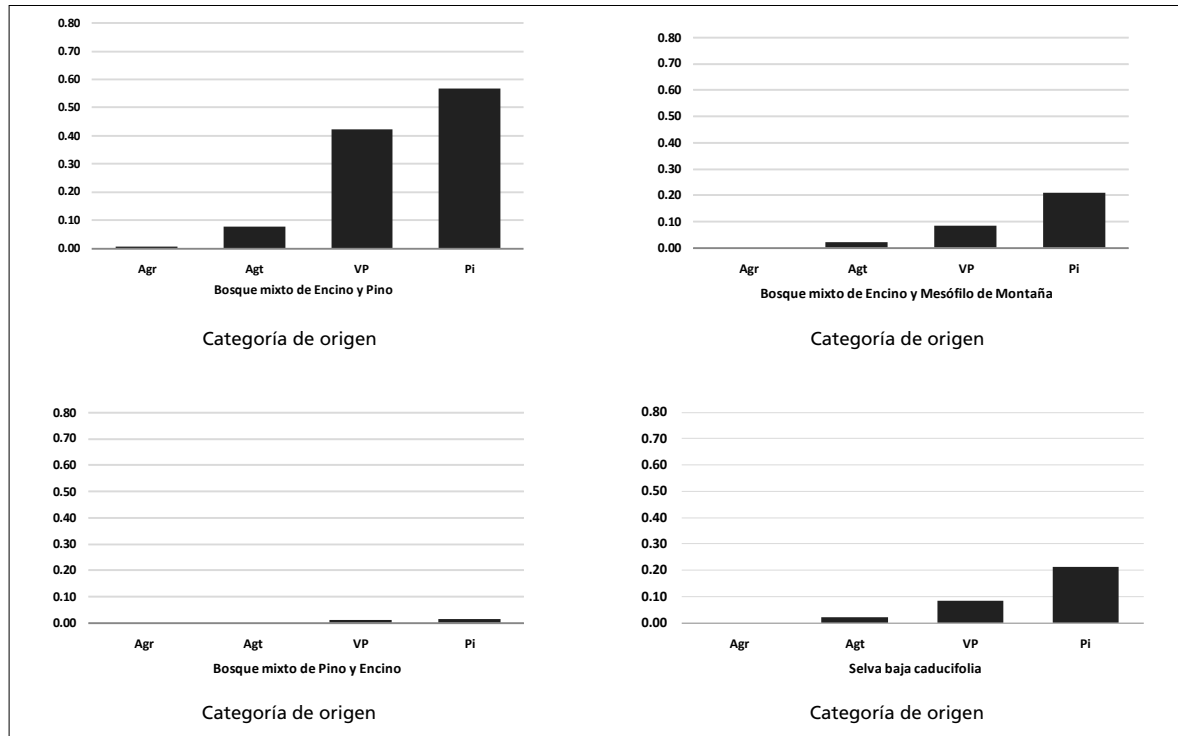


Figura 8. Análisis de intensidad a nivel de transición para el segundo periodo de tiempo. Las barras indican la categoría de origen para la transición de interés (2004-2008).

con la finalidad de mostrar la intensidad de cambio bajo un enfoque jerárquico anidado. Hasta ahora, es la primera vez que este método se desarrolla en un caso de estudio para México, el cual resulta relevante para etapas posteriores de análisis como, *a)* determinar los conductores potenciales causantes del cambio (Turner y Meyer, 1994, Aldwaik y Pontius, 2012), *b)* evaluar el impacto de la dinámica de cambio en el ambiente (Meyer y Turner, 1996), así como también *c)* pronosticar configuraciones en el uso de suelo futuro bajo diversos escenarios (Pontius *et al.*, 2008, Farfán, 2015).

El enfoque clásico de análisis de la dinámica de cambio basado solo en el análisis de la matriz de cambio, no permite determinar si los patrones de cambio observados pueden deberse a procesos sistemáticos e intensos, o bien a procesos que pueden ser aparentemente aleatorios en el tiempo. En este sentido, el análisis de cambio utilizado, al considerar en cada nivel de análisis una comparación en

función del cambio uniforme, permite tener una referencia. A nivel de periodo, el análisis permite saber si los cambios son estacionarios en el tiempo, es decir, si las tasas de cambio son similares de un periodo al otro o, al contrario, presentan fluctuaciones, como el caso de la RBSM aquí presentado. En el caso de cambios estacionarios, el análisis indica los periodos con tasas mayores o menores a las tasas esperadas bajo un escenario uniforme (estacionario). En los niveles de categorías y de transiciones, el análisis se basa en un enfoque parecido a una prueba estadística de chi cuadrado en la cual se compara la distribución de observaciones con una distribución esperada bajo el supuesto de una distribución aleatoria. En el caso de los CCUS bajo el supuesto uniforme, se espera que la cantidad de cambio por categoría o por transición dependa del área de las categorías. Se pueden por tanto identificar categorías o transiciones que ocurren con más intensidad que lo esperado bajo el supuesto uniforme.

Durante el primer periodo de tiempo (2000-2004) hubo una intensiva y rápida pérdida de las selvas tropicales hacia los usos agropecuarios en combinación con un estado latente de los bosques templados con una baja intensidad de transición hacia usos de suelo agropecuarios. Esto puede deberse a la actividad ganadera arraigada en la región como un factor promotor del proceso de deforestación que se expresa de manera diferencial entre selvas y bosques. Si bien en ambos casos hay un impacto, en el caso de las selvas implica la remoción total de la cobertura. Estudios previos de monitoreo para la RBSM mostraron también esta dinámica, durante el periodo de 1971 al 2000, con una tasa de deforestación de 2.7%/año para la selva mediana subcaducifolia durante el periodo de 1971 al 2000 y menor para los bosques templados (Farfán, 2009). A escala nacional, se ha observado para México la misma tendencia en donde la tasa de deforestación estimada para las selvas es superior a la de los bosques. De acuerdo con Mas *et al.* (2004), entre 1976 y el 2000, fueron deforestadas 60 000 km² de selvas a una tasa de 0.76%/año en contraste con la cifra para los bosques de 20 000 km² a una tasa de 0.25% por año. Las razones que explican esta tendencia se asocian a los sistemas de aprovechamiento, y se argumenta que las selvas son un tipo de vegetación más fácil de “limpiar” para diversas actividades agropecuarias debido al tamaño de los árboles sumado a que pueden ser fácilmente quemadas en la época seca.

Por otra parte, la ubicación de los desmontes localizados en la zona de influencia, probablemente pueden estar impulsados por el crecimiento de los asentamientos urbanos e infraestructura asociada, así como por las actividades de la mina a cielo abierto de Peña Colorada para la extracción de hierro. Es importante poner en perspectiva que aun con los problemas de deforestación ya descritos, se ha reportado que la RBSM es efectiva en la contención de los procesos CCUS en comparación con otras reservas de la biosfera del país (Figueroa y Sánchez, 2008).

CONCLUSIÓN

El análisis de intensidad de cambio es un marco cuantitativo novedoso que permite monitorear la dinámica de cambio bajo otros parámetros además de la proporción de la categoría ganada o perdida al final del periodo, tales como categoría activa o latente, identificación de las categorías blanco, y la aproximación jerárquica a la dinámica de cambio. Los resultados ilustran cómo el análisis de intensidad proporciona información diferente de la información obtenida a partir de una comparación directa de las áreas de las categorías de entrada de la matriz de transición.

Es claro un proceso de deforestación y uso de suelo intensivo para las selvas tropicales principalmente en la zona de influencia de la RBSM. Por sí mismo el ordenamiento territorial de zonificación, no es suficiente para contener la presión extractiva de los recursos de su zona de influencia y garantizar la conservación de los recursos *in situ* al interior de la misma. Finalmente, la cartografía derivada del análisis de intensidad de cambio es una contribución para la toma de decisiones en torno a la gestión de la RBSM.

REFERENCIAS

- Aldwaik, S. y R. Pontius (2012), “Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition”, *Landscape and Urban Planning*, Issue 106, pp. 103-114.
- Bocco, G., M. Mendoza y O. Maser (2001), “La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 18-38.
- Ceballos, G., L. Martínez, A. García, E. Espinoza y J. Bezaury (2010), “Áreas prioritarias para la conservación de las selvas secas del Pacífico mexicano”, en Ceballos, G., L. Martínez, A. García, E. Espinoza, J. Bezaury y R. Dirzo (coords.), *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas secas del oeste de México*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, UNAM, México, pp. 387-392.

- Eastman, J. R., J. E. McKendry y M. A. Fulk (1995), *Change and time series analysis*, United Nations Institute for Training and Research, Ginebra.
- FAO (2001), *Global Forest Resources Assessment 2000. Main Report. FAO forestry paper 140*, Food and Agriculture Organization of the UN, Roma.
- Farfán, M. (2009), De la percepción remota a la social, deforestación y conservación (1973-2000) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, tesis de Maestría, Posgrado en Geografía, UNAM, México.
- Farfán, M. (2015), Escenarios de deforestación (2004-2018) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán y su impacto en la distribución de dos felinos, tesis de Doctorado, Posgrado en Geografía, UNAM, México.
- Ferrusquía Villafraña, I. (1993), "Geología de México: una sinopsis", en Ramamoorthy, T. P., R. Bye, A. Lot y J. Fa (eds.), *Diversidad biológica de México: Orígenes y distribución*, Instituto de Biología, UNAM, México, pp. 3-108.
- Figuerola, F. y V. Sánchez Cordero (2008), "Effectiveness of natural protected areas to prevent land cover change in Mexico", *Biodivers Conserv*, núm. 17, pp. 3223-3240.
- INE (2000), *Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán*, Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Instituto Manantlán de Ecología y Conservación de la Biodiversidad, Universidad de Guadalajara, México.
- INEGI (1971), *Carta de uso del suelo y vegetación (1:50 000)*, México.
- Jardel, E. J., E. Santana y S. H. Graf (2006), "Investigación científica y manejo de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán", en Oyama, K. y A. Castillo (coords.), *Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México*, Siglo XXI-UNAM, México, pp. 127-153.
- Laurance, W. F., D. C. Useche, J. Rendeiro, M. Kalka *et al.* (2012), "Averting biodiversity collapse in tropical forest protected areas", *Nature*, vol. 489, pp. 290-294.
- Manandhar, R., I. O. A. Odeh y R. G. Pontius Jr. (2010), "Analysis of twenty years of categorical land transitions in the lower Hunter of New South Wales, Australia", *Agric. Ecosyst. Environ.*, núm. 135, pp. 336-346.
- Mas, J. F., A. Velázquez, J. R. Días Gallegos, R. Mayurga Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco, R. Castro, T. Fernández y A. Pérez Vega (2004), "Assessing land use/cover changes: a nationwide multivariate spatial database for Mexico", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 5, pp. 249-261.
- Meyer, W. B. y B. L. II Turner (1996), "Land use/land cover change: challenges for geographers", *Geo Journals*, vol. 39, núm. 3, pp. 237-240.
- Morán Zenteno, D. J. (2003), "El debate sobre el origen del Eje Neovolcánico Mexicano", Agencia de Noticias No. 57, Academia Mexicana de Ciencias, México.
- Pérez Vega, A., J.-F. Mas, A. Velázquez Montes and L. Vázquez Selem (2008), "Modeling vegetation diversity types in México based upon topographic features", *Interciencia*, vol. 33, pp. 88-95.
- Pontius, R. G., D. Huffaker and K. Denman (2008), "Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models", *Ecol Model*, ns. 179, pp. 445-461.
- Pontius, R. G. Jr., Y. Gao, N. M. Giner, T. Kohayama, M. Osaki and K. Hirose (2013), "Design and Interpretation of Intensity Analysis Illustrated by Land Change in Central Kalimantan", *Indonesia, Land 2(3)*, pp. 351-369.
- Ramírez, M. J. y R. Zubieta (2005), Análisis Regional y Comparación metodológica del Cambio en la Cubierta Forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Reporte Técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca, México.
- Turner, B. L. II and W. B. Meyer (1991), "Global Land-Use and Land-Cover Change: An Overview 3-10", *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*, University Press, Cambridge.