

## **Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México**

*Jean-François Mas<sup>1</sup> y Alejandro Flamenco Sandoval<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica,  
Universidad de Guanajuato, México

Manuscrito recibido: Noviembre 4, 2010  
Artículo aceptado: Enero 18, 2011

### **Abstract**

*A land use and land cover change simulation model (CCUS) was built for a southeastern Mexican region experiencing high deforestation rates. The model was based on two different scenarios: the first one, trend-oriented, was based on the hypothesis that high deforestation rates would remain following the same distribution patterns; the other alternative assumed a decline in the rate of change and a relocalization of forest clearings in secondary areas. Evaluation of prospective maps indicates that the alternate model worked out better suggesting that integration of expertise is a necessary condition for the construction of prospective models, especially in highly dynamic areas.*

**Key words:** *deforestation, geographic information systems, prospective models*

### **Introducción**

Los cambios de cobertura/uso del suelo (CCUS), y en particular la deforestación, contribuyen de forma importante a la pérdida de biodiversidad, la emisión de gases a efecto invernadero y la erosión de los suelos. Mientras que en los países desarrollados se

reporta una ganancia neta de superficie forestal, en la mayoría de los países en vía de desarrollo se registran pérdidas de bosques, a veces a un ritmo alarmante. Según la FAO (2009), en América Latina, países como Brasil, Ecuador, El Salvador, Honduras Paraguay y Venezuela presentaron tasas de deforestación entre 0.6 y 3%/año durante el periodo 2000-2005.

En México, la tasa de deforestación ha disminuido durante los últimos años y es inferior a 0.5% (FAO 2009, Mas et al. 2004). Sin embargo, esta tasa es más alta en ciertas regiones, en particular en los bosques tropicales, y la comprensión de las condiciones socio-ambientales que conducen a exacerbar, o al contrario disminuir, los procesos de CCUS son aun poco conocidas.

El análisis y la modelación de los CCUS en un sistema de información geográfica (SIG) son las principales herramientas para identificar las áreas más susceptibles de cambiar, ayudarnos en la comprensión de los procesos que llevan a los cambios y realizar proyecciones basadas en diferentes escenarios (Veldkamp and Lambin 2001; Xiang and Clarke 2003).

El objetivo de este estudio es llevar a cabo la modelación de los cambios CCUS en una región del trópico mexicano que ha presentado altas tasas de deforestación durante las últimas décadas y evaluar el modelo para identificar sus potenciales y limitaciones.

### **Área de estudio**

El área de estudio comprende un poco más de 682 mil hectáreas y se ubica en el cuadrante delimitado entre las coordenadas: 16°30' y 17°23' Norte, y 94°18' y 93°06' Oeste. En el centro del cuadrante se encuentra la reserva de la Biosfera Selva El Ocote que comprende poco más de 100 mil hectáreas, y al norte de la misma el embalse de la presa Nezahualcoyotl. Los límites del área se ajustaron de acuerdo con los límites municipales de Berriozabal, Copainalá, Francisco León, Ocoatepec, San Fernando, Tecpatán. También se incluyeron las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) de las regiones norte de los municipios de Cintalapa, Jiquipilas y Ocozocoautla (Figura 1). Se extiende en dos diferentes regiones fisiográficas y presenta más de 20 categorías de cobertura/uso del suelo (CUS) de acuerdo con el Inventario Nacional Forestal Periódico (Palacio et al., 2000) y un intervalo altitudinal que comprende de los 200 a los 1,500 m.

La región donde se encuentra la reserva de la biósfera Selva el Ocote se caracteriza por su gran heterogeneidad ambiental, debida a su accidentada topografía, gradiente de humedad y sustrato geológico cárstico. Los paisajes son complejos y diversos, con relieves, climas y tipos de vegetación distintos. El contexto socioeconómico es también muy heterogéneo.

La zona ha experimentado gran presión por el uso del suelo en los últimos cuarenta años, como ha ocurrido en otras regiones tropicales. Se observan distintas tendencias en el uso del suelo relacionadas con la agricultura y la ganadería que además de responder a las condiciones ambientales, obedecen a la influencia de las actividades económicas de las áreas circundantes, a las presiones del mercado y a subsidios oficiales (Castillo et al. 1998). En 1994 surgió el levantamiento armado del Ejército Zapatista de Liberación Nacional. Entre otras alteraciones a las condiciones que existían en el estado, fue imposible seguir sosteniendo una veda forestal que llevaba varios años restringiendo el manejo de los

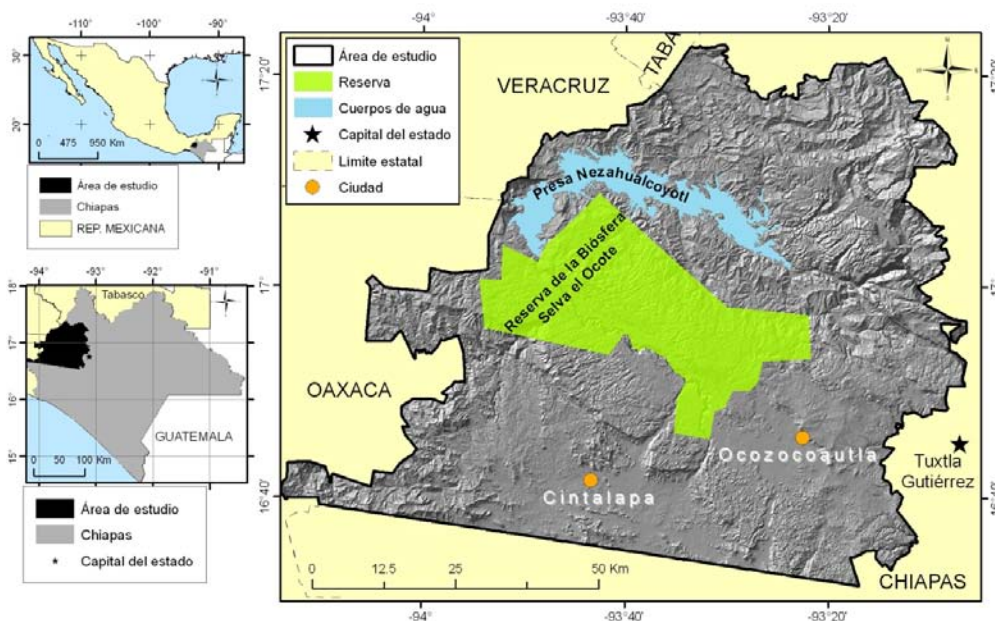


Figura 1. Localización del área de estudio

bosques a unas cuantas empresas. A partir de ese momento las invasiones de terrenos forestales y su posterior conversión a áreas agropecuarias empezaron a extenderse en diferentes regiones del estado. Aunado a ello, la primera fase de la construcción de la autopista Ocozocoautla-Las Choapas (a principios de 1995) favoreció el avance de la frontera agropecuaria en la región.

## Material

Para el monitoreo de los cambios, se utilizaron imágenes Landsat de la época de seca (marzo 1986, febrero 1995 y 2009, marzo 2000 y 2008) debido a que es la estación del año durante la cual se puede obtener imágenes libres de nubes. Se elaboró un mosaico conformado por las imágenes de 2008 y 2009 para subsanar el problema de bandeo sin datos del sensor Landsat ETM+. Se utilizaron también mapas describiendo rasgos frecuentemente relacionados con los CCUS como la elevación, la pendiente, la accesibilidad y la tenencia de la tierra, entre otros (tabla 1).

Para la modelación, se utilizó el programa DINAMICA EGO, un programa de modelación medio-ambiental desarrollado en la Universidad Federal de Minas Gerais en Brasil (Soareas-Filho et al., 2002 y 2009). Este programa ha sido aplicado en numerosos estudios, incluyendo modelados de procesos de deforestación tropical (Soares-Filho et al. 2002 y 2006; Cuevas y Mas 2008) y de crecimiento urbano (Almeida et al. 2003; Godoy and Soares-Filho 2008). Una revisión de algunos programas para la modelación de CCUS frecuentemente citado en la literatura reporta que DINAMICA es flexible, presenta la mayoría de los operadores de un SIG y permite el desarrollo de modelos sofisticados (Mas et al., 2011). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el paquete R (R Development Core Team 2009).

Tabla 1. Insumos Cartográficos

| <b>Insumo Cartográfico</b>       | <b>Descripción</b>   | <b>Fuente</b>  | <b>Escala o resolución</b>   |
|----------------------------------|--|--|--|
| Mapas de cobertura/uso del suelo | Mapas de cobertura /uso del suelo para 1986, 1995, 2000 y 2008. 9 categorías | Elaboración propia (Obtenido con base en la interpretación visual de imágenes Landsat)     | Escala de trabajo, 1:80,000<br>Rasterizado a 100 m                           |
| Modelo digital de elevación      | Recorte del continuo mexicano de elevaciones                                 | INEGI  | Basado en mapas topográficos 1:50,000, pixeles de 30 m, remuestreado a 100 m |
| Pendiente                        | Pendiente en grados, obtenido a partir del MDE                               | Elaboración propia con base en INEGI   | Idem anterior  |
| Distancia a Carreteras           | Distancia euclidiana a carreteras  | Mapa topográfico INEGI   | 1:50,000, pixeles de 100 m   |
| Distancia a Poblaciones          | Distancia euclidiana a poblaciones   | Poblados ubicados a partir de datos del Censo General de Población y Vivienda 1990 (INEGI) | Pixeles de 100 m   |
| Distancia a rasgos hidrográficos | Distancia a corrientes, corrientes navegables y Cuerpo de agua (presa)       | Mapa topográfico INEGI   | 1:50,000, pixeles de 100 m   |
| Área protegida                   | Polígono del área protegida Selva El Ocote                                   | CONANP   | 1:250,000, Rasterizado a 100 m   |
| Distancia a ciertos CUS          | Distancia euclidiana a cada tipo de CUS del año anterior                     | Elaboración propia   | Pixeles de 100 m   |
| Tenencia de la tierra            | Categorías de propiedad de los terrenos.                                     | Registro agrario nacional  | Basado en un archivo de datos vectoriales, rasterizado con pixeles de 100 m. |

## Métodos

Se interpretaron visualmente composiciones a color de las imágenes Landsat siguiendo el método de clasificación interdependiente (FAO 1996). Este método consiste en actualizar la interpretación de una fecha anterior con la imagen de la fecha siguiente, lo cual permite obtener una serie temporal de mapas más congruente que si fuera obtenida con base en interpretaciones independientes.

El proceso de modelación se basa en el análisis de los cambios pasados que permite evaluar las tasas de cambio entre los diferentes tipos de coberturas / uso del suelo (CUS) y la relación especial entre la localización de estos cambios y variables “explicativas” que influyen la distribución espacial de los cambios. Con base en este análisis, se pueden identificar las áreas más propensas a los cambios (mapas de probabilidad de cambio) y elaborar mapas prospectivos de CUS. Un modelo basado en un escenario tendencial utiliza los mismos patrones de cambio que los observados en el periodo anterior. Se puede también elaborar escenarios en los cuales estos patrones se alteran debido a un cambio del entorno socio-ambiental (nuevas políticas agropecuarias o de conservación, cambios socio-

económicos...) de la región modelada. Finalmente, se puede evaluar el mapa simulado comparándolo con un mapa “observado”, por ejemplo derivado del análisis de una imagen de satélite, que sirve de referencia. La Fig. 2 presenta los principales pasos de la modelación, los cuales se describen con más detalle a continuación.

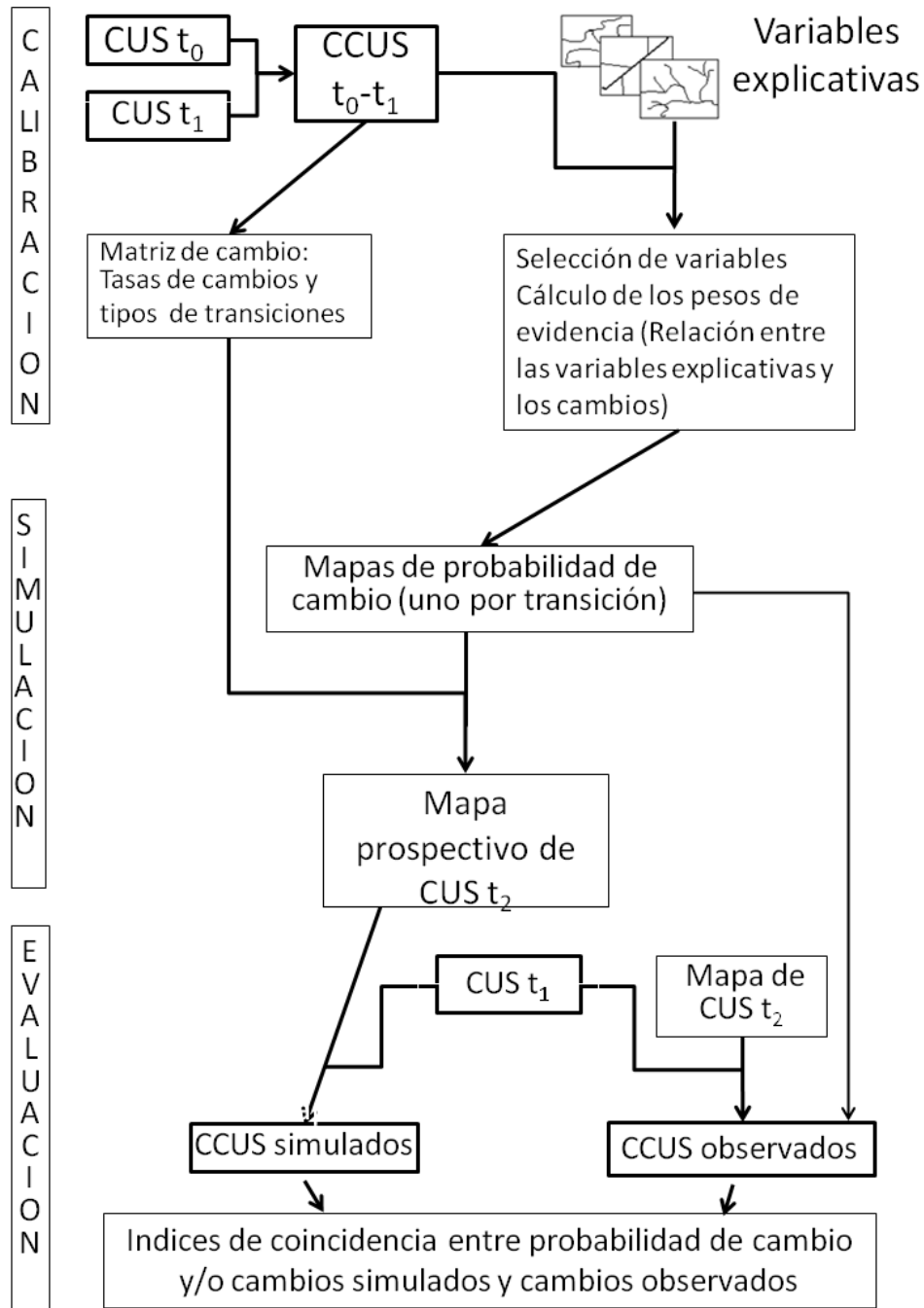


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de modelación

## Calibración del modelo

Esta etapa consiste en analizar los CCUS en un periodo anterior para evaluar los patrones de cambio y brindar información al modelo para determinar la cantidad de cambio, los tipos de transiciones y la localización más probable de los mismos. Para ello, se sobrepusieron los mapas de 1986 y 2000 para generar un mapa de CCUS y una matriz de cambio que indica la superficie de cada tipo de transición durante el periodo de observación (14 años en este caso). Esta matriz de cambio puede transformarse en una matriz de probabilidad de cambio (matriz de Markov) que indica la probabilidad de ocurrencia de cada transición durante un año (ecuación 1) y permite realizar proyecciones sobre una base anual (Soares-Filho et al. 2002).

$$P^t = H V^t H^{-1} \quad (1)$$

Donde  $P$  es la matriz de transición original,  $H$  es la matriz de vectores propios,  $V$  una matriz construida con base en los valores propios, y  $t$  es el número de años del periodo correspondiente a la matriz original (Takada et al. 2010).

Para identificar las áreas más propensas a los cambios, se compara cartográficamente, para cada transición, la localización de los cambios respecto a diferentes variables explicativas cartografiadas. Esta comparación permite establecer una relación entre el potencial de cambio y las variables a través de diferentes enfoques como análisis multicriterio, regresiones, pesos de evidencia o redes neuronales, entre otros. DINAMICA brinda herramientas para elaborar mapas de probabilidad de cambio con el método de los pesos de evidencia y eventualmente modificarlos utilizando algoritmos genéticos (Soares Filho et al. 2009).

El método de los pesos de evidencia se basa en las probabilidades condicionales. Se llama probabilidad condicional a la probabilidad de que un suceso se cumpla habiéndose cumplido ya otro. Por ejemplo en el mapa de CCUS de la figura a continuación, la probabilidad de deforestación  $P(D)$  es de 10% (proporción de área deforestada, 10 cuadritos entre un total de 100). Sin embargo, la probabilidad de deforestación condicional para las áreas próximas a la carretera  $P(D|C)$  es de 29% (7/24) y la probabilidad de deforestación condicional para el área protegida  $P(D|Ap)$  es de 5% (1/20).

El peso positivo de evidencia  $w^+$  asociado a la presencia de la condición considerada se calcula según la ecuación (2).

$$w^+ = \ln \left[ \frac{P(C|D)}{P(C|\bar{D})} \right] \quad (2)$$

donde  $P(C|D)$  es la probabilidad de estar cerca de una carretera sabiendo que hubo un desmonte (en términos prácticos es la proporción de los pixeles de deforestación que se encuentran cerca a carreteras) y,

$P(C|\bar{D})$  es la probabilidad de estar cerca de una carretera sabiendo que no hubo deforestación (proporción de los pixeles sin deforestación que se encuentran cerca a carreteras).

Cuando la presencia de la condición tiende a aumentar la probabilidad del evento, el valor del peso  $W^+$  es positivo. Cuando la presencia de la condición tiende a disminuir la probabilidad del evento, este valor es negativo. En el ejemplo de la figura 3 los valores del peso para las categorías cerca de la carretera, lejos de la carretera, dentro del AP y fuera del AP son respectivamente 1.31, -0.99, -0.75 y 0.13.

El cálculo de la probabilidad condicional tomando en cuenta varias condiciones es sencillo, ya que se suman los pesos de evidencia (ecuación 5). Para esto, el supuesto de independencia condicional entre los patrones o mapas de variables es requerido, por lo cual se calculó el coeficiente de Cramer entre las variables explicativas. Este coeficiente varía entre cero y uno, cero indicando variables totalmente independientes y uno totalmente correlacionadas. En caso de encontrar variable demasiadas correlacionadas (Cramer > 0.25), se conservó solo unas de ellas en el cálculo de los mapas de probabilidad.

$$P(D|C \cap A_p \cap \dots \cap C_i) = \frac{e^{\sum w_i^+}}{1 + e^{\sum w_i^+}} \quad (5)$$

Donde  $P(D|C \cap A_p \cap \dots \cap C_i)$  es la probabilidad del evento D (deforestación) en un sitio cumpliendo con las condiciones de cercanía a carreteras (C), dentro de un área protegida (Ap) y demás condiciones (Ci).

El cálculo de los pesos de evidencia se realizó para cada transición tomando en cuenta variables explicativas binarias (dentro/fuera de un área protegida) o con múltiples categorías (tipos de tenencia de la tierra, rangos de pendiente). Para ello, las variables continuas (distancias, pendiente) se transformaron en variables categóricas aplicando rangos. Para una discusión más detallada sobre el cálculo de los pesos de evidencia ver Soares Filho et al. (2010).

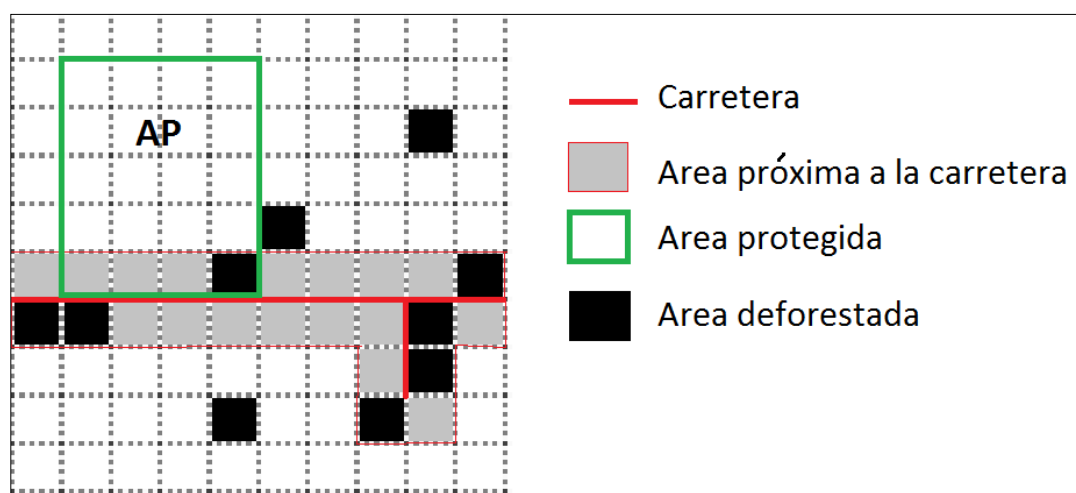


Figura 3. Distribución de los desmontes (evento deforestación). Se puede observar que la densidad de los desmontes es más alta cerca de la carretera y que en cambio solo hay uno en el área protegida (AP). Por lo tanto la probabilidad del evento deforestación varía dependiendo si nos encontramos cerca o lejos de la carretera y dentro o fuera del AP.

## Simulación

Con base en los pesos de evidencia y los mapas de las variables explicativas, se elaboró un mapa de probabilidad para cada transición. Este cálculo se realizó para cada paso de tiempo de la simulación ya que ciertas variables explicativas (variables “dinámicas”) se actualizan a cada paso de tiempo de la modelación como por ejemplo la distancia a ciertos tipos de CUS.

Con base en estos mapas de probabilidad, se elaboraron mapas prospectivos de CUS. Estos mapas se podrían obtener sencillamente seleccionando los píxeles con los valores más altos de probabilidad para el cambio correspondiente. Sin embargo, este enfoque no garantiza que los cambios simulados se produzcan de forma realista es decir reproduciendo, por ejemplo, parches que corresponden a desmontes. Con el fin de obtener resultados más verosímiles, DINAMICA utiliza dos autómatas celulares que permiten reproducir patrones espaciales de cambios: 1) PATCHER que realiza cambios en parches (como por ejemplo desmontes aislados en un bosque) y 2) EXPANDER que realiza cambios por extensión de áreas pre-existentes (como por ejemplo el avance de una frontera agrícola). Es posible controlar el tamaño promedio, la varianza y la isometría de los parches así como su distribución respecto al mapa de probabilidad (cambios confinados a las áreas más probables o distribuidos también en áreas menos probables, lo cual es a menudo más realista) (Mas et al. 2010).

## Evaluación

La evaluación del modelo consiste en comparar la coincidencia espacial entre las probabilidades de cambio y/o los CCUS simulados con los cambios observados. La comparación entre las probabilidades de cambio y los cambios observados puede llevarse a cabo a través del un análisis ROC (acrónimo de *Receiver Operating Characteristics*, o Característica Operativa del Receptor) (Schneider y Pontius, 2001) o del cálculo del índice de diferencia de potencial de cambio (DPC) (Eastman et al. 2005; Pérez-Vega et al. 2011). Utilizamos este último ya que proporciona un índice de desempeño más eficiente que ROC para modelos basados en la umbralización de las probabilidades de cambio. El índice consiste en calcular la diferencia entre la probabilidad promedio de las áreas de cambio y de permanencia (Eastman et al., 2005). Un índice de cero indica que no hay diferencia entre la probabilidad de cambio de las áreas que cambiaron y las que permanecieron (modelo “nulo”). Un valor de uno correspondería al caso hipotético en el cual todos los píxeles de cambio tuvieron una probabilidad de cambio igual a uno y todos los de permanencia a cero. Un valor negativo indica que fueron los píxeles con menos probabilidad de cambio los que cambiaron más.

Para evaluar los mapas prospectivos de CUS, se modela un mapa prospectivo para una fecha para la cual se dispone de un mapa de CUS (mapa observado o de referencia). Esta comparación se basa en los cambios únicamente ya que generalmente un mapa observado y su par simulado tienen mucha coincidencia debido a las áreas que no cambiaron (Paegelow y Camacho Olmedo 2005). Se utilizó un método difuso que permite manejar una cierta tolerancia en los casos en los cuales no existe una coincidencia perfecta entre las áreas de cambio simuladas y las observadas. Este método consiste en definir un área de influencia alrededor de un tipo de parches (por ejemplo los cambios simulados) y tomar



como coincidencia los parches de cambio observado que entran en esta área (figura 4). Debido a que no es equiparable aplicar el área de influencia a los parches simulados o a los observados, se procede de ambas maneras y se toma en cuenta el valor mínimo de los dos valores de coincidencia obtenidos. Se realizó esta operación con base en diferentes distancias de tolerancia.

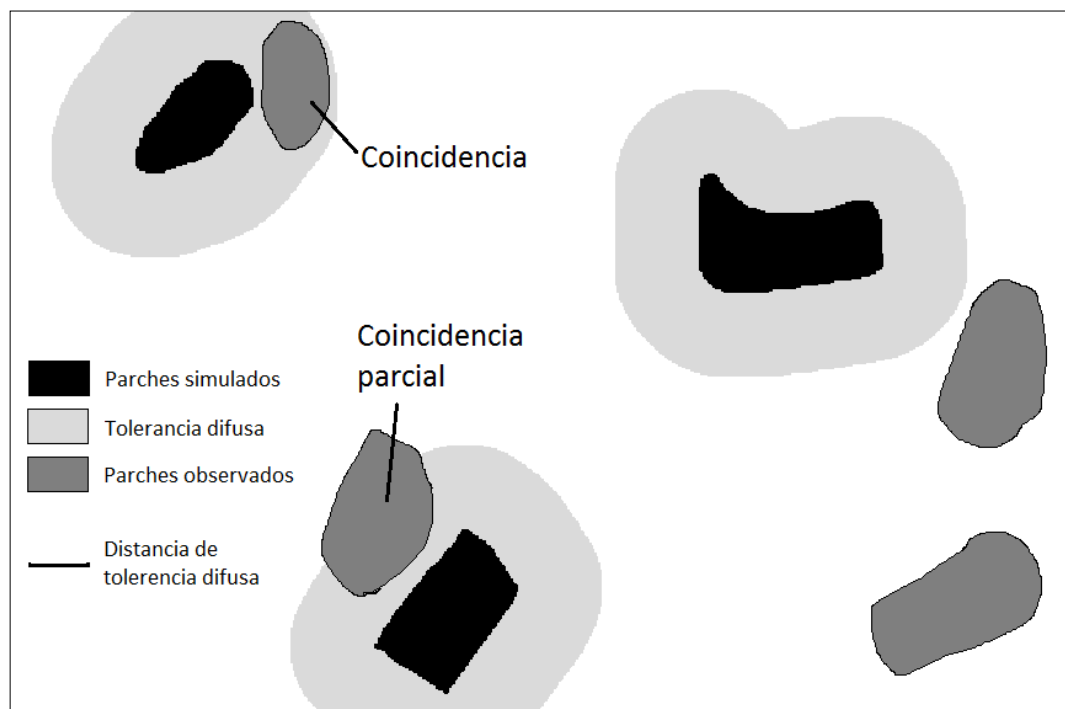


Figura 4. Evaluación difusa. Sin tolerancia difusa no hay ninguna coincidencia espacial entre los parches simulados y observados. Con la tolerancia indicada en la figura, se consideran que un parche simulado coincide totalmente y otro parcialmente. Note que más la distancia de tolerancia es grande, más coincidencia se obtendrá y que la falta de coincidencia se debe también a errores en la estimación de la cantidad de cambio (sobre o sub-evaluación de la superficie de cambio).

## Escenarios

Se llevaron a cabo modelaciones con base en diferentes escenarios: 1) un escenario tendencial en el cual se supone que las tasas (matriz de Markov) y la distribución de los cambios no cambian entre el periodo de calibración (1986-2000) y el periodo simulado (2000-2008), 2) un escenario en el cual se modifican los patrones de cambio con base en información disponible en el año 2000.

## Resultados

Las imágenes Landsat se interpretaron con base en un sistema clasificatorio resultando de un compromiso entre detalle y fiabilidad: se trató de distinguir las diferentes coberturas que pueden presentar patrones de cambios distintos siempre teniendo en cuenta las limitaciones de la información espectral de las imágenes. Por ejemplo, no fue posible distinguir pastizales y áreas de cultivos por lo cual estas dos categorías de uso del suelo se reagruparon (tabla 2). Debido a que las imágenes presentaban nubes y sombras, se aplicó

una máscara a todas las imágenes que corresponden a áreas para las cuales falta información para una o varias fechas, de tal modo que todos los análisis se refieren a la misma área con información para todas las fechas.

Tabla 2. Categorías de los mapas de cobertura/uso del suelo

| Uso / cobertura   | Abreviación |
|---|-------------|
| 1 Selva húmeda  | SH          |
| 2 Selva seca  | SS          |
| 3 Bosque templado (incluye bosque mesófilo)               | BT          |
| 4 Selva húmeda secundaria                                 | SH2a        |
| 5 Selva seca secundaria                                   | SS2a        |
| 6 Bosque templado secundario                              | BT2o        |
| 7 Bosques secundarios con agricultura nómada (itinerante) | B2osAN      |
| 8 Sabana/Matorral   | S/M         |
| 9 Agricultura y pastizales                                | Agr/Pz      |

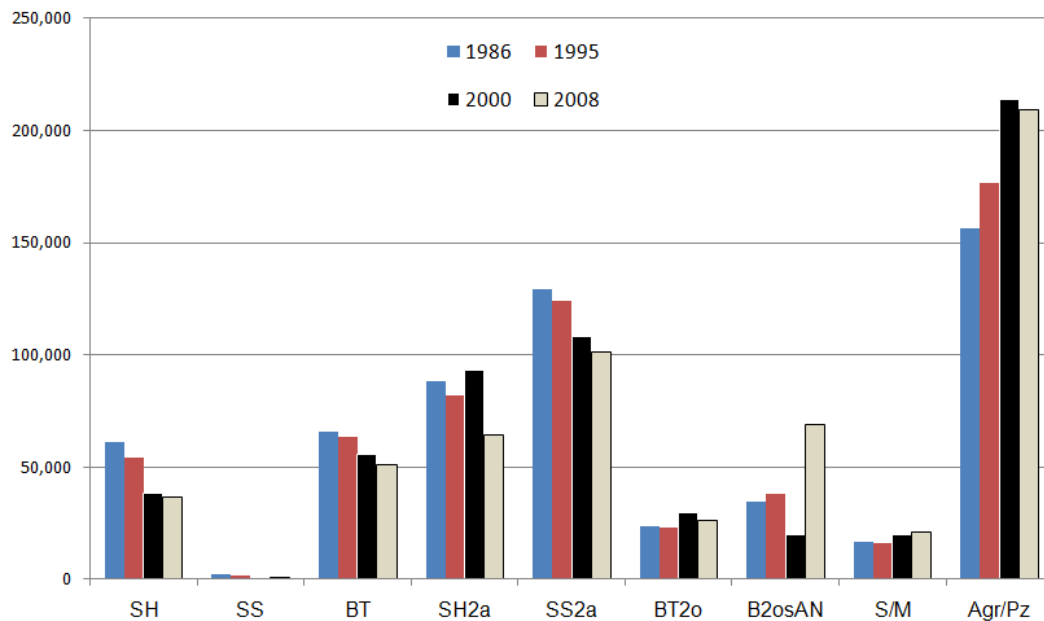


Figura 5. Superficie (ha) de las diferentes categorías de CUS en 1986, 1995, 2000 y 2008. No se utilizó la información de 2008 para desarrollar el modelo.

### Escenario tendencial

Como se puede observar en la figura 5, una gran cantidad de cambios ocurrieron entre 1995 y 2000 no obstante la corta duración del periodo (5 años). Con base en la matriz de cambio de 1986-2000, se identificaron 9 transiciones con una probabilidad superior a 1% (tabla 3), las cuales fueron las transiciones modeladas. Se escogió el periodo 1986-2000 (y no 1995-2000) por ser un periodo más largo por lo tanto más idóneo para darnos información sobre los procesos de cambio a largo plazo con más robustez estadística por tener más superficie de cambio que un periodo más corto. La figura 6 representa la distribución espacial de las 9 transiciones durante el periodo 1986-2000.

Tabla 3. Principales transiciones identificadas durante 1986-2000

| Transición | Descripción transición | Tipo de transición | Probabilidad de cambio anual (1986-2000) |
|------------|------------------------|--------------------|--|
| 1 to 4     | SH a SH2a              | Degradación        | 0.026                                    |
| 2 to 5     | SS a SS2a              |                    | 0.010                                    |
| 2 to 9     | SS a Agr/Pz            | Deforestación      | 0.104                                    |
| 4 to 9     | SH2a a Agr/Pz          |                    | 0.037                                    |
| 5 to 9     | SS2a a Agr/Pz          |                    | 0.019                                    |
| 6 to 9     | BT2o a Agr/Pz          |                    | 0.013                                    |
| 7 to 9     | B2osAN a Agr/Pz        |                    | 0.021                                    |
| 7 to 4     | B2osAN a SH2a          | Recuperación       | 0.046                                    |
| 9 to 4     | Agr/Pz a SH2a          |                    | 0.010                                    |

Se calcularon los pesos de evidencia para cada una de las nueve transiciones tomando en cuenta 16 variables explicativas: 1) Elevación, 2) pendiente, 3) distancia a cuerpos de agua y corriente, 4) distancia a corrientes, 5) distancia a cuerpos de agua navegable (porción del río Grijalva y presa Nezahualcoyotl), 6) distancia a carreteras, 6) distancia a poblaciones, 7) área protegida, 8) tenencia de la tierra y distancia a un tipo de cobertura/uso del suelo del mapa de 1986: 9) Selva húmeda, 10) Selva seca, 11) Bosque templado, 12) Selva húmeda secundaria, 13) Selva seca secundaria, 14) Bosque templado secundario, 15) Bosques secundarios con agricultura nómada, y 16) Agricultura y pastizales.

Para seleccionar las variables explicativas más pertinentes para cada transición se visualizaron las gráficas de los pesos de evidencia y la significancia estadística de su valor. Se seleccionaron las variables que presentaban valores de pesos bien diferenciados según las categorías de la variable explicativa y un comportamiento que parezca una tendencia entendible (no atribuible solamente a ruido) (Figura 7). Si algunas de las variables seleccionadas presentaban una correlación alta (Cramer > 0.25), se eliminaba algunas de ellas de modo que se pudiera obtener el conjunto de variables independientes entre ellas y con más influencia sobre la probabilidad de ocurrencia de la transición. La tabla 4 presenta las variables seleccionadas para cada transición.



Figura 6. Distribución de las 9 transiciones durante el periodo 1986-2000

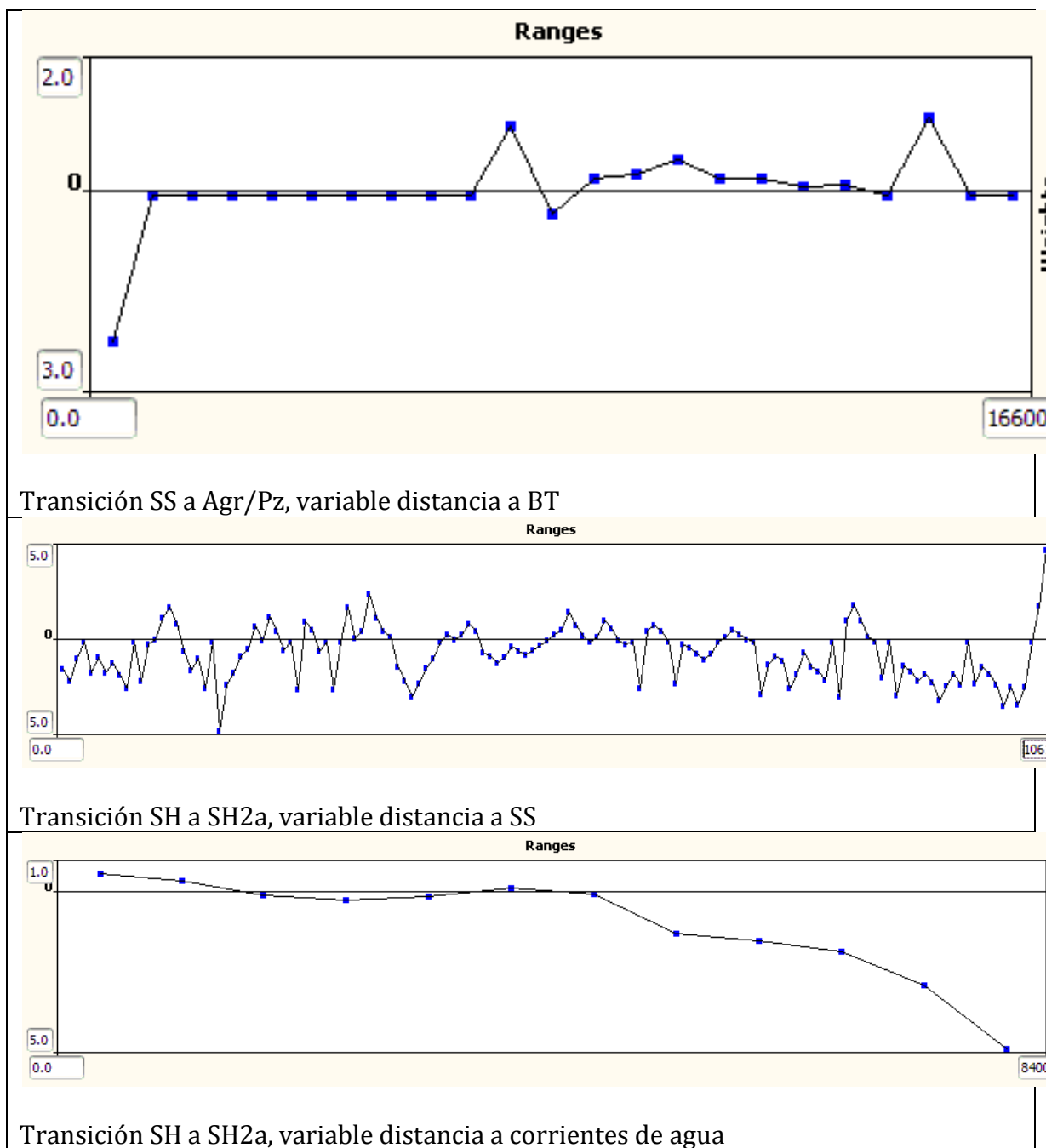


Figura 7. Selección de las variables con base en las gráficas de los pesos de evidencia. La primera gráfica corresponde a una variable con poco poder explicativo ya que la mayoría de los pesos están alrededor de cero y los demás no tienen significancia estadística. La segunda gráfica es también difícil de interpretar y los valores de los pesos de deben probablemente a la correlación de la variable explicativa con otras variables o/y a ruido. La tercera corresponde a una variable que tiene una influencia directa y efectiva sobre la transición. Se descartaron las dos primeras variables.

Tabla 4. Variables seleccionadas para cada transición en el modelo tendencial. (x) indica las variables que se descartaron en el modelo alternativo.

| Transición                              | SH a<br>SH2a | SS a<br>SS2a | SS a<br>Agr/Pz | SH2a<br>a<br>Agr/Pz | SS2a a<br>Agr/Pz | BT2o a<br>Agr/Pz | B2osAN<br>a SH2a | B2osAN<br>a<br>Agr/Pz | Agr/Pz<br>a<br>SH2a |
|---|--------------|--------------|----------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| Elevacion                               |              | x            |                | X                   | x                |                  | x                | x                     | x                   |
| Distancia a<br>corrientes<br>navegables |              |              |                | (x)                 |                  |                  |                  |                       | x                   |
| Distancia a<br>Corrientes               | x            | x            |                | X                   |                  |                  |                  |                       |                     |
| Distancia a<br>Carreteras               | x            | x            | x              | X                   | x                |                  |                  |                       |                     |
| Distancia a<br>Poblaciones              | x            | x            | x              |                     |                  | x                |                  |                       | x                   |
| Distancia a<br>Agua                     |              |              | x              |                     | x                | (x)              | x                | x                     | x                   |
| Distancia<br>a SH                       |              |              |                |                     |                  | x                | x                | x                     | x                   |
| Distancia<br>a SS                       |              |              |                |                     |                  | x                |                  |                       |                     |
| Distancia<br>a SH2a                     | x            |              |                |                     | x                |                  |                  | x                     | x                   |
| Distancia<br>a SS2a                     |              | x            |                |                     |                  |                  |                  |                       |                     |
| Distancia<br>a B2osAN                   |              |              |                |                     |                  | x                |                  |                       | x                   |
| Distancia<br>a Agr/Pz                   |              |              | x              | X                   | x                | x                | (x)              | x                     |                     |
| AP                                      |              |              |                | X                   |                  |                  |                  |                       |                     |
| Pendiente                               | x            | x            | x              | X                   | x                | x                | x                | x                     | x                   |
| Tenencia                                | x            |              | x              |                     |                  | x                | x                | x                     | x                   |

Se editaron los valores de los pesos con base en conocimiento experto. Esta operación, muy sencilla de realizar en la interface gráfica de DINAMICA consistió en modificar el valor de los pesos cuando no era significativo pero también cuando el experto consideraba que, aunque el valor fuera estadísticamente significativo, la forma de la curva representaba

más los cambios que ocurrieron durante el periodo de calibración que una tendencia más general y más idónea para realizar proyecciones a futuro. En general, estos cambios consistieron en lisar las curvas (Figura 8).

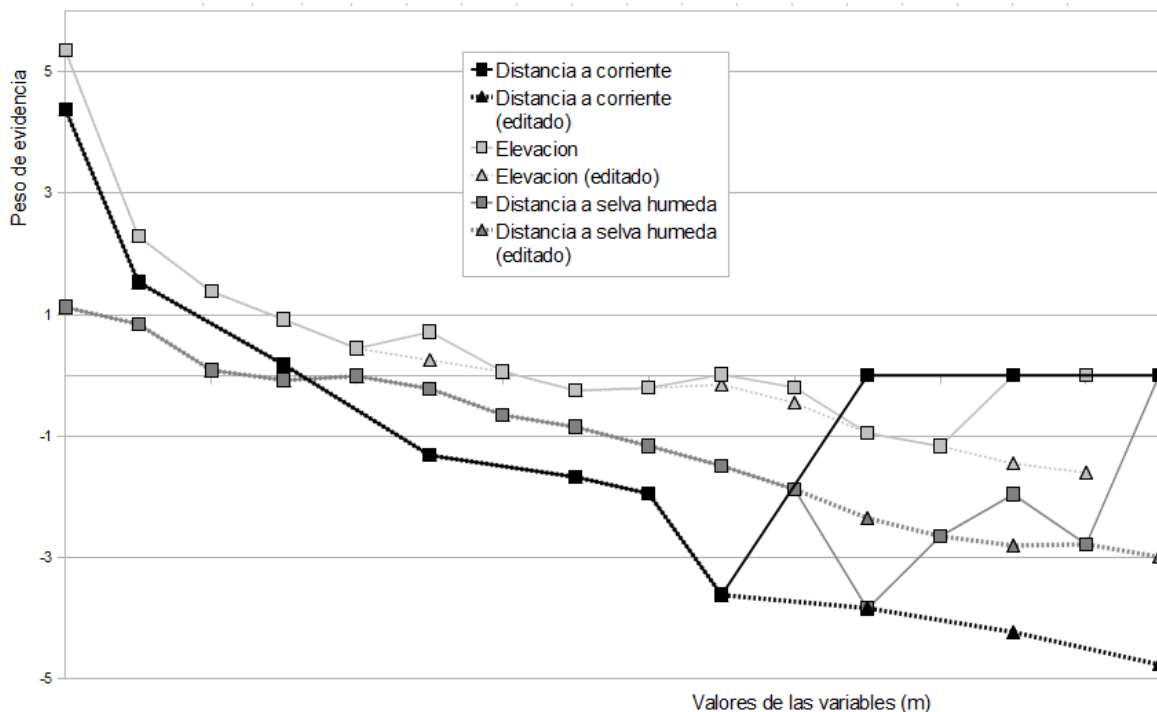


Figura 8. Edición de los pesos de evidencia. En el caso de la distancia a corriente, la edición consistió en prolongar la tendencia general de la curva modificando los tres últimos valores sin significancia estadística. En los demás casos, se modificaron valores que se alejaban de la tendencia general de la curva.

Para estimar los parámetros de los autómatas celulares, se visualizaron las áreas de cambio de cada transición para definir la proporción de cambio por expansión y por creación de nuevos parches así como el tamaño promedio y la varianza.

### Escenario alternativo

El escenario alterno se basa en el supuesto que las tasas de cambio observadas durante el periodo 1986-2000 están sesgadas por el periodo 1995-2000 durante el cual hubo una “explosión” de las tasas de deforestación. Se consideró que después de este periodo, las tasas de deforestación y degradación bajarían mientras que las tasas de recuperación aumentarían. Adicionalmente se supuso que los desmontes agrícolas se concentrarían más en los bosques secundarios y no en los primarios como ocurría en los periodos anteriores. Para plasmar este escenario en el modelo alterno se hicieron las siguientes modificaciones al modelo tendencial: 1) Se modificaron las probabilidades de cambio aumentando las probabilidades las transiciones de recuperación, disminuyendo las de deforestación en

áreas forestales primarias y aumentando en bosques secundarios, 2) se introdujeron dos nuevas transiciones de recuperación (Agri/Pz a SS2a y a B2osAN) (ver columna “probabilidad escenario alternativo” de la tabla 5), 3) Para estas transiciones de recuperación se editaron los pesos de evidencia para tener un probabilidad más alta lejos de las poblaciones, en pendientes fuertes, dentro del AP y cerca de áreas forestales conservadas. Se estableció también la suposición de una relativa eficiencia del AP asignando un peso de 0 y -1 para las categorías fuera y dentro del AP respectivamente para las transiciones de deforestación y degradación. Adicionalmente, se editaron los pesos de algunas variables.

### Evaluación de los modelos

En la Figura 9 se puede observar que ambos escenarios tienden a sobreestimar la superficie agropecuaria y de selva húmeda secundaria y, al contrario, a subestimar los bosques secundarios con agricultura nómada. El modelo alternativo presenta mejores estimaciones que el tendencial ya que refleja, aunque de manera insuficiente, las modificaciones en los patrones de cambio entre el periodo 1986-2000 y 2000-2008 a través de la modificación de las probabilidades de cambio de la matriz de Markov.

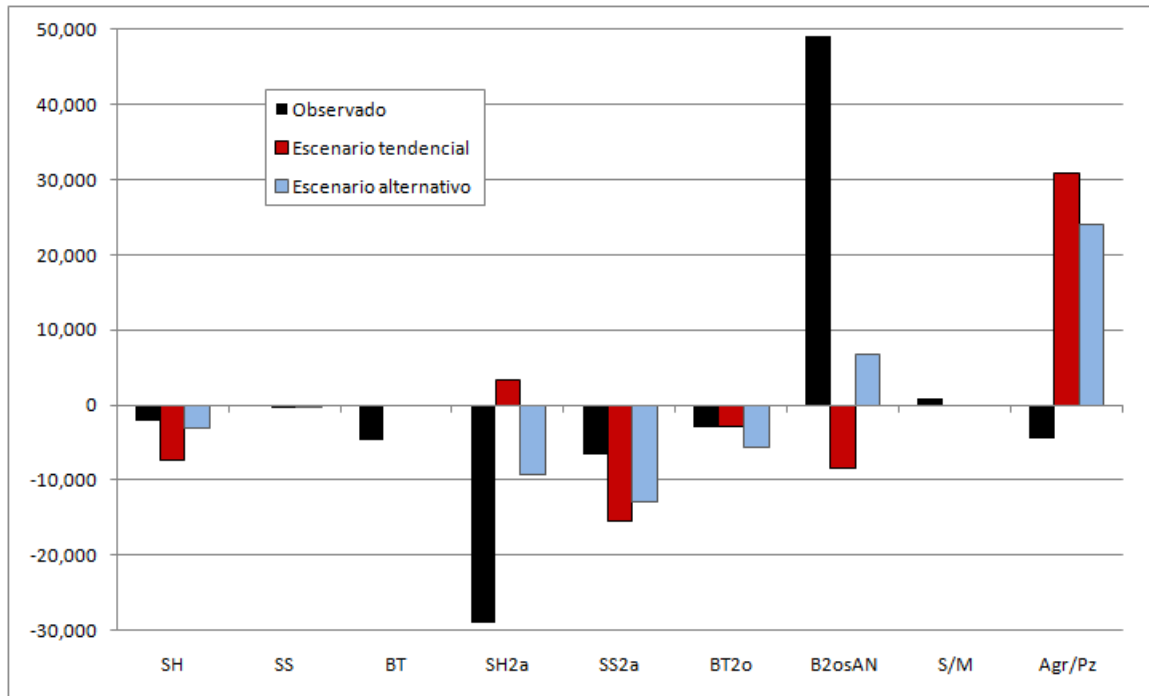


Figura 9 - Superficie de cambio (ha) de cada categoría de CUS durante el periodo 2000-2008 observada y estimada por los 2 escenarios.



En cuanto a la capacidad de los modelos a identificar la distribución espacial de los CCUS, se puede observar en la tabla 5 que hay pocas diferencias entre los dos modelos ya que se modificaron poco los pesos en el modelo alterno en comparación con el tendencial. En general el modelo alterno presenta un mejor desempeño. Sin embargo en ambos modelos, se puede observar que algunas transiciones están bien caracterizadas y otras no, inclusive algunas tienen un índice negativo, lo que significa que las áreas con una alta probabilidad de cambio sufrieron menos cambios que las de baja probabilidad. Eso se debe a que las características de la localización de los cambios cambiaron entre el periodo de calibración y de modelación.

Tabla 5. Valores del índice de diferencia de potencial de cambio (DPC) para cada transición modelada

| <b>Descripción Transición</b> | <b>Probabilidad escenario alternativo</b> | <b>DPC Escenario tendencial</b> | <b>DPC Escenario alterno</b> | <b>Num. pixeles de cambio</b> |
|-------------------------------|---|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| SH to SH2a                    | 0.01                                      | 0.08                            | 0.08                         | 239                           |
| SS a SS2a                     | 0.005                                     | 0.39                            | 0.39                         | 52                            |
| SS a Agr/Pz                   | 0.05                                      | -0.14                           | -0.10                        | 3                             |
| SH2a a Agr/Pz                 | 0.074                                     | 0.13                            | 0.10                         | 29,708                        |
| SS2a a Agr/Pz                 | 0.038                                     | 0.08                            | 0.10                         | 19,909                        |
| BT2o a Agr/Pz                 | 0.026                                     | 0.01                            | 0.01                         | 4,416                         |
| B2osAN a SH2a                 | 0.022                                     | -0.03                           | 0.04                         | 1,985                         |
| B2osAN a Agr/Pz               | 0.04                                      | 0.13                            | 0.13                         | 3,923                         |
| Agr/Pz a SH2a                 | 0.02                                      | 0.14                            | 0.16                         | 22,765                        |
| Agr/Pz a SS2a                 | 0.01                                      | -                               | 0.27                         | 14,015                        |
| Agr/Pz a B2osAN               | 0.01                                      | -                               | 0.02                         | 25,529                        |

La Figura 10 presenta un acercamiento de los mapas de CUS en 2000 y 2008 y los mapas prospectivos de CUS para 2008 bajo el supuesto tendencial y el escenario alternativo. La evaluación difusa muestra que, dependiendo de la transición, entre 0 y 40% de los cambios simulados coinciden perfectamente con los cambios reales (observados). Sin embargo, para la mayoría de las transiciones, la coincidencia aumenta rápidamente con la distancia de tolerancia lo que muestra que el modelo identificó bien las áreas más propensas a los cambios aunque no la localización exacta de los mismos (Figura 11). En algunos casos la falta de coincidencia se debe a la mala estimación de la cantidad de cambios de parte del modelo. Es por ejemplo el caso de la transición SS a Agr/Pz que tiene una coincidencia espacial casi nula porque no se observó durante el periodo simulado.

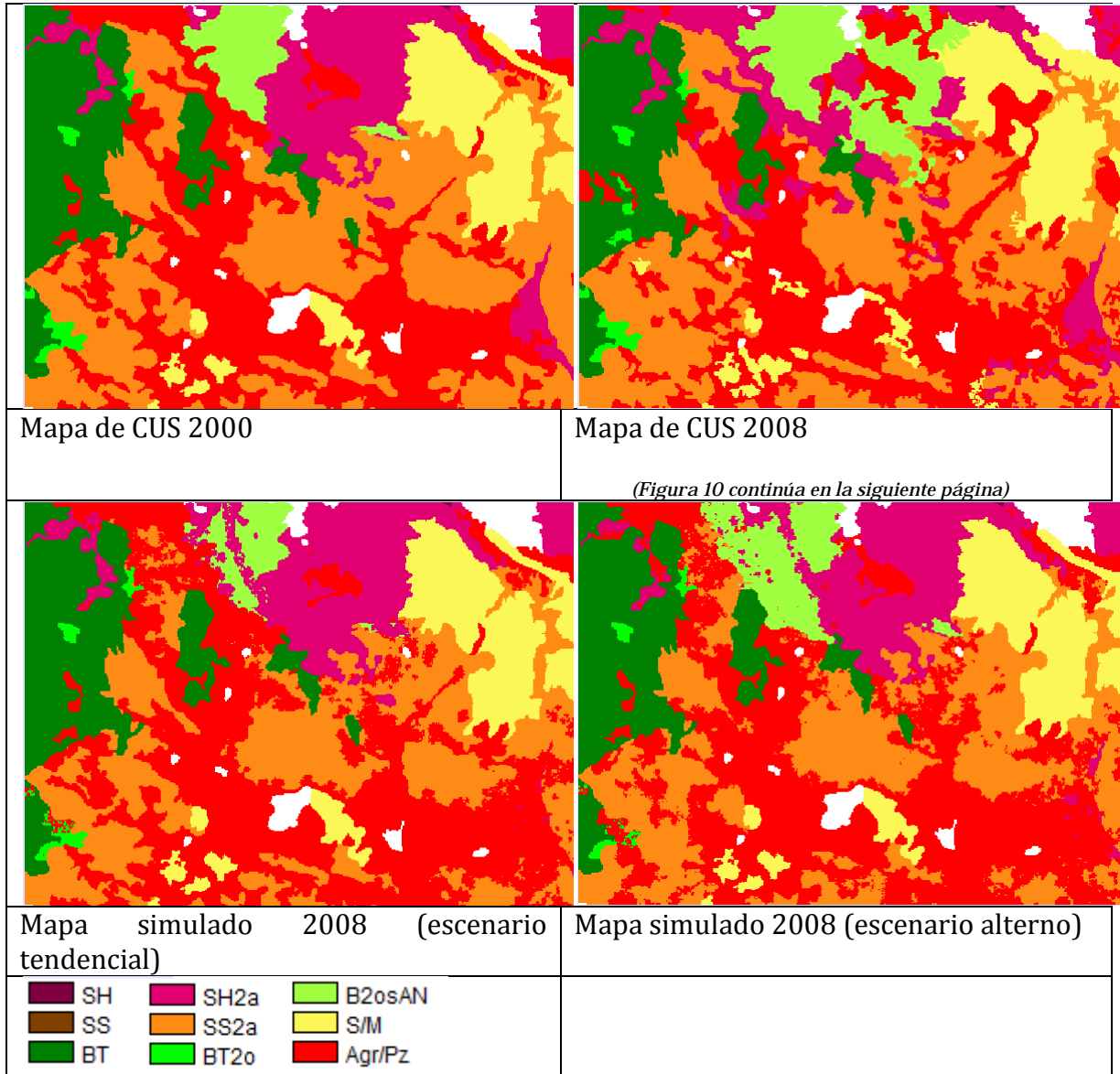


Figura 10. Mapas prospectivos (2008) y observados (2000 y 2008). La figura corresponde a un acercamiento.

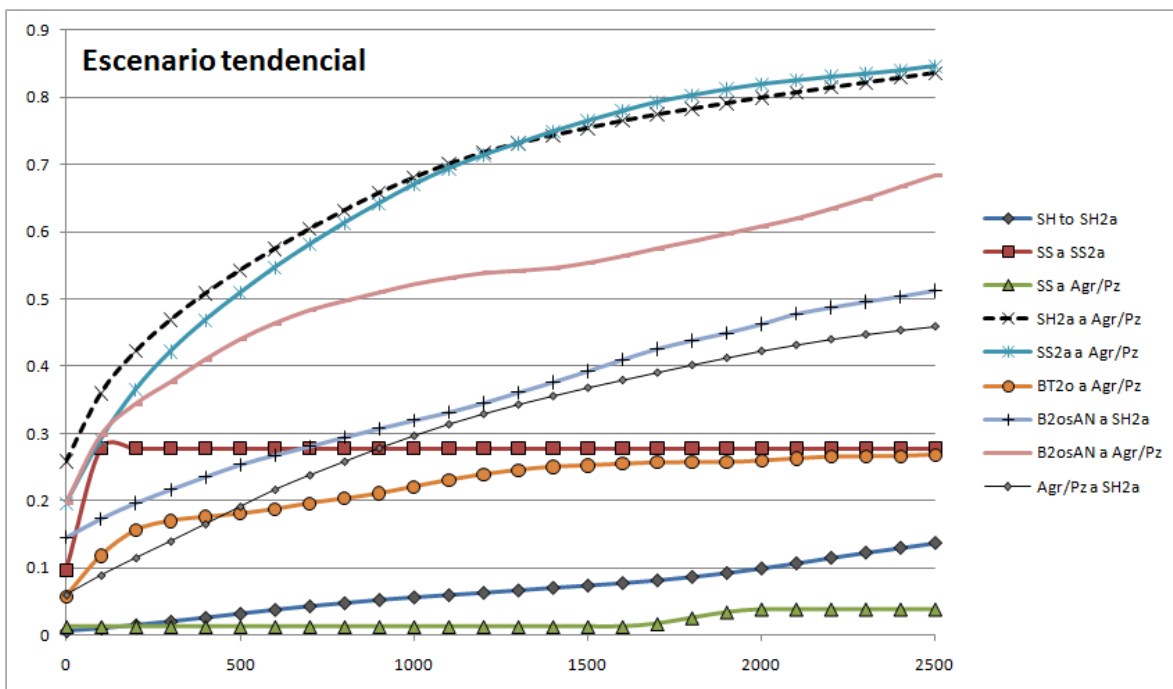


Figura 11-A

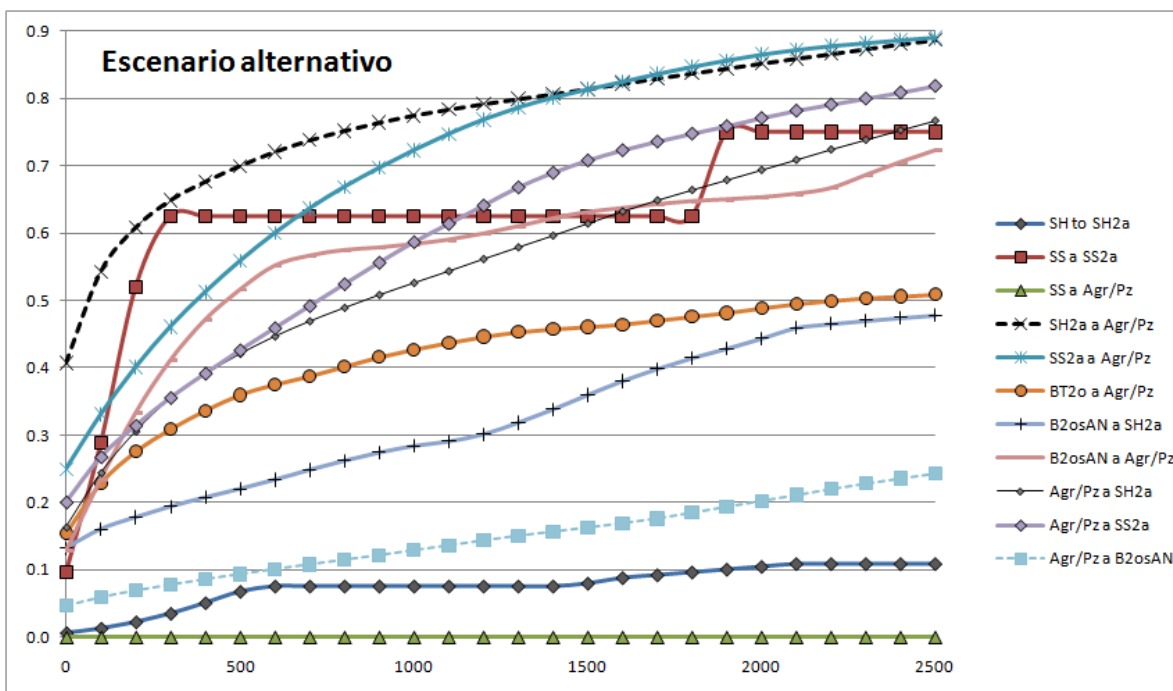


Figura 11-B

Figura 11 – Relación entre tasa de coincidencia (eje vertical) entre los mapas prospectivos (modelo tendencial arriba y escenario abajo) y el mapa observado (2008) en función de la distancia de tolerancia (eje horizontal).

## **Discusión y Conclusión**

Este estudio ilustra la dificultad de elaborar modelos prospectivos en regiones que presentan altas dinámicas de cambio. El área de estudio presentó cambios significativos de los patrones y tasas de cambio entre el periodo utilizado para calibrar el modelo y el periodo de simulación. El modelo tendencial, simulando procesos de expansión rápida de las áreas agropecuarias sobre extensiones de bosques conservados, fue el modelo más erróneo ya que sobreestimó la cantidad de cambio y no fue capaz de prever su localización. El modelo alternativo, en el cual se “apostó” a una baja de las tasas de deforestación y a una reconcentración de los desmontes en áreas secundarias estuvo más cercano a la realidad.

Estos resultados sugieren que los modelos que integran conocimiento experto (“knowledge driven”) son más adecuados que los modelos basados en calibraciones automáticas (“data driven”), los cuales, a veces, utilizan métodos que permiten reproducir los patrones del periodo de calibración con mucha precisión (redes neurales, algoritmos genéticos). Una ventaja del programa DINAMICA es que permite manejar ambos enfoques, o más bien controlar el grado de intervención experta según los intereses del usuario desde un enfoque totalmente automático (sin edición de los pesos y utilizando eventualmente la opción del algoritmo genético para modificar los pesos) hasta un enfoque totalmente basado en conocimiento experto modificando drásticamente los pesos de evidencia y la matriz de Markov. Cabe también mencionar que el programa brinda muchas herramientas para elaborar modelos mucho más sofisticados ya que nuestro ejemplo corresponde a un uso muy sencillo y básico del programa.

Finalmente, e independientemente del enfoque utilizado, es importante recalcar que los mapas arrojados por modelos prospectivos deben interpretarse como la representación plausible de las cubiertas/uso del suelo bajo ciertos supuestos y que en muchos casos la modelación no es un instrumento de predicción fiable.

## ***Agradecimientos***

Este estudio se llevó a cabo en el ámbito del proyecto *Simulaciones geomáticas para modelizar dinámicas ambientales. Avances metodológicos y temáticos* (BIA2008-00681). El primer autor agradece el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo otorgado para realizar una estancia sabática en la Universidad de California - Santa Barbara. El segundo autor agradece además al CONACyT por otorgarle una beca de estancia posdoctoral, a El Colegio de la Frontera Sur, por brindarle la posibilidad de realizar la estancia y al CIGA por permitir que dicha estancia se llevara a cabo. Los autores agradecen a B. Soares Filho y M. Kolb por sus comentarios a una versión previa de este documento.

## Referencias

- Aguejidad, R.; Houet T. 2008. Modeling of urban sprawl using the land change modeler on a French metropolitan area (Rennes): foresee the unpredictable, Symposium “Spatial landscape modelling: from dynamic approaches to functional evaluations,” Toulouse 2008, June 3rd-5<sup>th</sup> (abstract).
- Almeida, C.; Batty, M.; Monteiro, M.; Câmara, G.; Soares-Filho, B.; Cerqueira, G.; Pennachin, C. 2003. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27, pp. 481-509, 2003.
- Castillo, S.; García-Gil, M.A.; March, G.; Fernández, I.J.; Valencia, J.C.; Osorio, E.M.; Flamenco, A. 1998., *Diagnóstico geográfico y cambios de uso del suelo en la Selva El Ocote, Chiapas*. Informe Final, El Colegio de la Frontera Sur-Fondo Mundial para la Naturaleza WWF México, Biodiversity Support Program, U.S. AID. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México
- Cuevas, G.; Mas, J.F. 2008. Land use scenarios: a communication tool with local Communities. In: M. Paegelow and M.T. Camacho, eds. *Modelling Environmental Dynamics* (Springer-Verlag): 223-246.
- de Sherbinin, A. 2002. *CIESIN Thematic Guide to Land Land-Use and Land Land-Cover Change (LUCC)*, Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) Columbia University Palisades, NY, USA. Online: [http://sedac.ciesin.columbia.edu/guides/lu/CIESIN\\_LUCC\\_TG.pdf](http://sedac.ciesin.columbia.edu/guides/lu/CIESIN_LUCC_TG.pdf).
- Eastman, J.R.; van Fossen, M.E.; Solarzano, L.A. 2005. Transition potential modeling for land cover change, in: D. Maguire, M. Goodchild and M. Batty, eds., *GIS, spatial analysis and modeling* (Redlands, California, ESRI Press).
- FAO. 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. *FAO Forestry Paper*, vol. 130.
- FAO. 2009. *Situación de los bosques del mundo 2009*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Gaspari, F.J.; Delgado, M.I.; Sensiterra, G.E. 2009. Simulación espacio-temporal de la erosión hídrica superficial en una cuenca serrana bonaerense, Argentina, *GeoFocus* (artículos), 9, 67-82.
- Godoy, M.M.G.; Soares-Filho, B.S. 2008. Modelling intra-urban dynamics in the Savassi neighbourhood, Belo Horizonte city, Brazil. In: M. Paegelow and M.T. Camacho, eds. *Modelling Environmental Dynamics* (Springer-Verlag): 319-338.
- Gontier, M.; Mörtberg, U.; Balfors, B., en prensa. Comparing GIS-based habitat models for applications in EIA and SEA. *Environmental Impact Assessment Review*.
- Hagen, A. 2003. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(3): 235–249.
- Hall, M.; Masera, O.; Guerrero, G. 2003. Modeling deforestation baselines using GEOMOD for the Calakmul and Meseta Purépecha regions in Mexico, *Winrock International*, 66 p. 7 de octubre 2010. Online: <http://www.ine.gob.mx/cclimatico/download/Deforestation%20baselines-Appendix%202.pdf>
- Hellmann, F.; Verburg, P.H. 2009. Spatially explicit modelling of biofuel crops in Europe. *Biomass and Bioenergy*. Online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.09.003>.
- Johnson, S. 2009. An evaluation of Land Change Modeler for ArcGIS for ecological analysis of landscape composition. Master of Science (Department of Geography) —

- (GIScience Specialization). 3 de octubre 2010. Online: <http://gradworks.umi.com/14/65/1465027.html>
- Koi, D.D.; Murayama, Y. 2010. Forecasting areas vulnerable to forest conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam. *Remote Sensing*, 2, 1249-1272.
- Mac Nally, R. 2000. Regression and model building in conservation biology, biogeography and ecology: the distinction between and reconciliation of 'predictive' and 'explanatory' models. *Biodiversity and Conservation*, 9, 655–671.
- Mac Nally, R. 2002. Multiple regression and inference in ecology and conservation biology: further comments on identifying important predictor variables. *Biodiversity and Conservation*, 11, 1397–1401.
- Mas, J.F.; Kolb, M.; Houet, T.; Paegelow, M.; Camacho Olmedo, M.T. 2011. Éclairer le choix de modèles de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. *Revue Internationale de Géomatique*, 21(3), 405-430.
- Mas, J.F.; Pérez Vega, A.; Clarke, K. 2010. Assessing simulated land use/cover maps using similarity and fragmentation indices. ASPRS Annual Conference, April 26–30 2010, San Diego, CA, USA. Online: <http://www.ugr.es/~sigemod/publicaciones.html>
- Mas, J.F.; Velázquez, A.; Díaz-Gallegos, J.R.; Mayorga-Saucedo, R.; Alcántara, C.; Bocco, G.; Castro, R.; Fernández, T., Pérez-Vega, A. 2004. Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249-261.
- Paegelow, M.; Camacho Olmedo, M.T. 2005. Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science*, 19(6), 697-722.
- Pérez-Vega, A.; Mas, J.F.; Ligmann-Zielinska, A., G. 2012. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest, 29(1), 11-23.
- Pineda Jaimes, N.B.; Bosque Sendra, J.; Gómez Delgado, M.; Plata Rocha, W. 2009. Análisis de cambio de uso del suelo en el estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regression multivariantes, Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas* 69, 33-52. Online: [http://www.igeograf.unam.mx/web/iggweb/publicaciones/boletin\\_editorial/boletin/bol69/bltn69artC.pdf](http://www.igeograf.unam.mx/web/iggweb/publicaciones/boletin_editorial/boletin/bol69/bltn69artC.pdf)
- Pontius, R.G.; Cornell, J.; Hall, C. 2001. Modeling the spatial pattern of land-use change with Geomod2: application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3), 191-203.
- Pontius, R.G. 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66 (8), 1011-1016.
- R Development Core Team. 2009. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 5 de octubre 2010. Online: <http://www.R-project.org>.
- Schulp, C.J.; Nabuurs, G.J.; Verburg, P.H. 2008. Future carbon sequestration in Europe-- Effects of land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 127, 251-264.
- Soares-Filho, B.S.; Pennachin, C.L; Cerqueira, G. 2002. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217 – 235.
- Soares-Filho, B.S.; Rodrigues, H.O.; Costa, W.L.S. 2009. Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO, Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brazil. 4 de octubre 2010. Online: <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>
- Soares-Filho, B.S.; Moutinho, P.; Nepstad, D.; Anderson, A.; Rodrigues, H.; Garcia, R.; Dietzsch, L.; Merry, F.; Bowman, M.; Hissa, L.; Silvestrini, R.; Maretti, C. 2010. Role of

- Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 107 (24), 10821-10826.
- Soares-Filho, B.S.; Nepstad, D.; Curran, L.; Voll, E.; Cerqueira, G.; García, R.A.; Ramos, C.A.; McDonald, A.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440, 520-523.
- Takada, T.; Miyamoto, A.; Hasegawa, S.F. 2010. Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications. *Landscape Ecology*, 25(4), 561-572.
- Veldkamp, A.; Lambin, E. 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 1-6.
- Wassenaar, T.; Gerber, P.; Rosales, M.; Ibrahim, M.; Verburg, P.H.; Steinfeld, H. 2007. Predicting land use changes in the Neotropics: the geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change*, 17, 86-104.
- Xiang, W.N.; Clarke, K.C. 2003. The use of scenarios in land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(6), 885-909.

## Resumen

Se elaboró un modelo de simulación de los cambios de cobertura/uso del suelo (CCUS) para una región del sureste mexicano que presenta altas tasas de deforestación. La modelación se basó en dos escenarios: 1) uno tendencial basado en el supuesto que las altas tasas de deforestación iban a mantenerse siguiendo los mismos patrones de distribución y 2) otro alternativo en el cual se suponía una baja de las tasas de cambio y una relocalización de los desmontes en áreas secundarias. La evaluación de los mapas prospectivos revela que el modelo alternativo presentó un mejor desempeño y sugiere que la integración de conocimiento experto es necesaria para la elaboración de modelos prospectivos, particularmente en áreas altamente dinámicas.

*Palabras clave:* deforestación, sistema de información geográfica, modelos prospectivos

Forma de citar este artículo:  
*Suggested citation*

Mas, J.F., y Flamenco Sandoval, A. 2011. Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*, NS 5 (1), Artículo 1: 1-24. Online, acceso [insertar aquí fecha de descarga]: [http://www.geotropico.org/NS\\_5\\_1\\_Mas-Flamenco.pdf](http://www.geotropico.org/NS_5_1_Mas-Flamenco.pdf)

## Correspondencia:

J.F. Mas  
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)  
Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701  
Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta  
C.P. 58190 Morelia Michoacán  
México

A. Flamenco Sandoval  
Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica,  
Universidad de Guanajuato  
C.P. 36000 Guanajuato, Gto, México



GRUPO GEOLAT – BOGOTÁ

Editor  
HÉCTOR F. RUCINQUE, Ph.D.



Licenciado para uso personal gratuito bajo la *Creative Commons Attribution – Noncommercial – No Derivative Works 2.5 Colombia license*, especificada en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Licensed for free use under the *Creative Commons Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 2.5 Colombia license*, available at: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>