

UNA COMPARACIÓN DE DIFERENTES ENFOQUES DE MODELACIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA / USO DEL SUELO

Jean-François Mas ¹, Melanie Kolb ², Thomas Houet ³, Martin Paegelow ³, María Teresa Camacho Olmedo ⁴

¹Centro 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

²Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
Liga Periférico - Insurgentes Sur, Núm. 4903, Col. Parques del Pedregal
Delegación Tlalpan, 14010 México, D.F.
Posgrado en Geografía – UNAM MÉXICO

³Laboratoire GEODE Maison de la Recherche de l'Université du Mirail
5, Allées A. Machado - 31058 TOULOUSE Cedex 1 FRANCIA

⁴Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física
Facultad de Filosofía y Letras Universidad de Granada
Campus de Cartuja s/n. 18071 Granada ESPAÑA

Palabras claves: modelado espacial, deforestación, software

Resumen

Durante las últimas décadas, una gran variedad de modelos fueron desarrollados para predecir la localización de los CUCS. En este estudio, se comparan cuatro programas de modelación: CLUE, DINAMICA EGO, CA_Markov and Land Change Modeler (ambos disponible en IDRISI). En un primer paso, se revisaron los diferentes métodos y herramientas disponibles en cada modelo para llevar a cabo los diferentes pasos de la modelación (estimación de la cantidad de cambio, relación entre las variables explicativas y los cambios, alocaión de los cambios, reproducción de los patrones espaciales, evaluación del desempeño del modelo, posibilidad de desarrollar modelos más sofisticados). En un paso siguiente, se aplicaron los modelos a un caso de estudio virtual, basado en un escenario de deforestación sencillo. Esta estrategia nos permitió comparar los modelos en situaciones controladas y desarrollar situaciones retadoras para evaluar el desempeño de cada modelo. Se compararon los diferentes productos de la modelación (mapas de probabilidad de cambio, mapas de coberturas simulados) y se evaluaron los modelos tomando en cuenta su flexibilidad y capacidad para llevar a cabo las diferentes tareas relacionadas con la modelación.

INTRODUCCION

Los cambios de uso / cobertura del suelo (CUCS) están considerados entre las principales fuerzas que inciden sobre el cambio global. En las últimas décadas, una gran cantidad de modelos de CCUS han sido desarrollados para satisfacer las necesidades de gestión de la tierra, y para comprender, evaluar y proyectar el papel de los CUCS en el funcionamiento del sistema terrestre. La modelación, especialmente si se realiza de forma “espacialmente explícita”, es una técnica importante para la proyección y la exploración de escenarios prospectivos alternativos, para llevar a cabo experimentos que ponen a prueba nuestra comprensión de los procesos clave, y para describir estos últimos en términos cuantitativos (Veldkamp y Lambin, 2001).

Los CUCS se modelan empíricamente mediante un análisis de los cambios pasados para desarrollar un modelo matemático que estima el potencial de cambio en función de un conjunto de variables explicativas. En general, el análisis espacial de los cambios anteriores se lleva a cabo a través de la comparación de dos mapas de cobertura/uso del suelo (CUS) de dos fechas diferentes. Esta

comparación permite estimar los patrones y procesos de cambio (tipos de transiciones y tasas de cambio) y calibrar el modelo. Para el desarrollo de modelos de CUCS espaciales se necesitan mapas que indican el grado de susceptibilidad de cambio en el futuro. El análisis de los cambios pasados en relación con las variables explicativas permite mapear esta susceptibilidad, también referida en la literatura como potencial, propensión, o probabilidad. Emplearemos el término de probabilidad aunque en algunos modelos estos valores no son probabilidades en el sentido estricto. Estos mapas de probabilidad por sí mismos pueden considerarse como un primer producto de la modelación. Otros procedimientos, aplicados con el fin de crear un mapa prospectivo de CUS, involucran técnicas para asignar la cantidad de ciertos cambios establecidos a través de la proyección de la cantidad de los CUCS históricos y, finalmente, para reproducir los patrones espaciales de los paisajes. Por último, una evaluación del desempeño del modelo se lleva usualmente a cabo. Esta se basa a menudo en la coincidencia espacial entre un mapa simulado y un mapa "observado" (generalmente obtenido a través de la clasificación de imágenes de satélite) que sirve de referencia.

Diferentes paquetes de modelación tienen funciones y herramientas que pueden ser una ventaja o desventaja según los datos de entrada disponibles y el propósito de la modelación. Aunque algunos modelos han sido ampliamente utilizados, existen muy pocos estudios enfocados a comprender los beneficios y limitaciones de los modelos mediante la evaluación y la comparación de sus herramientas. Este estudio tiene como objetivo la evaluación de cuatro modelos diseñados para la simulación espacial de los CUCS.

METODOS

Comparamos 4 modelos, que presentan un amplio abanico de enfoques y métodos:

- CA_MARKOV en IDRISI (Eastman, 2009; Paegelow y Camacho Olmedo, 2008).
- CLUE-S (Verburg y Overmars, 2009)
- DINAMICA EGO (Soares-Filho et al., 2002, 2006, 2009).
- Land Change Modeler (disponible en IDRISI y como extensión de ARC-GIS) (Eastman, 2009; Johnson, 2009; Pineda-Jaimes, 2009).

Se llevó a cabo una revisión de los métodos y herramientas que ofrece cada modelo para realizar la simulación teniendo en cuenta las principales tareas en la modelación espacial: 1) ¿Cómo el modelo calcula la cantidad de cambios? 2) ¿Cómo establece la relación entre las variables explicativas y los cambios a fin de evaluar la probabilidad de cambio, 3) ¿Cómo se asignan los cambios? 4) ¿Cómo se simula los patrones espaciales de los cambios? y por último 5) ¿Cómo se evalúa el modelo? También se examinó la posibilidad de desarrollar modelos más sofisticados, la facilidad de uso y la disponibilidad de materiales de apoyo.

En una etapa posterior, se aplicó cada modelo a un caso virtual, que consisten en un conjunto de datos creados por los autores con el propósito de la comparación. Esta estrategia permite realizar la modelación en condiciones controladas y ofrece la posibilidad de elaborar situaciones con el fin de probar tareas específicas de la modelación. Los modelos fueron evaluados mediante una serie de criterios implicando un análisis de los resultados (proyección de las superficies de cambio, mapas de potencial de cambio, mapas prospectivos de CUS) y una evaluación de su flexibilidad y para cumplir las tareas de la modelación.

El caso virtual se inspira de casos reales de deforestación tropical e incluye dos mapas de CUS (con fecha de 2000 y 2003) y cuatro mapas explicativos (elevación, pendiente, distancia a las carreteras y distancia a los asentamientos). Tres categorías de CUS se distinguen para la simulación: 1) bosques, 2) pastizales y, 3) cultivos (figura 1). Durante el período 2000-2003, se observan sólo cuatro tipos de transición que presentan diferentes patrones espaciales. Los pastizales y la agricultura están asociados a pendientes suaves y a la proximidad de las carreteras y los asentamientos, respectivamente, pero estas dos últimas variables están fuertemente correlacionadas. Por último, el efecto de diversas variables no es la suma de los efectos de cada variable: Por ejemplo, la deforestación no ocurre en pendiente suave en lugares remotos o en pendientes fuertes cerca de las carreteras, sino en lugares que combinan pendientes moderadas y proximidad a las carreteras o los asentamientos. Los pastizales se amplían principalmente por expansión de parches ya existentes y forman grandes extensiones mientras que la transición hacia agricultura se realiza a través de la creación de nuevos pequeños parches.

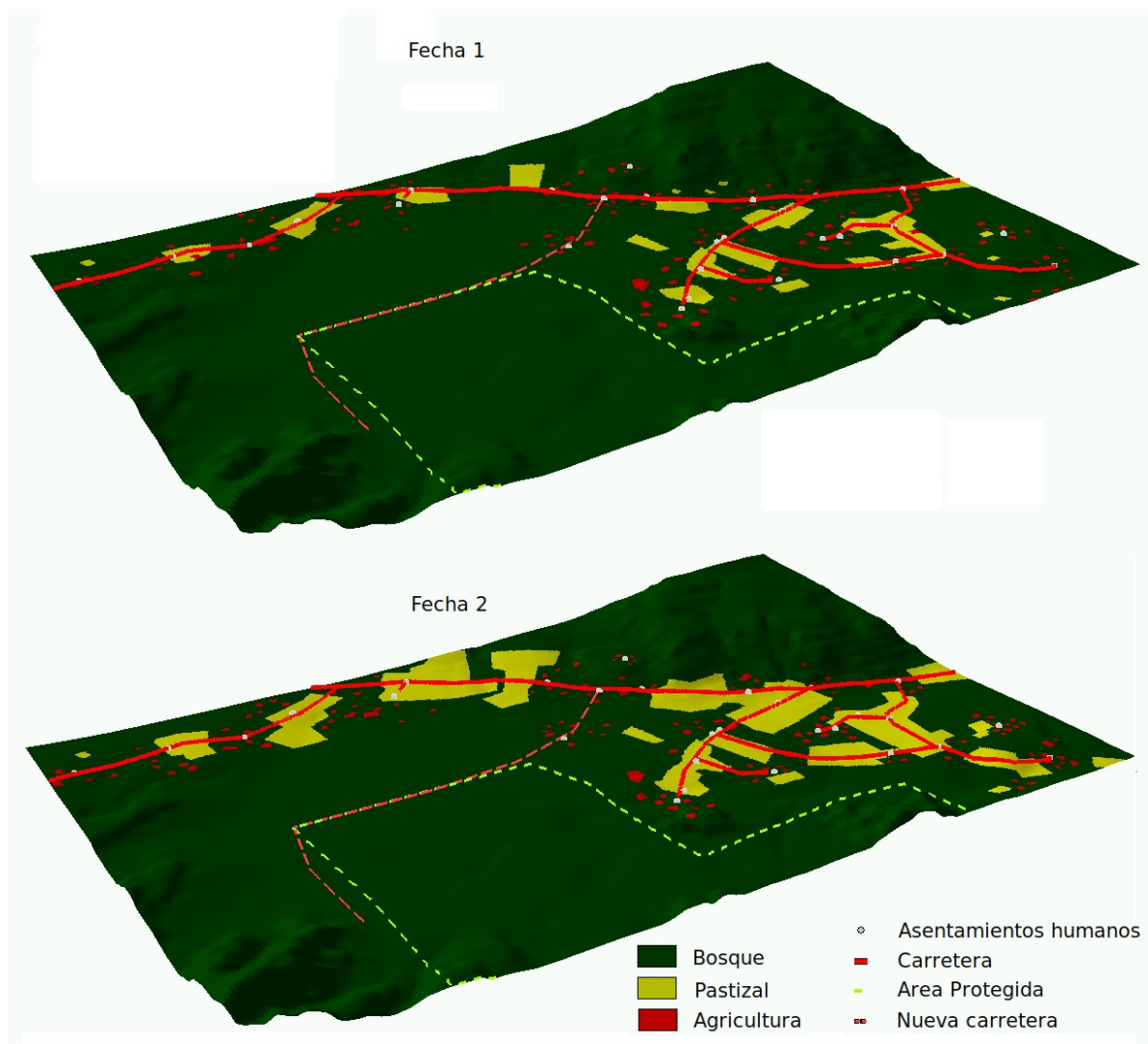


Figura 1 - Mapas de CUS para 2000 y 2003 (caso virtual)

RESULTADOS

Revisión de los modelos

El procedimiento de modelación puede ser sub-dividido en cinco pasos: 1) un procedimiento no espacial que calcula la cantidad de cada transición, 2) un procedimiento espacial que determina la probabilidad de cambio, 3) un componente espacial que asigna los cambios, 4) un módulo espacial que reproduce los patrones del paisaje y, por último, 5) un procedimiento de validación que permite comparar el mapa simulado con el mapa de referencia de la misma fecha. En la siguiente sección, se describen los métodos y herramientas que ofrece cada modelo para lograr cada una de estas tareas. A continuación, se presentan los parámetros de configuración avanzada y algunas consideraciones adicionales.

Estimación de la cantidad de cambios

En CA_MARKOV, DINAMICA y LCM, la cantidad de cambios se calcula con base a una matriz de Markov obtenida generalmente a través de la comparación de mapas de CUS de dos fechas. La matriz de transición entre la fecha de t_0 y t_1 (que determinan el periodo T) se obtiene mediante la superposición de los dos mapas de CUS de las mismas fechas. Se obtiene la superficie (o el número de píxeles) para cada transición. La matriz de transición puede ser transformada en una matriz de probabilidad de transición que permite hacer proyecciones a uno o varios periodos T (fecha $t_1 + T$). Sin embargo, a menudo es conveniente utilizar un tiempo determinado diferente del plazo T original para la proyección. Por ejemplo, el período de tiempo entre los dos mapas LUC utilizados para calibrar el modelo son típicamente varios años y el modelo se ejecuta con un intervalo de tiempo al año.

En DINAMICA, la matriz de transición se transforma para dar las tasas anuales de transición a fin de proyectar las tendencias de cambio sobre una base anual aplicando una ecuación de cálculo matricial (ver Soares-Filho et al., 2002 para más detalles). En IDRISI (CA_Markov y LCM), las probabilidades de transición anuales se obtienen realizando una corrección lineal simple de las probabilidades de transición. IDRISI propone además una corrección de los valores de probabilidad de la matriz que toma en cuenta la fiabilidad de los mapas de CUS. En CLUE, la cantidad de categorías de ocupación del suelo es proporcionada por el usuario para cada año simulado. Se puede obtener a través de una gran variedad de enfoques (simples extrapolaciones de tendencias, proyecciones de Markov, modelos económicos...), pero deben ser evaluados mediante herramientas externas.

Evaluación de la probabilidad de cambio

Se espera que los CUCS ocurran en las áreas más propensas al cambio. La probabilidad de cambio depende de la distribución de las características biofísicas y socio-económicas. Las variables explicativas más comúnmente utilizadas son la pendiente, la distancia a las carreteras y los asentamientos, la tenencia de la tierra y los tipos de suelo entre otros. La probabilidad de cambio de una transición dada puede ser evaluada a través de dos enfoques ligeramente diferentes: la aptitud de una ubicación para un determinado uso / cobertura del suelo resultante de la transición o bien la probabilidad de presentar esta transición.

CLUE y CA_Markov usan mapas que expresan la aptitud de una área para cada una de las categorías de CUS. DINAMICA y LCM calculan la probabilidad de cada transición. Ambos tipos de mapas se elaboran mediante el establecimiento de una relación entre las variables explicativas y los tipos de CUS o de transición. En CA_Markov los mapas de aptitud son generados por una evaluación multicriterio, para la cual se puede utilizar algunas de las herramientas ofrecidas por IDRISI. CLUE utiliza modelos de regresión logística que deben elaborarse en un programa separado. DINAMICA calcula un mapa de probabilidad utilizando el método de los pesos de evidencia. Estos pesos pueden eventualmente ser modificados mediante un algoritmo genético para mejorar el ajuste entre los mapas de probabilidad de cambio y el mapa de CUCS utilizado para la calibración del modelo. LCM utiliza una red neural (perceptrón multicapa) para producir el mapa de probabilidad. Presenta también la opción de utilizar una regresión logística.

Estos métodos implican diferentes supuestos y pre-procesamiento de las variables explicativas. Los modelos de regresión logística y de los pesos de evidencia se basan en la hipótesis de la independencia entre las variables explicativas. A menudo, este supuesto no se cumple. Para ello, estos paquetes disponen de herramientas para evaluar la correlación entre los mapas (coeficiente de Cramer, Chi cuadrado, correlación y Kappa en IDRISI, Cramer, contingencia e incertidumbre de información común en DINAMICA). Los pesos de evidencia se basan en variables categóricas y DINAMICA tiene una herramienta para optimizar la transformación de variables continuas en categóricas. Por el contrario, el perceptrón multicapa y los modelos de regresión logística utilizan variables de preferencia continuas. IDRISI permite convertir mapas categóricos en mapas continuos mediante la transformación de la evidencia de probabilidad basado en la frecuencia relativa de los píxeles que pertenecen a las diferentes categorías dentro de las áreas de cambio.

Estos métodos ofrecen también diferentes grados de integración de conocimiento experto y de aptitud para ajustar la relación entre las variables explicativas y la probabilidad de transición. La evaluación multicriterio (CA_Markov) permite tomar en cuenta el conocimiento de expertos mientras que la regresión logística y aun mas las redes neuronales o los algoritmos genéticos no. DINAMICA permite visualizar la relación entre las variables explicativas y los pesos de evidencia y, finalmente, editar (modificar) sus valores. Por lo tanto, es posible ajustar el nivel de integración del conocimiento experto desde un enfoque totalmente estadístico (sin modificar los valores de los pesos calculados de forma automática) a un enfoque completamente basado en conocimiento experto (modificación importante de los pesos por los expertos).

Los métodos también difieren en su flexibilidad para modelar las relaciones entre la probabilidad de cambio y las variables explicativas. Modelos de regresión logística no podrán modelar correctamente una función diferente de una sigmoidea. En el método de los pesos de evidencia, se calcula un peso para cada categoría, lo que permite elaborar una función compleja. Estos dos enfoques se basan en un efecto aditivo de las variables explicativas. Por el contrario, las redes neuronales y los algoritmos genéticos permiten manejar funciones no lineales, teniendo en cuenta las sinergias o efectos inhibitorios entre las variables. Estos dos últimos enfoques pueden por lo tanto ajustarse mejor a una función entre las variables explicativas y los posibles cambios. Sin embargo, la capacidad para modelar funciones complejas con una alta capacidad de ajuste no es necesariamente una ventaja, ya que puede conducir a un sobre-ajuste. Por ejemplo, Mas et al. (2004) encontraron que las redes neuronales más complejas permite un mejor

ajuste durante el período de calibración, pero no en la predicción del cambio en el período siguiente. Pérez-Vega et al. (2010) reportaron que el principal problema para producir mapas prospectivos en una región de bosque tropical seco se debió a las diferencias entre las tasas y los patrones espaciales de cambio durante los períodos de calibración y de simulación.

Asignación del cambio

La asignación del cambio es un proceso de decisión que selecciona los píxeles que van a experimentar cierto cambio con base en los mapas de probabilidad de cambio. En el supuesto de que los píxeles que cambian son los que tienen la mayor probabilidad, CA_MARKOV y LCM seleccionan los píxeles con los valores de probabilidad más altos. Debido a que hay normalmente una competencia entre diferentes transiciones (el mismo sitio puede ser candidato a transiciones diferentes), CA_Markov y LCM utilizar un procedimiento de asignación múlti-objetivo. CLUE utiliza un enfoque alternativo basado en un proceso iterativo. DINAMICA utiliza dos funciones de autómatas celulares que se describen más adelante. Los píxeles son clasificados de acuerdo a su potencial de cambio y son seleccionados al azar de mayor a menor potencial. Un parámetro permite controlar la cantidad de cambios simulados en áreas menos propensas al cambio.

Reproducción de los patrones temporales y espaciales

CA_MARKOV, DINAMICA y LCM utilizan autómatas celulares (AC) con el fin de obtener un efecto de proximidad (áreas cercanas a parches existentes de una cierta categoría son más propensas a cambios hacia esta categoría). En LCM, el proceso consiste en un filtro de 3x3 píxeles. No hay ninguna opción para controlar el comportamiento del AC. En CA_MARKOV, el AC reduce la aptitud de las áreas alejadas de áreas existentes de la categoría de CUS considerada usando un filtro de 5x5 píxeles. El usuario puede controlar el número de iteraciones del AC y por lo tanto el efecto de la aglomeración en torno a los parches ya existentes o de nueva creación. En ambos programas el mismo AC se aplica a todas las transiciones. DINAMICA utiliza dos AC complementarios: 1) el expandir, y 2) el parcher. El primero se dedica únicamente a la expansión o contracción de los parches anteriores de una determinada categoría. El segundo está diseñado para generar nuevos parches a través de un mecanismo de siembra. El usuario puede ajustar parámetros para controlar el tamaño de los parches, la variación del tamaño y la isometría para cada transición por separado. CLUE no tiene AC, pero presenta la opción de modificar el mapa de probabilidad utilizando una regresión logística adicional que tome en cuenta la distancia a los parches existentes a través de filtros espaciales.

Características adicionales diseñadas para reproducir patrones espacio-temporales incluyen la posibilidad de modelar el tiempo de permanencia durante las transiciones, efectos de la saturación y el uso de variables dinámicas. DINAMICA permite cambiar la matriz de Markov en los pasos específicos de la simulación. Algunas transiciones como bosque secundario a bosque maduro son deterministas y dependen del tiempo de permanencia de la sucesión vegetal. Sólo CLUE y DINAMICA permiten establecer un tiempo de permanencia de cada transición. Algunas transiciones se detienen cuando la cantidad de cambio alcanza un determinado nivel. Por ejemplo, un frente de deforestación se moverá hacia adelante dejando una cierta cantidad de fragmentos de bosque remanentes. En CA_MARKOV y DINAMICA, procedimientos para controlar los tiempos de estancia y el efecto de saturación pueden ser fácilmente implementados. Debido a su estructura fija, dicha aplicación no es posible en LCM. En CLUE, el efecto de saturación se puede modelar a expensas de otro patrón espacial porque el usuario puede utilizar sólo una regresión logística adicional por cada transición.

El uso de zonas de restricción o incentivo permite ajustar el cambio potencial a determinadas políticas de ordenación que no se pueden derivar de las variables explicativas. LCM y DINAMICA permitir el uso de zonas de restricción o de incentivo a un cierto paso de tiempo. En CLUE, estas áreas se crean mediante el suministro de un mapa con los valores de los píxeles entre 0 y 1, de modo que sean compatibles con los resultados de la regresión, pero sólo para la simulación completa (todos los pasos de tiempo). En CA_Markov, la incorporación de las zonas de restricción o incentivo puede hacerse a través de la elaboración de mapas de aptitud que tomen en cuenta estas áreas.

Modelo de evaluación

En general, la evaluación de los mapas de CUS prospectivos se basa en la comparación entre el mapa simulado y un mapa observado. IDRISI ofrece dos formas de evaluar los resultados de la simulación: 1) el índice Kappa (Pontius, 2000) y 2) el análisis ROC. DINAMICA permite calcular un índice de similitud difuso (Hagen, 2003). En CLUE, la evaluación de las regresiones logísticas se basa generalmente en un análisis ROC, pero esto tiene que llevarse a cabo en otro programa.

Opciones avanzadas

La elaboración de modelos más sofisticados involucra el manejo de sub-regiones que pueden presentar diferentes dinámicas (por ejemplo, diferentes tasas de cambio, diferentes tipos de transición, diferentes variables explicativas y/o efecto diferente de las mismas variables). En CLUE el usuario puede proporcionar un mapa de las regiones. DINAMICA también tiene la opción de dividir el área de estudio en regiones con especificaciones particulares. Sólo DINAMICA es capaz de subdividir el modelo en sub-regiones que interactúan entre ellas (por ejemplo, la proximidad de un frente de la deforestación en una sub-región puede influir en la deforestación en las sub-regiones vecinas).

Otro aspecto es la integración de diferentes patrones de CUCS en el tiempo. Esto puede hacerse fácilmente con DINAMICA que permite la sustitución de las matrices de transición, junto con las variables explicativas en un momento dado de la simulación. El *modeler* de IDRISI puede utilizarse para llevar a cabo tales procedimientos de modelado utilizando CA_Markov. LCM permite cambiar algunas variables durante el modelado (carreteras, infraestructura e incentivos previstos / limitaciones) en el paso del tiempo. LCM puede utilizar una matriz de transición fija de un modelo exterior en lugar de la matriz de Markov. DINAMICA puede utilizar un modelo externo, que calcula las tasas de dinámica de transición.

Con el fin de reproducir los patrones espaciales de deforestación tropical, donde la red de carreteras es un fuerte predictor de la deforestación, pero no existe cartografía de los caminos "espontáneos", DINAMICA y LCM ofrecen un modelo predictivo de la evolución de las carreteras. Además LCM proporciona herramientas destinadas a evaluar el impacto del cambio para la sostenibilidad ecológica y la planificación de la conservación. DINAMICA proporciona algunas herramientas adicionales para modelar los volúmenes de madera procesada por los aserraderos y de CO₂.

Consideraciones adicionales

Los programas que ofrece más flexibilidad para desarrollar modelos personalizados son CA_Markov y DINAMICA. Los modelos pueden ser construidos aprovechando la gran cantidad de herramientas y operadores disponibles en estos programas. Por otra parte, la programación es fácil, incluso para usuarios sin experiencia previa en programación, gracias a una interfaz gráfica amigable. Al contrario, LCM y CLUE presentan una estructura rígida, que define un flujo fijo de procedimientos. Esto puede ser ventajoso para nuevos usuarios ya que los procedimientos están bien definidos y documentados, pero se convierte en una desventaja cuando se quiere desarrollar modelos hechos a medida.

La facilidad de uso depende de las características que hacen más fácil emplear una herramienta y de la documentación ofrecida al usuario. Los programas de IDRISI (CA_MARKOV y LCM) son tal vez los más fáciles de usar porque: 1) están bien documentados (manual y tutorial), 2) todas las operaciones se pueden ejecutar en un entorno gráfico, pero también se puede automatizar a través de la secuencia de comandos y de herramientas de programación y 3) las operaciones previas a la modelación (clasificación de imágenes para crear mapas de CUS por ejemplo) puede llevarse a cabo en el mismo entorno. DINAMICA también presenta una interfaz de programación intuitiva y recientemente ha sido muy bien documentado (manual de instrucciones, lista de discusión). CLUE también está bien documentada (guía y una gran cantidad de publicaciones científicas), pero requiere algunas operaciones laboriosas (edición de archivos de texto para introducir los parámetros) y muchas operaciones tienen que llevarse a cabo con programas externos (regresión logística, despliegue de los mapas, evaluación). IDRISI permite importar y exportar una gran cantidad de formato de imágenes, DINAMICA maneja los formatos ERMapper, GeoTIFF y Arcview ASCII mientras CLUE sólo acepta archivos ASCII.

Todos los paquetes examinados son gratuitos, excepto IDRISI que es relativamente económico (US\$ 675 por una licencia académica). Sin embargo, IDRISI es un software de SIG y de procesamiento de imágenes muy completo. DINAMICA e IDRISI están actualizados de forma regular mientras que CLUE tiene la misma versión desde 2002.

Aplicación al caso virtual

Los cuatro paquetes fueron aplicados al caso virtual. La superposición de los dos mapas de CUS 2000 y 2003 permitirá crear una matriz de transición que representa cuatro transiciones de cambio: 1) bosques a pastizales, 2) bosques a agricultura, 3) agricultura a bosques y, 4) agricultura a pastizal (tabla 1). En la tabla 2, se puede observar que las matrices generadas por DINAMICA e IDRISI (sin correcciones) son muy similares). Al contrario, la corrección realizada por IDRISI con el fin de corregir el sesgo relacionado con errores cartográficos modifica todas las probabilidades de transición y el usuario tiene que asegurarse de que estos valores son realistas ya que la utilización de esta corrección modifica las proyecciones de manera muy importante (Figura 2). En este caso, después de esta corrección, ciertas

transiciones que no se observaron (pastizales a bosques y pastizales a la agricultura) presentan una probabilidad de 7,5%.

Tabla 1 - Matriz de transición 2000-2003 en número de píxeles

| 2003 | | | |
|-------------|--------|----------|-------------|
| 2000 | Bosque | Pastizal | Agricultura |
| Bosque | 243971 | 47265 | 3385 |
| Pastizal | 0 | 40628 | 0 |
| Agricultura | 2909 | 961 | 259 |

Tabla 2 – Matrices de probabilidad de transición IDRISI (sin corrección del error)

| 2003 | | | |
|-------------|--------|----------|-------------|
| 2000 | Bosque | Pastizal | Agricultura |
| Bosque | 0.9692 | 0.0244 | 0.0064 |
| Pastizal | 0.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| Agricultura | 0.3923 | 0.0647 | 0.5430 |

IDRISI (con corrección correspondiente a un error de 15%)

| 2003 | | | |
|-------------|--------|----------|-------------|
| 2000 | Bosque | Pastizal | Agricultura |
| Bosque | 0.8238 | 0.1396 | 0.0366 |
| Pastizal | 0.0750 | 0.8500 | 0.0750 |
| Agricultura | 0.4622 | 0.0763 | 0.4616 |

DINAMICA

| 2003 | | | |
|-------------|--------|----------|-------------|
| 2000 | Bosque | Pastizal | Agricultura |
| Bosque | 0.9712 | 0.0244 | 0.0043 |
| Pastizal | 0.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| Agricultura | 0.2660 | 0.0518 | 0.6822 |

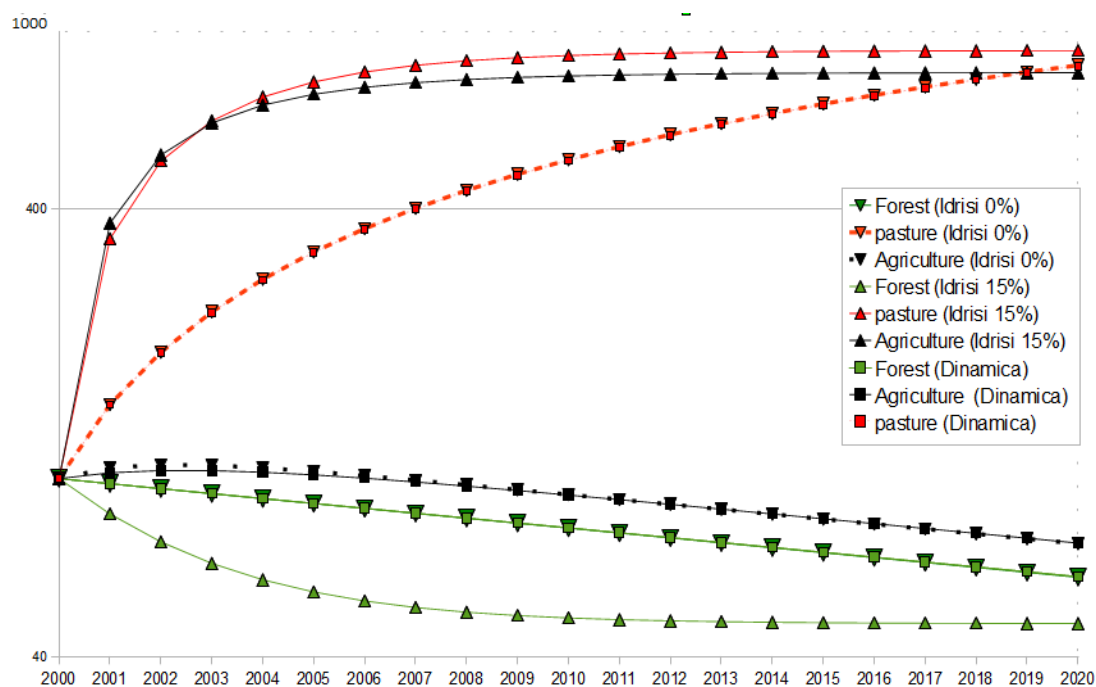


Figure 2 – Proyecciones de las superficies de las 3 categorías con base en las tres matrices

Mapeo de la probabilidad de cambio

Los mapas de probabilidad de cambio y de aptitud generados por los diferentes paquetes presentan algunas diferencias que se reflejan en la relación entre probabilidad de cambio y variables explicativas (Figura 3). De la misma manera, los mapas prospectivos son también muy diferentes, solo los AC de DINAMICA lograron reproducir los pequeños parches de agricultura (Figura 4).

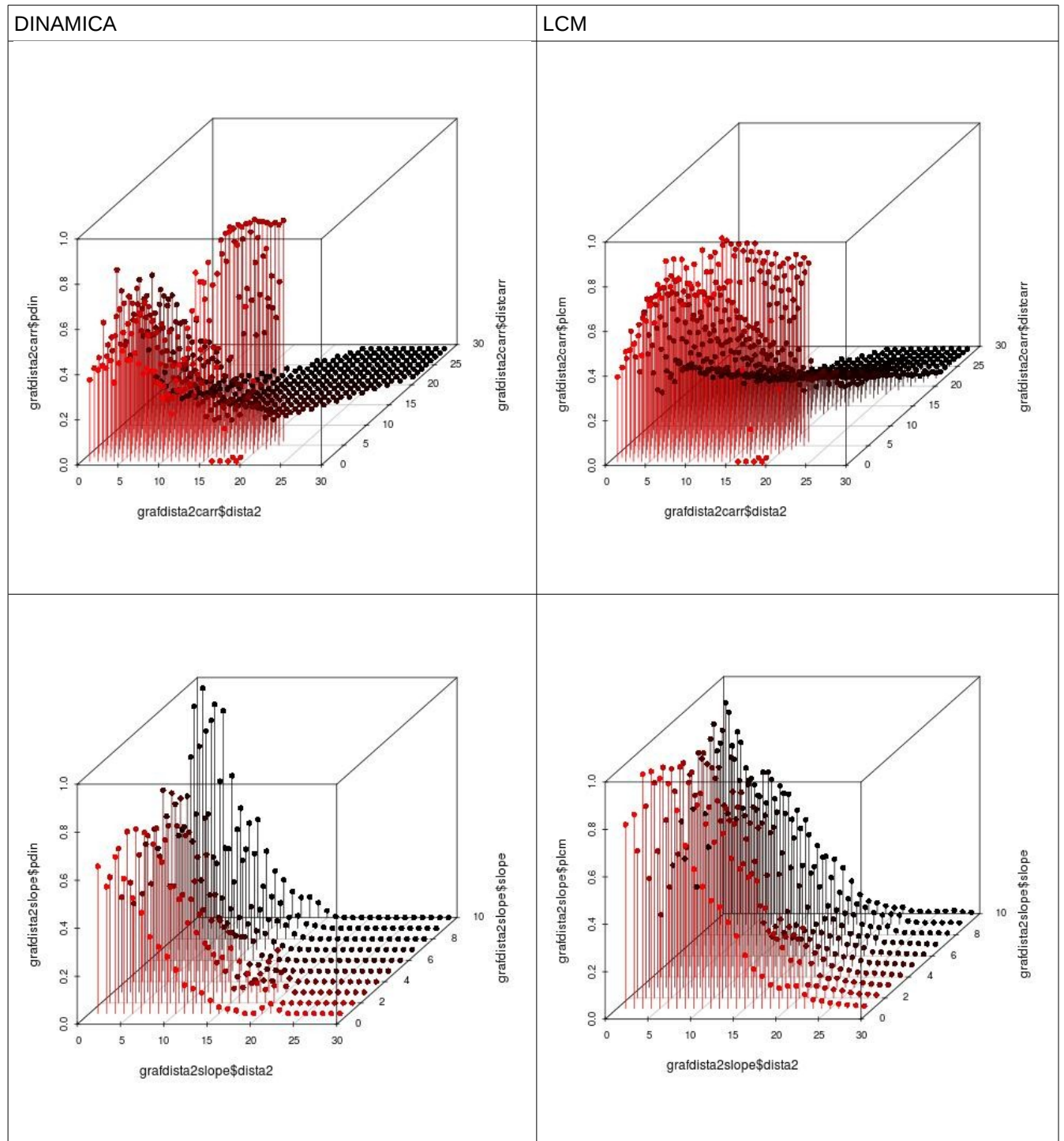


Figura 3 – Probabilidad de la transición “Bosque a pastizal” en función de las variables explicativas en DINAMICA y LCM.

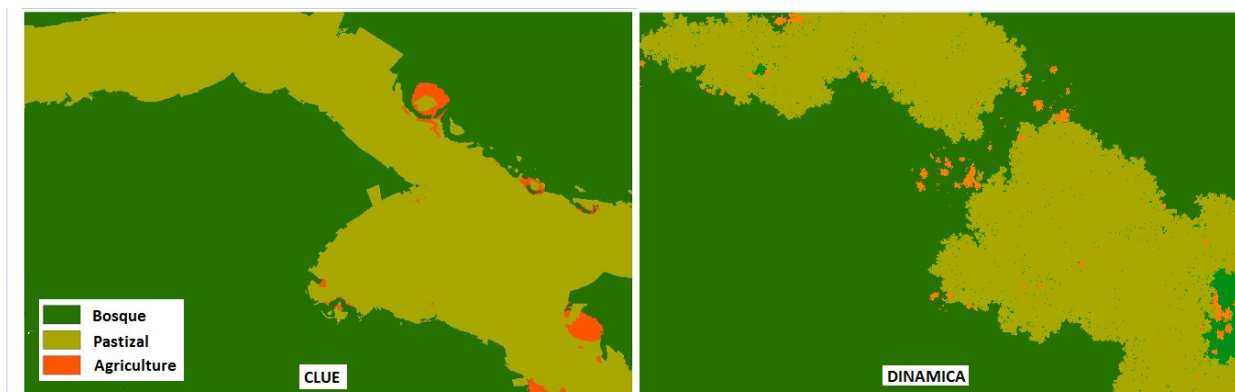


Figura 4 – Mapas prospectivos (2015) generados por CLUE y DINAMICA

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Los paquetes revisados utilizan diferentes enfoques para producir mapas prospectivos. Algunos se basan en los datos con métodos de calibración automáticos (LCM) mientras otros se basan más en conocimiento experto (CA_Markov). DINAMICA permite escoger niveles intermediarios entre ambos enfoques.

Por lo menos en caso de regiones con altas dinámicas de CCUS, los enfoques de calibración basados en métodos capaces de producir funciones que se ajustan mucho a los datos de entrenamiento (redes neurales, algoritmos genéticos) pueden resultar contraproducentes debido a las variaciones en los patrones de cambio durante el tiempo. En estos casos, la integración de algún grado de conocimiento experto parece recomendable.

Los modelos pueden producir dos tipos de salida: mapas de probabilidad de cambio y mapas prospectivos de CUS. Para estos últimos, el uso de autómatas celulares permite reproducir los patrones del paisaje, lo cual puede ser importante por ejemplo para evaluar el impacto de los CCUS sobre la fragmentación de los paisajes y la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, los AC, excepto los de DINAMICA, no lograron reproducir estos patrones. En CA_Markov se podrían realizar operaciones adicionales para mejorar este aspecto.

Finalmente, el interés de estos modelos es la posibilidad de desarrollar modelos que se adecuen a las necesidades del usuario y de acoplarlos con otros modelos (modelos económicos, emisión de carbono, conservación de especies, modelos hidrológicos...). LCM tiene módulos para evaluar aspectos de conservación. Sin embargo, su estructura rígida no permite salir del entorno ya establecido. En este aspecto es sin duda DINAMICA que presenta más potencial por su gran flexibilidad y sus posibilidades de interacción.

ACKNOWLEDGMENTS

Este trabajo se realizó en el ámbito del proyecto *Simulaciones geomáticas para modelizar dinámicas ambientales. Avances metodológicos y temáticos* (BIA2008-00681).

REFERENCES

- Eastman, R., 2009, Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing, manual version 16.02, Clark University, 342 p.
- Hagen, A., 2003, Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(3), 235–249.
- 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). <http://gradworks.umi.com/14/65/1465027.html>
- Mas, J.F., Puig, H. Palacio, J.L., Sosa, A.A., 2004, Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks., *Environmental Modelling and Software*, 19(5) 461-471.

- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T. (coord.), 2008, Modelling Environmental Dynamics. Advances in geomatic solutions. Springer, series: Environmental Science and Engineering, 390 p.
- Paegelow, M., M.T. Camacho Olmedo, 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., J.F. Mas, A. Ligmann-Zielinska, G. Ibarra-Manriquez, 2010, Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest, *sometido*.
- 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 regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación, 69:33-52.
- Pontius, R.G., 2000, Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66(8): 1011-1016.
- Soares-Filho B. S.; Nepstad, D.; Curran, L.; Voll, E.; Cerqueira, G.; Garcia, R. A.; Ramos, C. A.; McDonald, A.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P., 2006, Modeling conservation in the Amazon basin. *Nature*, London, 440: 520-523.
- 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., H. O. Rodrigues W. L. S. Costa, 2009, Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO, Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brazil. Disponible en <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>
- Veldkamp, A. y Lambin, E., 2001, Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85: 1-6.
- Verburg, P.H. y Overmars, K.P., 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology* 24(9): 1167-1181. <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7>