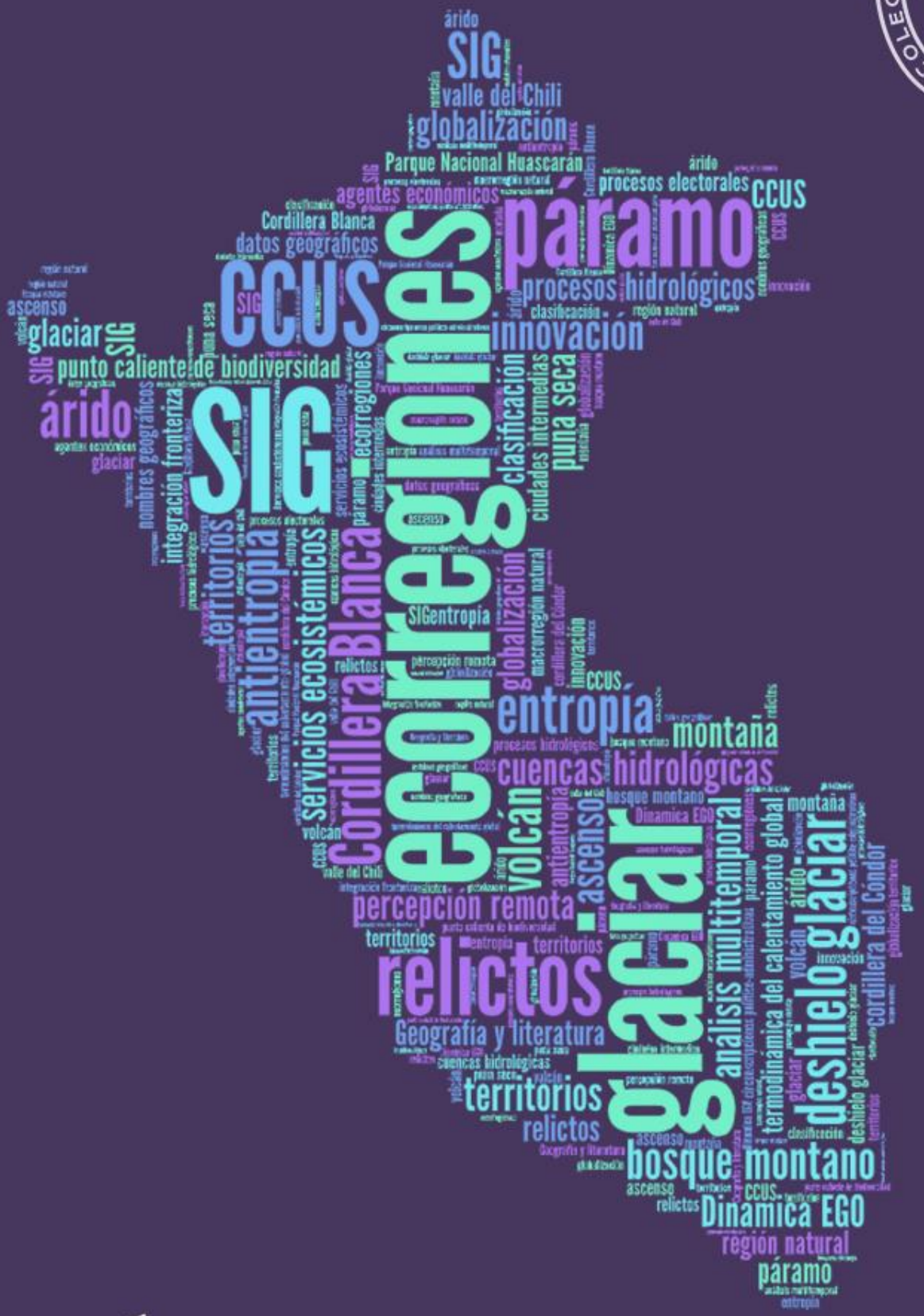
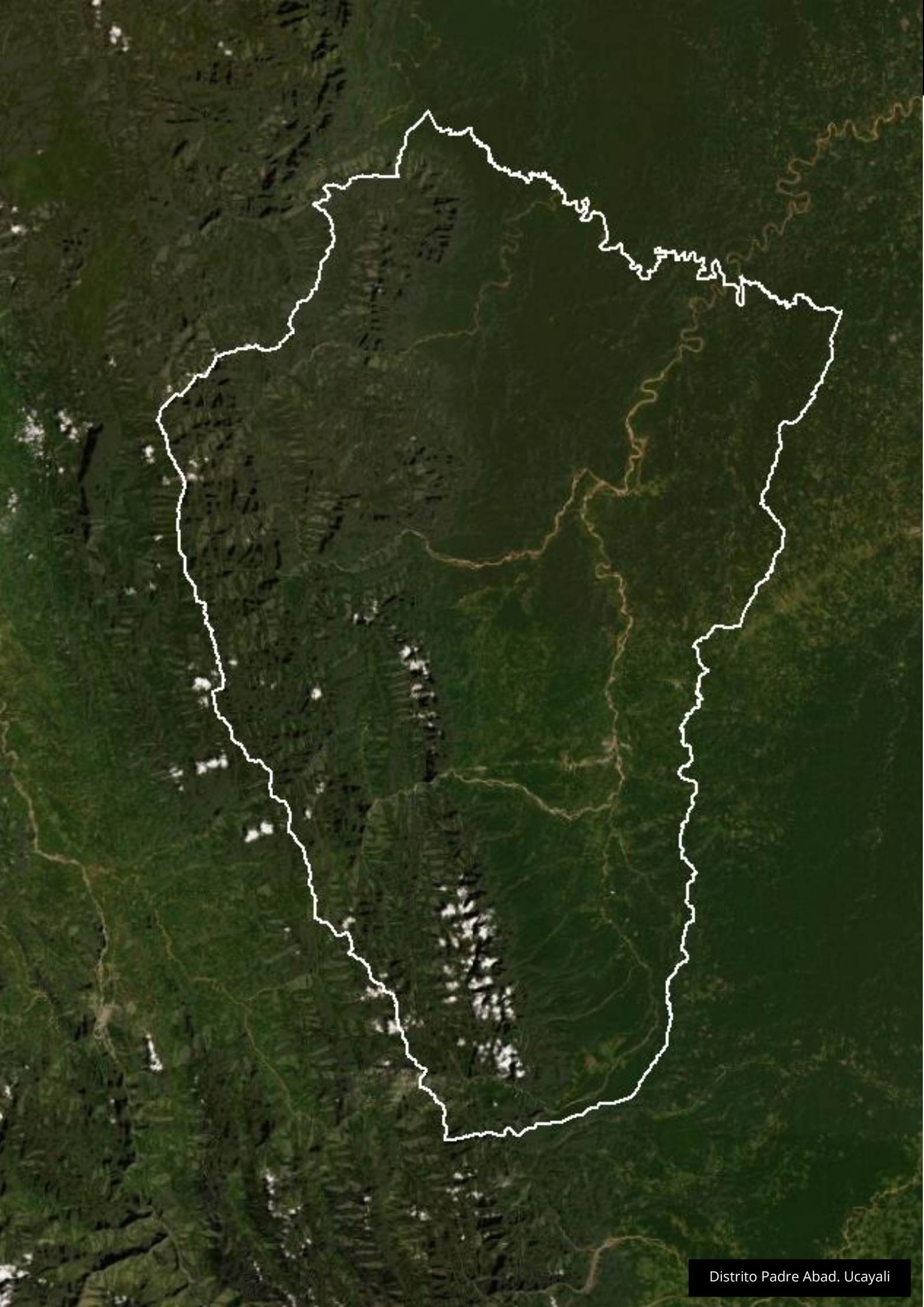


Boletín 3

ISSN 2411-6890



Distrito Padre Abad. Ucayali

DINAMICA EGO: UNA HERRAMIENTA GRATUITA PARA MODELAR Y BRINDAR SOPORTE EN EL ANÁLISIS DE CCUS

Victoria Espinoza-Mendoza

RESUMEN

El modelamiento de cambio en la cobertura/uso de suelo (CCUS) ha ido ganando terreno en las últimas décadas surgiendo diversas herramientas de modelamiento espacial que han facilitado procesos y han apoyado el análisis de los cambios multitemporales, así como en la generación de escenarios futuros de cambio. Una de las herramientas que facilita estos procesos es *Dinamica EGO*, un software gratuito desarrollado en Brasil, el cual cuenta con amplias ventajas en la identificación de impulsores de cambio, cálculos de tasas de transición, así como en la simulación de escenarios a futuro para monitorear las trayectorias de los cambios. En el presente artículo se presenta el desarrollo de un modelo de CCUS utilizando *Dinamica EGO*, explicando los principales conceptos empleados tomando ejemplos de literatura científica y de investigaciones realizadas por la autora.

PALABRAS CLAVES: *modelamiento espacial, Dinamica EGO, CCUS.*

DATOS DEL AUTORA

Geógrafa de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos con un Master of Science en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza – CATIE en Costa Rica.

vicempe@gmail.com

© Este artículo es de acceso abierto sujeto a la licencia Reconocimiento 4.0 Internacional de *Creative Commons*. No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas. Para más información, visite: **https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/**

ABSTRACT

Modeling cover change/land use, has been gaining ground in recent decades, emerging several tools of spatial modeling that have facilitated processes and supported by the analysis of multi-temporal changes, as well as the generation of future scenarios of change. One tool that facilitates these processes is Dinamica EGO, free software developed in Brazil, which has many advantages identifying drivers of change; calculate transition rates as well as the simulation of future scenarios to monitoring paths changes. In this article will be developed a model of CCUS by Dinamica EGO, explaining the main concepts used, taking examples of scientific literature and research by the author.

KEYWORDS: *Spatial modeling, Dinamica EGO, CCUS.*

© This article is of open access to the public and subject to the Creative Commons Attribution Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. The commercial use of this original work and the production of derived works from this article is not allowed. For more information, please visit: **https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/**

I. INTRODUCCIÓN

El cambio en la cobertura/uso de suelo (CCUS) es uno de los componentes más importantes del cambio global causado principalmente por el rápido crecimiento de la población humana y las altas tasas de consumo de recursos (Vitousek 1994; Sala et al. 2000). Actividades como el pastoreo o la agricultura modifican la estructura y el funcionamiento del ecosistema (Chapin Iii et al. 2000; Cabido et al. 2005), afectando la provisión de servicios ecosistémicos y por ende la capacidad de estos sistemas de satisfacer necesidades humanas, las cuales cada vez son más crecientes (Vitousek et al. 1997; Romijn et al. 2015).

Especificar las trayectorias de cambio de uso de suelo es esencial para comprender sus impactos sobre el paisaje (Peña 2007). Las investigaciones en el ámbito de CCUS se han enfocado en mejorar los sistemas de monitoreo, análisis y validación de los procesos de cambio y de transiciones (por ejemplo, transiciones de pastizales a cultivos o plantaciones forestales a cultivos) (Johnson y Zuleta 2013).

Uno de los métodos utilizados para evaluar el impacto que poseen los impulsores de cambio sobre los CCUS es el modelamiento espacial (Veldkamp y Lambin 2001). Esto permite entender y prevenir los efectos adversos de los CCUS (Vega et al. 2014), mediante el desarrollo de modelos para la generación de escenarios futuros, enfocándose en análisis multitemporales (Turner et al. 1994; Geist y Lambin 2002). Los análisis multitemporales permiten detectar cambios entre distintas fechas de referencia con la finalidad de mostrar las consecuencias de la acción humana sobre el medio (Ruiz et al. 2014).

Con el advenimiento de las nuevas tecnologías en las últimas décadas, diversas herramientas han sido desarrolladas para facilitar el análisis de los procesos acontecidos sobre el paisaje, en especial los CCUS. Estas herramientas están centradas en las fases de calibración, validación y en los avances temáticos extraídos de su utilización (Olmedo et al. 2010).

Analizar el proceso de modelación de CCUS implica tres pasos principales: (a) detección e interpretación cartográfica y digital del cambio, (b) análisis de los patrones de cambio y (c) análisis de la causalidad del cambio (Bocco et al. 2001). Sin embargo, no existe un único enfoque que determine o explique los CCUS, elegir un modelo depende de los objetivos de la investigación, llegando a utilizar más de uno si fuese necesario (Verburg et al. 2006).

Una de las herramientas que ha cobrado importancia debido a su flexibilidad, gratuidad y gran capacidad para modelar procesos complejos de una manera sencilla es Dinamica EGO. Esta herramienta fue desarrollada en la Universidad Federal de Minas Gerais en Brasil[1] (Soares-Filho et al. 2002; Soares-Filho et al. 2009) y se aplicó en estudios de modelación en CCUS, permitiendo el desarrollo de escenarios futuros de cambio (Rodrigues et al. 2007). También ha sido utilizada para análisis en diferentes países como Brasil, México, Panamá, Costa Rica, China, Bolivia y Colombia.

En el presente artículo se pretende mostrar las características y ventajas que posee Dinamica EGO como una herramienta innovadora en los análisis de CCUS, tomando como base investigaciones realizadas por la autora y referencias de otros investigadores. Lo que demuestra la gran capacidad del software para manejar datos complejos y obtener buenos resultados en la identificación de impulsores de cambio, tasas de cambio, así como la generación de escenarios futuros.

[1] Disponible en: < http://csr.ufmg.br/dinamica/>

II. MODELAMIENTO DE CCUS

Tal como lo indican Sandoval y Oyarzum (2004), la modelación estadística-espacial del CCUS se deriva de la combinación y el uso de técnicas cartográficas, sistemas de información geográfica y modelos estadísticos multivariantes. Los esfuerzos por modelar los procesos de cambio responden básicamente a tres preguntas clave que son abordadas en estudios de esta índole. Estas preguntas son *¿por qué ocurre el cambio?, ¿dónde ocurre el cambio? y ¿cuándo ocurre el cambio?*

Por otro, lado Lambin (1994) indica tres tipos de modelos para explicar los CCUS: empíricos, algorítmicos y sistémicos. Los modelos empíricos imitan las relaciones existentes entre las variables que explican el cambio de uso, asumiendo que estas continuarán de esta misma forma en el futuro. En los modelos algorítmicos, los procesos individuales de un sistema son descritos por ecuaciones simples bajo principios científicos. Finalmente, los modelos sistémicos están enfocados en explicar el funcionamiento e interacción de todos los componentes de un ecosistema.

Todos los modelos trabajan en base a comparaciones de dos o más mapas de cobertura/uso de suelo con fechas diferentes, a través de los cuales se estiman los patrones y procesos de cambio, en base a variables explicativas (Mas et al. 2011; Padilla et al. 2015). En la actualidad existen diversos paquetes de modelación con funciones, herramientas, enfoques y metodologías diferentes para propósitos variados. Entre ellas destacan:

- CA_MARKOV en IDRISI (Eastman 2009; Eastman 2012)
- CLUE-S (Verburg y Overmars 2009)
- DINAMICA EGO (Soares-Filho et al. 2002; Soares-Filho et al. 2009)
- LAND CHANGE MODELER (LCM), disponible en IDRISI y como extensión en Arc Gis para la versión 10.2 (Eastman 2012)

III. DINAMICA EGO: UNA POTENTE HERRAMIENTA DE MODELACIÓN

La herramienta Dinamica EGO, cuyas siglas hacen referencia al concepto de *"Environment for Geoprocessing Objects"* (Entorno para Objetos de Geoprocesamiento) (Padilla et al. 2015) fue desarrollada en la Universidad Federal de Minas Gerais en Brasil (Soares-Filho et al. 2002; Soares-Filho et al. 2009), y ha sido aplicada en estudios de modelado de procesos de deforestación tropical y crecimiento urbano. Es bastante flexible y permite el desarrollo de modelos sofisticados de CCUS y desarrollo de escenarios futuros de cambio (Rodrigues et al. 2007). Esta herramienta opera sobre una plataforma basada en lenguaje C++ y Java. Dinamica EGO representa el paisaje como un arreglo regular de celdas que interactúan dentro de cierta vecindad y en donde el estado de cada celda depende de los estados previos de las celdas dentro de un mismo vecindario (Soares-Filho et al. 2002; Padilla et al. 2015).

En Dinamica EGO, no solo podemos realizar análisis multitemporales de CCUS, también podemos trabajar con análisis multicriterio que se aplica para evaluaciones de impacto ambiental, planeamiento urbano o regional, con métricas de paisaje o Landscape metrics, para evaluar la calidad de hábitats cuando la disponibilidad de inventarios de biodiversidad o de datos ecológicos es limitada o de muy difícil obtención. También podemos desarrollar modelos de proyección econométricos, los cuales predicen las tasas de deforestación basándose en el contexto

socioeconómico de municipios, así como el desarrollo de modelos para monitorear emisiones de carbono (Soares-Filho et al. 2009).

Mas y Sandoval (2011) destacan algunas de las bondades del software, desde un punto de vista técnico, indicando que Dinamica EGO posee una herramienta para optimizar la transformación de variables continuas en categóricas. Señalan que los pesos de evidencia que representan la influencia de cada una de las variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición de cobertura y uso de suelo (Rodrigues et al. 2007) se calculan de manera independiente para cada variable, permitiendo elaborar funciones muy complejas de manera sencilla.

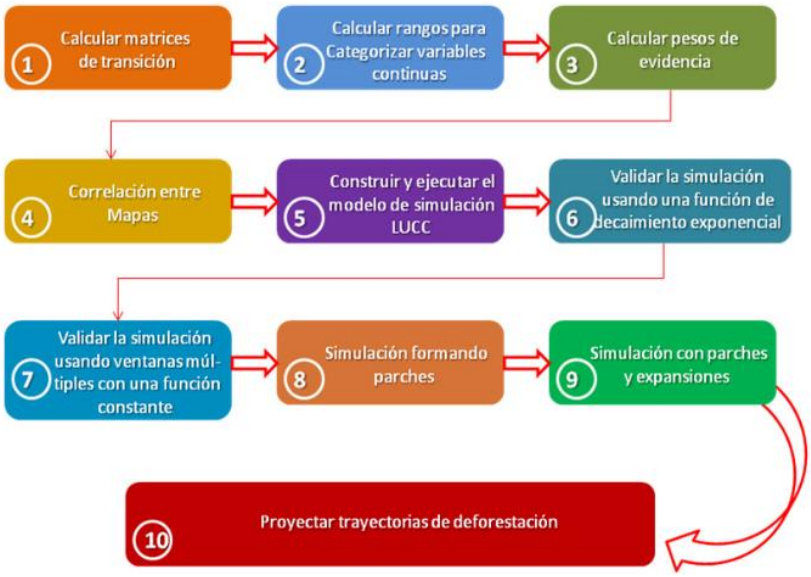
Existen diversas investigaciones que han utilizado Dinamica EGO con la finalidad de proveer análisis históricos de los CCUS y generar escenarios futuros de deforestación y degradación de los bosques a diferentes niveles. Imbach. et al. (2013), realizó un estudio en el que analizó el cambio de uso de la tierra para los períodos 1992, 2000 y 2008, formulando escenarios de deforestación futura en los bosques de Panamá. Osorio et al. (2014), modela y analiza procesos de deforestación en México, para un período comprendido entre 1986 y 2011, detectando que el incremento de los pastizales inducidos fue la principal causa de la pérdida de las cubiertas forestales. Padilla et al. (2015) analiza los cambios de uso de suelo utilizando los autómatas celulares de Dinámica EGO en una región de Ecuador, trabajando en el período comprendido entre 1965 y 2001 generando escenarios hacia el 2020, obteniendo como resultado la posible desaparición del bosque primario en más del 90 % de su cobertura original. Espinoza-Mendoza (2016b) utiliza Dinamica EGO para obtener las tasas de cambio de diferentes coberturas y modelar espacialmente los CCUS con el fin de identificar los principales impulsores de cambio y generar escenarios futuros hacia el 2030 en la región Central y Caribe de Nicaragua.

IV.- ¿CÓMO FUNCIONA DINAMICA EGO?

El modelamiento de CCUS en Dinamica EGO se desarrolla a través de una secuencia de diez pasos consecutivos (Figura 1). Los modelos son expresados a través de functors, formando diagramas de flujo (Figura 2) para producir un resultado que represente la solución a una pregunta sobre un determinado tema (Soares-Filho et al. 2009).

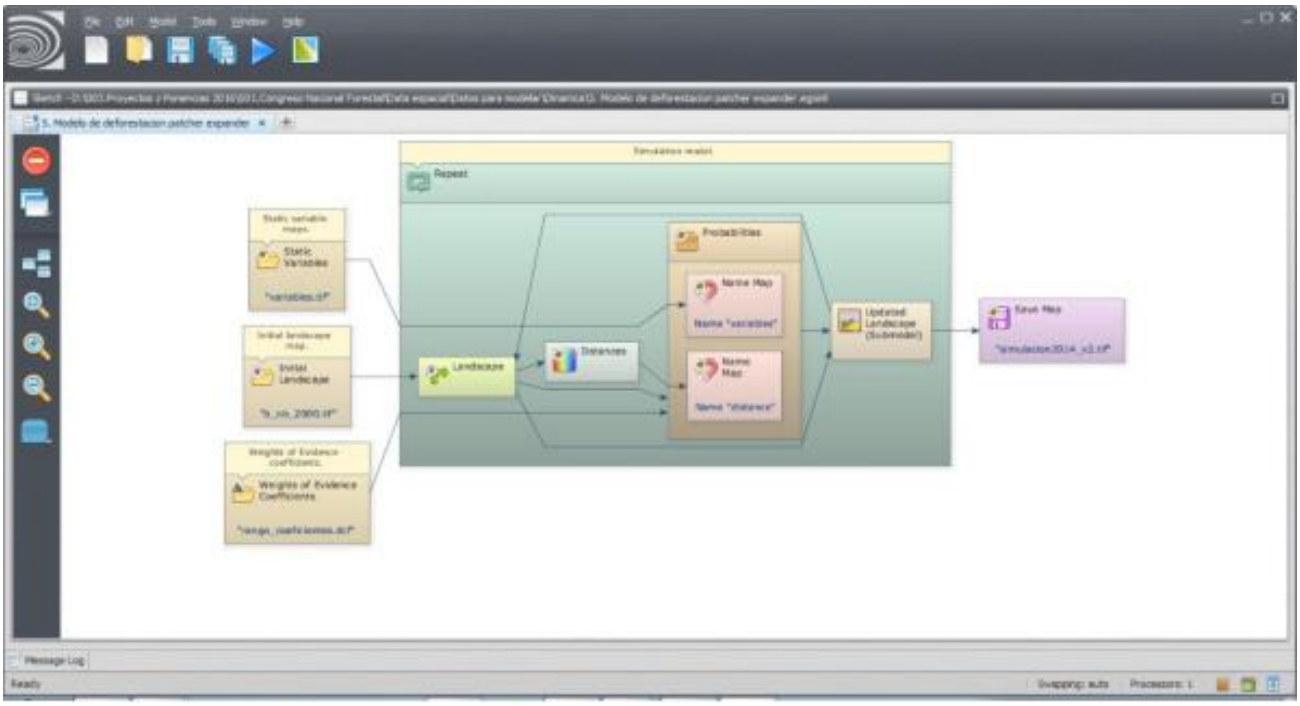
FIGURA 1.

Secuencia de pasos utilizados por Dinamica EGO



A simple vista, el software puede ser algo complicado de manejar debido a la gran cantidad de cajas, flechas y parámetros. Pero, en realidad su manejo es bastante sencillo, permitiendo representar modelos bastante complejos de manera simple, rápida y con muy buenos resultados.

FIGURA 2.
Interface del software Dinámica EGO



Fuente: captura de pantalla realizada por la autora desde interface.

Para llevar a cabo la modelación se deben definir las variables (posibles impulsores de cambio) y los mapas de cobertura de suelo con diferentes fechas. Las variables deberán ser elegidas en base a criterios basados en referencias bibliográficas, opiniones de expertos, dependiendo del tipo de estudio que se quiere realizar. Para algunos estudios las variables biofísicas presentarán mayor disponibilidad de acceso que las variables socioeconómicas, debido a la dificultad de representar espacialmente algunas de estas últimas. El número de variables que se incluyan en el modelo depende de cada investigador, no existe un límite, pero es aconsejable tomar en cuenta que el análisis para modelos con más de veinte variables tomará mucho más tiempo y los requerimientos del sistema serán mayores.

La preparación de las variables y de los mapas, incluye la generación de información ráster homologada, es decir, cada variable y mapa plasmado en un raster deberá contar con el mismo número de filas, columnas, píxeles y sistemas de proyección. Dinámica EGO, maneja datos en diferentes formatos, incluyendo raster (ER Mapper, GeoTiff, ASCII), tablas en Excel y matrices. Se debe tener en cuenta que el software, utiliza una clasificación numérica que identifica la clase de mapa de cobertura mediante un número, tal como se muestra en el siguiente cuadro:

CUADRO 1.
Clasificación numérica utilizada por Dinamica EGO

Número que identifica la clase	Clase de cobertura
1	Bosque
2	Pasto
3	Tierras agrícolas
4	Cuerpos de agua
5	Áreas urbanas

Contar con insumos (variables y mapas) definidos y homologados permite generar un archivo que contiene su futura inclusión en el modelo; este archivo se denomina Cubo Raster o *"cubo de mapas".* Este archivo es una serie de mapas estáticos, denominados de esta forma debido a que sus atributos no cambian a lo largo de las iteraciones del modelo (Soares-Filho et al. 2002). Una vez definido el Cubo Raster, explicaremos cómo trabaja el software Dinamica EGO en los diez pasos señalados anteriormente.

1.- CALCULANDO LAS MATRICES DE TRANSICIÓN (PASO 1)

La matriz de transición describe los cambios de un sistema a través de períodos discretos de tiempo, en los cuales el valor de cualquier variable en un período dado (por ejemplo hectáreas de bosque en el año 2012) es la suma de porcentajes fijos del valor de las variables en el periodo previo (Rodrígues et al. 2007). Las matrices de cambio con las que trabaja Dinamica EGO pueden ser simples o múltiples. Las matrices de cambio simples están referidas a tasas de transición para un determinado período de tiempo (por ejemplo 12 años), mientras que las matrices de cambio múltiples, se refieren a tasas anuales de cambio. Calcular estas matrices es importante porque serán tomadas en cuenta para la validación y la generación de escenarios futuros.

2.- CÁLCULO DE RANGOS PARA CATEGORIZAR VARIABLES Y CÁLCULO DE COEFICIENTES DE PESOS DE EVIDENCIA (PASOS 2 Y 3)

Dinamica EGO trabaja con el método geoestadístico de los pesos de evidencia, con el fin de obtener las probabilidades de transición y luego los pesos de las variables que poseen mayor influencia en los cambios (Soares- Filho et al. 2009). Este es uno de los pasos más sustanciales e interesantes del software y a su vez el que toma más tiempo para interpretar, debido a que categoriza cada una de las variables ponderando mediante un valor los pesos que cada una de ellas tiene sobre una determinada transición.

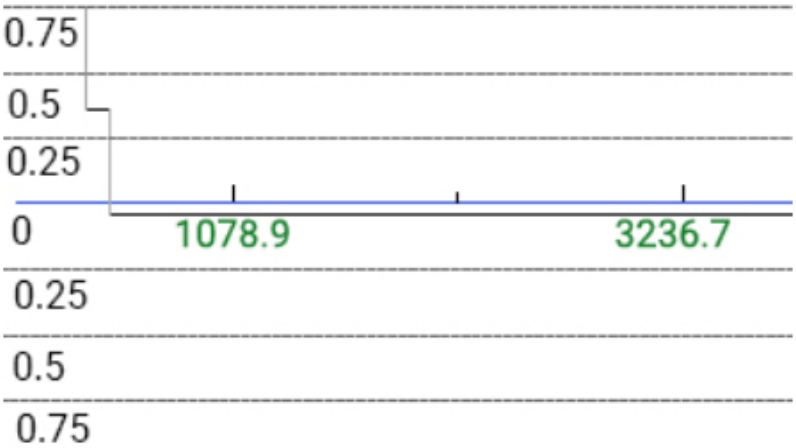
A partir de este punto tendremos la capacidad de definir si una variable será significativa o no en el modelamiento de CCUS. Esta significancia será obtenida analizando los gráficos de líneas de tendencia generados por el software para cada transición (Figura 3). Las variables que obtengan

valores negativos o iguales a 0 no tienen ningún peso en la transición. Mientras que las variables con valores mayores a 0 si influyen en la transición de una cobertura a otra.

En la Figura 3, se muestra un gráfico de líneas de tendencia que arroja Dinamica EGO para la transición de bosque a pastizal. Ahí, el eje X, está definido por la distancia en metros a una determinada variable, en este caso a centros poblados, mientras que el eje Y está referido al peso o valor que posee dicha variable en la transición.

En el ejemplo de Espinoza-Mendoza (2016b), la línea de tendencia inicia con un valor mayor a 0.75 (eje Y) a una distancia entre 0 a 250 m (eje X) de los centros poblados y va disminuyendo mientras la distancia se hace mayor. Esto indica que los centros poblados más cercanos a las áreas de transición de bosque a pastizales son los que han tenido mayor influencia para que ocurra esta transición. Un gráfico similar es creado e interpretado de la misma manera para cada una de las variables incluidas en el modelo, las cuales pueden ser distancia a cuerpos de agua, distancia a áreas naturales protegidas, tipos de suelo, nivel de erosión, nivel de pobreza, riesgos a inundaciones, entre otras.

FIGURA 3:
Gráfico de líneas tendenciales



Fuente: captura de pantalla realizada por la autora desde interface

3.- ANÁLISIS DE CORRELACIÓN (PASO 4)

El análisis de correlación se realiza con el fin de comprobar el supuesto de independencia de las variables. Es necesario que las variables incluidas en el modelo sean independientes espacialmente, para lo cual Dinámica EGO incluye en el modelo el índice de Cramer (Bonham-Carter 1994; Soares-Filho et al. 2009) para verificar esta independencia. Este índice opera en valores reales entre 0 y 1. Mientras las variables comparadas se encuentren más cercanas a 1 poseen mayor correlación y son menos independientes, por lo que una de ellas debe ser eliminada del proceso de modelación. No se indica un límite de tolerancia del índice de Cramer, pero existen algunos estudios que consideran el valor de 0.50 (Macedo et al. 2013; Rosseti. et al. 2013; Tramontina. et al. 2015).

4.- SIMULACIÓN PREVIA MEDIANTE EL PATCHER Y EL EXPANDER (PASO 5)

Esta es otra de las características fundamentales del software que simula un mapa ya existente denominado “mapa real observado” con la finalidad de compararlo con el mapa simulado para

determinar la capacidad del modelo de predecir los cambios de tal forma que sea lo más parecido posible a la realidad. Dinámica EGO trabaja con modelos de autómatas celulares (Ramírez-Mejía et al. 2011), que son definidos como sistemas espaciales dinámicos muy simples capaces de demostrar comportamientos complejos en los que el estado de cada celda (o píxel) va a depender de los estados previos de las celdas vecinas (Aguilera Benavente 2006).

Los autómatas celulares denominados *expander* y *patcher* se componen de un mecanismo de asignación responsable de la identificación de celdas con mayores probabilidades de cambios. El *expander* se dedica a expandir o contraer parches de una clase de cobertura de suelo ya existente, mientras que el *parcher* está diseñado para generar o formar nuevos parches de una cobertura de suelo través de un mecanismo *"semilla".* Cabe indicar que sí es posible controlar el tamaño promedio, la varianza y la isometría (parámetros incluidos en el modelo) de los *patcher* (Mas et al. 2012); estas variaciones pueden realizarse basándose en un criterio experto.

5.- VALIDACIÓN DEL MODELO (PASOS 6 Y 7)

Con base en la simulación previa del modelo se lleva a cabo una validación del mapa simulado con el mapa real observado. Esta validación utiliza índices de similitud difusa, los cuales permiten comparar los mapas de cambio de uso de suelo simulado y observado, tomando en cuenta la coincidencia espacial bajo distintos niveles de tolerancia (diversos tamaños de ventana o píxeles). Estos índices se enfocan en las áreas de cambio teniendo en cuenta no solo la clasificación de un píxel, sino del vecindario (píxeles vecinos) en el que se encuentra (Mas et al. 2011; González et al. 2014).

La validación del modelo se lleva a cabo utilizando dos tipos de función de decaimiento. La primera es la prueba de la función de decaimiento exponencial, aplicada por defecto a un tamaño de ventana de 11 píxeles (330m x 330 m^2). La segunda prueba de validación trabaja con la función constante del decaimiento con ventanas múltiples generando comparaciones desde una ventana de tamaño de un píxel (30*30 m o 900 m^2 en la realidad), lo que se incrementa de dos en dos hasta 15 píxeles (450*450m o 202, 500 m^2 en la realidad).

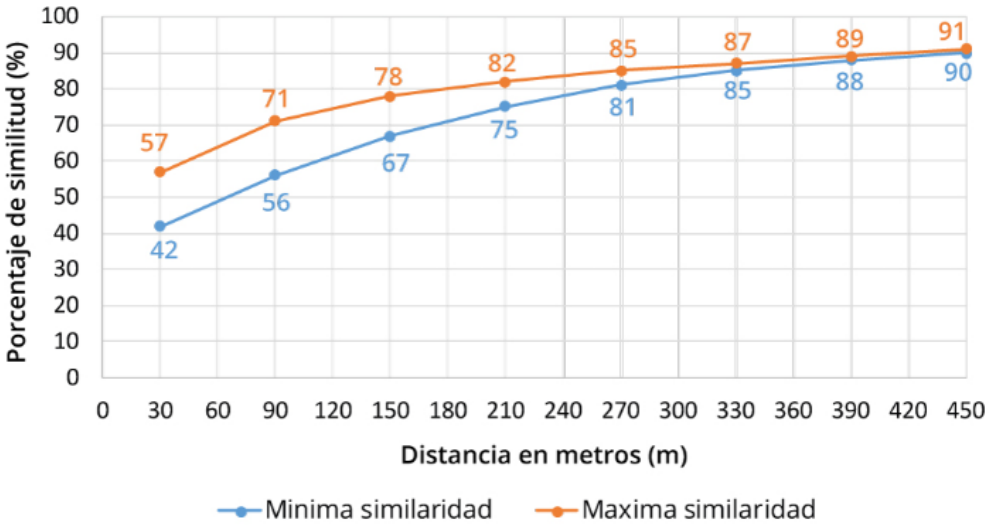
Lo provechoso del tema de validación en Dinamica EGO es que tendremos la capacidad de conocer el desempeño de nuestro modelo comparando lo simulado con lo real de manera sencilla. Por ejemplo, la Figura 4 ilustra como el software valida los resultados del modelo. Los conceptos de mínima similaridad están referidos a la comparación que hace el software entre el mapa 1 versus el mapa 2, mientras que la máxima similaridad, es la comparación del mapa 2 versus el mapa 1.

En nuestro caso, el ejemplo mostrado corresponde a una comparación entre un mapa simulado del año 2014 y un mapa real observado ese mismo año en una región de Nicaragua (Espinoza-Mendoza 2016b). El eje X representa la distancia en metros y el eje Y el porcentaje de similitud. En un área de 30*30 metros o 0.09 ha (tamaño de ventana de 1 píxel), la similitud fue entre 42 a 57%, mientras que en un área de 450*450 metros o 20.25 ha (tamaño de ventana de 15 pixeles), la similitud fue 90-91%.

Piontekowski et al. (2012) sugiere que la obtención de valores por encima de un 50 % de similitud entre los mapas comparados sería satisfactoria para la validación del modelo.

[2] Tomando en cuenta que cada píxel tiene el valor de 30 m.

FIGURA 4:
Gráfico de validación de la simulación en base al mapa real observado
Validación de ventanas múltiples



Fuente: elaborado por la autora.

6.- EJECUCIÓN DEL MODELO Y PROYECCIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE DEFORESTACIÓN (PASOS 8, 9 Y 10) Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de calibrar y validar el modelo se generan los escenarios de deforestación con la finalidad de entender y anticipar los cambios para mejorar la toma de decisiones (Cuevas 2008). En el modelo se incluyen las variables insumo, el mapa a partir del cual se proyectará el modelo, las matrices de transición del periodo estudiado y los coeficientes de pesos de evidencia de las variables. Las figuras 5 y 6 muestran resultados obtenidos en los estudios de Espinoza-Mendoza (2016b) desarrollado en la región Centro y Caribe de Nicaragua y Espinoza-Mendoza (2016a) desarrollado en el distrito de Padre Abad, Perú ambos utilizando Dinamica EGO.

A partir de los datos arrojados por Dinámica EGO (Figura 5) en el estudio de Espinoza-Mendoza (2016b) en Nicaragua se pudieron analizar las trayectorias de los cambios y los principales causantes de estos. Según los resultados se podría afirmar que hay zonas que indican una regeneración del bosque luego de haber sido degradadas por actividades agrícolas o agropecuarias. Además, se identificaron a los impulsores de cambio relacionados con la pérdida de coberturas, los cuales fueron distancia a centros poblados, distancia a vías, tipo de suelo, erosión y elevación. Mientras que los impulsores que favorecieron la recuperación de coberturas como el bosque fueron áreas con presencia de cultivos de café, cacao y algunos tipos de suelo.

Es interesante subrayar como Dinámica EGO define al tipo de suelo en el estudio de Espinoza-Mendoza (2016b) como un factor importante en la pérdida/ganancia de la cobertura forestal y cómo se puede llegar a explicar de manera simple el porqué de estos resultados que son acordes a la realidad de la zona.

En el área de estudio están presentes cuatro tipos de suelo: alfisol, vertisol, molisol y ultisol. Los alfisoles son suelos considerados como uno de los mejores para actividades agropecuarias, en el estudio obtuvieron fuertes pesos de evidencia (0.89) en la transición de bosque a pastos, explicando así el porqué de su influencia sobre la pérdida de la cobertura de bosque.

Por otro lado, los ultisoles y vertisoles estuvieron relacionados con el abandono de cultivos agrícolas, debido a su baja calidad de aprovechamiento en actividades agrícolas, apoyando en la regeneración de áreas de bosque. Mientras que los molisoles, fueron considerados como indicadores de pérdida de la cobertura de bosque, debido a que poseen una alta fertilidad siendo idóneos para el cultivo de productos como maíz y frijol (cultivos básicos en la alimentación nicaragüense).

FIGURA 5.
Mapas reales observados (2014) y mapas simulados (2030) para la región central y Caribe nicaragüense utilizando Dinamica EGO

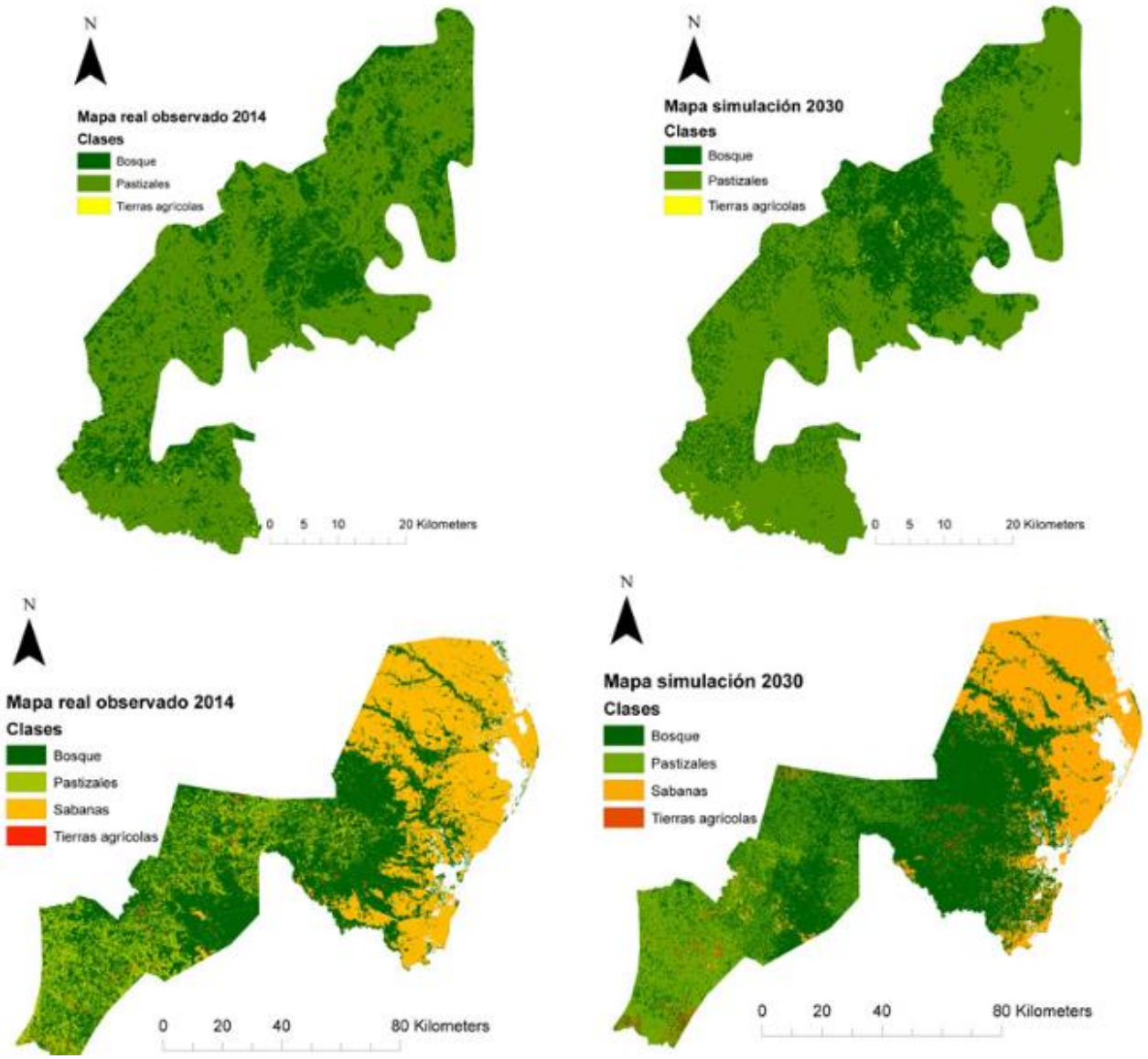
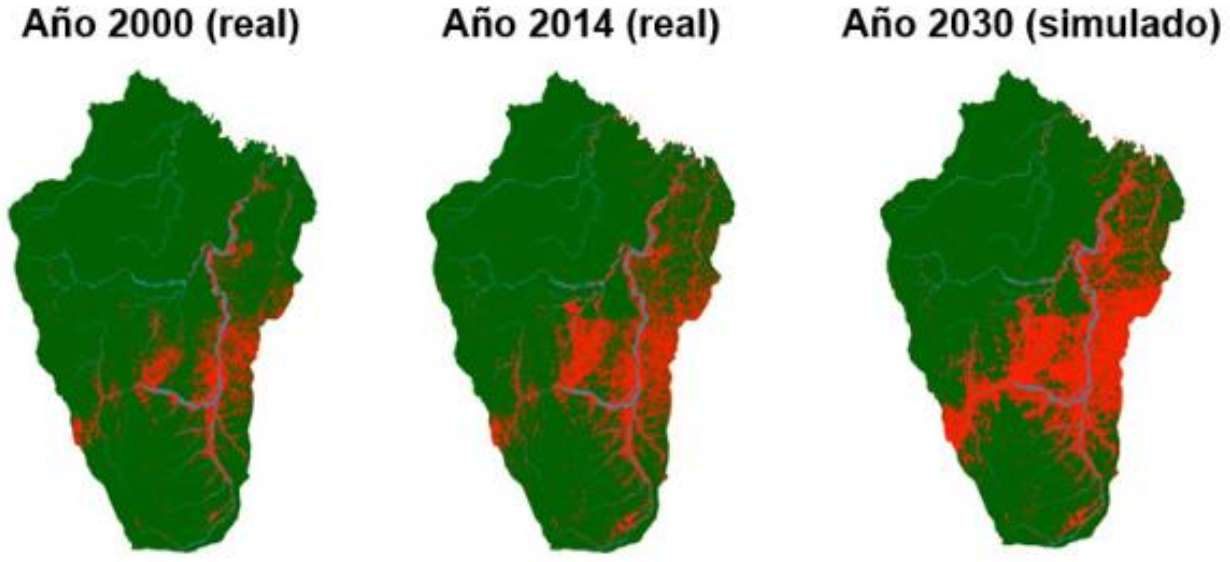


FIGURA 6:
Mapas de Bosque y No Bosques del distrito de Padre Abad (Ucayali, Perú) para los años 2000, 2014 (mapas reales observados) y 2030 (mapa simulado) utilizando Dinámica EGO

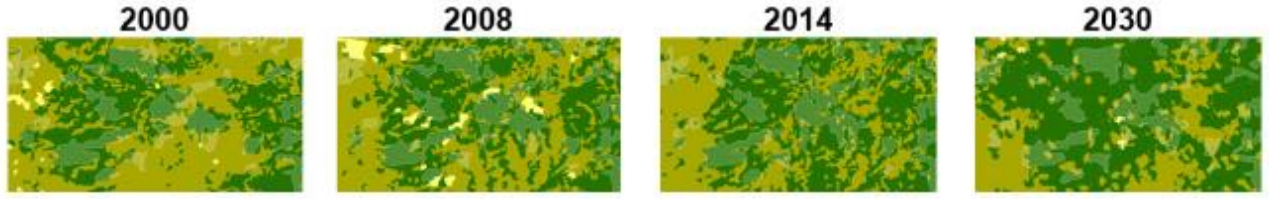
Las áreas de color verde representan el bosque y las áreas de color rojo representan las de no bosque.



Dinamica EGO fue muy útil para detectar áreas donde existe recuperación del bosque, influenciada por la presencia antrópica en la zona central de Nicaragua, en donde se cultiva café bajo sombra (Figura 7). La variable elevación también jugó un papel clave en la regeneración del bosque, las zonas de menor elevación estuvieron relacionadas directamente a las áreas cultivadas con café, y fue justamente ahí en donde aumento el área boscosa.

FIGURA 7.
Áreas cultivadas con café bajo sombra

El color verde oscuro representa las áreas de bosque, el color verde claro señala las áreas de pastizales, el amarillo muestra las áreas agrícolas y los polígonos grises representan las áreas cultivadas con café.



Dinamica EGO también fue capaz de apoyar en la detección de grandes pérdidas de bosque y evidenciar las alarmantes proyecciones -nada favorables- en áreas naturales protegidas (Figuras 8, 9 y 10), incluyendo parte de la única reserva de biósfera presente en Centroamérica (Reserva de Biósfera de Bosawas).

FIGURA 8.
Pérdida real de bosque en el Parque Nacional Cerro Saslaya (Nicaragua) y proyección de pérdida hacia el 2030

El color verde oscuro representa a las áreas de bosque, el color amarillo las tierras agrícolas y el color verde claro áreas de pastizales.

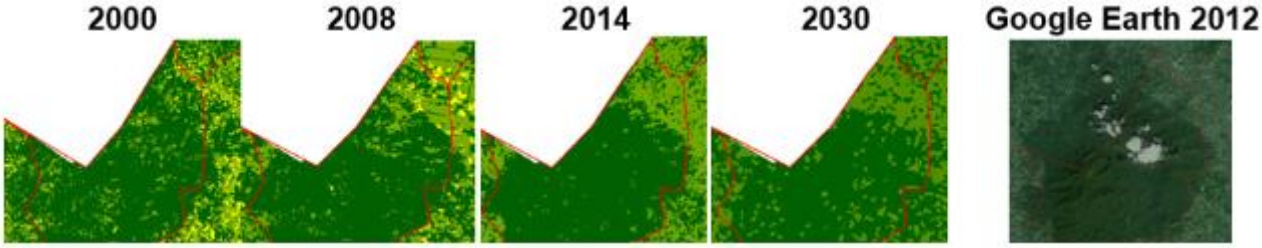


FIGURA 9.
Pérdida real de bosque en un área de la Reserva Natural Cerro Banacruz (Nicaragua) y proyección de pérdida hacia el 2030

El color verde oscuro representa las áreas de bosque y el color verde claro áreas de pastizales.

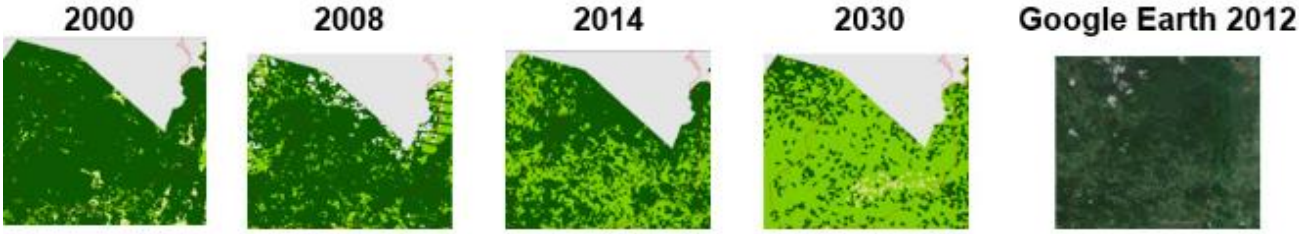
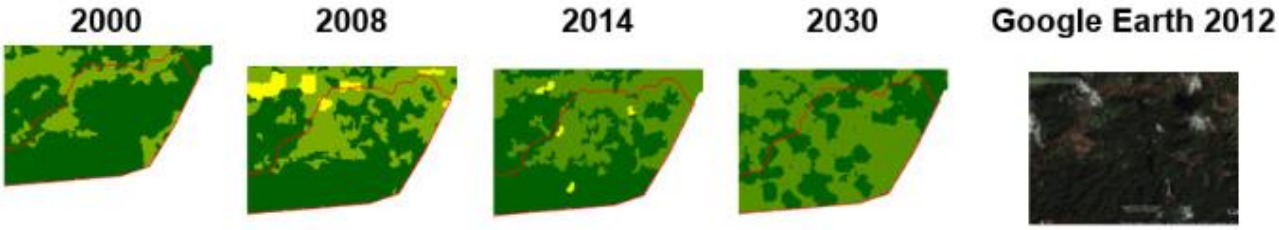


FIGURA 10.
Pérdida real de bosque en un área del cerro Guabule en la Reserva de Biósfera Bosawas (Nicaragua) y proyección de pérdida hacia el 2030

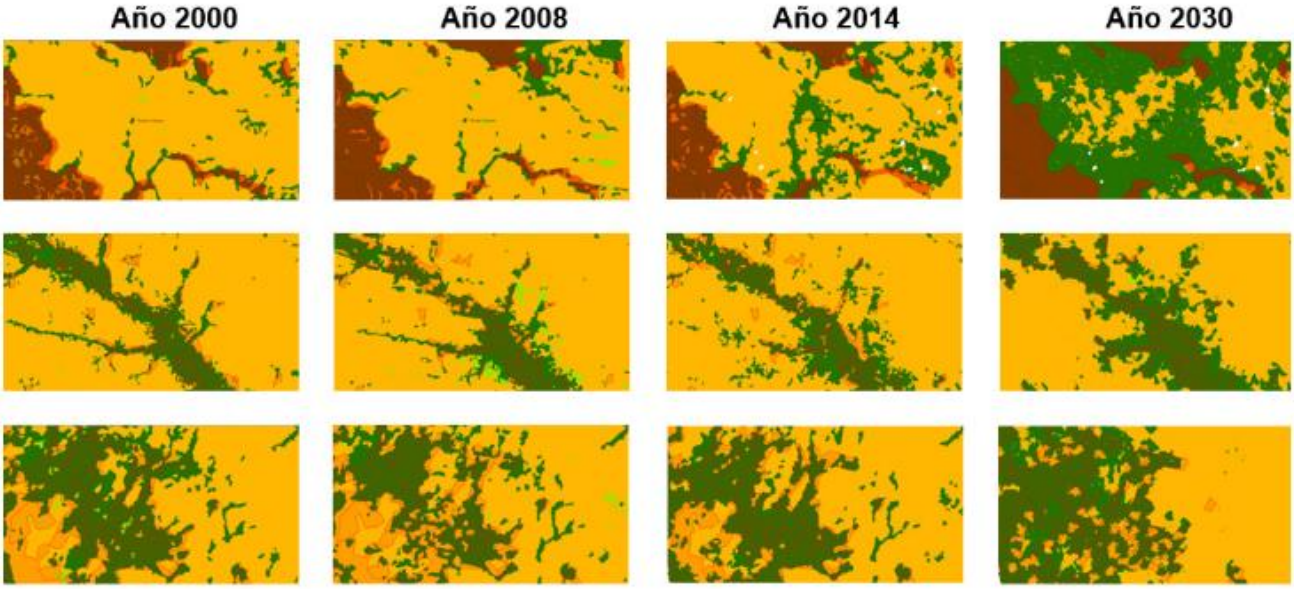
El color verde oscuro representa a las áreas de bosque, el color amarillo a las tierras agrícolas y el color verde claro a las áreas de pastizales.



Finalmente, Dinamica EGO ayudó en la detección de procesos de regeneración natural del bosque luego de una perturbación natural como el Huracán Félix, que azotó la Costa Caribe de Nicaragua el 2007 con una categoría 5 (Figura 11).

FIGURA 11.
Procesos de regeneración en el bosque afectado por el huracán Félix en el municipio de Puerto Cabezas, Nicaragua

El color verde oscuro representa a las áreas de bosque, el color amarillo a las áreas de sabanas y el color rojo representa a las áreas afectadas por el huracán.



V.- CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Dinámica EGO es un software gratuito de modelamiento espacial que simula exitosamente proyecciones hacia futuro, de manera sencilla e incluyendo tasas anuales de transición de cambio y los diversos pesos que posee cada una de las variables incluidas en la modelación.

El uso de Dinámica EGO para modelar cambios en la cobertura de suelo se vuelve relevante entre otros puntos porque incluye un valor numérico de la influencia que las variables poseen sobre las transiciones de cobertura, esto muestra de forma clara y sencilla los valores para su posterior interpretación. Además, una de las cualidades del programa es su gran flexibilidad, permitiendo incorporar el conocimiento experto, según los intereses del usuario y pudiendo modificar los parámetros en base a sus conocimientos.

Dinámica EGO, posee una gran variedad de herramientas para elaborar modelos mucho más complejos y sofisticados, ofreciéndole al usuario la posibilidad de crear modelos acordes a sus requerimientos. También brinda la posibilidad de trabajar en conjunto con una amplia gama de software tales como Fragstats, Arc GIS, Maxent y R.

Debemos tomar en cuenta que ningún software de modelamiento puede predecir exactamente lo que sucederá en un corto, mediano o largo plazo, pero sí puede ayudarnos a conocer las tendencias que podrían seguir los cambios bajo distintos escenarios.

Algunos de los datos mostrados en este artículo corresponden a los resultados de tesis de la autora para optar el grado de *Magister Scientiae* en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y

Enseñanza CATIE de Costa Rica. Esta tesis fue financiada por el fondo para investigaciones del CGIAR *Consortium Research* Centre a través del programa *Forests, Trees and Agroforestry* del ICRAF - World Agroforestry Centre y por la Cátedra de Ecología de CATIE.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera Benavente, F. 2006. *Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares.* Geofocus 6: 81-112.

Bocco, G.; Mendoza, M.; Masera, O.R. 2001. *La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación.* Investigaciones geográficas (44): 18-36.

Bonham-Carter, G. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS, Elsevier.* 398 p. (13).

Cabido, M.; Zak, M.R.; Cingolani, A.; Cáceres, D.; Díaz, S.; Oesterheld, M.; Aguiar, M.; Ghersa, C.; Paruelo, J. 2005. *Cambios en la cobertura de la vegetación del centro de Argentina ¿Factores directos o causas subyacentes? La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas,* Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires: 271-300.

Cuevas, G. 2008. *Aplicación de un modelo espacial para la elaboración de escenarios de uso/cobertura del suelo en la Huacana, Michoacán. Maestría en Geografía.* Morelia, Michoacán, Mexico., Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. División de estudios de postgrado.

Chapin III, F.S.; Zavaleta, E.S.; Eviner, V.T.; Naylor, R.L.; Vitousek, P.M.; Reynolds, H.L.; Hooper, D.U.; Lavorel, S.; Sala, O.E.; Hobbie, S.E. 2000. *Consequences of changing biodiversity.* Nature 405(6783): 234-242.

Eastman, J. 2012. IDRISI selva: guide to GIS and image processing

Eastman, J.R. 2009. IDRISI Taiga guide to GIS and image processing. Clark Labs Clark University, Worcester, MA.

Espinoza-Mendoza, V.E. 2016a. *Identificación de ecosistemas de bosque amenazados en el distrito de Padre Abad, utilizando modelos espaciales para el período 2001 – 2014 y simulaciones futuras al año 2030.* In Congreso Nacional Forestal (XII, Lima) 2016a. Universidad Nacional Agraria La Molina, UNALM. p.

Espinoza-Mendoza, V.E. 2016b. *Impulsores de cambio en el uso de suelo y almacenamiento de carbono sobre un gradiente de modificación humana de Paisajes en Nicaragua*. Magister Scientiae. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 170 p.

Geist, H.J.; Lambin, E.F. 2002. *Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations.* Bioscience 52(2): 143-150.

González, J.; Cubillos, A.; Arias, M.; Zapata, B. 2014. *Resultados de la simulación de la deforestación para el ajuste del nivel de referencia del área subnacional A8*. Bogotá, Colombia.

Imbach., P.; Robalino., J.; Brenes., C.; Zamora., J.C.; Cifuentes., M.; Sandoval., C.; Beardsley., M. 2013. *Análisis de cambio de uso de la tierra (1992–2008) y formulación de escenarios de deforestación futura de los bosques de Panamá Turrialba*, *Costa Rica,* CATIE. 41 p.

Johnson, B.G.; Zuleta, G.A. 2013. *Land-use land-cover change and ecosystem loss in the Espinal ecoregion, Argentina.* Agriculture, ecosystems & environment 181: 31-40.

Lambin, E.F. 1994. *Modelling deforestation processes*. FAO.

Macedo, R.; Almeida, C.; Santos, J.; Rudorff, B. 2013. *Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira*. Boletim de Ciências Geodésicas 19(2): 313-337.

Mas, J.-F.; Sandoval, A.F. 2011. *Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México.* GeoTrópico 5(1): 1-24.

Mas, J.-F.; Pérez-Vega, A.; Clarke, K.C. 2012. *Assessing simulated land use/cover maps using similarity and fragmentation indices.* Ecological Complexity 11: 38-45.

Mas, J.; Kolb, M.; Houet, T.; Paegelow, M.; Camacho Olmedo, M. 2011. *Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura/uso del suelo.*

Olmedo, M.T.C.; Melgarejo, E.M.; Paegelow, M. 2010. *Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio*. La información geográfica al servicio de los ciudadanos [Recurso electrónico]: de lo global a lo local 2010. Secretariado de Publicaciones. p. 658-678.

Osorio, L.; Caussel, J.; Mass, J.; Guerra, F.; Maass, M. 2014*. Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México.* Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía: 15. dx.doi. org/10.14350/rig.43853

Padilla, O.; Pérez, P.; Cruz, M.; Huilcamaigua, S.; Astudillo, S. 2015. *Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal.* Ciencias Espaciales 8(1): 310-326.

Peña, J. 2007. *Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos del suelo en la Marina Baixa* (Alicante). University of Alicante, Alicante, Spain. 539 pp. p.

Piontekowski, V.; da Silva, S.; Mendoza, E.; de Souza Costa, W.; Ribeiro, F.; Ribeiro, C. 2012. *Modelagem do desmatamento para o Estado do Acre utilizando o programa Dinamica EGO.* Simpósio de Geotecnologias no Pantanal 4: 1064-1075.

Ramírez-Mejía, D.; Cuevas, G.; Mendoza, E. 2011. *Escenarios de cambio de cobertura y uso del suelo en el Corredor Biológico Mesoamericano-México*.

Rodrigues, H.; Soares-Filho, B.; Costa, W. 2007. *Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais.* Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 13: 3089-3096.

Romijn, E.; Lantican, C.; Herold, M.; Lindquist, E.; Ochieng, R.; Wijaya, A.; Murdiyarso, D.; Verchot, L. 2015. *Assessing change in national forest monitoring capacities of 99 tropical countries.* Forest Ecology and Management 352: 109-123.

Rosseti., L.A.F.G.; Almeida., C.M.d.; Pinto., S.d.A.F. 2013. *Analise de mudancas no uso do solo urbano e rural com aplicacao de modelagem dinamica espacial.* In XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR (Foz do Iguazu, Paraná, Brazil.) 2013. INPE. p.

Ruiz, V.; Savé, R.; Herrera, A. 2014. *Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo en un área protegida de Nicaragua, Centroamérica.* Revista Ecosistemas 22(3): 117-123.

Sala, O.E.; Chapin, F.S.; Armesto, J.J.; Berlow, E.; Bloomfield, J.; Dirzo, R.; Huber-Sanwald, E.; Huenneke, L.F.; Jackson, R.B.; Kinzig, A. 2000. *Global biodiversity scenarios for the year 2100.* Science 287(5459): 1770-1774.

Sandoval, V.; Oyarzum, V. 2004. *Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo.* Quebracho 11: 9-21.

Soares-Filho, B.; Coutinho Cerqueira, G.; Lopes Pennachin, C. 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.; Rodríguez, H.; Costa, W. 2009. *Modelamiento de dinámica ambiental con Dinamica EGO.* Giudice, R. trad. Belo Horizonte, Brazil, Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais. 119 p.

Tramontina., J.; Pedrali., L.; Alba., E.; Mello., E.; Silva., E.A.; Pereira., R.S. 2015. *Modelagem Dinâmica do uso e cobertura da terra do municipio de Sobradinho-RS.* In XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR (João Pessoa-PB, Brasil) 2015. INPE. p. 4239-4246.

Turner, B.; Meyer, W.B.; Skole, D.L. 1994. *Global land-use/land-cover change: towards an integrated study.* Allen Press on behalf of Royal Swedish Academy of Sciences 23(1): 91-95.

Vega, A.P.; Mas, J.-F.; López-Carr, D. 2014. *Modelado de los cambios de uso/cobertura del suelo y conservación de la biodiversidad en Michoacán.*

Veldkamp, A.; Lambin, E. 2001. *Predicting land-use change.* Agriculture, ecosystems & environment 85(1): 1-6.

Verburg, P.H.; Kok, K.; Pontius Jr, R.G.; Veldkamp, A. 2006. *Modeling land-use and land-cover change. In. 2006.* Land-use and land-cover change. Springer. p. 117-135.

Verburg, P.H.; 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.

Vitousek, P.M. 1994. *Beyond global warming: ecology and global change.* Ecology 75(7): 1861-1876.

Vitousek, P.M.; Mooney, H.A.; Lubchenco, J.; Melillo, J.M. 1997. *Human domination of Earth's ecosystems.* Science 277(5325): 494-499.