

ESTUDIO MULTITEMPORAL Y ANÁLISIS PROSPECTIVO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL MEDIANTE EL USO DE AUTÓMATAS CELULARES

Oswaldo V. Padilla A.¹; Mario A. Cruz D.²; Jefferson L. Valero V.³

Carrera de Ingeniería Geográfica y Medio Ambiente. Escuela Politécnica del Ejército. Av. General Rumiñahui, s/n. Sangolquí-Ecuador.

¹ovpadilla@espe.edu.ec; ²macruz@espe.edu.ec; ³jlvalero@espe.edu.ec

Resumen

La actividad antrópica en la microcuenca del río Cristal se ha incrementado en los últimos años provocando daños irreparables a los ecosistemas naturales, acelerando así los procesos de erosión por el mal manejo de los suelos y el crecimiento de la frontera agrícola, con lo que surge la necesidad de proveer a las autoridades de insumos para la elaboración de planes relacionados al manejo de cuencas. En el presente proyecto se desarrolla un modelo prospectivo del uso y cobertura de suelo para el año 2020 basado en la técnica combinada de autómatas celulares y cadenas de Markov. Para ello, se han realizado procesos de ortorectificación de fotografías aéreas de donde se extrajeron las coberturas de suelo para el periodo 1983-2000. Además, se ajustaron modelos de regresión logística, para relacionar las variables biofísicas que condicionan la evolución en los usos de suelo y las zonas de cambio, se efectuó la simulación al año 2010 y se comparó mediante el índice Kappa para determinar el grado de ajuste a la realidad y finalmente se simuló al año 2020. El estudio evidencia la pérdida de vegetación natural, disminución de áreas agrícolas e incremento de zonas de uso pecuario.

Palabras clave: Autómatas celulares, modelos prospectivos, uso de suelo, regresión logística.

Abstract

Anthropic activities in the Cristal River watershed have increased in recent years causing irreparable damage to natural ecosystems, accelerating erosion processes as a result of incorrect soil management and agricultural frontier expansion; in response, emerges the need of providing inputs to authorities for the development of plans related to watershed management. In this project, it develops a prospective land use model for 2020, based on the combined technique of cellular automata and Markov chain analysis. To this end, orthorectification of aerial image process were carried to interpret land cover for the period 1983-2000. Next, it was adjusted logistic regression models to relate biophysical variables and land cover change. The following steps consist in performing a simulation to 2010 and a validation process using the Kappa index to determine the level of adjustment with reality, and finally a 2020 simulation was performed. The results show the loss of natural vegetation, reduction of agricultural zones and increment of livestock areas.

Key words: Cellular automata, prospective models, land use, logistic regression

Introducción

En los últimos años gracias al rápido avance en los modelos geoespaciales, se ha hecho posible el diseño y simulación prospectiva de patrones de cambio de uso/cobertura de suelo, los cuales permiten comprender y prever cómo evolucionan a lo largo del tiempo utilizando un conjunto de técnicas a fin de producir herramientas eficaces de ayuda en la planeación, utilización y manejo de tierras (Bocco, Mendoza, & Masera, 2001; Camacho, Molero, & Paegelow, 2010; Kamusoko, Aniya, Adi, & Manjoro, 2009; Mitsova, Shuster, & Wang, 2011). Surge la necesidad de modelar estos cambios debido a que se han constituido en uno de los factores plenamente implicados en las modificaciones locales y globales de los procesos y ciclos naturales (Pineda, Bosque, Gómez, & Plata, 2009; Verburg, Schot, Dijst, & Veldkamp, 2004). El crecimiento poblacional y las actividades humanas están incrementando la presión sobre los recursos de suelo y agua para la obtención de alimentos, energía y necesidades varias (Singh & Khanduri, 2011). Lambin (1997), destaca que la mayoría de los cambios ocurridos en los ecosistemas terrestres se producen por la degradación del terreno y procesos de conversión e intensificación en el uso de las coberturas de suelo que traen graves consecuencias, en este sentido Foley et al., (2005) establece la estrecha relación de los cambios en los climas regionales producidos por las alteraciones en los balances hídricos y la energía superficial, asimismo las actividades antrópicas han transformado el ciclo hidrológico para proveer agua destinada a irrigación y consumo doméstico y el impacto más significativo radica en la disminución de la biodiversidad a través de la pérdida, modificación y fragmentación de los hábitats naturales; degradación del suelo y agua.

Los patrones de cambio en los usos/coberturas de suelo de una región, son el resultado de la interacción de factores biofísicos y socioeconómicos con el hombre a lo largo del tiempo y espacio. (Singh & Khanduri, 2011) Para determinar y proyectar estos cambios se han propuesto diversas técnicas que integran métodos estadísticos, análisis espacial a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Mas, Kolb, Houet, & Paegelow, 2011) y herramientas informáticas. Se desarrollan a través del análisis de transiciones pasadas con lo que se puede desarrollar modelos matemáticos que estiman el potencial de cambio introduciendo una serie de variables explicativas que a través de modelos de regresión logística las relacionan con una variable dependiente a fin de obtener la probabilidad de cambio de las diversas coberturas naturales (Mas et al., 2011). Una técnica utilizada ampliamente en este tipo de simulaciones son los autómatas celulares (Benavente, Miguel, & Montes, 2010; Benenson, 2007) y cadenas de Markov (Buzai, 2007), las cuales tienen grandes ventajas y desventajas en la predicción de cambios. El modelo de Markov se ha utilizado extensamente para modelar las dinámicas en las coberturas terrestres, pero presenta grandes dificultades para predecir los patrones espaciales de las modificaciones; por el contrario, los modelos basados en autómatas celulares ofrecen contigüidad espacial con lo que permiten simular las variaciones de los sistemas de manera efectiva. La técnica combinada CA-Markov, ofrece un enfoque sólido en el modelamiento espacial y temporal de las dinámicas debido a que absorben los beneficios de las series de tiempo y predicciones espaciales de Markov y el gran potencial de los autómatas celulares que toman en cuenta la vecindad (J. R. Eastman, 2012; Sang, Zhang, Yang, Zhu, & Yun, 2011).

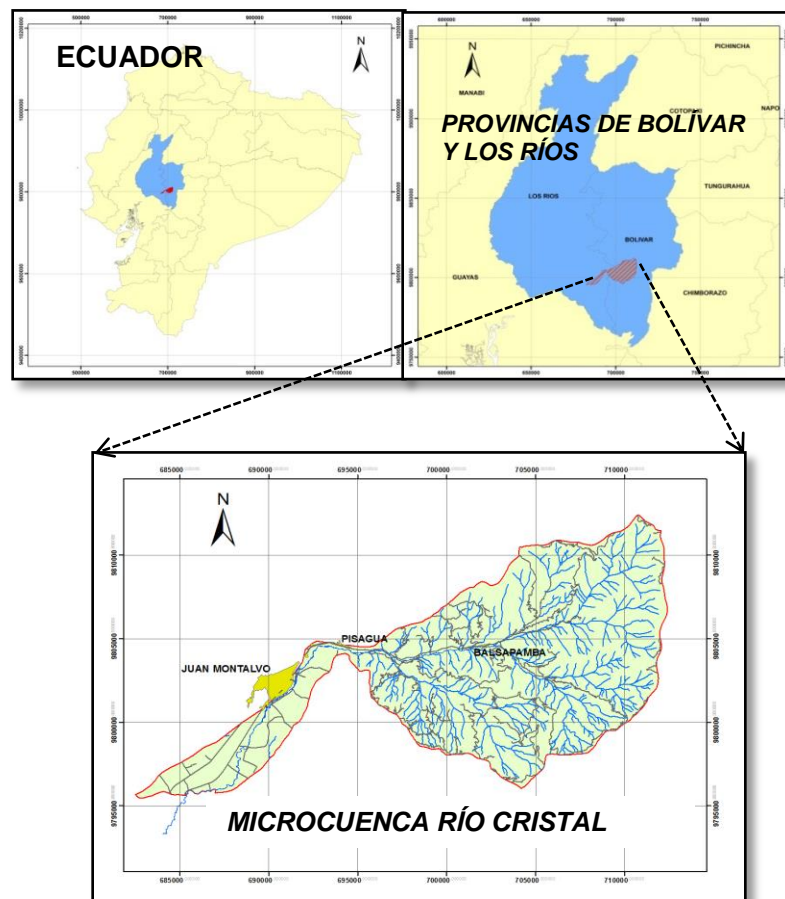
Considerando los antecedentes descritos y el gran poder que ofrecen estas técnicas se planteó el desarrollo de un modelo prospectivo de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal para la Microcuenca del Río Cristal, mediante el uso de la técnica combinada de autómatas celulares y cadenas de Markov, con el objeto de contribuir a entender las dinámicas de cambio pasadas y proyectarlas a futuro. Este se calibró con modelos de regresión logística a fin de generar imágenes de probabilidad de cambio a cada clase de cobertura de suelo y mejorar así su ajuste con la realidad. El autómata se diseñó con una vecindad de 5x5, con celdas de 8 metros, lo que permite tener un análisis más profundo y fiable que se resume en la posibilidad de contar un mayor número de estados, útil para modelos con una gran cantidad de clases de cobertura que compiten por ganar extensión.

Área de estudio

El área de estudio comprende la microcuenca hidrográfica del río Cristal. Cuenta con una superficie de 199 Km² y corresponde a los grandes paisajes: montaña, piedemonte y llanura costera, localizada en territorios pertenecientes a los cantones: Montalvo (Provincia de los Ríos), y San Miguel (Provincia de Bolívar) (figura 1). Drena las aguas de las vertientes externas de la cordillera Occidental del cantón San Miguel, tiene una morfología irregular con grandes elevaciones y fuertes pendientes que han limitado el desarrollo antrópico en la

zona, su rango altitudinal varía entre 3172,45 m.s.n.m. y 23,37 m.s.n.m., está caracterizada por la presencia de extensas áreas agrícolas, vegetación espontánea y bosques primarios; en la cuenca alta la población habita de forma dispersa, mientras que en la cuenca baja se ubica el área urbana de la ciudad de Montalvo; asimismo, el 100% del área que comprenden las parroquias Balsapamba y Bilovan es rural, siendo la actividad agropecuaria la más representativa del sector (SNGR, PNUD, & UEB, 2013). Actualmente el territorio analizado se destina a la producción agrícola que en su momento fue la más representativa, sin embargo se evidencia una regresión con fuertes disminuciones en sus áreas. Por otra parte las áreas de pastizales se han incrementado con el paso de los años, al ritmo del crecimiento en las actividades pecuarias, todo esto ha reducido substancialmente las zonas de cobertura vegetal natural en la microcuenca, la misma que cuenta con una gran importancia en el ámbito social, económico, ambiental y para el correcto funcionamiento de los sistemas ambientales locales (CISMIL, 2006).

Figura 1. Área de estudio Microcuenca del río Cristal



Elaboración propia.

Metodología

El estudio consta de cuatro etapas bien definidas: interpretación de coberturas de suelo, calibración del modelo, simulación y validación.

Interpretación de coberturas de suelo

Se inició con la recopilación de información cartográfica de diversas fuentes productoras de información a nivel nacional entre ellas: Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), Instituto Geográfico Militar (IGM), SIG tierras, entre otras. Los datos incluyen fotografías aéreas de los años 1983, 2000 y un mosaico de ortofotografías digitales del año 2010, sobre el cuál el IEE extrajo el mapa de cobertura de suelo a escala 1:25000, asimismo imágenes ASTER, modelo digital de terreno MDT e información base.

La cobertura de suelo del año 2010 (IEE), se reclasificó utilizando como información adicional el ortomosaico del mismo año, y el nivel II de la leyenda temática propuesta por el Ministerio del Ambiente en el año 2012, las categorías fueron adaptadas de acuerdo a las necesidades de un estudio de esta clase. En la tabla 1 se muestran las categorías adaptadas y la descripción operativa dada por varias instituciones: IEE, MAE, SINAGAP.

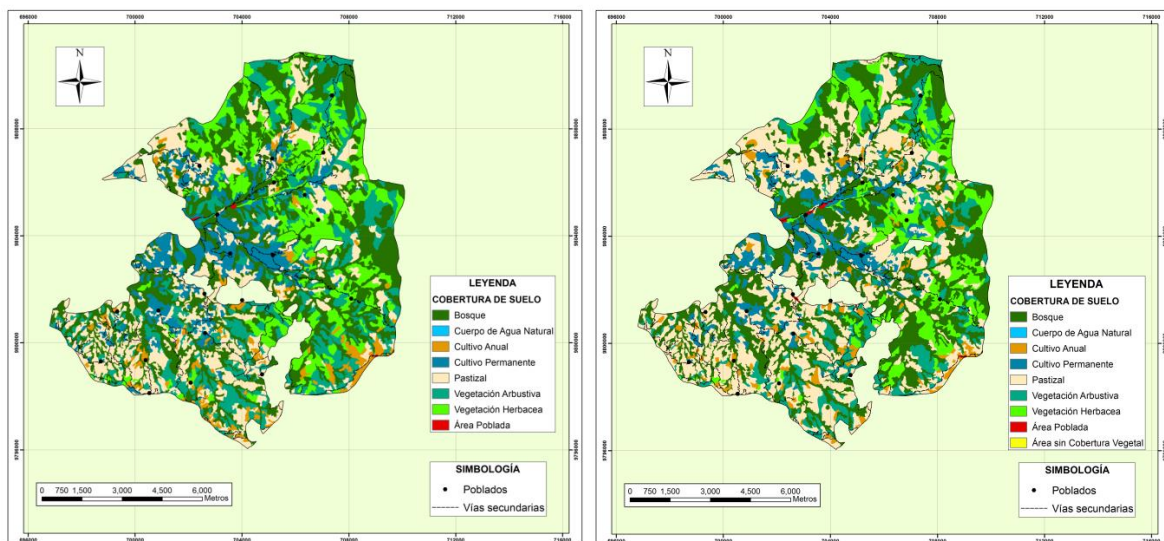
Tabla1. Leyenda temática adaptada y descripción operativa de las clases

Nivel II	Definición operativa
Bosque (BN)	Comunidad vegetal que se caracteriza por la dominancia de árboles de diferentes especies nativas, edades y tamaños.
Vegetación Arbustiva (VA)	Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas no arbóreas.
Vegetación Herbácea (VH)	Áreas constituidas por especies herbáceas nativas con un crecimiento espontáneo, que no reciben cuidados especiales, utilizados con fines de pastoreo esporádico, vida silvestre o protección.
Cultivo Anual (CA)	Tierras dedicadas a cultivos agrícolas, cuyo ciclo vegetativo es estacional, pudiendo ser cosechados una o más veces al año.
Cultivo Permanente (CP)	Tierras dedicadas a cultivos agrícolas cuyo ciclo vegetativo es mayor a tres años, y ofrece durante éste periodo varias cosechas.
Pastizal (PS)	Vegetación herbáceas dominadas por especies de gramíneas y leguminosas introducidas, utilizadas con fines pecuarios, que para su establecimiento y conservación, requieren de labores de cultivo y manejo.
Cuerpo de Agua Natural	Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento.
Área Poblada (AP)	Áreas principalmente ocupadas por viviendas y edificios destinados a colectividades o servicios público
Área sin cobertura vegetal (SC)	Áreas generalmente desprovistas de vegetación, no son aprovechadas para uso agropecuario o forestal, sin embargo pueden tener otros usos.

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012)

Fue necesario contar con tres épocas de estudio: dos para la obtención de las áreas de cambio y la última para fines de validación. Las fotografías aéreas fueron sometidas a procesos de ortorectificación, a fin de contar con una base de calidad que garantice gran exactitud posicional y se obtengan cambios en zonas donde en realidad han existido. Mediante interpretación digital de la ortofotografía y las imágenes ASTER año 2000 y tomando como referencia la cobertura ya consolidada del año 2010, se efectuó la interpretación de las coberturas de suelo pertenecientes a la segunda época de análisis, solamente de polígonos que registraron algún cambio, lo que se denomina interpretación interdependiente (Velázquez et al., 2001). De la misma forma sobre la base de las ortofotografías año 1983 y tomando como referencia la cobertura de suelo del 2000, se efectuó la interpretación para la primera época de análisis (figura 2.).

Figura 2. Mapas de cobertura de suelo de la zona de estudio años 1983(i) 2000(d)



Fuente: Elaboración propia a partir de interpretación de ortofotografías

Los polígonos generados se convirtieron de formato vector a raster con un tamaño de pixel 8 x 8 metros lo que permite manipular la información y desarrollar análisis espaciales. Las variables explicativas de los cambios en las coberturas de suelo se obtuvieron de la información base y mapas de cobertura y uso de suelo.

Calibración del modelo (Análisis de regresión logística)

La fase de calibración tiene una importancia significativa en el ajuste final que presenta un modelo, por lo que la calidad de la información utilizada y el método son trascendentales. El método seleccionado se basa fundamentalmente en ajustar modelos estadísticos de regresión logística para analizar la contribución de una serie de variables independientes en la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno específico, en este caso una variable

binomial que presentan valores de 0 y 1, los cuales corresponden a presencias y ausencias de coberturas de suelo de una categoría determinada. La ecuación 1. establece la relación entre la variable dependiente y las variables explicativas donde P es la probabilidad de que la variable dependiente sea igual a 1 mientras que las variables explicativas se definen con $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, y b corresponden a los coeficientes de regresión (García, 2010).

Ecuación 1.

$$\ln(P/(1-P)) = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + \dots + b_k * x_k$$

Las variables dependientes se obtienen como producto de la evaluación de los cambios, proceso efectuado en el Software Idrisi Selva v.17.0, a través de análisis espaciales de tabulación cruzada que reflejan las zonas que cambiaron a cada categoría y la cantidad de pixeles involucrados, este proceso se desarrolló para cada clase en estudio. Las áreas obtenidas corresponden a las variables dependientes que posteriormente serán utilizadas en la regresión logística.

El cambio de cobertura y uso del suelo se encuentra estrechamente relacionado con un conjunto de variables explicativas que influyen en la ocurrencia del cambio y la dirección del mismo (tipo de cobertura). Para esto, a través de criterios técnicos, la información disponible y en base a otros trabajos relacionados (García, 2010; Kamusoko et al., 2009; Peña, 2007; Rutherford, Bebi, Edwards, & Zimmermann, 2008), se consideraron un conjunto de factores físicos y humanos que interactúan con estas dinámicas (tabla 2.).

Tabla 2. Variables empleadas en la regresión logística

Variable explicativa	Descripción	Fuente
Altitud (VAL)	Altitud en metros	DTM generado por IEE, tamaño de pixel 10 m
Pendiente (VPE)	Pendiente en %	Elaboración propia a partir del DTM
Distancia a poblados (VDP)	Asentamientos humanos	Elaboración propia a partir de puntos de poblados.
Distancia a ríos (VDR)	Ríos dobles y simples	Elaboración propia a partir de cobertura IEE 1:25000
Distancia a vías principales (VDV)	Carretera Interprovincial Guaranda Babahoyo	Elaboración propia a partir de cobertura IEE 1:25000
Distancia a vías secundarias (VDS)	Carreteras secundarias que conectan zonas pobladas rurales y urbanas	Elaboración propia a partir de cobertura IEE 1:25000
Distancia áreas agrícolas (VDA)	Zonas con presencia de cultivos	Elaboración propia a partir de cobertura IEE 1:25000
Precipitación (VPR)	Precipitación media anual (mm)	Interpolación de valores (Estaciones Meteorológicas) INAMHI

Elaboración propia.

Debido a la morfología del territorio de análisis y su gran irregularidad la pendiente se consideró como un factor influyente, asimismo la altitud se encuentra altamente relacionada con la temperatura y es un factor determinante en la distribución de la vegetación natural; del mismo modo, la influencia antrópica se materializó a través de la distancia a centros poblados, vías principales, secundarias, y áreas agrícolas.

Antes de ingresar las variables explicativas al modelo se requiere un análisis de correlación que determine el grado de asociación entre los factores. Se utilizó el coeficiente de Spearman, técnica no paramétrica ampliamente utilizada para determinar la correlación entre dos variables con una distribución no normal, es necesario este análisis para asegurar que el modelo distinga que parte de la variable dependiente se explica por cada factor (Del Hoyo, 2007; Montoya & Arrobo, 2014). Los valores de correlación van de -1 a 1 (1 correlación perfecta). Los umbrales máximos establecidos para considerar que existe correlación se encuentran en 0,6 según García (2010) y Del Hoyo (2007) establece un valor de 0,7, entonces se decidió trabajar con un coeficiente de 0,65, las variables con un coeficiente superior deben ser excluidas. El software utilizado para efectuar los análisis estadísticos fue “R statistics”, que ofrece muchas bondades en lo referente a calidad, cantidad de técnicas y funciones implementadas, además es libre y gran parte de la comunidad científica lo usa como estándar para sus análisis (Del Hoyo, 2007). El coeficiente de Spearman para cada par de variables se presenta en la tabla 3. No fue necesario eliminar ninguna variable, ya que todas se encuentran por debajo de lo establecido.

Tabla 3. Índice de Spearman para cada par de variables consideradas

	VAL	VDA	VDP	VDR	VDV	VDS	VPE	VPR
VAL	1	0.57	0.50	0.22	0.29	0.29	0.37	-0.58
VDA	0.57	1	0.50	0.23	0.53	0.28	0.33	-0.47
VDP	0.50	0.50	1	0.10	0.34	0.34	0.34	-0.44
VDR	0.22	0.23	0.10	1	0.02	0.09	0.11	0.10
VDV	0.29	0.53	0.34	0.02	1	0.04	0.23	-0.42
VDS	0.29	0.28	0.34	0.09	0.04	1	0.26	-0.34
VPE	0.37	0.33	0.34	0.11	0.23	0.26	1	-0.39
VPR	-0.58	-0.47	-0.44	0.10	-0.42	-0.34	-0.39	1

Elaboración propia.

Se efectuaron 8 regresiones logísticas para cada cobertura de suelo excluyendo la categoría cuerpo de agua natural por considerarse poco dinámica en el periodo de estudio. Es necesario identificar cuáles son las variables que contribuyen significativamente en la predicción de un fenómeno. Existen varios indicadores estadísticos como pruebas t, z, Chi cuadrado, entre otras que determinan el grado de aporte de una variable en la predicción. En este caso se utilizó el indicador $(Pr(>|z|))$, que corresponde a la probabilidad de que el

coeficiente de la variable sea cero; es decir que el cambio de pueda dar por casualidad, entonces cuanto menor sea dicho valor mayor será la significancia de la variable al momento de predecir el cambio. (García, 2010). Los factores cuya probabilidad se encontró por debajo de 0.001 fueron considerados posteriormente en una nueva regresión. Los coeficientes que determinan la probabilidad de cambio a cada clase de cobertura de suelo se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes que aportan en la probabilidad de cambio a cada cobertura de suelo

Variable	Cobertura de suelo							
	SC	BN	CA	CP	PS	VA	VH	AP
	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$	$b * 10^4$
Constante	-	-	-	-	-	-	-	-
	521100	63150	90900	67270	59640	68950	69200	118200
Altitud	118.00		15.81	-11.11	5.23	20.31	23.56	
Distancia áreas agrícolas	-83.18		-17.17	-11.49	-14.97	-5.48		
Distancia a poblados	-28.31	3.80	-1.98		1.07	-1.85	-3.31	-122.30
Distancia ríos		-5.49	5.36	-4.44	4.93	5.63	-4.43	
Distancia a vías principales	65.98	-1.32	2.19	1.04	1.80	1.42	1.62	-20.20
Distancia a vías secundarias	-63.64	4.47	-1.70	-3.04	-1.58	-3.00	2.35	-62.77
Pendiente	418.70	107.80	-49.38		47.73	85.45	107.80	-637.90
Precipitación		22.28	19.74	33.24	20.52		-4.70	94.23

Elaboración propia.

La estimación de los valores de probabilidad de cambio a cada cobertura comprendido entre 0 y 1 se efectuó utilizando la función logística (ecuación 2.). Con esto se obtuvieron 8 imágenes de probabilidad de cambio utilizadas posteriormente en la simulación con autómatas celulares.

Ecuación 2. Función logística

$$P = \frac{e^{(b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_k * x_k)}}{1 + e^{(b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_k * x_k)}}$$

Al analizar las variables incluidas en el ajuste de regresión logística se determinó que para predecir el cambio a un área sin cobertura vegetal, la variables distancia a ríos y precipitación no influyen de manera significativa, lo que explica que el cambio hacia dicha categoría se ve grandemente influenciado por la pendiente y la actividad antrópica, asimismo la mayoría de cambios hacia bosque se da por procesos de recuperación desde la vegetación arbustiva y áreas de baja o nula intervención humana, se observó que a menor distancia a poblados, vías secundarias y bajas pendientes disminuye la probabilidad de cambio. Las áreas pobladas ejercen una influencia importante para las transiciones hacia cultivos anuales, mediante el modelo de regresión logística se obtuvo que las zonas más

cercanas a poblados, a zonas agrícolas ya establecidas y vías secundarias tienen una mayor probabilidad de cambiar en el siguiente periodo. Por otra parte existe una marcada tendencia al desarrollo de cultivos anuales a cortas distancias de las áreas agrícolas y de los ríos El salto y San Jorge de los cuales se aprovechan sus aguas para el riego de cultivos. Adicionalmente, los cambios a pastizales se producen principalmente en espacios próximos a zonas agrícolas que a corto plazo pasarán a transformarse en zonas pecuarias, las transiciones a vegetación arbustiva y herbácea se producen en zonas de difícil acceso con altas pendientes, mientras que la expansión de zonas pobladas se produce a cortas distancias a poblados y pendientes bajas.

Simulación

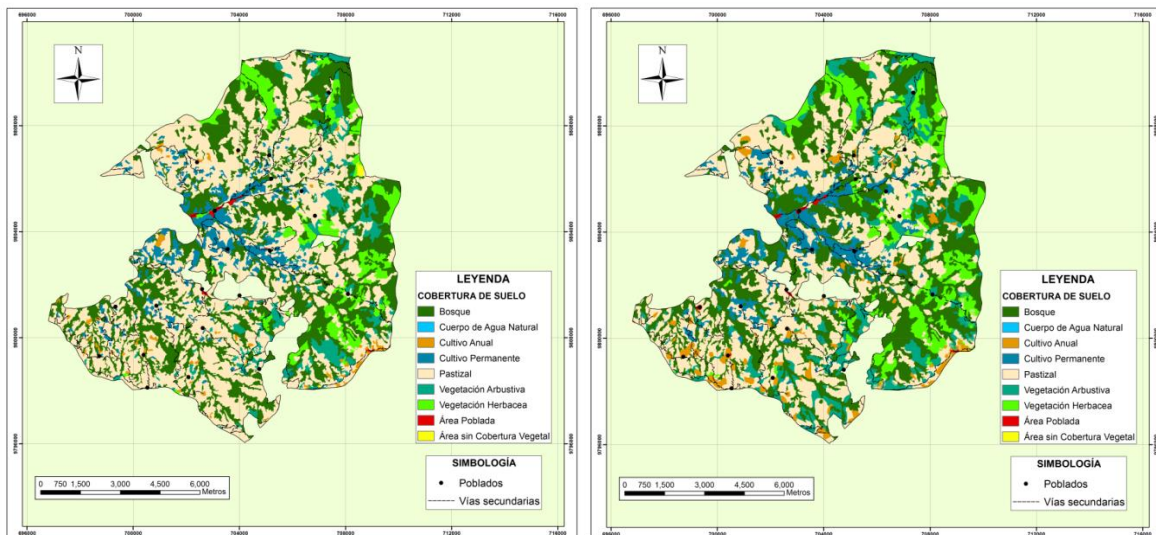
El presente estudio analiza la técnica combinada de autómatas celulares y cadenas de Markov para simular las coberturas de suelo de una época determinada. Un insumo importante es la determinación del número de píxeles que se esperan que cambien en el próximo periodo, para esto se efectuó el análisis de Markov que además genera imágenes de adecuación con la probabilidad de cada píxel de pertenecer a la clase designada; sin embargo, estas no fueron consideradas debido a que en su determinación no toman en cuenta los factores concionantes, solo los cambios pasados.

La simulación se llevó a cabo en el módulo CA_Markov del software Idrisi Selva, se realizó al año 2010 con el fin de posteriormente validar el modelo desarrollado comparándolo con el mapa de cobertura observado del mismo año. Se utilizó la cobertura de suelo año 1983 desde la cual se va a simular, asimismo la matriz que contiene la cantidad de píxeles que se espera cambien en el próximo periodo, las imágenes de probabilidad de cambio, el periodo de tiempo de la proyección (17 años) y finalmente el filtro de 5 x 5 que garantiza contigüidad espacial en la pérdida y ganancia de coberturas de suelo.

Validación

Conocer el grado de ajuste de un modelo es esencial para determinar la exactitud de una predicción. Existen varios métodos para establecer una relación entre las simulación y la realidad, en este caso se seleccionó el Índice de acuerdo Kappa que es esencialmente una declaración de exactitud posicional, ajustada para el acuerdo de oportunidad, considerado de mucha importancia en la evaluación de modelos por su sencillez y fiabilidad de la manera en que cambian las categorías modeladas (R. Eastman, 2003). La ventaja es que permite determinar el grado de acople de acuerdo a la cantidad y a la posición de los píxeles de cada clase, los valores cercanos a 1 significan un ajuste perfecto. Los resultados arrojaron un ajuste muy bueno con un valor de 0,83. Una vez determinado que el método es correcto y las imágenes de calibración producen un efecto positivo en el modelo, se procedió a efectuar la simulación al año 2020 (figura 3.).

Figura 3. Cobertura de suelo observada año 2010 (i), cobertura simulada año 2010 (d)



Elaboración propia.

Resultados

Durante el primer periodo de estudio (1983-2000) de 17 años, las coberturas de suelo han sufrido cambios significativos, provocados completamente por la actividad antrópica que se ha desarrollado en los últimos años. En el año 1983 se observó una gran dominancia del bosque, el cual presenta una cobertura del 31% de la superficie, los pastizales se encuentran en un 20%, las áreas de vegetación arbustiva y herbácea para este año representan el 16% de la superficie cada una. Respecto al año 2000, tomando en cuenta las coberturas interpretadas en cada clase, se obtuvo que la superficie que cubre mayoritariamente la microcuenca es el pastizal con 33%, seguido muy de cerca por el bosque con 32%; además, la vegetación herbácea y arbustiva se hallaba en el 11% de la superficie cada una, mientras que los cultivos permanentes cercanos en su mayoría a la población de Balsapamba se desarrollaban en 8% del suelo, los cultivos anuales esparcidos en mayor proporción en los límites de la microcuenca ocupan solo el 3% (tabla 5.).

El cambio más representativo observado es el incremento de áreas de pastizales en 1315 Ha., provenientes principalmente de vegetación herbácea, arbustiva, bosque, cultivos anuales y permanentes; de manera que, todas las coberturas naturales cedieron superficie en más de 200 Ha. al pastizal, lo que explica su acelerado crecimiento. Cambios producidos debido a que en las décadas de los años 70 y 80, la producción agropecuaria en el Ecuador sufrió una serie de transformaciones radicales, en donde se observaron una serie de tendencias importantes entre las que se tiene que el área de producción de alimentos básicos para el mercado interno disminuyó entre 1970 y 1989, la cual decreció en 345000 toneladas. Mientras que las áreas dedicadas a pastos casi se duplicó en este periodo, cambio

relacionado al decremento del área que antes se dedicaba a la producción de alimentos básicos, a favor del aumento de zonas para la producción de leche y carne y sus derivados (Waters, 2000).

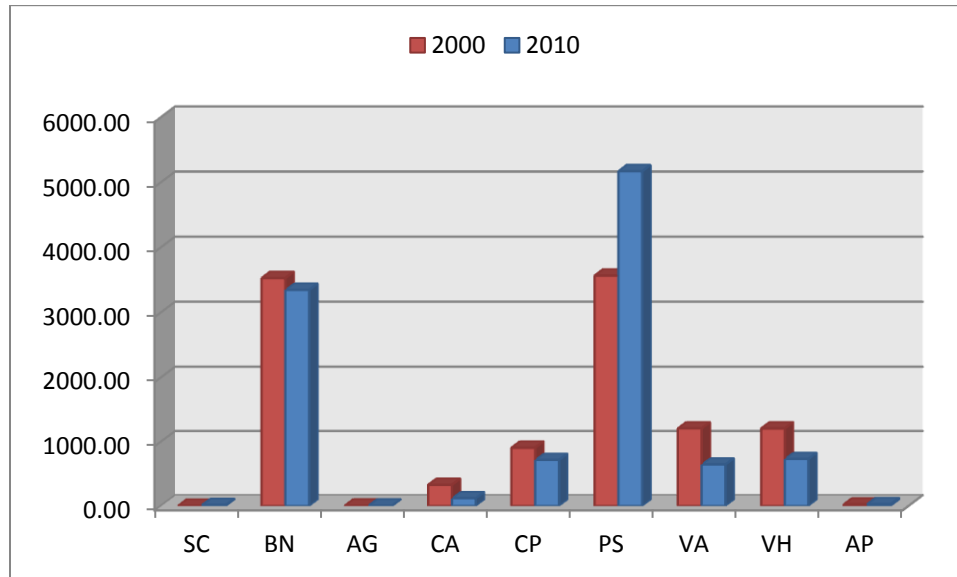
Tabla 5. Superficie y porcentaje por tipo de uso y cobertura de suelo periodo 1983-2000

Áreas de uso y cobertura de suelo						
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Año 1983		Año 2000		Cambio
		(Ha)	(%)	(Ha)	(%)	
Agrícola		1568.7	14.6	1233.2	11.5	-335.5
	CP	1151.2	10.7	905.6	8.4	-245.6
	CA	417.5	3.9	327.6	3.0	-89.9
Pecuario		2251.2	20.9	3566.6	33.1	1315.4
	PS	2251.2	20.9	3566.6	33.1	1315.4
Recreación		4.4	0.0	3.9	0.0	-0.5
	AG	4.4	0.0	3.9	0.0	-0.5
Residencial rural		8.3	0.1	20.8	0.2	12.4
	AP	8.3	0.1	20.8	0.2	12.4
Sin uso		6937.4	64.4	5945.6	55.2	-991.8
	BN	3389.9	31.5	3528.8	32.8	138.9
	VH	1755.7	16.3	1206.6	11.2	-549.1
	VA	1791.8	16.6	1206.7	11.2	-585.1
	SC	0.0	0.0	3.5	0.0	3.5
Total uso		10770.0	100.0	10770.0	100.0	
	Total cobertura	10770.0	100.0	10770.0	100.0	

Elaboración propia.

La figura 4. describe las variaciones en las coberturas de suelo para un periodo de estudio de 10 años (2000-2010), tiempo durante el cual se han desarrollado una serie de modificaciones en las coberturas naturales por parte del hombre. Se observa que los pastizales se incrementan aproximadamente en 1/3 de la superficie con la que contaba una década antes; es decir, un aumento de 1603 Ha. valor superior al del periodo de estudio anterior en el que se incrementó solo 1315 Ha. en 17 años. Estas áreas se derivan de la supresión de más de 800 Ha. de vegetación arbustiva y herbácea, que se han perdido a una tasa del 6% y 4.8% respectivamente, lo que denota una rápida pérdida de las coberturas naturales en un periodo de tiempo tan corto. Adicionalmente 270 Ha. de bosque han cambiado a pastizal y en menor proporción a superficies de cultivos anuales y permanentes. Asimismo, las coberturas de cultivos anuales y permanentes han mermado en 500 Ha., a una tasa de 9.7% y 2.3% respectivamente, continuando con la tendencia del periodo pasado de conversión en pastizales.

Figura 4. Variaciones en las coberturas de suelo periodo 2000-2010

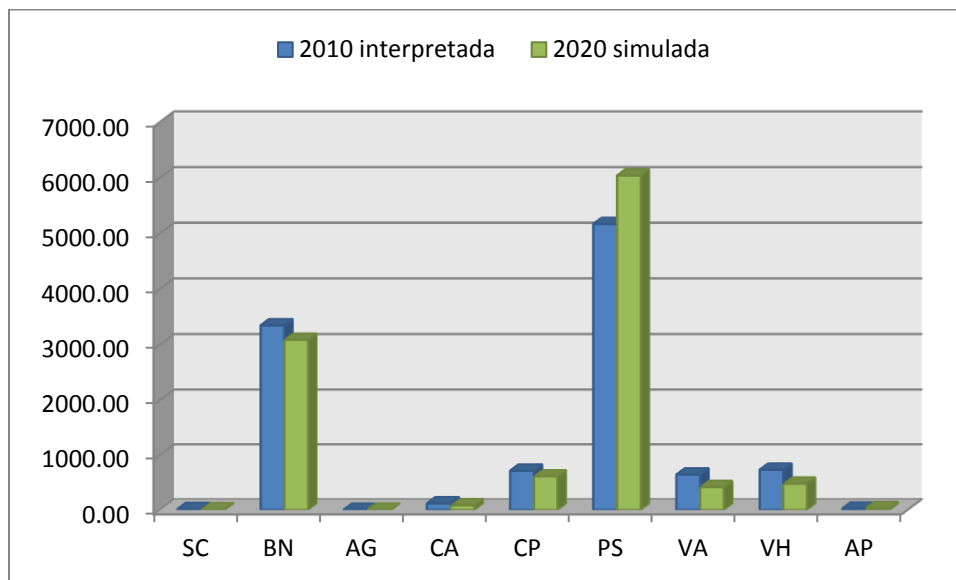


Elaboración propia.

Analizando a nivel provincial se ha observado un aumento paulatino de la producción de carne bovina, con 298 Toneladas métricas en el año 2000, hasta alcanzar 400 Toneladas métricas en el año 2008. Por otra parte, la provincia se ha especializado en la producción de leche, aportando la mitad de la producción total de la zona de planificación 5. Se evidencia que ha presentado un crecimiento dinámico en la producción lechera, con 64 millones de litros en el año 2000 valor que se incrementó a 83 millones de litros para el año 2008, todo esto debido a la alta demanda en la región costa. Según Agrocalidad, el número de cabezas de ganado en el área del trópico y subtrópico de la provincia de Bolívar para el año 2010 sobrepasaba las 110000 unidades (MCPEC, 2011).

En la figura 5, se muestran las variaciones presentadas en las coberturas de suelo para el periodo 2010-2020. El principal cambio que presentaran las clases, es el incremento de las áreas de pastizales con 871 Ha. a una tasa de cambio anual de 1.5%, valor inferior al presentado en el periodo pasado (1603Ha.), pero de igual forma muy significativo. La disminución en la tasa de cambio para este periodo se debe a la restricción que ejerce el territorio sobre las actividades antrópicas; es decir, las coberturas naturales que son las que en mayor proporción se modificarán y formarán pastizales, se encuentran en áreas de difícil accesibilidad y pendientes fuertes lo que desacelera la pérdida de la vegetación natural.

Figura 5. Variaciones en las coberturas de suelo periodo 2000-2010

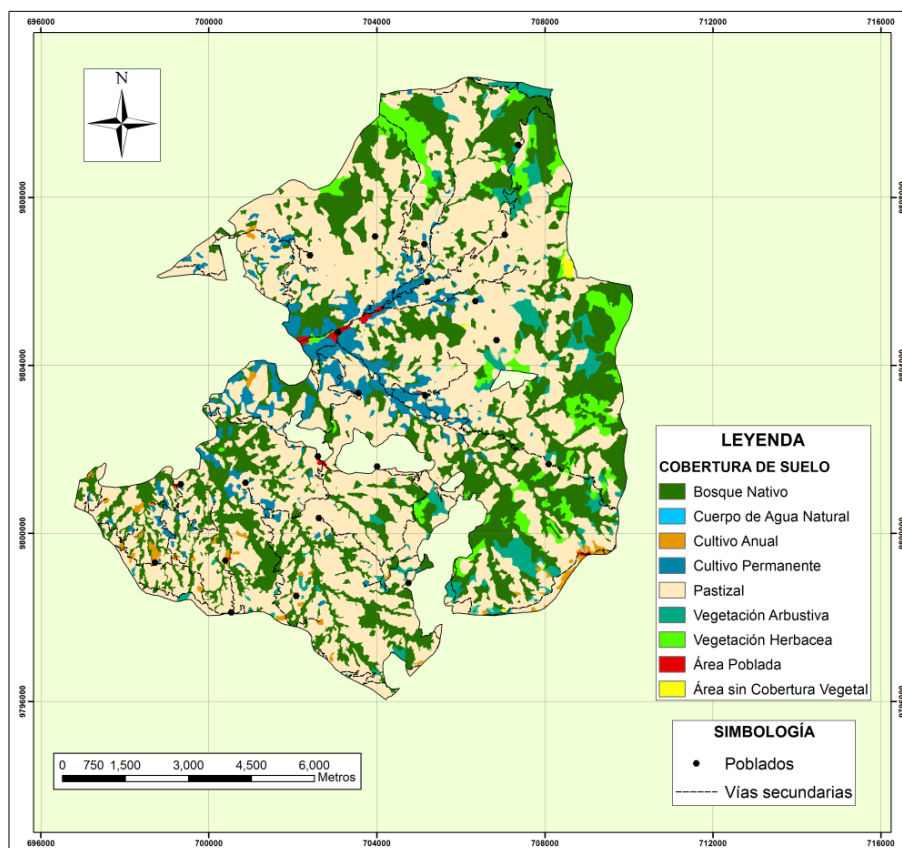


Elaboración propia.

Asimismo la vegetación herbácea y arbustiva presentarán pérdidas importantes hasta el año 2020, se reducirán sus coberturas en 254 Ha. y 228 Ha. respectivamente, valores inferiores a las disminuciones observadas en el periodo anterior, ambas a una tasa de cambio superior al 4%. Los cultivos anuales y permanentes continuarán con la misma tendencia de años anteriores, una disminución considerable de sus extensiones; principalmente los cultivos anuales se reducirán en 34 Ha. y al principio de cada año cambiarán a una tasa del 3.5%, se observa la permanencia de los cultivos de ciclo corto en la cuenca alta en los poblados: Matapalo, Como Cruz y Guapaloma.

En consecuencia, las coberturas de suelo distribuidas en la microcuenca del río Cristal al igual que en años anteriores sufrirán cambios significativos en cuanto a la pérdida de vegetación natural y posterior conversión en pastizales destinados al uso pecuario (figura 6.).

Figura 6. Simulación de cobertura de suelo año 2020



Elaboración propia

Conclusiones

Los modelos de regresión logística constituyen herramientas útiles para establecer relaciones de dependencia entre variables biofísicas y la evolución de las coberturas de suelo; de este modo, proporcionan información valiosa para la identificación de los principales factores y su grado de influencia sobre los cambios en el paisaje. Se evidenció que los cultivos permanentes se establecen preferentemente a cortas distancias de cuerpos de agua y áreas agrícolas ya consolidadas, las zonas pobladas presentan mayor probabilidad de expandirse mientras más cerca se encuentran a un asentamiento humano y en pendientes bajas; adicionalmente, se corrobora la idea de que las áreas de recuperación de vegetación natural se concentran lejos de la intervención antrópica y en fuertes pendientes.

Los modelos de autómatas celulares demostraron ser herramientas con un alto potencial en la simulación de escenarios futuros, utilizados ampliamente en análisis de crecimiento

urbano, cambios en el uso de suelo, deslizamientos; en suma, cualquier proceso dinámico predecible. Para el caso de estudio, la combinación de autómatas celulares con cadenas de Markov permite tomar en cuenta en la regla de decisión el estado previo de la celda central y las celdas vecinas, proceso combinado en el que fue posible además la inclusión de imágenes de probabilidad de cambio, lo que permitió calibrar el modelo e incrementar la probabilidad de alcanzar mejores resultados. El ajuste del modelo fue muy bueno, 83%; sin embargo, al analizar visualmente el mapa generado se evidenció que los cultivos anuales no fueron simulados correctamente y se concluye que se debe al gran dinamismo de la cobertura lo que dificulta su proyección a largo plazo.

La proyección de las superficies de cobertura de suelo al año 2020, muestra un panorama nada alentador, con un incremento importante de las zonas de pastizales en 871 Hectáreas, pérdida de vegetación natural de 739 Ha., y de igual forma que en los periodos anteriores disminución de las áreas agrícolas, valores inferiores a décadas pasadas pero de igual forma con impactos significativos en los ecosistemas; cabe destacar que las estimaciones son menos fiables mientras se incrementa el periodo de análisis, debido a que se presentan cambios cíclicos difíciles de predecir en largos periodos. Las variables explicativas del cambio de cobertura de suelo influyen de diferente forma en la probabilidad de transición; por este motivo, se recomienda efectuar un proceso de normalización de los valores de las variables a fin de que los coeficientes obtenidos sean indicadores del peso de cada factor y así determinar cuáles ejercen mayor influencia en las modificaciones; asimismo, es recomendable incluir en el modelamiento variables socioeconómicas como: nivel de pobreza, número de parcelas, contratación en agricultura, edad media, densidad poblacional, rama de actividad, entre otras.

Referencias bibliográficas

- Benavente, F. A., Miguel, L., & Montes, V. (2010). Simulación de escenarios futuros en la Aglomeración urbana de Granda a través de modelos basados en autómatas celulares. *Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 271–300.
- Benenson, I. (2007). Warning! The scale of land-use CA is changing! *Computers, Environment and Urban Systems*, 31, 107–113. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2007.01.001
- Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación (parte 1). *Red de Revistas Científicas de América Latina Y El Caribe, España Y Portugal*, 44, 18–38. Recuperado de <http://redalyc.uaemex.mx>
- Buzai, G. (2007). Actualización de cálculos y distribuciones espaciales a través de cadenas de markov y autómatas celulares. In S. D. Matteucci (Ed.), *Panorama de la Ecología de Paisajes en Argentina y Países Sudamericanos*. (pp. 433–450). Buenos Aires:

- INTA. Recuperado de <http://www.gesig-proeg.com.ar/documentos/articulos/2007-Buzai-INTA.pdf>
- Camacho, M., Molero, E., & Paegelow, M. (2010). Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. evaluación del potencial de cambio. In J. Ojeda, F. Pita, & I. Vallejo (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla* (pp. 658–678). Sevilla.
- CISMIL. (2006). *Objetivos desarrollo del Milenio* (pp. 1–258). Quito. Recuperado de http://www.unitecnologica.edu.co/otros/LOS_OBJETIVOS_DE_DESARROLLO_DE_L_MILENIO.pdf
- Del Hoyo, V. (2007). Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. Madrid. Recuperado de http://www.geogra.uah.es/firemap/pdf/VilardelHoyo_Granada.pdf
- Eastman, J. R. (2012). IDRISI Selva, (January).
- Eastman, R. (2003). Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Worcester: Clark University. Recuperado de <http://www.clarklabs.org/products/spanish-manual.cfm>
- Foley, J. a, Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science (New York, N.Y.)*, 309(5734), 570–4. doi:10.1126/science.1111772
- García, A. (2010). Análisis de los factores que condicionan la evolución de los usos del suelo en los pequeños asentamientos urbanos de la costa norte de galicia. *Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 57–79.
- Kamusoko, C., Aniya, M., Adi, B., & Manjoro, M. (2009). Rural sustainability under threat in Zimbabwe – Simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. *Applied Geography*, 29(3), 435–447. doi:10.1016/j.apgeog.2008.10.002
- Lambin, E. F. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21(3), 375–393. doi:10.1177/030913339702100303
- Mas, J., Kolb, M., Houet, T., & Paegelow. (2011). *Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo* (pp. 1–8).
- MCPEC. (2011). Agendas para la transformación productiva territorial- Provincia de Bolívar. Quito.
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Línea base de deforestación del ecuador continental* (pp. 1–32). Quito, Ecuador. Recuperado de <http://sociobosque.ambiente.gob.ec/?q=node/595>
- Mitsova, D., Shuster, W., & Wang, X. (2011). A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 141–153. doi:10.1016/j.landurbplan.2010.10.001
- Montoya, A., & Arrobo, V. (2014). *Vicerrectorado de investigación y vinculación con la colectividad maestría en evaluación y auditoría de sistemas tecnológicos promoción iv*. ESPE, Quito.

- Peña, J. (2007). *Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos de suelo en la Marina Baixa (Alicante)*. Universidad de Alicante, Alicante.
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M., & Plata, W. (2009). Análisis de cambio del 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 Analysis of land use changes in the State of M. *Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, 69, 33–52.
- Rutherford, G. N., Bebi, P., Edwards, P. J., & Zimmermann, N. E. (2008). Assessing land-use statistics to model land cover change in a mountainous landscape in the European Alps. *Ecological Modelling*, 212(3-4), 460–471. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.10.050
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 938–943. doi:10.1016/j.mcm.2010.11.019
- Singh, P., & Khanduri, K. (2011). Land use and Land cover change detection through Remote Sensing & GIS Technology: Case study of Pathankot and Dhar Kalan Tehsils , Punjab. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(4), 839–846.
- SNGR, PNUD, & UEB. (2013). Perfil territorial y análisis de vulnerabilidad del cantón San Miguel de Bolívar. San Miguel. Recuperado de [http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/858/1/Perfil territorial SAN MIGUEL.pdf](http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/858/1/Perfil%20territorial%20SAN%20MIGUEL.pdf)
- Velázquez, A., Mas, J., Gallegos, J., Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., ... Ezcurra, E. (2001). *Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México* (No. 62) (pp. 28–29). México D.F.
- Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst, M. J., & Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4), 309–324. doi:10.1007/s10708-004-4946-y
- Waters, W. (2000). El desarrollo de las agroexportaciones en el Ecuador: la primera respuesta empresarial. Quito.