

Comparación del modelo markoviano y de regresión para predicción de cambios en el uso y cobertura del suelo en la zona central del Departamento del Meta-Colombia

Jeniffer Trejos Serrato ¹
Manoel de Araújo Sousa Júnior ²
Federico Pinzón Pinzón ³
María Silvia Pardi Lacruz ⁴

¹Grupo de Investigación en Geomática Aplicada - GIGA
Universidad del Valle - Cali, Valle del Cauca, Colombia
jeniffertrejos@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Avenida Roraima, 1000 - 97105-970 - Santa Maria - RS, Brasil
manoel.der.ufsm@gmail.com

³Grupo Conflicto, Aprendizaje y Teoría de Juegos
Centro de Investigación y Documentación Socio-Económica - CIDSE
Universidad del Valle - Cali, Valle del Cauca, Colombia
fedepinzon@gmail.com

⁴ CRECTEALC – Campus Brasil
Caixa Postal 5021 - 97105-970 - Santa Maria - RS, Brasil
lacruz@dsr.inpe.br

Abstract. To propose new methodologies for the sustainable management of the natural resources, some techniques for the prediction of changes in the land use have been implemented. Those techniques allow to estimate tendencies in the landscape dynamics in the time. To contribute with this purpose, this work compare two empirical models – regression model and Markov chain model - focused in predicting land use change, verifying advantages and disadvantages of each one. Land use classes such as oil palm, urban area, agriculture, water, sand areas, bare soil and forest, were mapped from classification of three images: a 1988 TM/Landsat, an ETM+/Landsat 7 from 2000 and a 2005 CCD/CBERS 2 of the year 2005. Linear spectral mixture model was applied to the different bands. The area of land use classes were computed in each one of the images and dates and the regression model with better adjustment were estimated. With these models, projections for the years 2010, 2012 and 2015 were made. The second prediction were calculated through the Markov chain transition matrix for the periods 1988-2000 and 2000-2005, and projections were calculated for 2010, 2012 and 2015. Finally, the results of the Markov chain transition matrix were compared with those obtained by regression models. The better predictive performance was obtained with the Markov chains for each of the land use classes. However, the regression models had good performance for the classes of oil palm and urban areas. It could also be verified the applicability of these techniques for agricultural areas under great exploitation.

Palabras-claves: prediction of change, Markov chain, regression model, land use/land cover, linear spectral mixture model, predicción de cambios, cadenas de Markov, modelo de regresión, uso y cobertura de suelo, modelo lineal de mezcla espectral.

1. Introducción

Avanzar en las diversas técnicas de geoprocésamiento, modelamiento espacial y su análisis, propone nuevas tendencias en el uso de procedimientos para predecir la ocurrencia de fenómenos en determinado espacio y tiempo, con el fin de resolver preguntas como dónde y cuándo ocurrirán los eventos en análisis (Sandoval y Oyarzun, 2004).

Para resolver estos cuestionamientos se ha propuesto el uso de modelos de predicción aplicados a los sistemas de información geográfica y a la percepción remota, los cuales han sido acogidos como herramienta útil para la planificación, ordenación y gestión del territorio,

convirtiéndose en un apoyo para la toma de decisiones y a su vez, para medir los impactos en el medio ambiente causados por las modificaciones en los usos del suelo.

Los modelos de predicción han sido fundamentales en estudios relacionados con el crecimiento urbano, cambios climáticos, manejo de recursos hídricos, entre otros, como el trabajo de López-Granados et. al (2001) en el que describen patrones de crecimiento urbano y los relacionan con la afectación del paisaje y el aumento poblacional a través de modelos predictivos y de transición del cambio en el uso del suelo.

Según Henríquez (2007), los modelos pueden clasificarse en dos tipos: los estáticos, en el que los datos de entrada y de salida pertenecen a un mismo instante de tiempo, y los dinámicos, donde los datos de entrada y de salida corresponden a diferentes estados de tiempo, permite elaborar análisis multitemporales en la realización de predicciones y proyecciones de un futuro posible.

Entre los modelos dinámicos, pueden contemplarse aquellos basados en regresiones que permiten relacionar las variables a ser usadas como predictivas y su influencia en los cambios del uso y cobertura del suelo, y los modelos basados en transición espacial como cadenas de Markov, que suponen que para predecir un escenario futuro es suficiente conocer su estado actual (Baca et. al 2007). También, los Autómatas Celulares (AC), que tienen una influencia en sus probabilidades por parte de las áreas vecinas, permitiendo entender el porqué del cambio, su evolución y dónde se encuentra.

Por ello, para áreas con mucho cambio en la cobertura y uso del suelo como en los llanos orientales colombianos, especialmente el departamento del Meta, resulta interesante aplicar modelos predictivos con el fin de conocer qué pasará en períodos posteriores si se mantienen las tendencias de explotación agrícola, fenómenos de migraciones sociales y la problemática de violencia derivada del conflicto armado.

El objetivo de este trabajo es evaluar los cambios sobre el uso y cobertura del suelo en la zona central del Departamento del Meta, Colombia para realizar predicciones a mediano y largo plazo a través de modelos markovianos y de regresión.

2. Metodología

A continuación se describen los datos usados en la elaboración de este trabajo así como la metodología aplicada

2.1. Área de estudio

El departamento del Meta es una de las regiones menos pobladas en Colombia, es una zona principalmente ganadera y de explotación agrícola con plantaciones como la palma africana, arroz, plátano, maíz, algodón, cultivos frutales, y otros de carácter transitorio. El área de estudio comprende una extensión de: 4.150,5 Km² entre las coordenadas geográficas: 4° 07' 7,82" - 3° 40' 27" latitud norte y 73° 48' 00" - 72° 56' 25,42" longitud oeste. Cubre la totalidad de los municipios de San Carlos de Guaroa, Castilla La Nueva y porciones de los municipios: Villavicencio, Acacías, San Martín, El Dorado, Puerto López, Cubarral y Guamal, bañados por los ríos Metica, Guayuriba, Humadea y Ocoa, los cuales tienen importantes crecidas en las temporadas de invierno. En la Figura 1, se observa la localización del área de estudio.

2005 se tomaron 296 y 235 muestras respectivamente, con un intervalo de aceptación del 95%.

2.3. Modelos dinámicos

Una vez realizados los procedimientos necesarios para la comprensión del cambio del uso y cobertura del suelo, se utilizaron dos modelos, el de regresión y cadenas de Markov.

Para el modelo de regresión se graficaron los valores obtenidos para cada clase o estado, siendo los años (1988, 2000 y 2005) las variables independientes y el área de cada clase la variable dependiente. Se generaron líneas de tendencia que logaran ajustarse a los tres puntos evaluados de cada clase y posteriormente se extrapoló hacia los años 2010, 2012 y 2015 con las ecuaciones resultantes de la regresión para cada clase.

Las cadenas de Markov fueron aplicadas teniendo en cuenta la metodología empleada por Baca et al. (2007). Por tanto, se calcularon las matrices de porcentajes, los vectores de estado y las matrices de transición como es planteado por López-Granados et. al (2001).

Finalmente se construyeron los vectores de estado predictivos para estimar las áreas de cada clase obtenidas a períodos futuros.

3. Resultados y Discusión

Con la clasificación realizada se definieron once clases temáticas de las cuales se obtuvo su extensión para cada año analizado, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Medidas de las clasificaciones de 1988, 2000 y 2005

Clase de uso y cobertura del suelo	Años					
	1988		2000		2005	
	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)
Bosque de Galería	836,8	20,2	819,6	19,7	653,4	15,7
Palma Africana	80,6	1,9	329,8	7,9	418,6	10,1
Sabanas/Pastos	2.808,7	67,7	2.605,8	62,8	2.690,1	64,8
Cultivos	109,8	2,6	104,1	2,5	114,4	2,8
Suelo Expuesto	97,2	2,3	113,1	2,7	131,2	3,2
Quema	73,3	1,8	35,9	0,9	15,5	0,4
Área Urbana	2,8	0,1	6,3	0,2	8,8	0,2
Bancos de Arena	48,9	1,2	23,0	0,6	54,4	1,3
Cuerpos de Agua	92,4	2,2	99,4	2,4	58,8	1,4
Nubes	0,0	0,0	5,0	0,1	2,0	0,0
Sombra de nube	0,0	0,0	8,5	0,2	3,0	0,1
Total	4.150,5	100	4.150,5	100	4.150,2	100

De los resultados de la clasificación se observa que la mayor clase presente en el área de estudio es sabanas/pastos. El área urbana presenta crecimiento en cada uno de los períodos, y también puede notarse una disminución de los cuerpos de agua. Sin embargo, el mayor cambio porcentual encontrado fue en la clase palma africana, que tuvo un crecimiento entre los años 1988 y 2000 de 309% y entre el 2000 y 2005 de 27%, lo que indica una abrupta transformación del uso del suelo principalmente en el primer período (1988-2000) y de mayor estabilidad en el segundo (2000-2005). La región posee óptimas características fisiográficas para el desarrollo de este cultivo, pero el crecimiento tan acelerado en los primeros doce años, sugiere que hubo condiciones diferentes a las naturales. Según Pinzón (2008), el crecimiento de este cultivo está relacionado directamente con la dinámica del conflicto armado en esta zona.

La Figura 2, permite observar las variaciones de las clases entre 1988 y 2005, ya que cuenta con el detalle de incremento o disminución en algunas de ellas. En este mapa temático, se especifican de forma independiente clases como: incremento de palma africana, dado el caso en que haya sido palma en el tiempo 2 y no existiera en el tiempo 1, nuevo cultivo, entre otras.

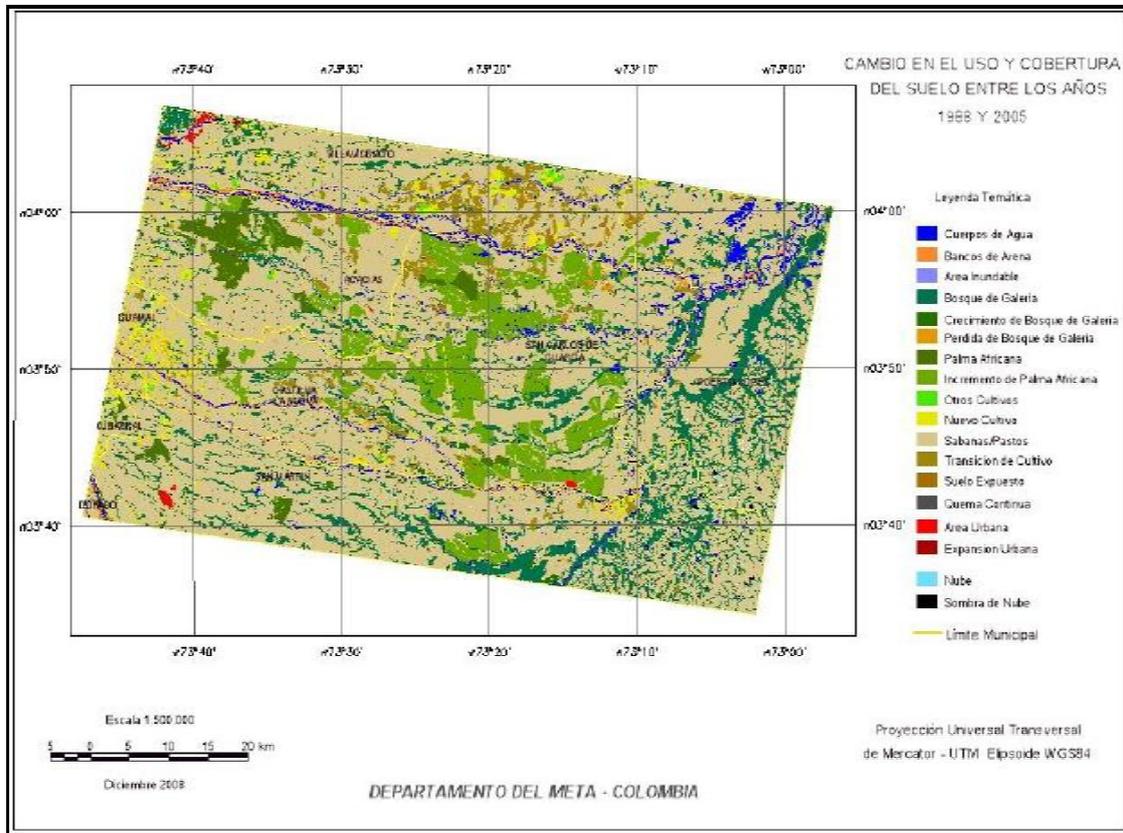


Figura 2. Mapa temático de cambio en el uso y cobertura del suelo de 1988 a 2005.

La diferencia de áreas de las clases temáticas en el tiempo muestra una transformación acelerada en esta región y la presencia de fenómenos antrópicos que inciden directamente en el uso del suelo, siendo ésta, una zona óptima para la aplicación de modelos dinámicos.

Para los modelos de regresión se estimaron diferentes tipos de tendencias para cada clase y se seleccionó la de mejor ajuste en cada caso, tal como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelos de regresión estimados

Clases Temáticas	Tipo de Modelo	Ecuación de la Curva
Bosque de Galería	Polinomial	$Y = -1,870x^2 + 7457x - 7E+06$
Palma Africana	Logarítmico	$Y = 40006 \ln(x) - 30376$
Sabanas/Pastos	Polinomial	$Y = 1,985x^2 - 7936x + 8E+06$
Cultivos	Polinomial	$Y = 0,149x^2 - 596,6x + 59540$
Suelo Expuesto	Polinomial	$Y = 0,134x^2 - 535,8x + 53304$
Quema	Lineal	$Y = -3,345x + 6725$
Área Urbana	Exponencial	$Y = 2E-57e^{0,066x}$
Cuerpos de Agua + Bancos de Arena	Logarítmico	$Y = -3279 \ln(x) + 30376$

Para los modelos markovianos se calcularon las matrices de transición de 1988 a 2000 y 2000 a 2005; además de una predicción realizada con el período completo de 1988 a 2005 obteniéndose los vectores de estado presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Vectores de estado para los años 2010, 2012, 2015, 2020, 2024 y 2036.

	1988 – 2000 (%)			2000-2005 (%)			1988-2005 (%)
	2012 n = 2	2024 n = 3	2036 n = 4	2010 n = 2	2015 n = 3	2020 n = 4	2036 n = 2
Bosque de Galería	19,19	18,65	18,16	13,50	12,15	11,40	13,4
Palma Africana	12,56	16,06	18,70	11,80	13,14	14,24	11,8
Sabanas/Pastos	58,92	56,04	53,86	65,40	65,32	65,01	65,40
Cultivos	2,38	2,29	2,21	2,80	2,78	2,76	2,80
Suelo Expuesto	2,59	2,46	2,36	3,30	3,34	3,35	3,30
Quema	0,80	0,75	0,72	0,40	0,37	0,38	0,40
Área Urbana	0,22	0,27	0,30	0,30	0,31	0,33	0,30
Cuerpos de Agua y Bancos de Arena	2,71	2,56	2,45	2,60	2,47	2,39	2,60

Comparando la proyección realizada para el período 1988-2000 con la proyección del año 2036, se puede observar que hay una sobreestimación en la clase palma africana y en bosque de galería. Sin embargo, al comparar con las proyecciones de los demás años se puede notar que los valores son muy similares y no difieren significativamente. Esta es una de las limitaciones encontradas con las cadenas de Markov, ya que este modelo acepta incluir sólo dos momentos de serie histórica y asume que la dinámica del paisaje es constante y estacionaria.

Con las cadenas de Markov fue posible estimar el error de la predicción realizada para el período 1988-2000 contrastado con el valor observado de la clasificación de la imagen CCD/CBERS 2 de 2005 como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Error de la estimación con cadenas de Markov.

	1988 (km ²)	2000 (km ²)	2005 (km ²)		Diferencia Extra-Obs. (km ²)	Error (%)
			Extrapolado	Observado		
Bosque de Galería	836,80	819,60	809,88	653,42	156,47	23,95
Palma Africana	80,60	329,80	408,85	418,55	-9,71	-2,32
Sabanas/Pastos	2.808,70	2.605,80	2.538,13	2.690,10	-151,97	-5,65
Cultivos	109,80	104,10	101,99	114,38	-12,39	-10,83
Suelo Expuesto	97,20	113,10	110,67	131,22	-20,55	-15,66
Quema	73,3	35,9	34,8	15,5	19,30	124,49
Área Urbana	2,80	6,30	6,77	8,76	-2,00	-22,77
Cuerpos de Agua y Bancos de Arena	141,30	122,40	118,30	113,16	5,14	4,54

En la clase quema se obtuvo un error bastante alto, el modelo markoviano mostró una estabilidad en esta clase para el 2005, pero en lo observado ésta disminuyó. Debido al nivel de error obtenido en esta clase, no puede ser analizada a través de los modelos predictivos expuestos, por lo cual no fue considerada en los análisis posteriores.

El mayor porcentaje de error, sin considerar la clase quema, se obtuvo en el área urbana que creció más de lo proyectado, igualmente en el bosque de galería se perdió mucho más de lo esperado, en general se puede decir que las cadenas de Markov presentaron un rendimiento o confiabilidad un poco superior al 75%, fundamentado en los resultados obtenidos de la comparación de los valores estimados con respecto a los observados para el año 2005.

De la aplicación de ambos modelos se obtuvieron las predicciones que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Predicciones estimadas con cadenas de Markov y modelos de regresión.

	Calculado con Modelos de Regresión (km ²)			Calculado con Cadenas de Markov (km ²)						
				1988 – 2000			2000-2005			1988-2005
	2010	2012	2015	2012 n = 2	2024 n = 3	2036 n = 4	2010 n = 2	2015 n = 3	2020 n = 4	2036 n = 2
Bosque de Galería	393,7	263,7	40,5	796,5	773,9	753,9	558,3	504,2	473,2	558,2
Palma Africana	521,2	561,0	620,6	521,4	666,6	776,3	488,7	545,4	590,9	488,7
Sabanas/Pastos	2.873,7	2.974,9	3.156,6	2.445,3	2.325,7	2.235,5	2.712,5	2.711,1	2.698,1	2.713,8
Cultivos	132,2	141,4	157,4	99,0	94,8	91,7	115,8	115,3	114,4	115,8
Suelo Expuesto	156,0	167,8	187,6	107,3	102,0	98,0	136,6	138,6	139,0	136,6
Área Urbana	12,3	14,0	17,1	9,0	11,0	12,5	11,9	12,9	13,7	10,6
Cuerpos de Agua y Bancos de Arena	105,0	101,7	96,9	112,6	106,3	101,9	106,7	102,3	99,3	106,7

La diferencia encontrada en la clase bosque de galería es bastante alta, el modelo de regresión estima que para el año 2015 habrá sólo 40,5 km², mientras que el modelo markoviano proyecta 504,2 km², las clases restantes no superan una diferencia del 30% con respecto al modelo de regresión para los años 2010 y 2015; y no superan el 40% para el año 2012. De acuerdo con lo anterior, no es recomendable estimar proyecciones a largo plazo porque estos modelos tenderán a linealizar el comportamiento de los cambios de usos y cobertura del suelo a largo plazo. A pesar de los factores exógenos como las problemáticas sociales por la violencia en la región, que influenciaron las transformaciones del uso y cobertura del suelo durante el período 1988-2000, se consideró confiable la predicción realizada con esta serie temporal de acuerdo a los resultados de error expuestos en la Tabla 4.

4. Conclusiones

Los modelos de regresión mostraron un rendimiento deficiente para intervalos de tiempo muy largos. Se concluye que el bajo desempeño puede estar relacionado con el poco volumen de datos. Un mejor rendimiento en el uso de estos modelos predictivos podría obtenerse con proyecciones hacia períodos más próximos a los datos de entrada del modelo, en otro caso teniendo una serie histórica del fenómeno a proyectar más continua.

El resultado obtenido con cadenas de Markov permite concluir que este modelo no sólo es pertinente para la predicción de usos en áreas urbanas (Almeida 2003) ó usos de densa cobertura vegetal aplicado a la Amazonía Colombiana (Gaitan 2007), sino también en áreas de alta explotación agropecuaria y simultáneamente de alta dinámica como lo es el Departamento del Meta con presencia de fenómenos sociales fuertes como la alta intensidad del conflicto armado en esta zona.

A pesar de las restricciones, los modelos de regresión funcionaron bien para proyectar las clases: palma africana, área urbana y sabanas-pastos, por que sus comportamientos tienen tendencias muy estables y definidas. El modelo Markoviano proyectó muy similar al modelo de regresión estas clases excepto el área urbana.

La clase palma africana pudo ser extrapolada satisfactoriamente para el año 2005 partiendo de la predicción realizada con cadenas de Markov en el período 1988-2000, lo cual indica que esta clase puede ser estimada a través de este modelo de predicción, de manera eficiente ante la tendencia de crecimiento presentada en los períodos anteriores.

Ambos modelos mostraron en sus proyecciones un incremento de los cultivos de palma africana, dado que las áreas cultivables de palma son limitadas se espera que la tendencia creciente de este cultivo no se mantenga, sino que en algún momento haya una desaceleración en su expansión hasta obtener una estabilización del mismo.

Se recomienda que para el uso de modelos predictivos se realice un levantamiento de datos mucho mayor al elaborado en este trabajo, incluyendo trabajo de campo (aunque la problemática de la región lo dificulta), ya que tener más datos del fenómeno en estudio permite hacer validaciones de los modelos y así tener conocimiento del porcentaje de error al que pueden estar sujetas las proyecciones.

Referencias Bibliográficas

Almeida, C.M. Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. 2003. 351p. (INPE-10567-TDI/942/A). Tesis (Doctorado en Percepción Remota) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.

Baca, J.F.; Netto, A.L.; Menezes, P.M.; Modelagem da dinâmica da paisagem com processos de markov. En: Meirelles, M.S.; Camara, G.; Almeida, C.M.; **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília: EMBRAPA, 2007. cap. 10, p. 497-528.

Gaitan, S. Análisis multitemporal y predicción de cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo en el noroccidente de la Amazonía Colombiana. 2007. 44 p. Monografía (Curso Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa María. 2007.

Henríquez, C. Propuesta de modelos predictivos en la planificación territorial y evaluación de impacto ambiental. **Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales** - Universidad de Barcelona. , v. 11, n. 245 (41), 2007. Disponible en: <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-24541.htm>> Accesado en: 27.ago.2008.

López-Granados, E.; Bocco, G.; Cantú, M. Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. **Investigaciones Geográficas**, Boletín del Instituto de Geografía UNAM, n. 45, p. 56-76, 2001.

Pinzón, F. Uso de técnicas de percepción remota para la estimación de incrementos de cultivos destinados a biocombustibles y su relación con el conflicto armado en la zona central del departamento del meta-Colombia. 2008. 69 p. Monografía (Curso Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa María. 2008.

Ponzoni, F. J.; Shimabukuro Y. E.; **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP: Parêntese Editora, 2007. 136 p.

Sandoval, V.; Oyarzun, V. Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. **Revista de Ciencias Forestales - Quebracho**, v. 11, p. 9-21, 2004. Disponible en: <<http://fcf.unse.edu.ar/pdf/Quebracho/01-sandoval-oyarzun-q11.pdf>>. Accesado en: 21.ago.2008.