

# Las cadenas de Markov en el análisis de cambios y asignación de usos de la tierra

*Markov chain in the land-use change and assignment analysis*

Francisco Briceño Valera\*

*Recibido: diciembre, 2003 / Aceptado: julio, 2004*

## Resumen

El desarrollo de los sistemas automatizados para la captura de información espacial y para el desarrollo de procesos de análisis ha permitido que la visualización y modelaje de los cambios de uso de la tierra sobre el tiempo se puedan hacer resumiendo la cantidad total, tipos y sitios de cambio. De igual manera, se han desarrollado instrumentos para indagar el patrón espacial de los cambios dentro o entre las categorías de uso y cobertura de la tierra. En el presente trabajo se muestra como el proceso estocástico conocido como cadenas de Markov, resulta ser un potencial modelo descriptivo y predictivo para los análisis de cambios de uso de la tierra y para las futuras distribuciones o asignaciones de usos. También, se presenta la utilización de un interfase automatizado para los análisis de cambios donde se emplea un Sistema de Información Geográfica (SIG) en formato raster y una aplicación que facilita la construcción y el análisis espacial de los mecanismos de cambio. La herramienta de análisis espacial es aplicada a un sector de la zona baja del estado Trujillo, utilizando el software Idrisi para Windows e información de imágenes de satélite de los años 1988 y 1996.

**Palabras clave:** uso de la tierra; SIG; probabilidades; sensores remotos; estado Trujillo; Venezuela.

## Abstract

The development of automated systems for the capture of space information and for the analysis process development has allowed that the visualization and modeling of land-use changes over time can be performed by summarizing the total quantity, types and places of change. In the same way, instruments have been developed to investigate the spatial pattern of changes inside of, or within the use categories and coverages of land. In this work, how a well-known stochastic process known as Markov chain turns out to be a potential descriptive and predictive model for the land use change analysis and for future distributions or assignments of uses is demonstrated. Also, the use of an automated interface is shown for the analysis of these changes where the utilization of a Geographical Information System (GIS) in raster format as well as an application that facilitates the construction and spatial analysis of the change mechanisms is performed. The tool for the spatial analysis is applied to a sector of the low land areas of the Trujillo State, using the software Idrisi for Windows and information from satellite images for the years 1988 and 1996.

**Key words:** land use; GIS; probabilities; remote sensing; Trujillo State; Venezuela.

\* Universidad de Los Andes, Núcleo Universitario "Rafael Rangel", Grupo de investigación GEOCIENCIA, Trujillo-Venezuela, e-mail: franshe@ula.ve.

## Introducción

Las posibilidades del desarrollo de un espacio geográfico están sujetas a las condiciones de diferentes factores, siendo de fundamental importancia el conocimiento sobre las disponibilidades que ofrecen los recursos naturales y sus potencialidades productivas. Conocimiento que debe estar basado en estudios que faciliten información cualitativa y cuantitativa sobre la situación real, recursos naturales y sobre el uso a que están siendo sometidos éstos, todo en conjunto dentro de las investigaciones integradas, de utilidad para la formulación de los planes de ordenación del territorio.

El análisis del uso de la tierra y los cambios que en ésta tienen lugar son de interés para numerosas ramas del conocimiento, ya que generan información básica para la formulación de planes, programas y proyectos en los organismos de planificación responsables de la ordenación y organización del territorio, y el manejo adecuado de los recursos naturales. El análisis de cambios de usos frecuentemente vincula la extracción de un dato de cambio dentro de una matriz que muestra la frecuencia de cambio desde una categoría  $i$  en tiempo  $t$  a una categoría  $j$  en tiempo  $t+1$ . Para el caso donde se asume que los cambios sólo dependen de la variable tiempo, se pueden representar las probabilidades de cambio mediante una cadena de Markov de primer orden, con lo que la matriz de cambios es una matriz de transición de las probabilidades condicionales que refleja la proba-

bilidad de cambio de una categoría en tiempo  $t$  a otra en tiempo  $t+1$

Sobre la base de lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo analizar los cambios temporales y espaciales del uso de la tierra en un sector de la zona baja del estado Trujillo, durante el período 1988 - 1996, mediante un proceso de análisis probabilístico de cadenas de Markov de primer orden. La metodología utilizada incluye la generación de mapas de uso de la tierra a través de clasificación de imágenes de satélite y un SIG en formato raster para la tabulación cruzada de los datos de las dos fechas y la determinación de las matrices de probabilidades de cambios de uso.

## Antecedentes

En los estudios del desarrollo, el conocimiento sobre el uso de la tierra y su dinámica es considerado un factor de importancia, por la significación que tiene como uno de los primeros análisis a realizar antes de cualquier propuesta de planificación para el futuro, dado que incluye la inspección y registro de la situación actual y la explicación de la razón de ser de la misma (Stamp, 1965). Es por esto que la Organización de Estados Americanos (OEA, 1969), al plantear la necesidad de estas investigaciones señala que los levantamientos de uso actual de la tierra son normalmente parte de los componentes de las investigaciones integrales para el desarrollo de los recursos, ya que se supone que estos levantamien-

tos proveen una medida de cómo están siendo utilizados los recursos en relación con su potencial de productividad, tal como es determinado por otros trabajos, en particular los realizados sobre potencialidades de los suelos y de capacidades productivas de la tierra

En nuestro país, numerosas investigaciones han considerado la utilidad de los estudios de uso de la tierra, de donde han elaborado trabajos, con aplicabilidad en los análisis de potencialidades para el desarrollo, en particular en el sector agrícola y en la planificación urbana. Cabe señalar el trabajo de Rojas (1972), quien utilizando de técnicas de fotointerpretación y análisis agroestadístico, reconoció las características del uso de la tierra en el medio montañoso de la cuenca de los ríos Chama y Capazón, en el estado Mérida, aporte que junto a los resultados de otros trabajos de la región andina, se aproximan a una visión de conjunto tanto de las condiciones de los recursos como de sus capacidades

Otros trabajos, precursores fuera del ámbito nacional, muestran el uso de las computadoras e información de sensores remotos para fines de investigación de los recursos de la tierra. Entre éstos podemos mencionar al de Pyott (1973), quien clasificó rangos de vegetación a través de computadora utilizando imágenes de satélite del ERTS-1 MSS, con relación a la expresión florística de una región de Arizona.

En investigaciones realizadas por autores como Bell (1974) y Logsdon (1996) se han estudiado los cambios en el uso de la tierra, comprobando que el uso de da-

tos provenientes de sensores remotos y metodologías de análisis probabilístico, permiten detectar problemas asociados con el impacto espacial causado por dichos cambios, al igual que facilitan la identificación de las tendencias de los cambios. Los resultados obtenidos han posibilitado la elaboración de diagnósticos antes o durante el desarrollo de los eventos, facilitando la orientación del mejor uso del territorio, al igual que el diseño de políticas adecuadas a la realidad socio-económica y físico natural.

Otros antecedentes donde se utilizan sistemas automatizados para el análisis son los trabajos de López, *et al.*, (1996) que evaluaron el avance de las deforestaciones en la Reserva Forestal de Caparo entre 1987 y 1994, utilizando dos imágenes HRV-SPOT, un Sistema de Procesamiento Digital de Imágenes y un SIG. También Gutiérrez (1999) utilizó procesamiento digital de imágenes y SIG en la determinación de cambios en la cobertura vegetal y uso de la tierra en la cuenca del río Mucujún en el estado Mérida, entre los años 1988 y 1996, utilizando dos imágenes de satélite LANDSAT TM, concluyendo que el uso de herramientas automatizadas facilitan el análisis y permiten ahorro de recursos.

## Metodología

La metodología utilizada en el presente trabajo se inicia con la clasificación, en categorías de uso de la tierra, de un espacio geográfico delimitado para el propósito del análisis, la cual se puede

obtener mediante la interpretación de información de sensores remotos.

El análisis de la dinámica de los cambios de usos se hace asumiendo que la dinámica de los cambios tiene un comportamiento que se puede explicar como un proceso estocástico, mediante una cadena de Markov de primer orden. Para el caso, se define una cadena de Markov de primer orden con el ejemplo, donde se tienen tres categorías de uso de la tierra 1, 2 y 3 (Figura 1). Si iniciamos en el uso (1) que puede ser considerado como el estado natural, no intervenido, el sistema puede cambiar al uso (2), un estado intervenido con actividades agrícolas o al uso (3), actividades urbanas y sus relacionados; también se puede dar el caso de que no cambie y permanezca en el uso (1) inicial. El proceso entonces se puede describir como una serie de valores de estado del sistema: 2,3,3,1,2,1,3,2, .....  $\alpha$ .

Si se denota la probabilidad de un cambio en uso de  $i$  a  $j$  durante el intervalo de tiempo  $(t, t+1)$  con la expresión  $p_{ij}(t, t+1)$ . La figura 1 muestra todas las posibilidades con sus propias probabilidades. Estas se llaman *probabilidades de transición* y son probabilidades condicionales, condicionadas por el estado previo o estado inicial (Bell, 1974).

La matriz de probabilidades de transición, designada por  $P_{ij}$  Scherer (1972), representa la probabilidad de moverse al estado  $j$  en tiempo  $T_{r+1}$  dado que el proceso está en el estado  $i$  en el tiempo  $(t)$ , lo cual es el mecanismo básico en el proceso Markov, que proporciona un potencial modelo descriptivo y prospectivo para el análisis de los cambios en el

uso de la tierra y la distribución de los mismos. Aplicando lo mencionado a una parcela se tiene que la probabilidad de que esté en uso  $i=1$  en un tiempo  $(t)$ , representado por la expresión  $\pi_i(t)$ , y la probabilidad de un cambio de uso de (1) a (2), o de  $i$  a  $j$ , durante un intervalo de tiempo  $(t, t+1)$  como  $P_{ij}(t, t+1)$ , entonces la probabilidad de que esa parcela esté en una categoría de uso  $j$  en el tiempo  $(t+1)$ , será dada por la expresión probabilística siguiente:

$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^n \pi_i(t) * P_{ij}(t, t+1)$$

Donde  $(n)$  es el número total de categorías de uso.

Simplificando, se tiene que la distribución de probabilidades de las variables aleatorias de uso de la tierra en tiempo  $(t+1)$ , será dada por la multiplicación matricial siguiente:

$$\pi_i(t+1) = \pi_i(t) * P(t, t+1).$$

Y para el caso donde las probabilidades de transición dependen sólo del intervalo de tiempo  $(t, t+1)$ , se considera que el proceso es temporalmente homogéneo, pudiendo escribirse la ecuación anterior en la forma siguiente:

$$\pi(t+1) = \pi(t) * P.$$

De esta manera, el proceso Markov se lleva a efecto mediante operaciones entre matrices. Pudiendo hacerse de forma automatizada, con el software apropiado,

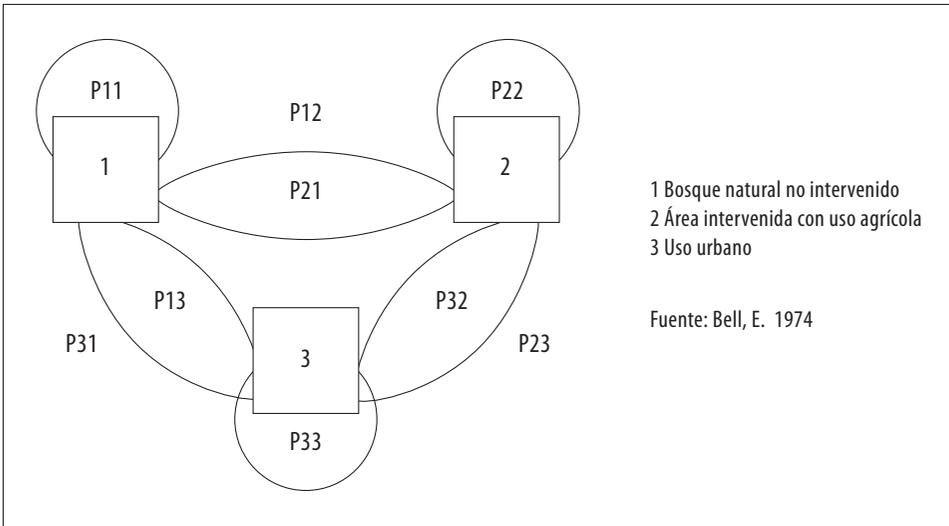


Figura 1. Probabilidades de cambios de usos

obteniéndose la matriz de probabilidades de transición a partir de la matriz de conteo Scherer (1972), generada de la tabulación cruzada de los datos de dos fechas que tienen las mismas categorías de uso en la clasificación. A partir de la matriz de probabilidades de transición o de tabulación cruzada proporcional, se genera la matriz de probabilidades condicionales que permite hacer el pronóstico de los cambios en función de probabilidades de cambio.

## Resultados

El trabajo se inició con la clasificación en categorías de usos de la tierra de dos sub-imágenes de satélite Landsat TM (escena 006-054) de los años 1988 y 1996, haciendo uso del software Idrisi para windows versión 2. El sistema

de clasificación utilizado fue una adaptación del sistema de clasificación formal o de cobertura del servicio de geología de los Estados Unidos, sugerido por Anderson (1976). Para el caso, se tienen las categorías de usos de la tierra: Urbano, Agua, Pantano, Bosque, Pastos, Cultivos, Tierras limpias y Matorral.

El territorio estudiado se localiza en la zona baja del estado Trujillo, entre las poblaciones de Sabana de Mendoza, Buena Vista y La Ceiba. Espacio geográfico que presenta una dinámica por sus condiciones de ubicación y de disponibilidad de recursos naturales, que permiten visualizarlo como de alta potencialidad para el aprovechamiento agrícola. Este espacio está sometido a cambios de uso por efecto de nuevas inversiones públicas y privadas que se dan en el área, a raíz de la creación de entidades municipales dentro del proceso de descentralización

y de división político territorial del país y de la región.

Luego de la elaboración de los mapas en categorías de uso de la tierra para los años 1988 y 1996, se realizó una tabulación cruzada de los datos de las dos fechas, obteniéndose la superficie en hectáreas para cada uso (Cuadro 1) y la matriz de conteo que muestra las diferentes celdas que han cambiado de acuerdo a su categoría de uso de la tierra (Cuadro 2).

Utilizando los datos del cuadro 2 y mediante una operación de multiplicación de matrices se calculó la matriz de relaciones de cambio o matriz de transición (Cuadro 3), que expresa las relaciones de cambio existentes entre los diferentes usos de la tierra.

Luego, con los datos de la matriz de transición, se calcula la matriz de probabilidades condicionales, que permite ver los probables cambios que ocurrirán, de mantenerse la tendencia detectada en la evolución de los usos de la tierra (Cuadro 4).

Como relevante en los cambios se tienen las probabilidades de cambio de las áreas de pantano (uso 3) y bosque (uso 4), hacia pastos (uso 5) y cultivos (uso 6) respectivamente, con las consecuentes implicaciones que se dan desde el punto de vista ecológico, donde se genera una reducción y hasta eliminación de especies naturales.

Otros cambios de importancia son los que probablemente se den, de acuerdo a la tendencia del uso, desde áreas de pastizales (uso 5) hacia cultivos (uso 6) y una baja probabilidad de permanencia de las áreas de cultivo, volviendo a ser pastos. Esto último se relaciona con los desequilibrios que presenta el sector en cuanto a la comercialización de los rubros agrícolas y la baja disponibilidad de infraestructura agroindustrial que limita la permanencia de las inversiones públicas y privadas en el sector agrícola vegetal.

Los cambios de uso de la tierra que se dan en este territorio y su tendencia

Cuadro 1. Superficie en hectáreas por categorías de uso de la tierra, 1988 y 1996

Categoría de uso	1988	1996
1 Urbano	376,20	704,97
2 Agua	1044,99	1080,63
3 Pantano	201,24	134,55
4 Bosque	15586,02	8447,13
5 Pastos	44483,49	41722,29
6 Cultivos	19418,94	28556,91
7 Tierras limpias	598,59	852,030
8 Matorral	893,16	1069,65

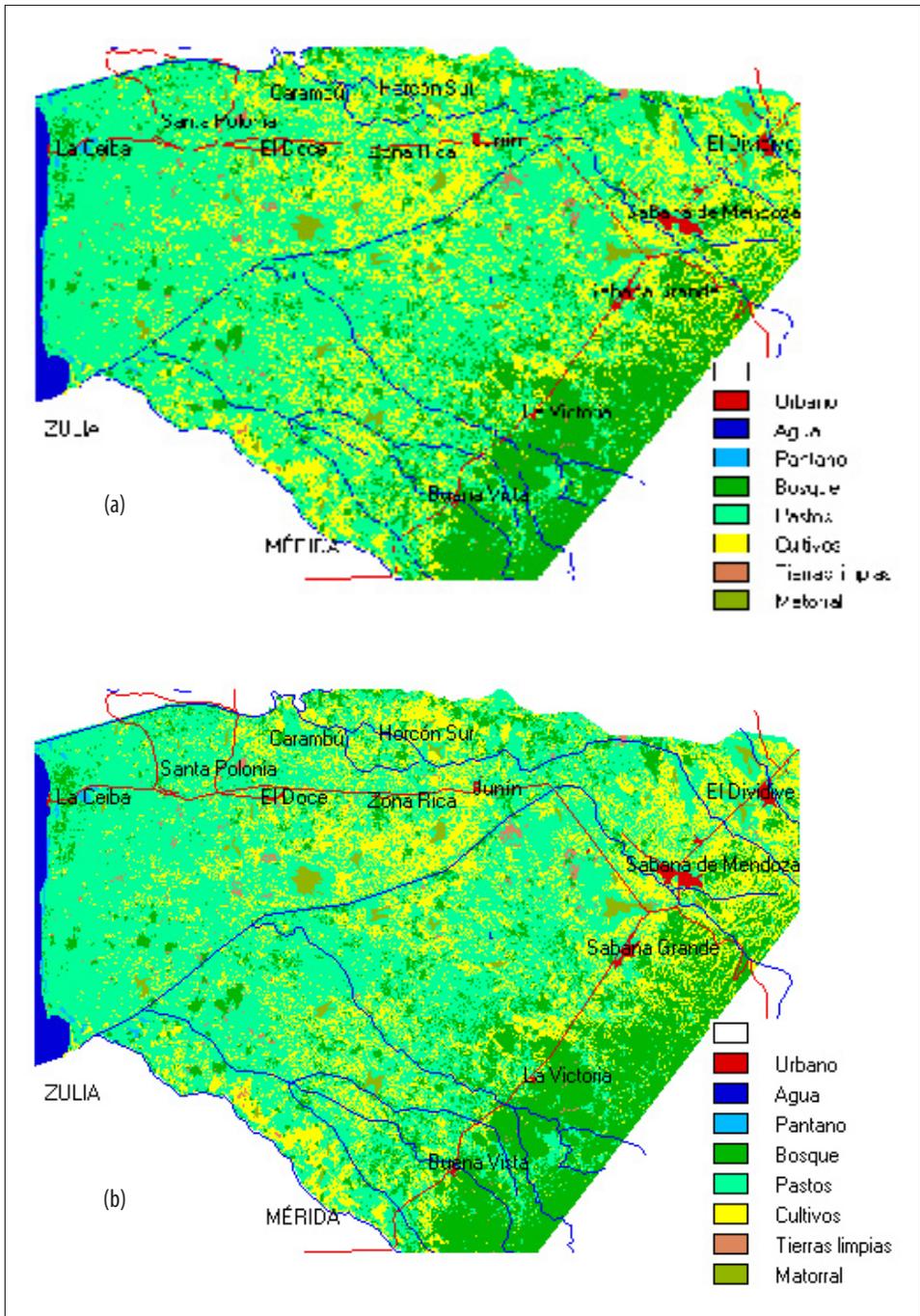


Figura 2. Mapas de usos de la tierra (a) 1988, (b) 1996.

Cuadro 2. Matriz de conteo

Usos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
0	322393	0	0	0	0	0	0	0	0	322393
1	0	4180	0	0	0	0	0	0	0	4180
2	0	1	11117	49	11	253	179	1	0	11611
3	0	0	30	646	117	1230	212	1	0	2236
4	3	365	71	49	63080	73711	34564	669	666	173178
5	377	2184	744	737	15296	283475	180192	5670	5586	494261
6	0	1045	32	10	15030	96508	95076	2766	5299	215766
7	0	31	13	4	211	3351	2746	214	81	6651
8	0	27	0	0	112	5053	4330	149	253	9924
Total	322773	7833	12007	1495	93857	463581	317299	9470	11885	1240200

Cuadro 3. Matriz de transición

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
0	0.2600	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2600
1	0	0.0034	0	0	0	0	0	0	0	0.0034
2	0	0	0.0090	0	0	0.0002	0.0001	0	0	0.0094
3	0	0	0	0.0005	0.0001	0.0010	0.0002	0	0	0.0018
4	0	0.0003	0.0001	0	0.0509	0.0594	0.0279	0.0005	0.0005	0.1396
5	0.003	0.0018	0.0006	0.0006	0.0123	0.2286	0.1453	0.0046	0.0045	0.3985
6	0	0.0008	0	0	0.0121	0.0778	0.0767	0.0022	0.0043	0.1740
7	0	0	0	0	0.0002	0.0027	0.0022	0.0002	0.0001	0.0054
8	0	0	0	0	0.0001	0.0041	0.0035	0.0001	0.0002	0.0080
Total	0.2603	0.0063	0.0097	0.0011	0.0757	0.3738	0.2558	0.0076	0.0096	1

Cuadro 4. Matriz de probabilidades condicionales

	0	Urbano	Agua	Pantano	Bosque	Pastos	Cultivos	Tierras limpias	Matorral
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Urbano	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	0.9574	0	0	0.2127	0.0106	0	0
Pantano	0	0	0	0.2777	0.0555	0.5556	0.1111	0	0
Bosque	0	0	0	0	0.3646	0.4255	0.1998	0.0036	0.0036
Pastos	0	0.0045	0	0.3333	0.0308	0.5736	0.3646	0.0115	0.0113
Cultivos	0	0	0	0	0.0695	0.4471	0.4408	0.0126	0.0247
Tierras limp	0	0	0	0	0.0370	0.5000	0.4074	0.0370	0.0185
Matorral	0	0	0	0	0.0125	0.5125	0.4375	0.0125	0.0250

tienen correspondencia con los planes de desarrollo ejecutados para la región. Los programas y proyectos establecidos por la Corporación de Los Andes desde la década de 1970, han tenido fuerte impacto con la instalación de pequeños sistemas de riego utilizando aguas subterráneas, lo cual se manifiesta en los espacios destinados a cultivos y pastizales. Es importante señalar que las superficies bajo riego, por las condiciones de los suelos, están zonificadas para cultivos intensivos. Sin embargo, por efecto del riesgo e incertidumbre los productores beneficiados han cambiado hacia uso ganadero, por ser este sistema el que tiene mejores condiciones de mercado y mayor tradición entre los productores.

Otra actividad de interés para la zona es la del cultivo de bananos, estimulada por inversión privada internacional que, aunque no forma parte de manera directa

de las programaciones de las instituciones del Estado para el desarrollo agrícola de estos espacios, genera una dinámica en el uso de la tierra. Los cambios del uso más evidentes se dan desde pastizales hacia el cultivo de banano, con la característica de que su permanencia es discontinua, debido a problemas de costos de producción, transporte y tenencia de la tierra; lo cual hace más competitivas otras latitudes para la inversión en esta actividad.

También genera dinámica en la ocupación y uso de la tierra, el ordenamiento político administrativo establecido a partir de 1988 y 1989 con la promulgación de la Ley Orgánica de Descentralización, Delimitación y Transferencia de Competencias del Poder Público y la Ley Orgánica de Régimen Municipal, que estimula procesos de descentralización y la elección directa del gobiernos estatales

y locales. Esto ha influido, además, en la expansión del espacio urbano, el cual ocupaba para 1988 cerca de 376 hectáreas, en tanto que en 1996 alcanza un total de 705 hectáreas urbanas aproximadas.

Por otra parte, la actuación del Sistema Hidráulico Trujillano (SHT), empresa creada para la administración y desarrollo de los recursos hidráulicos del estado Trujillo, desde los primeros años de la década del noventa, también se manifiesta en la dinámica de ocupación y uso de la tierra; especialmente en el crecimiento del uso destinado a cultivos, aun cuando algunos rubros agrícolas no han tenido una permanencia por efecto de las condiciones de mercadeo. Muestra de esto se tiene dentro del área de trabajo, en los sectores El Horcón y Carambú, donde los productores incorporaron superficies bajo riego a la producción de hortalizas de piso bajo y frutales, pero por no disponer de un mercado asegurado, se encuentra esta actividad en proceso de desaparición y abandono.

## Conclusiones

Las cadenas de Markov, como proceso para el análisis de cambios de uso, resulta ser una herramienta de utilidad para el estudio de la dinámica que se produce en el territorio, aportando información útil cuando se desea generar propuestas de asignación de usos y actividades permisibles, lo cual resulta ser de gran utilidad para la ordenación y uso del espacio y la planificación del territorio.

La aplicación del método de análisis probabilístico permite generar datos que se ajustan a la relación lógica entre las variables seleccionadas en el área de estudio, lo cual sugiere comprobar el ajuste del método, utilizando imágenes posteriores a las interpretadas para comparar la realidad de los cambios observados en este trabajo.

La validez relativa del método probabilístico para el análisis de cambios de uso y cobertura de la tierra, sólo podrá ser reafirmada una vez que se realice la evaluación correspondiente a su aplicación. Sin embargo, se infiere que el grado de subjetividad que el investigador impone a la valoración, debe disminuir en la medida que aumente el nivel de detalle de la clasificación y de la información utilizada; por ello se sugiere profundizar la investigación en este sentido para determinar en forma progresiva patrones de evaluación.

La utilización de los sensores remotos como fuente de información para explicar los cambios en la cobertura y uso de la tierra permite agilizar los estudios y facilita una visión de conjunto del comportamiento de los cambios y la tendencia que presentan los mismos.

Con datos provenientes de sensores remotos y metodologías de análisis con procesos estocásticos, se puede detectar problemas asociados con el impacto espacial causado por los cambios de uso de la tierra, al igual que se facilita la identificación de las tendencias de los cambios. Los resultados obtenidos ofrecen la posibilidad de elaborar diagnósticos antes o durante el desarrollo de los eventos. Ello

permite orientar la decisión del mejor uso del territorio al igual que hacer contribuciones para el diseño de políticas acordes con la realidad socio-económica y físico-natural.

## Agradecimiento

El autor agradece al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes por el apoyo financiero para la realización de la presente investigación, la cual se desarrolló como proyecto Código: NURR-H-167-00-09-C.

## Referencias citadas

- ANDERSON, J. 1976. *A land use land cover classification system for the with remote sensing data*. Geogical survey professional paper 964. USA.
- BELL, E. 1974. *Markov analysis of land use change an application of stochastic processes to remotely sensed data*. **Socio Economic Planning Science**, 8, 311-316.
- GUTIÉRREZ, J. 1999. *Utilización de técnicas de procesamiento digital de imágenes y sistemas de información geográfica en la determinación de cambios en la cobertura vegetal y uso de la tierra, cuenca del río Mucujún*. Estado Mérida. Venezuela. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Manejo de Cuencas. Mérida-Venezuela.
- LOGSDON, J. 1996. *Probability mapping of land use change: a GIS interfase for visualizing*. **Comput, environ and urban systems**. 20 (6), 389-398.
- LOPEZ, J. PERNÍA, E. y POZZOBON, E. 1996. *Avance de las deforestaciones en la Reserva Forestal de Caparo, entre 1987 y 1994, utilizando dos imágenes HRV de satélite SPOT y un Sistema de Información Geográfico*. **Revista Forestal Venezolana**, 40(2), 29-36.
- ORGANIZACIÓN DE ESTADOS AMERICANOS. 1969. *Investigación de los recursos físicos para el desarrollo económico; un compendio práctico de experiencias de campo de la OEA. en América Latina*. Washington DC, USA.
- PYOTT, W. 1973. Computer classification of range vegetation ERTS-1 MSS vs Floristic. En: *Proceeding 47th Annual Conference in Remote Sensing in Arid Lands*. University of Arizona. Arizona-USA.
- ROJAS, J. 1972. *Aspectos del uso de la tierra en las cuencas de los ríos Chama y Capazón*. Escuela de Geografía. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Trabajo de ascenso. Mérida-Venezuela.
- SCHERER, W. 1972. Aplicación de cadenas de Markov a la sedimentación cíclica de la formación oficina. *Cuarto Congreso Geológico Venezolano*. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Caracas.
- STAMP, D. 1965. **Geografía aplicada**. EUDEBA. Buenos Aires-Argentina.