

# Análisis espacial del uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica

**Edith Méndez**

*edithmen@catie.ac.cr*

**Mario Piedra**

*CATIE. mpiedra@catie.ac.cr*

**Alan González**

*CATIE. alang@catie.ac.cr*

**Jeffrey Jones**

*CATIE. jjones@catie.ac.cr*

En la cuenca del río Turrialba es evidente que las restricciones físicas del medio no impiden la probabilidad de ocurrencia del área urbana.

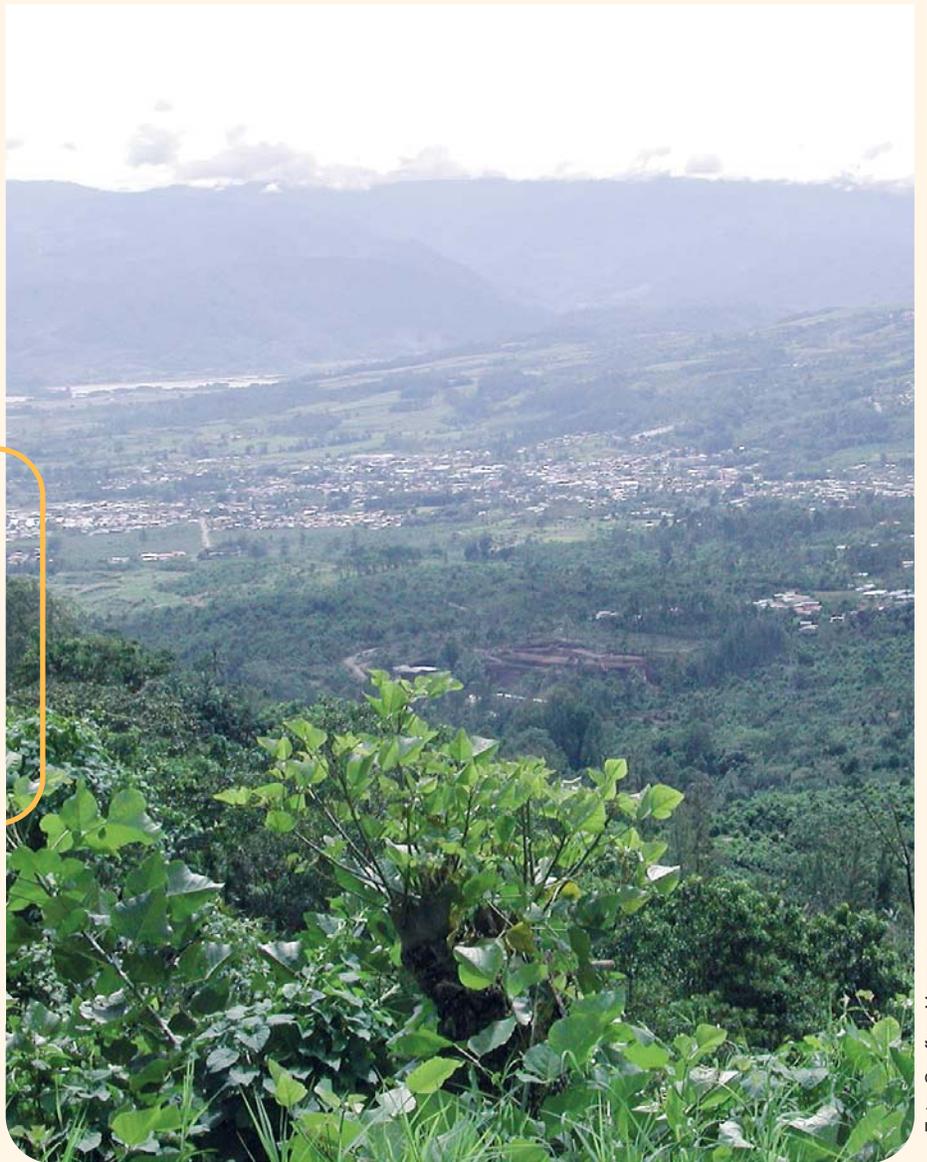


Foto: Geoffrey Venegas

## Resumen

Mediante un análisis espacial, el estudio buscaba identificar los factores físicos, naturales y socioeconómicos que influyen en el uso del suelo de la cuenca del río Turrialba. Con la ayuda del Sistema de Información Geográfica como herramienta para la elaboración de la base de datos, los diferentes usos de suelo se agruparon en seis categorías (bosque, pasto, café, caña, urbano y otros); como insumos se usaron fotografías e imágenes de satélite. A partir de modelos de regresión logística multinomial, los resultados demostraron que el uso del suelo en la cuenca del río Turrialba se explica por una combinación de los factores profundidad de suelo, tipo de suelo, zonas de vida, tamaño de finca y distancia como costo de acceso, la cual incluye un coeficiente de fricción a partir del mapa de pendientes. Los resultados demostraron que la fotografía aérea tiene un 67% de eficiencia en la predicción de cambios de uso de la tierra, y la imagen de satélite un 61%. No obstante, estos resultados no pueden generalizarse por la agregación de los usos del suelo en seis categorías para fines de comparación.

**Palabras claves:** Utilización de la tierra, análisis estadístico; análisis de regresión; manejo de cuencas; fotografía aérea; SIG; imágenes de satélite; río Turrialba; Costa Rica.

## Summary

### Space analysis of the land use in the watershed of the river Turrialba, Costa Rica.

By means of a space analysis, the study pretended to identify the natural, physical and socioeconomic factors that have influences on land use in the Turrialba River watershed. The Geographic Information System was used to categorize soil use into six classes: forest, pasture, coffee, sugar cane, urban and others. Two sources of information were used: aerial photographs and satellite images. The data were analyzed through logistical regressions of the type 'Multinomial Logit', using the LIMDEP econometric software. The results demonstrated that the land use at the Turrialba river watershed depends on a combination of factors, such as: soil depth, soil type, life zone, size of farm, and distance as access cost. Basing on the slope map, a coefficient of friction was included. The results demonstrated that the aerial photographs rendered an efficiency of 67% in the prediction of land use changes, and 61% the satellite images. These results cannot be generalized since data were manipulated to group uses into six categories, for comparison purposes. Additional studies should be carried out to validate the results.

**Keywords:** Land use; statistical analysis; regression analysis; watershed management; aerial photography; GIS; satellite imagery; Turrialba river; Costa Rica.

El uso apropiado y sostenido de la tierra es una meta fundamental hoy en día, ya que la demanda por este recurso se incrementa en forma incompatible con su disponibilidad. La planificación, ordenamiento y manejo del uso de la tierra adquieren cada vez mayor relevancia si se quiere establecer un manejo sostenible de las cuencas hidrográficas. Este estudio trató de identificar los factores físicos y socioeconómicos que influyen

en la distribución espacial del uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica, mediante el uso de modelos econométricos. Se cuantificaron posibles diferencias de precisión comparando dos fuentes de información diferentes: fotografías aéreas e imágenes de satélite.

Varios autores han investigado los cambios de uso del recurso tierra como una función de factores biofísicos y socioeconómicos (Turner *et al.* 1996, Baritto 2000, Briassoulis

2000, Veldkamp y Fresco 1997a y 1997b, Kaimowitz *et al.* 2000). En esta línea de investigación se utilizan modelos econométricos utilizando como fuentes de información datos provenientes de sensores remotos. Los modelos intentan medir la magnitud de la influencia que factores biofísicos y socioeconómicos tienen sobre cambios en el uso de la tierra. En este estudio, los modelos evaluaron variables físico-naturales como profundidad de suelo, tipo de suelo,

zonas de vida y pendiente; así como aspectos socioeconómicos: distancia como costo de acceso y tamaño de finca. Se diseñaron modelos de regresión logística multinomial como herramienta de análisis. El Sistema de Información Geográfica (SIG) se utilizó como instrumento básico para la obtención de datos espaciales de la cuenca a partir de imágenes de satélite y fotografías aéreas.

### Metodología

El estudio se llevó a cabo en la cuenca del río Turrialba, vertiente atlántica de Costa Rica. La altitud de esta cuenca varía entre 580 y 3300 metros sobre el nivel del mar y tiene una superficie de 7451 ha (Calvo 1993). La información fue suministrada por el departamento de Sistemas de Información Geográfica del CATIE (SIG-CATIE), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

La unidad básica de información utilizada representa a una entidad de muestreo (parcela) de 30 x 30 m (0,09 ha), arbitrariamente definida con características físico-naturales propias, en función de una serie de factores que determinan el tipo de uso de la tierra (Figura 1).

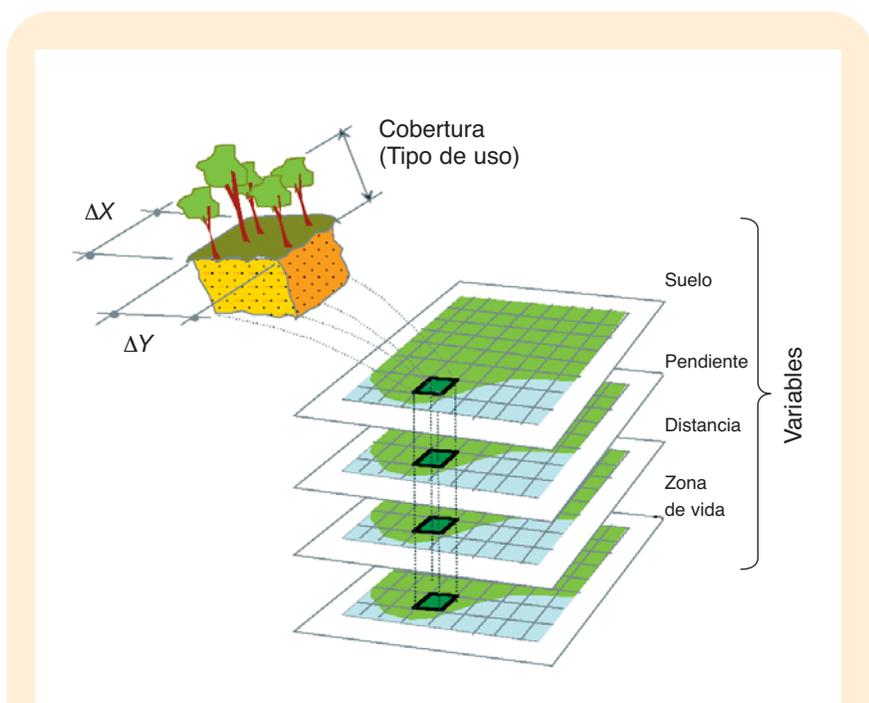
La variable de respuesta ( $Y =$  Uso de la tierra) se tomó de dos fuentes principales: fotografía aérea con una resolución de 2 m e imagen de satélite con una resolución de 28,5 m. Dado que la descripción y número de categorías de uso de la tierra en cada fuente no son las mismas se procedió a agruparlas por afinidades, a criterio de los autores, para obtener categorías de uso iguales en las dos fuentes y facilitar la comparación de resultados.

Con la ayuda del programa IDRISI, que permite sobreponer el mapa de usos de la imagen sobre el mapa de usos de la foto, se generó una matriz de confusión para medir

la correspondencia entre los usos de la tierra presentes en cada fuente de información. La fotografía aérea contaba inicialmente con 17 categorías de uso, las cuales se redujeron a las seis descritas en el Cuadro 1. La imagen de satélite fue agrupada en las mismas seis categorías de uso, a partir de las 21 originales (Cuadro 2).

Para explicar la presencia de un tipo de uso particular en la cuenca, se tomaron como variables explicativas o independientes una serie de características físico-naturales y factores de tipo socioeconómico, tales como: profundidad de suelo, tipo de suelo, zona de vida, tamaño de fincas, pendiente, distancia euclidiana y distancia como costo de acceso (Cuadro 3). Esta última se generó mediante un coeficiente de fricción a partir de la raíz cuadrada de la pendiente con base en el Modelo de Elevación Digital (MED) de la cuenca (Nelson y Hellerstein 1997).

Por medio de computadora se seleccionó una muestra aleatoria simple inicial  $n = 3000$  puntos (Baritto 2000). A fin de constatar la representatividad del muestreo, las proporciones de uso de la tierra en el universo se compararon con las proporciones en la muestra final y se verificó la representatividad inicial de la muestra. Además, se examinó la varianza muestral de los principales tipos de uso de la tierra en la fotografía aérea y en la imagen de satélite. Dado que sólo hay dos sucesos posibles asociados a un individuo ( $Y = \{0,1\}$ ), la probabilidad de ocurrencia del evento es  $Y=1$  en la muestra y la probabilidad de no ocurrencia es  $Y=0$ , por eso se genera una población binomial. Esta distribución se usa como una aproximación de variables discretas; por lo tanto, la varianza puede ser estimada a partir de la siguiente fórmula (Steel y Torrie 1985):



**Figura 1.** Representación gráfica de la unidad de información definida para el estudio  $\Delta X$  y  $\Delta Y$  corresponden al distanciamiento de 30 x 30 metros especificado

$$\sigma^2 = p(1 - p) / n \quad (1)$$

Donde:

$\sigma^2$ : Varianza

$p$ : Probabilidad de ocurrencia del evento ( $Y=1$ )

$1-p$ : Probabilidad de no ocurrencia ( $Y=0$ )

$n$ : Número total de observaciones de la muestra

Como puede observarse en las figuras 2 y 3 la varianza estimada tiende a estabilizarse antes de  $n = 2000$  puntos en cada uno de los usos, lo cual indica una relativa homogeneidad de la varianza con el incremento del tamaño de la muestra.

Dado el comportamiento de la varianza, se retomó otra muestra de  $n = 2000$  puntos para intentar minimizar la autocorrelación espacial. En este tipo de estudios, la correlación espacial aumenta con el tamaño de la muestra (Bockstael 1996, Gómez 1999, Nelson y Hellerstein 1997).

La clasificación de usos de la tierra ( $Y$ ) en cada una de las unidades de muestreo sólo define el estado del ecosistema en términos estáticos; es decir, define la investigación como espacial. El uso de la tierra se define como una variable discreta que representa las distintas alternativas de uso, las cuales se consideran nominales; o sea, que no existe ningún ordenamiento o jerarquía específica en los valores que toma debido a que esta clasificación representa opciones de uso mutuamente excluyentes. Así, se generaron modelos probabilísticos de análisis basados en modelos multinomiales para cada fuente de información. Asimismo, se modeló por separado la influencia de la variable distancia como un proxie (aproximación) del costo de acceso utilizando la distancia a la carretera más próxima tomando en cuenta la pendiente y distancia euclidiana (Nelson y Hellerstein 1997).

Los modelos econométricos se estimaron mediante el software econométrico LIMDEP (Greene 1998). Se calculó el poder de predicción medido a partir de las probabilida-

**Cuadro 1.**

Usos del suelo en la fotografía aérea agrupados por categoría de uso

Y	Categoría de uso	Usos agrupados	% en el universo
1	Pasto	Pasto puro, pasto sombra, suelo pasto	33
2	Bosque	Bosque, plantaciones forestales	27
3	Café	Café puro, café sombra, suelo café	20
4	Caña	Caña, suelo caña	7
5	Urbano	Urbano	5
6	Otros	Hortalizas, carreteras, cauce, parque nacional, sabana, suelo hortalizas	8

**Cuadro 2.**

Usos del suelo en la imagen de satélite agrupados por categoría de uso

Y	Categoría de uso	Usos agrupados	% en el universo
1	Pasto	Potreros	26
2	Bosque	Bht primario, Bht intervenido, Bht secundario Fas1, Bht secundario Fas2, Bht secundario Fas3, Reforestación, B montano primario, B montano sec. inicial, B montano sec. avanzado, Sucesión prim. montana	19
3	Café	Café	38
4	Caña	Caña	10
5	Urbano	Urbano	3
6	Otros	Agricultura, suelo agrícola, piña, sarán, árboles frutales, suelos descubiertos, agua	4

des medias. La escogencia de los modelos más apropiados se verificó comparando la significancia de los factores en cada uno de los usos.

### Resultados y discusión

Efectos de las variables sobre el uso del suelo "Pastos"

La profundidad de suelo resultó ser altamente significativa ( $P < 0,05$ ) para la imagen de satélite; sin embargo, el signo de los coeficientes fue positivo, lo que indica que la probabilidad de tierras de pastura aumenta a medida que el suelo es menos profundo. Las zonas de vida presentan efectos altamente significativos (positivos) sobre este uso del suelo, tanto en la fotografía aérea como con la imagen de satélite.

Tanto la distancia euclidiana como la distancia a la carretera más próxima, fueron significativas y negativas para la imagen de satélite. Esto significa que a medida que aumenta la distancia de un punto muestral hasta la carretera, disminuye significativamente la probabilidad de encontrar pastizales; o sea que las zonas de pastos dedicadas a la producción de leche se ubican cerca de las carreteras de acceso. A partir de fotografías aéreas se encontró un efecto significativo y directo entre el tamaño de finca y la presencia de pasturas. En general, se podría afirmar que entre más grande sea una finca y más cerca de la carretera se ubique, mayor es la probabilidad de encontrar zonas de pastoreo.

### Cuadro 3.

Matriz de variables explicativas o independientes

Profundidad de suelo	Tipo de suelo	Zonas de vida	Tamaño de finca	Pendiente (%)	Distancia euclidiana	Distancia como costo de acceso
Profundo (>90 cm) Medio prof. (40-90 cm) Delgado (20-40 cm)	Entisol Inceptisol Ultisol	Bht. Tp Bmh Mb Bmh P Bpm	5-20 ha >100 ha Áreas protegidas	0-3 3-8 8-15 15-30 30-60	Medida en metros desde el punto muestral a la carretera más próxima	Medida en metros desde el punto muestral a la carretera más próxima. Incluye un coeficiente de fricción basado en la pendiente



Foto: Geoffrey Venegas

Según el estudio la probabilidad de que el suelo sea usado para café aumenta con el tamaño de la finca

#### Efectos de las variables sobre el uso del suelo “Bosques”

Las variables profundidad de suelo y zona de vida fueron altamente significativas para la presencia de bosques en ambas fuentes de datos. En cambio, el tipo de suelo fue estadísticamente significativo sólo en los modelos generados con fotografías aéreas.

De igual manera, la distancia euclidiana y distancia a la carretera más cercana resultaron significativas solamente en los modelos con fotos aéreas. Este resultado puede deberse a la agrupación de usos pa-

ra fines del análisis. La fotografía incluye a las plantaciones forestales dentro de este uso. En cambio, en la imagen de satélite, las plantaciones no fueron identificadas y hubo un mayor número de categorías reagrupadas. A mayor distancia de la carretera y mayor tamaño de la finca, mayor es la probabilidad de encontrar bosques.

#### Efectos de las variables sobre el uso del suelo “Café”

La profundidad de suelo es altamente significativa para ambas fuentes de información en cuanto a

la probabilidad de ocurrencia de cafetales como uso del suelo. La distancia euclidiana y la distancia a la carretera más próxima resultaron altamente significativas con coeficientes negativos, lo que permite deducir que a menor distancia a la carretera aumenta la probabilidad de ocurrencia de cultivos de café. Este resultado puede estar ligado con la necesidad de fácil acceso que la cadena productiva y de comercialización de este cultivo requiere para su rentabilidad. Por otra parte, la probabilidad de que el suelo sea usado para café aumenta con el tamaño de la finca lo que coincide con Calvo (1993), quien encontró que en la parte media de la cuenca hay áreas muy extensas cultivadas de café, como las fincas Aquiares y Santa Rosa y el pueblo de La Esmeralda.

#### Efectos de las variables sobre el uso del suelo “Caña”

En la imagen de satélite, el factor profundidad de suelo es altamente significativo para el cultivo de caña de azúcar. El tipo de suelo y la zona de vida, en cambio, mostraron diferencias significativas solamente en la fotografía aérea. Este resultado puede deberse a la diferencia en precisión que presentan los modelos generados con diferentes fuentes de información.

De igual manera, el efecto de las distancias no es significativo a partir de fotografías aéreas; sin embargo, si se analizan a partir de datos prove-

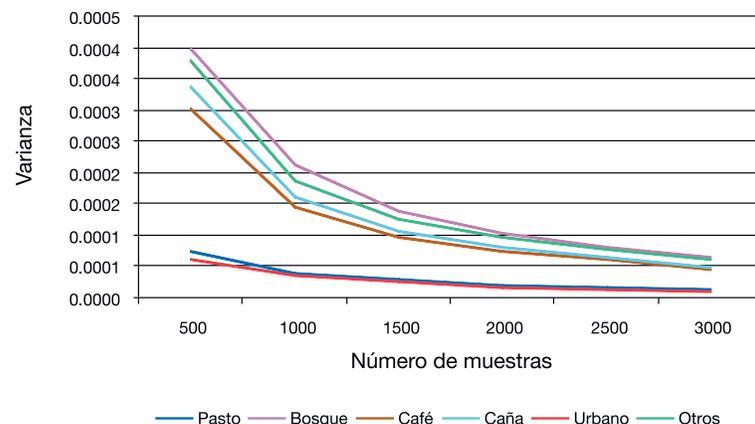
nientes de la imagen de satélite resultan altamente significativas, por lo que la probabilidad de que ocurra el cultivo de la caña se incrementa al disminuir la distancia a la carretera más próxima.

#### Efectos de las variables sobre el uso del suelo "Urbano"

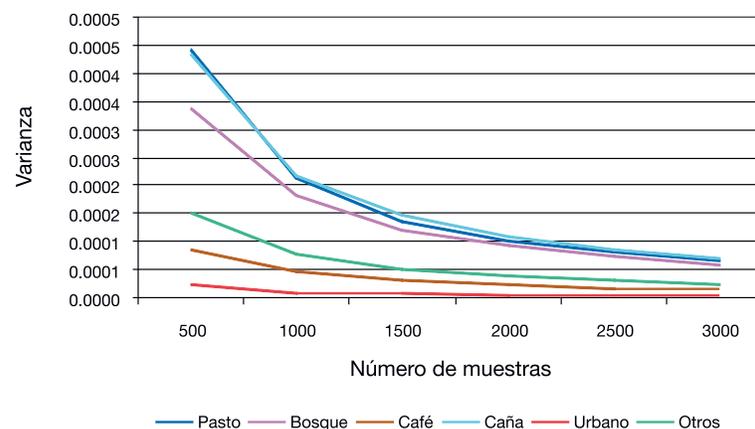
Baritto (2000) afirma que la dinámica del uso urbano no parece ser regulada por restricciones físicas del medio, ni por factores normativos (y si existen, la relación es muy débil); o sea, que cualquier área puede ser ocupada por asentamientos urbanos, independientemente de las características de la zona. En la cuenca del río Turrialba es evidente que las restricciones físicas del medio no impiden la probabilidad de ocurrencia del área urbana; aún más si se toma en cuenta que la ciudad de Turrialba es atravesada por el río Colorado. Según García (1990), el crecimiento del uso urbano en la cuenca se proyecta hacia las áreas vecinas al río.

#### Precisión de los modelos generados a partir de fotografías aéreas e imágenes de satélite

Los modelos generados a partir de datos obtenidos de la imagen de satélite presentaron un 61% de eficiencia en el poder de predicción. En cambio, los modelos generados a partir de la fotografía aérea presentaron un 67% de eficiencia. Este resultado nos conduce a aceptar la hipótesis de que los modelos generados con fotografías aéreas son más precisos que los generados con imágenes de satélite. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las clasificaciones de uso de la tierra en la cuenca no eran homogéneas. En la imagen de satélite se reflejaron inicialmente 21 categorías de uso y en la fotografía aérea 17; por lo que para fines del análisis se reagruparon los usos en seis categorías comunes, a criterio de los autores.



**Figura 2.** Comportamiento de la varianza de los tipos de uso de la tierra en la fotografía aérea



**Figura 3.** Comportamiento de la varianza de los tipos de uso de la tierra en la imagen de satélite

Este estudio coincide con los resultados obtenidos por Richters (1995), quien reconoce la ventaja de usar fotografías aéreas pues permiten realizar muestreos con un buen nivel de objetividad. Además, permiten conocer la ubicación de los obje-

tos específicos y diseñar un programa eficiente de estudio de campo. Sin embargo, el mismo autor sugiere que el éxito de trabajos realizados con fotografías aéreas depende del marco de referencia que se use para interpretarlas.

**Cuadro 4.**  
Modelos probabilísticos generados a partir de dos fuentes de información

Variables/Fuente	Fotografía aérea	Imagen de Satélite
Variables explicativas + distancia euclidiana	Modelo 1	Modelo 3
Variables explicativas + distancia a carretera más cercana	Modelo 2	Modelo 4

La dinámica del uso urbano no parece ser regulada por restricciones físicas del medio, ni por factores normativos; o sea, que cualquier área puede ser ocupada por asentamientos urbanos, independientemente de las características de la zona.

A partir de la matriz de confusión generada con el programa IDRISI, se comparó el grado de coincidencia entre el uso de la tierra en la fotografía aérea y el mismo uso en la imagen de satélite. En este análisis resultó que menos del 57% del área de cada uso de tierra fue consistente en ambas fuentes de información.

#### Conclusiones

- El uso de modelos multinomiales en el análisis e interpretación de la distribución espacial del tipo de uso de la tierra permite hacer inferencias altamente significativas de los factores físicos, naturales y socioeconómicos que influyen en dicha distribución.

- El uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, estudiado desde el punto de vista espacial, se puede definir como el resultado de la combinación de factores físicos, naturales y socioeconómicos.
- La distancia a la carretera más próxima, analizada como un costo, y la distancia euclidiana no mostraron diferencias en cuanto a su efecto sobre los diferentes usos de la tierra encontrados en la cuenca.
- El uso de fotografías aéreas demuestra ser más eficiente para la predicción que las imágenes de satélite, aunque la diferencia porcentual es pequeña. No obstante, este resultado no puede generalizarse pues la información fue manipulada para fines del análisis.
- La matriz de confusión creada para comparar los usos representados en la fotografía aérea y en la imagen de satélite mostró porcentajes de consistencia muy bajos, por lo que no se puede hacer una clara comparación entre los resultados de los factores que afectan cada uso de la tierra en cada fuente de información.

#### Literatura citada

- Baritto, F. 2000. Dinámica de factores asociados al uso de la tierra e implicaciones sobre el colapso ambiental de 1999 en la Costa Norte de Venezuela. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 104 p.
- Briassoulis, H. 2000. Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. Lesvos, Greece, University of the Aegean, Department of Geography. DERN. (Consultado enero 2001): <http://www.rri.wvu.edu/Webbook/Briassoulis/contents.htm>
- Bockstael, N. 1996. Modeling Economics and Ecology: The importance of a spatial perspective. *American Journal of Agricultural Economics* 78:1168-1180.
- Calvo, C. 1993. Dinámica, uso apropiado y sostenible de la tierra en la cuenca del río Turrialba. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 186 p.
- García, J. 1990. El análisis de cuencas hidrográficas aplicado al problema de inundaciones: el caso de la ciudad de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 191 p.
- Greene, WH. 1998. LIMDEP. Versión 7.0. User's Manual. Revised Edition. New Cork, Econometric Software Inc.
- Gómez, M. 1999. Econometría especial: Algunos aspectos generales. Universidad Complutense. <http://www.ucm.es/BUCEM/cee/doc/9901/9901.htm>
- Kaimowitz, D; Méndez, P; Puntodewo, A; Vanclay, J. 2000. Spatial Regression Analysis of Deforestation in Santa Cruz, Bolivia. CIFOR. (Consultado en enero 2001). <http://www.cgiar.org/cifor>
- Nelson, G.; Hellerstein. 1997. Do Roads Cause Deforestation? Using Satellite Images in Econometric Analysis of Land Use. *American Journal of Agricultural Economics* 79:80-88.
- Richters, E. 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central: Hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. San José, CR, IICA. 445 p. (Colección Investigación y Desarrollo /IICA no. 28).
- Steel, RGD; Torrie, JH. 1985. Bioestadística: Principios y Procedimientos. Segunda Edición. México, DF, McGraw-Hill. 622 p.
- Turner, D; Wear, D; Flamm, R. 1996. Land Ownership and Land-Cover Change in the Southern Appalachian Highlands and the Olympic Peninsula. *Ecological Applications* 6(4):1150-1172.
- Veldkamp, A; Fresco, L. 1997a. Exploring Land Use Scenarios and Alternative Approach Based on Actual Land Use. *Agricultural Systems* 55(1): 1-17.
- Veldkamp, A; Fresco, L. 1997b. Reconstructing Land Use Drivers and Their Spatial Scale Dependence for Costa Rica. *Agricultural Systems* 55(1):19-43.