

SIG como herramienta de estudio y planificación del uso del suelo en zonas agrícolas^{*1}

[Using GIS for land use planning for rural landscapes]

MARIO A. GIRALDO²

RECIBO: 18.08.2013 – APROBACIÓN: 16.12.2013

Resumen

Este artículo presenta los pasos metodológicos para el análisis histórico del uso del suelo usando sistemas geográficos de información, SIG, y sensores remotos, SR. Así mismo, muestra la aplicación de estas técnicas a un estudio de caso para la producción de herramientas digitales que puedan servir para planear y administrar zonas agrícolas de una forma eficiente y sostenible. En el estudio se describe como fotos aéreas de 1973 a 2001, y una imagen de satélite, fueron usadas para generar mapas básicos, mapas de cambio de uso del suelo, así como de unidades administrativas agrícolas. En este estudio se muestra como los mapas y tablas además de otros análisis generados con los sistemas SIG-SR se convierten en una importante estructura analítica para la toma de decisiones en el sector rural.

Palabras clave: *Uso del suelo, planificación rural, SIG, sostenibilidad*

Abstract

This paper discusses the use of geographic information systems, GIS, supported by remote sensing, RS, data as an important tool in the day to day decision making process on agriculture areas.

* Modelo para la citación de este artículo:

GIRALDO, Mario A. (2013). SIG como herramienta de estudio y planificación del uso del suelo en zonas agrícolas. En: Ventana Informática No. 29 (jul-dic). Manizales (Colombia): Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales. p. 111-128. ISSN: 0123-9678

1 Artículo de investigación científica y tecnológica proveniente del proyecto del mismo nombre inscrito en el grupo de investigación en efectos del cambio del uso del suelo en el ciclo del agua, en CSUN, Northridge, California. Traducido al español por Betulio Salazar G.

2 Ingeniero Agrónomo, MSc. PhD. Profesor Asistente, Departamento de Geografía, California State University Northridge (CSUN), Northridge (California, USA). Correo electrónico: mario.giraldo@csun.edu

The study is used to demonstrate how historical aerial photographs and a satellite image from 1973 to 2001 were used to produce land use, and land use change maps as well as maps of agriculture units for the study area that are later used for planning purposes of agriculture activities. The paper summarizes the methodological steps followed in the GIS analysis and the way that GIS-RS systems can be used in rural areas to plan and to manage day to day activities in agriculture areas under the philosophy of sustainable agriculture.

Keywords: Sustainable agriculture, GIS, rural planning

Introducción

En Colombia, como país tropical, la planeación del uso del suelo es un proceso complejo debido a la gran heterogeneidad y diversidad ecosistémica del territorio, a la falta de una política central y coordinada del estudio del territorio y a la fragmentación de funciones de manejo del territorio entre una variedad de entidades públicas no coordinadas. El inventario de tierras, a pesar de tener unos orígenes históricos en la colonia, ha sido relevante solo en los últimos 50 años, debido a su función catastral. Las tierras de la nación han sido consideradas baldíos sobre los cuales poca información existe y por lo tanto han sido marginadas del proceso de planeación. En los 400 años de historia reciente, el uso del suelo en Colombia ha seguido un patrón, fragmentado y caótico que obedece más a una reacción de entes gubernamentales a la presión e iniciativa particular de colonos y empresarios que a las funciones de una agencia central o de unas políticas nacionales de planeación.

Por otro lado, tragedias de gran magnitud (inundaciones, destrucción de zonas de cultivo, remociones en masa, daños permanentes a la infraestructura), están vinculados al mal uso del suelo particularmente en zonas rurales y agropecuarias, implicando elevados costos humanos y económicos se han convertido en un llamado de atención sobre la necesidad de modernizar los planes de ordenamiento territorial y a la incorporación de tecnologías informáticas de captura, sistematización, documentación y análisis de información en la toma de decisiones correspondientes al uso del suelo.

El uso de la tierra es el hilo que enlaza algunos de los temas vitales que enfrentan las comunidades rurales en la actualidad. Asuntos como el crecimiento económico, los desastres naturales, la protección de los recursos naturales y la calidad de vida se afectan directamente cuando se lleva a cabo un proceso de planeación deficiente, señalan Naveh et

al. (2002, 120). Aquellos funcionarios encargados de tomar las decisiones en el ámbito local, de acuerdo con Caldiz et al. (2001, 312), son los primeros beneficiarios de planes de ordenamiento territorial. En este contexto, para Castro & Ruerd (1998, 65) y Bill, Nash & Grenzdörffer (2012, 465), el proceso de planeación del uso del suelo con métodos tradicionales debe ser revisado, debido a que ha sido insuficiente para manejar la gran diversidad de actividades involucradas en los procesos agrarios y especialmente a que deben ser ejecutadas bajo los principios del desarrollo sostenible.

En las zonas agrícolas y comunidades rurales existe gran variedad de actividades (asentamientos humanos y áreas habitacionales de subsistencia agrícola, plantaciones comerciales, áreas de ecoturismo, áreas de conservación, zonas de protección de aguas, plantaciones de bosque comercial, granjas pecuarias y ganaderas, monocultivos de alto rendimiento, minifundios, redes fluviales y de carreteras y vegetación ribereña), que dificulta el proceso de planeación, unido a la complejidad creciente de los sistemas agrícolas, al mayor tamaño de las áreas explotadas, y a la necesidad de hacer un manejo eficiente de los asentamientos humanos y recursos naturales de conservación presentes en ellos. El ejemplo en la figura 1, muestra diversos sistemas productivos dentro de una explotación agrícola típica.

1. Fundamento teórico

1.1 Planeación rural a través de uso del SIG y de SR

En el proceso de planear el uso del suelo es necesario rediseñar procesos de planeación multi-objetivo que incluyan las diferentes actividades desarrolladas en las zonas rurales. En este contexto, las tecnologías geoespaciales se convierten en una herramienta ideal en la obtención de los elementos científicos y críticos necesarios para apoyar los procesos de planeación y diseñar el uso de la tierra de las comunidades agrarias, según coinciden Arnold et al. (2000, 1251), Martínez & Calera (2001, 1177) y Runquist, Zhang & Taylor (2001, 202). La versatilidad y la interactividad de un SIG proporciona una visión general del sistema agroecológico y de sus elementos constitutivos, así como muestra su valía al integrar todas las variables de los procesos agrícolas, ofreciendo una infraestructura jerárquica que puede llevarse hasta el nivel de subparcelas productivas, haciendo más eficiente sus posibilidades administración y manejo, como lo señalan Skop & Schou (1999, 427) y Williamson & Goes (2001, 167).

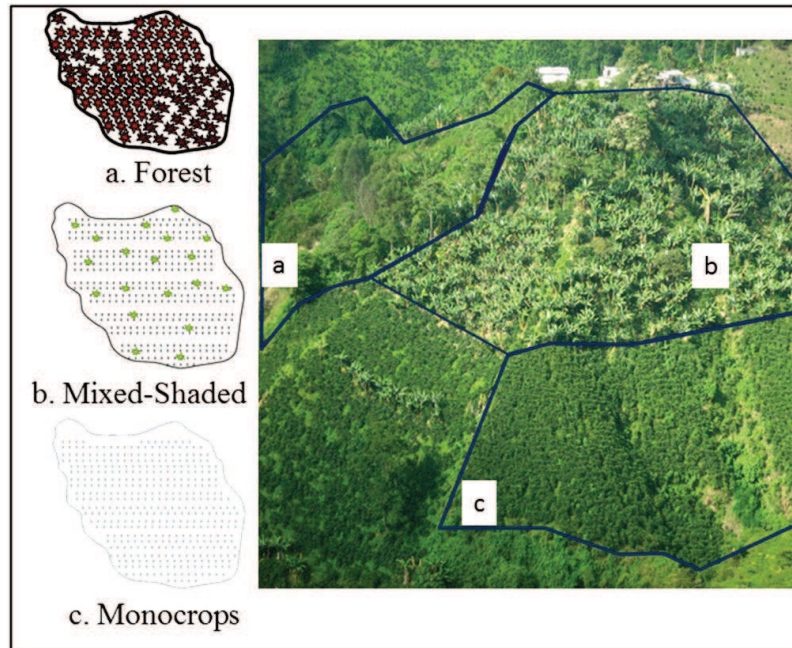


Figura 1. Diversidad agroecológica en una zona rural andina colombiana (Giraldo, 2012, 399)

De esta manera, indican Aspinall (2002, 1102) y Brooner (2002, 200), las tecnologías SIG y de SR soportan los procesos de toma de decisiones a partir de la interpretación correcta de la asociación local entre agricultura y recursos naturales, proporcionando elementos científicos para el direccionamiento de estrategias requeridas para el desarrollo sostenible, complementando el conocimiento empírico y las decisiones administrativas basadas en la tradición oral, como se puede observar en la figura 2, que muestra un mapa usado en los procesos cotidianos de administración.

El uso de las técnicas SIG y de SR para apoyar los procesos de planeación en áreas rurales ha sido bien documentada, expresan Brooner (2002, 200) y Lan (2012, 43). Por ejemplo, Bugg, Spencer & Lee (2000) muestran, cómo a través de la revisión de los desarrollos registrados en la recolección de datos, construcción de *databases* y manejo de datos, es posible desarrollar objetivos múltiples utilizando la colección compleja de datos. También Li & Yeh (2001) ofrecen un ejemplo de cómo los campos agrícolas pueden ser sometidos a una zonificación estratégica en áreas expuestas a una rápida pérdida de suelo agrícola usando un SIG, mientras Schipper et al. (2000), presentan un análisis de modelamiento automático.

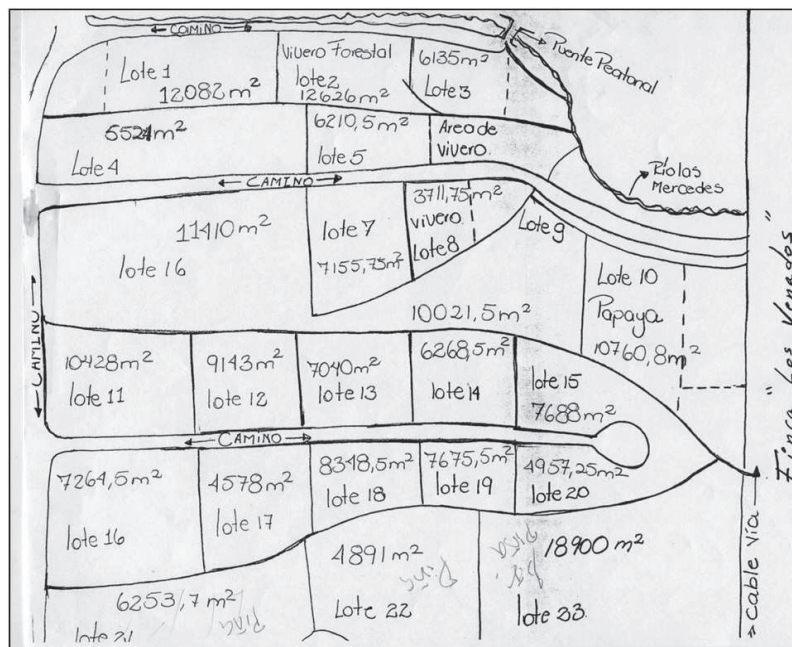


Figura 2. Mapa hecho a mano sobre campos agrícolas

El SIG no limita su aplicación a los procesos de planificación, y se pueden hacer aplicaciones múltiples del sistema después de que logre un estado de madurez, cuando todos los subsistemas contribuyan a alimentar el sistema, como lo afirman Bourgoin et al. (2012, 271). Por ejemplo: - la integración con sistemas automáticos, permite el desarrollo de prácticas de agricultura de precisión, - la predicción de los costos ambientales asociados a prácticas agrícolas puede realizarse a través de la integración con bases de datos contables (Skop & Schou, 1999, 428), - aumentar el potencial de rendimiento final a partir del proceso de zonificación agro-ecológica, como lo plantean Caldiz et al. (2001, 312). Todas estas aplicaciones de procesos agrícolas conforman un sistema compacto e integrado donde el riesgo natural involucrado es evaluado usando información científica, aplicando técnicas de simulación ecológica en escenarios hipotéticos, los cuales permiten hacer cálculos racionales acerca de los gastos potenciales.

1.2 Sensores remotos

El uso de las imágenes digitales de sensores remotos obtenidas usando satélites y de Mapa Temático, TM, para el análisis de ecosistemas naturales o agrícolas se basa en el análisis de los diferentes patrones de reflectancia de la luz que cambian de acuerdo con los

diferentes tipos de vegetación, suelo y cuerpos de agua. En el caso del estudio de vegetación, la interacción de la luz con pigmentos verdes produce diferentes patrones de reflectancia³, que son un indicador de las diferentes respuestas fisiológicas de las plantas a los factores ambientales.

La variedad de información espectral es complementada a su vez con una variedad de resoluciones espaciales que permiten detectar elementos en tierra de diferente tamaño. En el caso de la resolución espacial, el satélite *Landsat 7 ETM+* (*Enhanced Thematic Mapper plus*) Bandas 1-5 tiene una resolución espacial de 30x30 m con banda infrarroja térmica con 60 x60 m de resolución y está también equipado con una banda de resolución pancromática 15x15 m, lo que incrementa sus posibilidades de detección, señala Jensen (2000, 194).

Las imágenes *Landsat* tienen la habilidad, sin precedentes, de observar grandes áreas geográficas, dentro de una imagen, por lo que le permite complementar y ser complementado con otras fuentes de información, como las fotos aéreas⁴ y las expediciones en tierra, aumentando las posibilidades que ofrecen los sistemas de datos de forma individual.

1.3 Procesamiento de imágenes

Las ventajas de utilizar imágenes de satélites terrestres, en combinación con fotografías aéreas, para comprender la composición diferencial de la vegetación en grandes áreas naturales y de agricultura han sido señaladas en varios estudios, como: Brondizio et al. (1996), Ma, Hart & Redmond. (2001), Pereira, Congalton & Zrin. (2002), Read, Denslow & Guzmán (2001), Wear & Bolstad (1998), Parra & Hernández (2010) y Badaracco (2012).

Un método usado ampliamente para obtener representaciones de áreas a partir de fotografías aéreas, consiste en analizar la imagen utilizando un sistema de procesamiento de imagen digital, escaneando una imagen de 9x9 pulgadas para luego realizar los cálculos de área. En este pro-

3 Estos patrones de reflectancia son captados por el sistema de mecánica óptica sensible a bandas espectrales: verde, rojo, y dos versiones de infrarrojo reflectivas en el sistema MSS, mientras que en el sistema TM y ETM+ es sensible a: azul, verde, rojo, reflectivo infrarrojo, infrarrojo medio e infrarrojo térmico. La banda azul es útil en análisis de agua, la roja, es una de las más importantes al discriminar vegetación, el reflectivo infrarrojo puede determinar la cantidad de agua en los tejidos de las plantas, según lo señala Jensen (2000, 357).

4 En el caso de las fotos aéreas, se ha constituido en una herramienta para mapear la cobertura y el uso del suelo, para clasificar la vegetación y para monitorear los cambios espaciales y temporales de elementos en tierra. La alta resolución y la habilidad para programar vuelos que minimicen el efecto negativo de la nubosidad de baja elevación son algunas de sus ventajas sobre otras fuentes de datos de sensores remotos.

ceso se hace necesaria una rectificación geométrica a un mapa base⁵ de la imagen para corregir el desplazamiento topográfico causado por el relieve del terreno, y la distorsión causada por la variación de altitud de la cámara, ubicando todos los detalles de la imagen en una posición planimétrica correcta, de acuerdo con Jensen (2000, 152). Una vez que la fotografía aérea ha sido corregida con el mapa base, se realiza la digitalización en pantalla de los elementos de tierra adicionando a las bases de datos tablas de atributos que incluyan ubicación, tamaño, perímetros y áreas, los cuales permitan al usuario hacer cálculos y obtener valores totales.

2. Metodología

El estudio muestra la reconstrucción histórica del uso del suelo y evaluación del cambio en la cobertura vegetal en un área rural durante un periodo de 30 años, cuyo propósito es producir mapas de cobertura del suelo basados en la interpretación y clasificación de datos de sensores remotos y trabajo de campo. La comparación de las coberturas vegetales de diferentes periodos permite estudiar el cambio de uso del área, cuantificando la magnitud del cambio, que generan explicaciones apropiadas para dichos cambios.

Estos análisis pueden incluir el análisis del impacto de intervenciones en el ecosistema rural, cuyos resultados permiten generar recomendaciones para un proceso de planeación a largo plazo bajo la filosofía de desarrollo sostenible. Para este fin, los SIG deben documentar los tipos de uso del suelo y generar mapas temáticos de las subunidades administrativas que distinga entre cada una de las diferentes áreas productivas agrícolas o pecuarias, proporcionando datos para los procesos de planeación diaria.

2.1 Área de estudio

El estudio examina la aplicación de un análisis de cambio del uso del suelo a una zona agrícola y pecuaria de Costa Rica, que incluye un sector poblado adyacente que sirve de residencia para los habitantes de la región. El área tiene una larga tradición de actividad agrícola y ganadera con una distribución desigual entre pasturas, agricultura y reservas de bosque, donde el banano ha sido el principal producto en una gran plantación bajo el sistema de monocultivo.

⁵ Consideran Philipson (1997) y Jensen (2000, 152), que el mapa básico puede ser la imagen de satélite siempre y cuando esta haya sido procesada y convertida a mapa planimétrico con anterioridad.

2.2 Recolección de datos de campo

El primer paso en la creación de un SIG consiste en la creación del mapa básico a partir de información de sensores remotos. Para esta tarea, los institutos geográficos nacionales cuentan con mapas topográficos, fotografías aéreas⁶ y datos de satélite que pueden ser adquiridos para la elaboración de los mapas básicos. Así mismo, las agencias públicas y privadas, universidades y centros de investigación locales, pueden ser fuentes de datos para alimentar el SIG.

Es importante también efectuar un reconocimiento de campo del área de estudio para obtener información de campo que luego se usa en la clasificación de las imágenes, que incluye entrevista con actores locales, obtención de puntos referenciados con GPS, de manera que se suministre confiabilidad a la interpretación de las fotografías.

2.3 Adquisición y pre-procesamiento de datos

En este estudio, las fotografías aéreas en blanco y negro de los años 1973, 1981, 1982 y 1998 se escanean a 300 dpi usando un escáner Epson de base plana y el software *Expression 863 XLT*. Los ajustes exploratorios para reducir la opacidad de algunos rasgos presentes en algunas fotos hasta obtener una imagen satisfactoria del área de estudio, se realizan siguiendo a Verbyla & Chang (1997). El mapa puede ser la fuente para puntos de control base, GCP, destinados a corregir la foto, mientras *ERDAS* y *ArcGIS* son opciones para la corrección geométrica de las imágenes.

La primera imagen se usa para registrar las otras imágenes seleccionando no menos de 20 GCP rodeando el área de estudio. Por lo menos, cuatro de ellas se seleccionan lo más cerca de cada esquina de la foto para maximizar la posibilidad de un buen contraste, de acuerdo con Frazier & Page (2000, 1463). Algunas de las imágenes necesitan múltiples correcciones geométricas para reducir los valores de error, RMSE, incrementando el número de puntos de control base, enfatizando su contraste con el área de estudio, lo que lleva a que las imágenes resultantes pueden tener un error de un pixel o menos luego de la corrección.

2.4 Digitalización en pantalla

Los polígonos de las diferentes coberturas vegetales y usos del suelo se digitalizan directamente en la pantalla a partir de las fotos aéreas.

⁶ Las imágenes de satélite corregidas radiométrica y geométricamente se pueden obtener del U.S. Geological Survey (USGS) en el estándar *Nacional Land Archive Processing Sistem Data Format* (NDF).

Las capas así creadas para cada serie histórica son completadas con información de atributos y organizadas en las clases de uso de la tierra: guadua (*Bambusa guadua* L.), banano (*Musa balbisiana* L.), cultivos (mezcladas entre anuales y perennes), residencias, zonas inundables, bosque, pastos, áreas ribereñas y vías. El área y el perímetro se calculan para cada polígono, creando mapas de uso de la tierra por serie histórica. Con el fin de producir una comparación entre años para definir cambios de uso del suelo entre diferentes periodos, los polígonos son convertidos a un formato *raster* o de *pixels*, de acuerdo con Frazier & Page (2000, 1464).

2.5 Adquisición y clasificación de imágenes de satélite

A fin de incorporar la información al SIG se reproyecta la imagen de satélite al sistema de proyección y coordenadas seleccionado para el estudio. Subáreas del *Landsat ETM+* del área de estudio pueden crearse usando un archivo vector o un archivo de áreas de interés, AOI, que sirvan para recortar la imagen a los límites del área de estudio. Con el fin de obtener una mejor discriminación de los ríos, zonas inundables y cuerpos de agua, el AOI se puede ampliar partiendo de los límites del área.

Como alternativa al proceso de clasificación, la imagen de satélite puede ser usada como base para la creación de archivos vector digitalizados directamente en pantalla. Finalmente, para calcular la precisión de la clasificación, se realiza una visita de terreno a varios puntos, en este caso más de 40, del área durante un ejercicio de verificación, comparando el uso de la tierra observada en el terreno, con la obtenida de la clasificación y, también corrigiendo los límites de los polígonos, en caso de ser necesario.

2.6 Análisis de detección del cambio

Se efectúa comparando imágenes y fotos aéreas de diferentes fechas clasificadas previamente de manera independiente, mediante superposición en un ambiente *ArcGIS*, usando la función *unión* para calcular las áreas de cambio. Los resultados se resumen en histogramas y tablas de contraste, donde las columnas y las hileras representan los diferentes periodos analizados, teniendo especial énfasis en el contraste entre los datos anteriores y posteriores a la creación del poblado. Finalmente, con el fin de lograr una mejor comprensión de los datos, las diferentes interacciones entre categorías del uso del suelo se agrupan en categorías resumidas atendiendo al interés del estudio sobre la interacción entre agricultura, área residencial y bosque natural.

2.7 Verificación de la precisión y veracidad de la información

Para que sean confiables, los resultados de los cálculos para las clasificaciones del uso de la tierra deben mostrar una precisión superior al 90% de la clasificación de los puntos de observación en campo durante el ejercicio de verificación. Para esto se comparan un mínimo de 20 sitios-puntos por clase entre la imagen clasificada y la información de campo, que detectan errores e implican hacer clasificación correctiva⁷. En el trabajo de campo, a fin de aumentar la confiabilidad de la información, los resultados de la clasificación se discuten con los habitantes del área, garantizando así la concordancia entre la interpretación hecha de la foto y el conocimiento local del área.

3. Resultados

3.1 Uso del suelo

En la figura 3 se aprecian los mapas individuales que muestran la composición del uso del suelo del área de estudio para diferentes años. Además de mostrar los valores absolutos por clase y por año, se pueden usar gráficos para la evolución de la cobertura del uso del suelo por clases a lo largo de los 30 años incluidos en el estudio.

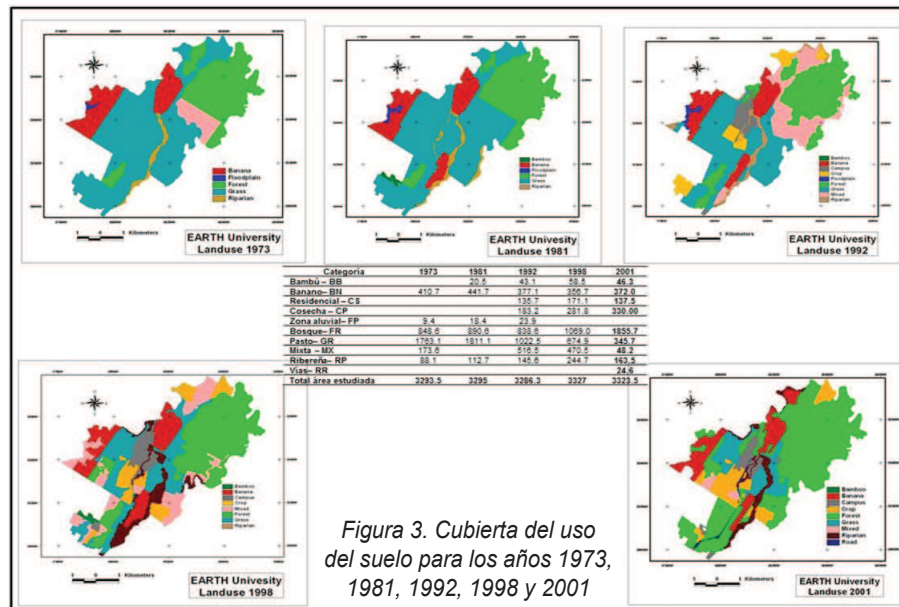


Figura 3. Cubierta del uso del suelo para los años 1973, 1981, 1992, 1998 y 2001

⁷ Índices matemáticos como Kappa y Tau pueden ser estimados para definir las fuentes de error y dirigir el proceso de corrección del mismo.

Con estas figuras pueden identificarse periodos en los que ocurrieron cambios importantes, tales como 1992 (figura 4). En las tablas se observan también las clases con los valores más altos para la cubierta del uso de la tierra, lo mismo que los años en que tuvieron la mayor extensión de cobertura, así como su contribución global.

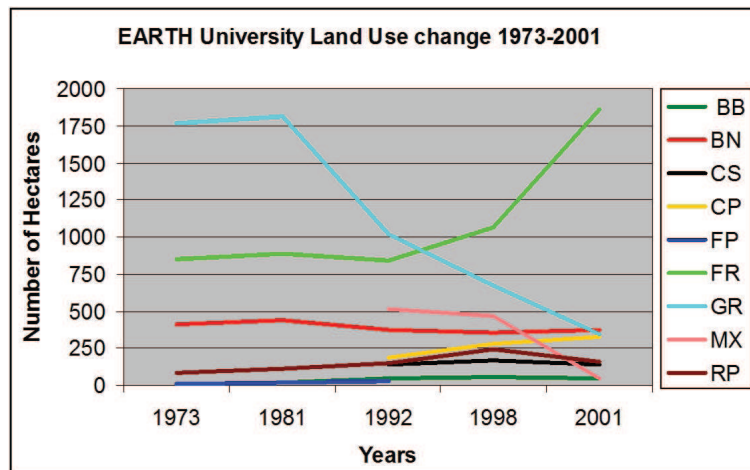


Figura 4. Cambios en el área por categoría durante el periodo 1973-2001.

Finalmente, la distribución espacial de las áreas expuestas a algún tipo de cambio en los distintos periodos puede apreciarse creando mapas adicionales que agrupen las áreas de acuerdo a criterios binarios de cambio/no cambio para un año en particular, como se observa en la figura 5.

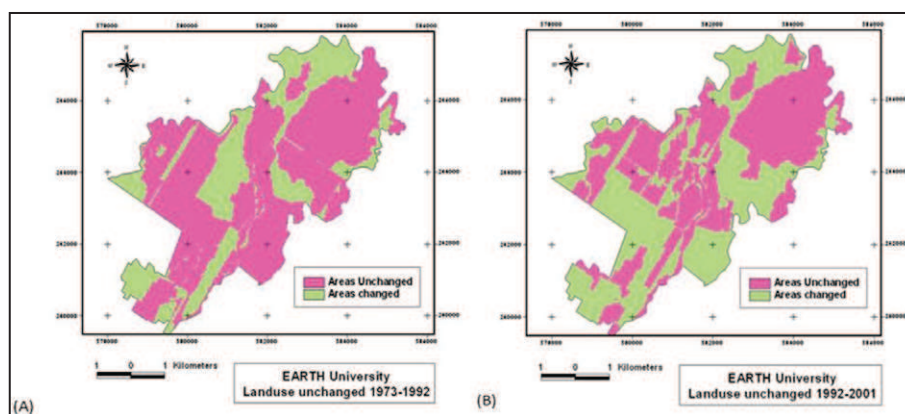


Figura 5. Áreas del uso del suelo con cambios y sin cambios antes (A) y después (B) de 1992.

3.2 Análisis SIG de los cambios en el uso de la tierra

Un resumen de los cambios del uso de la tierra se presenta en una matriz de cambio, donde al final de la fila y de la columna de cada categoría, se agregan los valores totales para un año en particular (Tabla 1). Ella ayuda a visualizar las clases que han perdido y ganado área durante el periodo del estudio, así como también permite observar áreas que han permanecido inmutables, así como hacer análisis cuantitativos del número de hectáreas bajo producción agrícola y pecuaria y obtener índices con relación a las áreas bajo conservación o áreas en bosque.

Tabla 1. Matriz de cambios del uso del suelo desde 1973 hasta 2001

	BB	BN	CP	CS	FR	GR	MX	RP	RR	Total
BN	22.1	275.5	4.8		89.4	12.2		4.6		408.6
FP		1.9			7.4					9.3
FR		8.3			837.2			3.8		849.3
GR	24.0	79.2	324.4	136.5	741.9	333.6	48.1	81.9	24.6	1794.3
MX					170.9	2.7				173.6
RP			0.4	0.7	1.3	1.5		66.3		70.2
Total	46.1	364.9	329.5	137.2	1848.1	350.0	48.1	156.7	24.6	3305.3

3.3 Toma de decisiones apoyadas por la base de datos SIG

El producto final del análisis SIG es la creación de una base de datos integrada y jerarquizada. La base de datos geográfica utilizada en este estudio incluye los archivos digitales en formatos de vector y *raster* de mapas de cubierta para el uso del suelo durante para los años 1973, 1981, 1992, 1998, y 2001 unidos a datos de atributo para cada una de las áreas y usos del suelo encontrados.

Así mismo, incluye un nivel secundario de información relacionada con la distribución espacial de las subunidades administrativas del área. Este nivel secundario es el más útil para el administrador y el personal encargado de la toma de decisiones, pues les permite coordinar y organizar las actividades diarias de la explotación rural al mismo tiempo que produce una información actualizada de sus operaciones. La base de datos geográfica contiene datos de atributos para cada subárea que permiten la creación de mapas individuales para cada una de las unidades administrativas (granjas, plantaciones, etc.) como se observa en la figura 6.

4. Discusión

4.1 Uso de la tierra en el área de estudio

Algunas de las observaciones más importantes como resultado del análisis de uso del suelo para el área de estudio son las siguientes:

- La cobertura boscosa en zonas de protección de caudales mostró una súbita interrupción y conversión a otros usos de la tierra, indicando una clara intervención humana y su posterior incorporación a áreas agrícolas y pecuarias de las fincas.

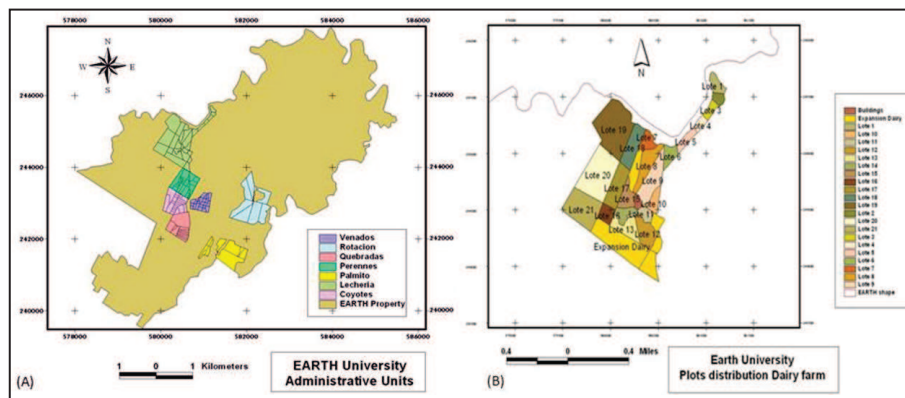


Figura 6. (A) sub unidades administrativas o fincas para toda el área de estudio, (B) mapa de muestra de una subunidad 'Lechería' o 'Dairy farm'

- En las áreas donde se observan incrementos de bosque ribereño, puede indicar una consolidación de las zonas de bosque hacia una zona de conservación más permanente.
- Con relación a las coberturas de bosque y pastos es posible reconocer cómo el área ha visto un activo proceso de reforestación de zonas de pastoreo señalado por otros investigadores⁸.
- Los bosques y pastos fueron identificados como las coberturas más importantes y por ende, las que eventualmente son responsables de la mayoría de los procesos ecológicos. Las demás categorías, especialmente las de cultivos, son secundarias a los procesos de reforestación. En el proceso de reforestación aparece una categoría de vegetación mixta que puede ser considerada como de transición entre bosque y pastos.

⁸ Earth Town digital files. Personal communication with Russo y Soto, in June 2002.

- Las comunidades rurales aparecen sufriendo un gran proceso de conversión desde el pastoreo a un sistema de agricultura de bosque complejo con restauración del elemento primario del ecosistema, como es el bosque, en un intento de fundación de un uso sostenible de la tierra.
- La tendencia del cambio en el uso de la tierra durante los últimos 30 años se orienta hacia el establecimiento de áreas de bosque, áreas de cosechas y a la preservación de la vegetación ribereña en las cuencas del río. También se define el área de dominio residencial y la distribución de parcelas de cosecha y unidades de pastura.
- Las fuentes de datos proporcionan una considerable cantidad de información útil no solo para los temas investigados aquí, sino también para nuevos estudios que consideren la asociación ecológica entre zonas agrícolas y de conservación.

4.2 Base de datos SIG y otros temas de análisis

Existen varios ejemplos de otras aplicaciones que pueden tener las bases de datos utilizados en este estudio, en el proceso de administración de las actividades agrícolas y ganaderas usando el marco del desarrollo sostenible.

Una de las aplicaciones más interesantes e inmediatas puede ser la integración de la base de datos SIG en los procesos administrativos del cultivo del banano y otros monocultivos, con el fin de mejorar los procesos de toma de decisiones. Con esta idea, se generan mapas de volúmenes de producción de las diferentes subparcelas con el propósito de identificar áreas con relativamente baja producción, en comparación con el potencial de la plantación. Esta información, según Stoorvogel et al. (2000, 200) y Zhang, Li & Fung (2012, 2265), sugiere un sistema que sirva de base a la toma de decisiones tratándose de áreas complejas donde los procesos de rotación, asociación y substitución puedan reemplazarse por sistemas monoculturales intensos.

En el caso de las zonas de conservación, las bases de datos desarrolladas también sirven de apoyo al estudio del bosque nativo a través de la identificación y subclasificación de los diferentes elementos de la cobertura de bosque, los cuales pueden ser organizados y documentados en la base de datos como un segundo nivel en similar al creado para las cosechas y las pasturas, según lo expresan Brown & Lugo (1994, 99) y, más recientemente, Chandna et al. (2012, 758).

5. Conclusiones

- Este trabajo muestra los pasos metodológicos para el análisis histórico del uso del suelo usando sistemas de información geográfica, SIG, y sensores remotos, SR. Así mismo, la aplicación de estas técnicas a un estudio de caso para la producción de herramientas digitales útiles para planear y administrar zonas agrícolas de una forma eficiente y sostenible. Se presenta cómo los mapas y tablas, además de otros análisis generados con los sistemas SIG-SR, se convierten en una importante estructura analítica para la toma de decisiones en el sector rural.
- A las personas encargadas de tomar decisiones, les permite identificar la combinación apropiada de las categorías del uso de la tierra y la sostenibilidad del sistema de producción. La base de datos geográfica es una fuente importante de información acerca de la manera como se puede realizar la rotación de cosechas o la sustitución de cultivos. Por ejemplo, el cultivo intensivo de ciertas áreas con plantaciones de banano, sugiere que a largo plazo, los procesos de planeación y manejo deben incluir estrategias para mantener la fertilidad del suelo, según señala Sun (2000, p), así mismo, periodos de barbecho y acumulación de materia orgánica se constituyen en opciones importantes para las zonas de monocultivo.

Referencias bibliográficas

- ARNOLD, C. L.; CIVCO, D. L.; PRISLOE, M. P.; HURD, J. D. & STOCKER, J. W. (2000). Remote-sensing-enhanced outreach education as decision support system for local Land use officials [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 66, No. 10 (oct). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 1251-1260. ISSN: 0099-1112<http://eserv.asprs.org/PERS/2000journal/oct/2000_oct_1251-1260.pdf> [consult: 20/09/2013]
- ASPINALL, R. (2002). A land cover data infrastructure for measurement modeling and analysis of land cover changes [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 68, No. 10 (oct). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 1101-1105. ISSN: 0099-1112<http://eserv.asprs.org/PERS/2002journal/oct/2002_oct_1101-1105.pdf> [consult: 20/09/2013]
- BADARACCO MEZA, R. R. (2012). Detección de la salinidad en los suelos de cultivos de algodón usando imágenes de satélite en la costa norte del Perú [en línea]. Tesis (Licenciado en Física). Lima (Perú): Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas. 112 p. <<http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/3071>> [consulta: 04/12/2013]
- BILL, R.; NASH, E.; & GRENZDÖRFFER, A. G. (2012). GIS in Agriculture [online]. In: KRESSE, W. & DANKO, D. M. (Eds.) (2012). Springer Handbook of Geographic Information. New York (NY, USA): Springer. p. 461-476. <link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-72680-7_24> [consult: 20/09/2013]
- BOURGOIN, J.; CASTELLA, J. C.; PULLAR, D.; LESTRELIN, G.; BOUAHOM, B. (2012). Toward a land zoning negotiation support platform: "Tips and tricks" for participatory land use planning in Laos [online]. In: Landscape and Urban Planning, Vol. 104, No. 2 (feb). Kidlington (Oxford, UK): Elsevier, p. 270-278. ISSN: 0169-2046. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204611003306>> [consult: 04/12/2013]

- BRONDIZIO, E.; MORAN, E.; MAUSEL, P. & WU, Y. (1996). Land cover in the Amazon estuary: Linking the thematic mapper with botanical and historical data [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 62, No. 8 (aug). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 921-929. ISSN: 0099-1112<http://eserv.asprs.org/PERS/1996journal/aug/1996_aug_921-929.pdf> [consult: 20/09/2013]
- BROONER, W. G. (2002). Promoting sustainable development with Geospatial technologies. [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 66, No. 3 (mar). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 199-201. ISSN: 0099-1112
- BROWN, S. & LUGO, A. E. (1994). Rehabilitation of Tropical Lands: A Key to Sustaining Development [online]. In: Restoration Ecology, Vol. 2, No. 2 (jun - published online: 07/04/2006). Malden (MA, USA): John Wiley & Sons, Inc. p. 97-111. Online ISSN: 1526-100X. <DOI: 10.1111/j.1526-100X.1994.tb00047.x> [consult: 20/09/2013]
- BUGG, A. L.; SPENCER, R. D. & LEE, A. (2002). Applying GIS for developing regional forest agreements in Australia [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 68, No. 3 (mar). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 241-249. ISSN: 0099-1112 <http://eserv.asprs.org/PERS/2002journal/mar/2002_mar_241-249.pdf> [consult: 20/09/2013]
- CALDIZ, D. O.; GASPARI, F. J.; HAVERKORT, A. J. & STRUIK, P. C. (2001). Agroecological zoning and potential yield of single or double cropping potato in Argentina [online]. In: Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 109, No. 4 (sep). Kidlington (Oxford, UK): Elsevier, p. 311-320 ISSN: 0168-1923. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192301002313>> [consult: 20/09/2013]
- CASTRO JIMÉNEZ, E. & RUERD, R. (ed.) (1998). Políticas Agrarias para el uso sostenible de la tierra y la seguridad alimentaria en Costa Rica. Heredia (Costa Rica): Programa de Publicaciones e Impresiones Universidad Nacional. 174 p.
- CHANDNA P.; LADHA, J. K.; SINGH, U. P.; PUNIA, M.; GUPTA, R.; SIDHU, B. S. (2012). Using remote sensing technologies to enhance resource conservation and agricultural productivity in underutilized lands of South Asia [online]. In: Applied Geography, Vol. 32, No. 2 (mar). Kidlington (Oxford, UK): Elsevier, p. 757-765. ISSN: 0143-6228 <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622811001585>> [consult: 04/12/2013]
- FRAZIER, P. S. & PAGE, K. P. (2000). Water body detection and delineation with landsat TM Data [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 66, No. 12 (dec). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 1461-1467. ISSN: 0099-1112<http://eserv.asprs.org/PERS/2000journal/dec/2000_dec_1461-1467.pdf> [consult: 20/09/2013].
- GIRALDO, M. A. (2012). Spatial heterogeneity of the rural Andes and its effects in monitoring water related processes at the regional level. In: Journal of Applied Geography, Vol. 34 (may). Kidlington (Oxford, UK): Elsevier, p. 395-402. ISSN: 0143-6228
- JENSEN, J. R. (2000). Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective. New Jersey (USA): Prentice Hall. 544 p. ISBN: 9780131889507
- LAN, B. (2012). The establishment of Agriculture Information System Based on GIS and GPS. In: QU, X & YANG, Y. (Eds.). Information and Business Intelligence, Vol. 268. New York (NY, USA): Springer. p. 506-511. <link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-29087-9_78> [consult: 20/09/2013]
- LI, X. & YE, H. A. G. (2001). Zoning land for agricultural protection by the integration of remote sensing, GIS and cellular automata [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 67, No. 4 (apr). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 471-477. ISSN: 0099-1112<http://eserv.asprs.org/PERS/2001journal/apr/2001_apr_471-477.pdf> [consult: 20/09/2013].
- MA, Z.; HART, M. M. & REDMOND, R. L. (2001). Mapping vegetation across large geographic areas: integration of remote sensing and GIS to classify multisource data [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 67, No. 3 (mar). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 295-307. ISSN: 0099-1112 <http://eserv.asprs.org/PERS/2001journal/mar/2001_mar_295-307.pdf> [consult: 20/09/2013].

- MARTÍNEZ BELTRÁN, C. & CALERA BELMONTE, A. (2001). Irrigated crop area estimation using Landsat TM imagery in La Mancha, Spain [online]. In: *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, Vol. 67, No. 10 (oct). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 1177-1184. ISSN: 0099-1112 <http://eserv.asprs.org/PERS/2001journal/oct/2001_oct_1177-1184.pdf> [consult: 20/09/2013]
- NAVEH, Z.; LIEBERMAN, A.; SARMIENTO, F.; GHERSA, C. & LEÓN, R. (2002). *Ecología de Paisajes: Teoría y Aplicación*. Buenos Aires (Argentina): Editorial Universitaria de Buenos Aires, EUDEBA. 608 p. ISBN: 950-29-0676-4.
- PARRA M., A & HERNÁNDEZ T., F. L. (2010). Identificación y delimitación de humedales lenticos en el valle alto del río Cauca mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite [en línea]. En: *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, No. 9 (nov). Cali (Colombia): Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. p. 77-88. ISSN 1692-9918. <<http://dintev.univalle.edu.co/revistasunivalle/index.php/eidenarevista/article/view/76>> [consulta: 04/12/2013]
- PEREIRA, V. F. G.; CONGALTON, R. G. & ZRIN, D. J. (2002). Spatial and temporal analysis of a tidal floodplain landscape using Geographic Information Systems and remote sensing [online]. In: *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, Vol. 68, No. 5 (may). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 463-472. ISSN: 0099-1112. <http://asprs.org/a/publications/pers/2002journal/may/2002_may_463-472.pdf> [consult: 20/09/2013]
- PHILIPSON, W. R. (1997). *Manual of Photographic Interpretation*. 2 ed. Bethesda (Maryland, USA): American Society for Photogrammetry and Remote sensing. 600 p. ISBN: 978-1570830396
- READ, J. M.; DENSLOW, J. S. & GUZMAN, S. M. (2001). Chapter 5. Documenting Land cover history of secondary forest in a humid tropical environment using time series remote sensing data. In: MILLINGTON, A. C.; WALSH, S. J. & OSBORNE, P. E. (2001). *GIS and remote sensing applications in biogeography and Ecology*. Collection: The Springer International Series in Engineering and Computer Science. New York (NY, USA): Springer. p.35-55. ISBN: 978-0792374541
- RUNQUIST, S.; ZHANG, N. & TAYLOR, R. K. (2001). Development of a field level geographic information system. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 31, No. 2 (apr). Kidlington (Oxford, UK): Elsevier. p. 201-209. ISSN: 0168-1699.
- SCHIPPER, R. A.; BOUMAN, B. A. M.; JANSEN, H. G. P.; HENGSDIJK, H. & NIEUWENHUYSE, A. (2000). 6. Integrated biophysical and socioeconomical analysis of regional land use. In: BOUMAN, B. A. M. (ed.) (2000) *Tools for Land use Analysis on Different scales with case studies for Costa Rica*. Dordrecht (the Netherlands): Kluwer academic publishers. p. 115-145. ISBN: 978-0792364795
- SKOP, E. & SCHOU, J. S. (1999). Modeling the effects of agricultural production: An integrated economic and environmental analysis using farm account statistics and GIS. In: *Ecological Economics*, Vol. 29, No. 3 (jun). Kidlington (Oxford, UK): Elsevier. p. 427-442. ISSN: 0921-8009
- STOORVOGEL, J. J.; ORLICH, R. A.; VARGAS, R. & BOUMA, J. (2000). 9. Linking information technology and farmer knowledge in a decision support system for improved banana cultivation. In: BOUMAN, B. A. M.; JANSEN, H. G. P.; SCHIPPER, R. A.; HENGSDIJK, H. & NIEUWENHUYSE, A. (Eds.) (2000). *Tools for Land use Analysis on Different scales: With Case Studies for Costa Rica*. Series: System Approaches for Sustainable Agricultural Development, Vol. 8. Dordrecht (the Netherlands): Kluwer academic publishers. p. 199-212. ISBN: 978-0792364795
- SUN, J. 2000. Dynamic monitoring and yield estimation of crops using the remote sensing technique in China [online]. In: *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, Vol. 67, No. 5 (may). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 645-650. ISSN: 0099-1112 <http://eserv.asprs.org/PERS/2000journal/may/2000_may_645-650.pdf> [consult: 20/09/2013].
- VERBYLA, D. & CHANG, K. (1997). *Processing digital images in GIS: A tutorial featuring ArcView and ARC/INFO*. Santa Fe (USA): On Word Press. 400 p. ISBN: 978-1566901352.
- WEAR, D. N. & BOLSTAD, P. (1998). Land-use changes in southern Appalachian landscapes: spatial analysis and forecast evaluation. *Ecosystems*, Vol. 1, No. 6 (dec). New York (NY, USA): Springer. p. 575-594. ISSN: 14329840

- WILLIAMSON, R. A. & GOES, J. (2001). Using geospatial technologies to enhance and sustain resource planning on native lands [online]. In: Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Vol. 67, No. 2 (feb). Bethesda (Maryland, USA): The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. p. 167-169. ISSN: 0099-1112 <http://eserv.asprs.org/PERS/2001journal/feb/2001_feb_167-169.pdf> [consult: 20/09/2013].
- ZHANG, Y. J.; LI, A.J.; FUNG, T. (2012). Using GIS and Multi-criteria Decision Analysis for Conflict Resolution in Land Use Planning [online]. In: Procedia Environmental Sciences, Vol 13. Kidlington (Oxford, UK): Elsevier, p. 2264-2273. ISSN: 1878-0296 <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029612002162>> [consult: 20/09/2013].