

CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA DE LA COBERTURA DE SUELO DE LA REGIÓN SIERRA DE TABASCO MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT ETM+

Non-supervised classification of soil cover in the Mountain Region of Tabasco through ETM+ Landsat images

CD Rullán-Silva ✉, LM Gama-Campillo, A Galindo-Alcántara, AE Olthoff

(CDRS)(LMGC)(AGA) Laboratorio Sistemas de Información Geográfica, División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Km. 0.5 Carretera Villahermosa-Cárdenas. Centro, Tabasco C P. 8600
cristobal.rullan@dacbiol.ujat.mx

(AEO) Departamento de Geografía. Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina

Artículo recibido: 19 de diciembre de 2008, **aceptado:** 7 de octubre de 2010

RESUMEN. La imagen compuesta elaborada a partir de tres imágenes Landsat ETM+ y su procesamiento digital a través de un algoritmo de clasificación no supervisada, permitió obtener una cartografía de la cobertura de suelo en la región Sierra de Tabasco que resultó heterogénea y fragmentada. Este paisaje complejo tornó insuficiente el método aplicado, por lo que la clasificación aquí presentada puede usarse considerando una precisión superior al 70 % en la mayoría de las clases de cobertura en la cartografía generada.

Palabras clave: Clasificación no supervisada, ISODATA, LANDSAT, coberturas de suelo, región Sierra de Tabasco.

ABSTRACT. The composite image prepared from three Landsat ETM+ images and their digital processing through a non-supervised classification algorithm, made it possible to obtain the soil cover cartography of the Tabasco Mountain Region, which resulted highly heterogeneous and fragmented. The complex landscape caused the method used to be insufficient. Nevertheless, the classification presented here is useful considering a precision greater than 70 % in the majority of the cover classes in the generated cartography.

Key words: Non-supervised classification, ISODATA, LANDSAT, soil cover, Mountain Region of Tabasco.

INTRODUCCIÓN

La importancia biológica y ecológica de la Sierra de Tabasco se refleja en una alta biodiversidad, cuya protección y conservación se procura a través de cuatro áreas naturales protegidas: Parque Estatal Agua Blanca, Parque Estatal La Sierra, Reserva Ecológica Yu-Balcah y Monumento Natural Cerro del Coconá (SERNAPAM 2007). Por otra parte la vegetación natural de esta región aporta servicios ambientales tales como estabilización climática y atmosférica (producción de oxígeno y captura de dióxido de carbono), reguladora fundamental del ciclo hídrico y de la humedad mesoclimática (aporte de humedad a través de la evapotranspiración de la vegetación), regulación hídrica en cuencas y aminoramiento de inundaciones y deslaves (el agua desciende más lentamente debido a la existencia de

vegetación, esto es de gran importancia en la mitigación de las inundaciones), protección de suelos frente a la erosión hídrica y fluvial, control de sedimentación, fuente de productos forestales maderables y de productos farmacéuticos, valor estético y turístico (Comité Técnico Interagencial-PNUMA 2000).

Sin embargo, en la región Sierra, los ecosistemas han sido modificados, a veces al grado de la pérdida de especies, como sucede con el desmonte de la selva mediante el sistema "tumba-roza-quema" (Ochoa-Gaona *et al.* 2007) que termina reemplazándola por comunidades de pastizales destinados a la ganadería (Manjarrez-Muñoz *et al.* 2007). Entre los años 1973-2003, Salazar-Conde *et al.* (2004) llevaron a cabo una evaluación espacial y temporal de la vegetación de la Sierra Madrigal (Tabasco) mediante fotografías aéreas, comprobando que un 80 % del

área de la selva de ésta región se encontraba deforestada debido a la expansión de la agricultura y los pastizales (que presentaron un incremento de 56 % y 10.2 %, respectivamente, en el periodo mencionado); estos autores también señalan que tal situación afecta a los suelos degradándolos químicamente en su perfil superficial (de cero a treinta centímetros) ya que se provoca la disminución de materia orgánica y nitrógeno.

Existen otros estudios de importancia sobre clasificación de vegetación y uso de suelo mediante percepción remota en el estado de Tabasco, como el estudio de los procesos de cambio en el uso del suelo mediante la comparación de diferentes técnicas de procesamiento de imágenes de satélite realizados por Zetina & Mas (S/f). Con la finalidad de conocer la deforestación a nivel de formación y de tipo de vegetación en el sureste mexicano, Díaz-Gallegos et al. (2001) realizaron estudios a partir del análisis de las bases geográficas digitales de INEGI 1993 y del Inventario Nacional Forestal 2000 concluyendo que “la dinámica del cambio de uso del suelo en el sureste de México presenta diferentes patrones a nivel estatal y municipal, los estados que presentan la mayor pérdida de cobertura vegetal son Veracruz y Tabasco; a nivel de formación se encontró que las selvas son las que han presentado la mayor reducción de su superficie”. También se cuenta con el Informe del Inventario Forestal Nacional 2000-2001 que cuantificó la distribución espacial del recurso forestal del país, usando datos del sensor Landsat ETM y puntos de control de cartas topográficas del INEGI a escala 1:50.000. Estudios como los mencionados son de suma importancia en zonas donde los ecosistemas son dinámicos, por su propia naturaleza como por las actividades antrópicas que los intervienen y modifican; la cartografía que se obtiene de ellos puede servir de base para proponer ordenamientos ecológicos y áreas naturales, entre otras.

Los métodos no supervisados de clasificación digital de coberturas de suelo tienen como principal ventaja el reconocimiento de patrones espectrales de manera autónoma e interactiva, sin sujetarse a un estricto conocimiento del sitio de estudio y permitiendo concentrar la tarea humana en la interpretación más que en la consecución de los re-

sultados (Chuvienco 2002). El uso de imágenes de satélite “ofrece mayor rapidez y confiabilidad en la generación de cartografía de los recursos naturales (...) y de realización de un mapeo periódico (monitoreo)” (Chuvienco 1985; Buendía-Rodríguez et al. 2002) ya que por ejemplo los satélites Landsat TM y ETM+ tienen cierta periodicidad (ciclo de paso cada 16 días) y están en órbita permanente. Los estudios con fotografías aéreas resultan más onerosos en la relación costo-beneficio con respecto al uso de imágenes de satélite, debido a que éstas últimas permiten realizar estudios en grandes extensiones de cobertura terrestre (Chuvienco 1985, 2002; Valdez-Lazalde et al. 2006).

El propósito del presente trabajo fue cartografiar la cobertura de vegetación en la región Sierra del estado de Tabasco, mediante imágenes Landsat ETM+ del año 2000 y 2003 a través del método de clasificación no supervisada, para construir una base de datos cartográfica digitalizada que distinga coberturas vegetales, con su información cuantitativa correspondiente, para ser utilizada en programas de monitoreo. Esta información generada también es básica para estudios de deforestación, cambio climático e inundaciones, inventarios de cobertura vegetal, para ordenamiento ecológico-territorial, análisis de fragmentaciones y conectividad estructural de los hábitats para la conservación de la biodiversidad, estudios temporales (monitoreos) que permitan comparar con la situación de la cobertura en otros años y diferenciar las dinámicas naturales y antrópicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales y equipos

Para abarcar la región Sierra de Tabasco (17° 15' - 18° 15' N y 92° 15' - 93° 15' O) que ocupa una superficie aproximada de 4 231 km² (Figura 1), se ocuparon tres imágenes de satélite Landsat ETM+, una de abril de 2000 y dos de marzo del 2003, las cuales se procesaron en una estación de trabajo que opera en ambiente Windows XP con el paquete informático para procesamiento digital de imágenes ERDAS Imagine®v8.5.

El material de apoyo utilizado fueron mapas temáticos de Uso de Suelo de Tabasco en lo que

corresponde a su parte serrana (INE-SEMARNAT 2000), así como ortofotografías aéreas de la Sierra de octubre del 2000. Para la verificación de coberturas se fotointerpretaron imágenes del programa Google Earth (Google Earth. Image®2005 Digital Globe) y se ocupó un sistema de información geográfica (S.I.G.) con capas vectoriales de la cobertura de vegetación y uso de suelo de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1994).



Figura 1. Localización de la región Sierra de Tabasco.
Figure 1. Location of Tabasco's Mountain Region.

Debido a la biodiversidad de la región Sierra, se realizó una generalización de sus coberturas de suelo, ya que una clasificación no supervisada requiere que previamente se determinen, de manera aproximada, las clases informacionales que se cartografiarán (Chuvieco 2002). La generalización resultante explica las asociaciones que se consideraron y se muestra en la Tabla 1.

Adquisición y pre-procesamiento de las imágenes multiespectrales

Las tres imágenes Landsat obtenidas fueron de la época de estiaje, para disminuir la variabilidad que se presenta en las respuestas espectrales de las cubiertas vegetales, debido a cambios fenológicos (Lillesand & Kiefer 1994). A partir de ellas se generó una imagen compuesta por medio de una operación llamada mosaico, que requirió del método de unión de imágenes por función de sobreposición, y para comprobarla se evidenciaron puntos de terreno mediante ortofotografías.

De dicho mosaico se extrajo el recorte del sitio de estudio con un área de interés construida por

digitalización del contorno político de las Áreas Geopolíticas Bases (AGEBs) que conforman cada uno de los cuatro municipios (Macuspana, Jalapa, Teapa y Tacotalpa) de la región de la Sierra (INEGI 2000a). Finalmente se obtuvo la escena de trabajo previa corrección radiométrica del recorte para las bandas 453, que en el diagrama de firmas dentro del análisis denominado estadísticas de entrenamiento (Chuvieco 2002), mostró más probabilidades de separar las categorías espectrales.

Clasificación No Supervisada

La clasificación no supervisada de la imagen compuesta se llevó a cabo mediante la aplicación del algoritmo de agrupamiento ISODATA (Interactive Self-Organizing Data Analysis Algorithm) con el apoyo de la cartografía de uso de suelo y vegetación descrita anteriormente. Posteriormente se evaluaron las clases asignadas mediante un Análisis de Separabilidad. En los casos de traslape se eliminó aquella clase con mayor valor estadístico de dispersión, mediante técnica de evaluación gráfica (ERDAS 1999) que muestra el diagrama de dispersión espacial de las dos clases a comparar y permite elegir de acuerdo al tamaño y forma de la nube la de menor dispersión.

La asignación de los píxeles a las clases seleccionadas se llevó a cabo con el criterio de decisión de la máxima verosimilitud (ERDAS 1999). Para posteriormente proceder a evaluar las estadísticas de entrenamiento de las firmas espectrales resultantes de las coberturas de suelo, por el método estadístico de separabilidad mediante la función de divergencia transformada, como en la etapa de preclasificación. A las firmas de una misma clase informacional se les aplicó una recodificación que permitió ordenar y eliminar la redundancia de clases. La nomenclatura de las clases informacionales que se obtuvieron responde a criterios de sistematización fisiográfico-florísticos de las comunidades vegetales que representan, y a una obligada generalización, dada la resolución a mesoescala del sensor Landsat, siendo el número de las mismas inferior a las complejas asociaciones vegetales en la realidad. Este es el caso de los relictos de la selva alta perennifolia en el sitio de estudio que quedaron comprendidos en la clase denominada selva perennifolia.

Tabla 1. Generalización de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco.
Table 1. Generalisation of soil cover in Tabasco's Mountain Region.

Algunos tipos de Cobertura	Características Generales
Selva perennifolia	Incluye la selva mediana: Estrato arbóreo cuyas alturas oscilan entre los 15 y 25 m, se destaca la comunidad de <i>Bravaisia integerrima</i> (canacoite); y la selva baja inundable que se encuentra asociada sobre todo con selva mediana subperennifolia y subcaducifolia; la selva baja inundable está formada por asociaciones de <i>Haematoxylum Campechianum</i> (palo de tinto), <i>Metopium brownei</i> (chechenales) y <i>Cameraria latifolia</i> (chechen blanco de sabana).
Vegetación hidrófila	Se desarrollan en cuerpos de agua de escasa profundidad (0.5 a más de 1 m). Existen varios tipos de comunidades de hidrófilas, predominan <i>Typha domingensis</i> (tule), y <i>Ceratophyllum demersum</i> (zargazo) generalmente enraizadas.
Vegetación secundaria	También llamada "acahuales", presentan una distribución heterogénea. Su origen está relacionado con la perturbación antropogénica de la vegetación primaria y la tendencia de ésta a recuperar su estado original.
Pastizal	En algunos sectores dominan las gramíneas distribuidas en manchones, junto a comunidades de ciperáceas y estratos de árboles bajos, aunque también coexisten con relictos de selva alta y mediana perennifolia. Junto a la sabana arbolada, las comunidades de herbáceas forman un mosaico, con muchas fases intermedias, en las que además hay que agregar las comunidades de <i>Acoelorrhaphe wrightii</i> (palmar o tasistal) y el bosque de galería, el pastizal de zonas inundables, y el pastizal inducido para ganadería.
Agricultura de Plantación y Temporal	Destacan las plantaciones de plátano, caña de azúcar, cacao y piña, y los cultivos agrícolas de arroz y maíz. En las laderas de las serranías se cultiva frijol para el autoconsumo.

Fuente: López-Hernández (1994); Pennington & Sarukhán (2005); Rzedowski (1986).

Por último, debido a la complejidad y fragmentación espectral del sitio de estudio se aplicó a la imagen temática un filtraje categórico 5x5 para obtener una mayor nitidez en las clases al reasignar sus píxeles aislados.

Evaluación de la clasificación

La evaluación de la clasificación se hizo por medio de una matriz de confusión o de contingencia (ERDAS 1999). Se seleccionaron 512 píxeles, si bien Congalton (1991) establece 256, mediante muestreo aleatorio estratificado, con un mínimo de 10 por clase, y a cada píxel se le asignó una clase de pertenencia, sin ocupar la clasificación a evaluar, mediante su reconocimiento con información auxiliar: Principalmente el S.I.G. de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1994), cartografía en papel, fotografías aéreas e imágenes del programa Google Earth (Google Earth. Image®2005 Digital Globe). Al finalizarse la prueba se construyó una matriz comparada entre las clases de referencia y las de clasificación, obteniéndose el porcentaje de

precisión global y de cada categoría. En la matriz de confusión los conceptos de "usuario" y "productor" se refieren al que hará uso del mapa temático en cuestión y al que lo construyó, respectivamente. De tal suerte que será éxito o fracaso para el productor y para el usuario confiabilidad o riesgo, la correspondiente mayor o menor precisión obtenida en una clasificación. Así una mayor precisión o exactitud para el usuario corresponde a una menor cantidad de errores de comisión y una mayor precisión o exactitud del productor será equivalente a una menor cantidad de errores de omisión (Chuvienco 2002).

RESULTADOS

Cartografía de la Cobertura de Suelo de la región Sierra

Con el análisis espectral de la imagen compuesta de la escena de trabajo se obtuvieron 7 clases informacionales: Ríos, lagos y lagunas; selva perennifolia; vegetación secundaria de selva perenni-

folia; vegetación hidrófita; agricultura de plantaciones y de temporal; pastizal y asentamientos, infraestructura y actividades antrópicas (incluye áreas sin vegetación aparente). En general la nomenclatura de las clases responde a criterios de sistematización fisiográfico-florísticos de las comunidades vegetales que representan, que dada la resolución a mesoescala del sensor Landsat el número de las mismas es muy inferior a las complejas asociaciones vegetales en la realidad.

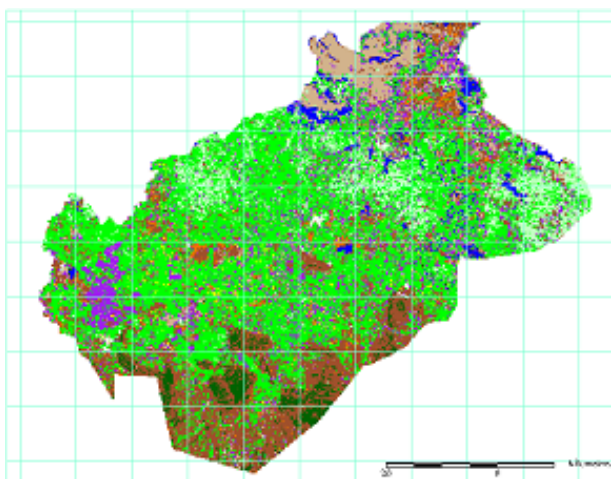


Figura 2. Cartografía de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco. (■ Ríos, lagos y lagunas; ■ Selva perennifolia; ■ Vegetación secundaria de selvas; ■ Vegetación hidrófita; ■ Agricultura de plantación y de temporal; ■ Pastizal; ■ Asentamientos, infraestructura y actividades antrópicas).

Figure 2. Soil cover cartography in Tabasco's Mountain Region. (■ Rivers, lakes and lagoons; ■ Evergreen rainforest; ■ Secondary rainforest vegetation; ■ Hydrophile vegetation; ■ Plantation and temporal agriculture; ■ Grazing land; ■ Towns, infrastructure and anthropic activities).

El área total de la región Sierra se calculó en 428 003 ha. Cada cobertura de suelo o clase informacional representa la siguiente superficie y su porcentaje: Ríos, lagos y lagunas 11 210 ha (2.6 %); Selva perennifolia 42 672 ha (10 %); Vegetación secundaria de selva 70 099 ha (16.4 %); Vegetación hidrófita 32 851 ha (7.7 %); Agricultura de plantación y de temporal 45 249 ha (10.6 %); Pastizal 219 190 ha (51.2 %); Asentamientos, infraestructuras y actividades antrópicas 6 732 ha (1.6 %).

Evaluación de la Clasificación

El análisis de precisión de la clasificación resultó en 59 %. La Tabla 2 muestra la matriz de error, donde se estimaron los porcentajes de precisión del usuario y del productor para cada una de las clases informacionales obtenidas, antes referidas en la Figura 2.

DISCUSIÓN

Cartografía de la Cobertura de Suelo de la región Sierra

La clasificación no supervisada permitió establecer 7 clases relativamente homogéneas de coberturas de suelo. Las 42 672 ha de "selva" que en el presente trabajo representa la Selva perennifolia (SP) difieren de las 41 711.7 ha que reportan los municipios que integran la región Sierra (INEGI 2000b). Tal diferencia puede deberse a los errores de asignación de píxeles, a los llamados píxeles mixtos. Es decir, los píxeles ubicados en el límite o borde de la clase o cobertura seleccionada que toman información de las coberturas colindantes mostrando valores digitales promedio que no corresponden a ninguna de las coberturas clasificadas (Speranza & Zerda 2005), este efecto también llamado fronterizo sucede cuando la escena de estudio es compleja y dinámica en sus cambios (Chuvieco 1985).

La cartografía obtenida permite observar una amplia fragmentación de la mayoría de las clases, mostrando la imagen clasificada con una apariencia confeti, o según el término anglosajón "salt and pepper", debido tanto a la propia complejidad del paisaje (Chuvieco 2002) como a las fuertes y persistentes perturbaciones en la vegetación, que se muestran como respuestas espectrales muy variadas, que causan que los valores digitales de los píxeles de una clase tiendan a confundirse con clases diferentes (Vega-Guzmán *et al.* 2008).

Los asentamientos humanos, infraestructura y actividades antrópicas (AIA) representan cerca del 2 % del total del área de estudio considerada, pero los pastizales, acahuals y superficies de producción agrícola representan junto con AIA la antropización de la región Sierra en cerca del 80 % de su paisaje. Este porcentaje, en contraste con un 10 % de

Tabla 2. Matriz de Error de la Clasificación No Supervisada -píxeles-. (RLL = Ríos, lagos y lagunas; SP = Selva Perennifolia; VS = Vegetación secundaria; VH = Vegetación hidrófila; APT = Agricultura de plantación y temporal; P = Pastizal; AIA = Asentamientos, infraestructura y actividades antrópicas).

Table 2. Non-Supervised Classification Error Matrix -pixels-. (RLL = Rivers, lakes and lagoons; SP = Evergreen rainforest; VS = Secondary vegetation; VH = Hydrophile vegetation; APT = Plantation and temporal agriculture; P= Grazing land; AIA = Towns, infrastructure and anthropic activities).

CLASES	% Precisión Usuario	RLL	SP	VS	VH	APT	P	AIA	Total Clasificación
RLL	79	19	0	0	5	0	0	0	24
SP	85	0	22	2	1	0	1	0	26
VS	26	2	21	23	12	3	27	0	88
VH	76	3	2	3	42	0	5	0	55
APT	20	2	1	9	14	11	19	0	56
P	72	11	3	21	30	5	180	0	250
AIA	46	0	0	1	0	1	5	6	13
Total Referencia		37	49	59	104	20	237	6	512
% Precisión Productor		51	45	39	40	55	76	100	
Total Aciertos	303								
Precisión Clasificación	59 %								

la vegetación arbórea natural (selva mediana y baja) sugiere la fragmentación y destrucción de hábitats, sinónimo de pérdida de biodiversidad, y desde el punto de vista de las actividades económicas una disminución en la disponibilidad de los recursos naturales (Ochoa-Gaona *et al.* 2007).

Evaluación de la Clasificación

La matriz de confusión advierte que la información obtenida de la clasificación no supervisada debe tomarse con reservas, dada su precisión del 59 %. Para editar esta información como documento cartográfico temático, es conveniente que ésta obtenga una precisión global mayor al 80 % (Chuvieco 2002). No obstante el desfavorable valor porcentual en general obtenido, veremos adelante que ciertas coberturas de suelo podrían considerarse útiles como base preliminar del año 2003 en la región Sierra.

La baja precisión en su mayoría resultó de la dificultad para el productor en lograr que el algoritmo ISODATA pudiera discriminar las diferentes respuestas espectrales provenientes del paisaje antrópico. De las clases informacionales que constituyen dicho paisaje: AIA, VS y APT presentaron los porcentajes más bajos, con una confiabilidad menor al 50 %. Esto tiene como posible explicación la mayor heterogeneidad a mesoescala que el patrón paisajístico natural va adquiriendo al irse dividiendo

do y subdividiendo de acuerdo a los diferentes usos de suelo que la actividad humana le va confiriendo, según sea su dinámica, que en el caso del territorio tabasqueño se ha caracterizado por ser acelerado (Tudela 1989).

Las diferentes actividades agrícolas en los cultivos de plantaciones como caña de azúcar, plátano, palma de aceite y piña, y de temporal como el maíz y el arroz, mostraron elevada confusión con la vegetación secundaria (16 %), de pastizal (34 %) e hidrófila (25 %), y estas últimas entre sí, debido a sus estructuras herbáceas, contenido de humedad y suelos de zonas bajas en su mayor parte, resultando la clase APT la de menor precisión con el 20 %.

Ocurrió lo contrario con las asociaciones vegetales más leñosas, arbóreas principalmente (selva baja en zonas inundables, así como en las zonas más elevadas la selva mediana y los relictos de selva alta) que generalizadas en la clase selva perennifolia logran una aceptable confiabilidad para el usuario del 85 %, no pudiendo ser mejor debido principalmente a su traslape de cerca del 8 % con los píxeles de la clase Vegetación secundaria de selva (VS), que dada su fracción leñosa de origen común hace difícil su separación espectral, aunque lo es también en campo según reportes de Rzedowski (1986), quien menciona que la vegetación secundaria, como los acahuales, pueden contener fracciones de vegetación arbórea, arbustiva y herbácea. Por lo que la

vegetación secundaria se traslapó en un 24 % con la selva perennifolia, y además en un 31 % y 14 % con la clase Pastizal (P) y la clase Vegetación hidrófila (VH), infiriéndose con ello su alta proporción no sólo arbustiva sino principalmente herbácea; esto coincide con la literatura que señala en la región un incremento de los pastizales destinados a la producción ganadera (Salazar-Conde *et al.* 2004; Manjarrez-Muñoz *et al.* 2007). Por lo anterior, la VS alcanzó una precisión de 26 %.

Como puede desprenderse de lo anterior, y de la omnipresencia del pastizal en la región (51 %), su caracterización en pastos inducidos, cultivados y de zonas inundables como en un principio se pretendió, no fue posible con este método. Pero, de la misma manera que con la clase SP se logró una buena confiabilidad al generalizarse en una clase, los pastos se agruparon en pastizal (P). Con esto se logró obtener una confiabilidad del 72 % y un éxito del 76 % en la precisión del productor, que no fue mayor por la confusión espectral del 8 % con la clases VS, y del 12 % con la clase VH debido posiblemente a la alta asociación espacial entre los pastos de zonas bajas inundables y la vegetación acuática que allí crece, y a un semejante patrón espectral como especies herbáceas.

El pastizal complicó en un 9 % la mejor discriminación de la vegetación hidrófila, 76 % de confiabilidad y 40 % de precisión del productor. Ésta a su vez fue afectada, pero en menor medida, en un 5 % por las clases VS y RLL (ríos, lagos y lagunas). Es conveniente mencionar que los pastos de zona inundable (incluidos en la clase pastizales) y la vegetación hidrófila forman mosaicos de comunidades de herbáceas, incluyendo a veces otras más arbustivas (mucalesías, zarzales, etc.) en las que además hay que agregar las comunidades de *Acoelorrhapha wrightii* (palmar o tasistal) y el bosque de galería (Rzedowski 1986), pudiendo todas las anteriores competir en su detección con la diferentes fracciones de la vegetación secundaria.

La vegetación hidrófila, propia de suelos anegados de escasa profundidad, traslapó en un 20 % la respuesta espectral de los cuerpos de agua, representados por la clase ríos, lagos y lagunas, alcanzando esta clase una fiabilidad del 80 %, pero

con un 49 % de omisiones en su asignación.

Los asentamientos humanos, su infraestructura y actividades (AIA) presentes en la región (como las extractivas cementeras, graveras, petroleras, etc.) pudieron reconocerse y cartografiarse con un 100 % de éxito del productor, aunque no así su delimitación espacial a la escala trabajada, ya que su respuesta espectral se mezcló en un 38 % con los pastizales y con cerca del 8 % con la vegetación secundaria como con la agricultura de plantaciones y de temporal, pudiendo deberse a los jardines públicos y áreas verdes dentro de los perímetros urbanos, y en áreas periurbanas a potreros y campos agrícolas adyacentes.

Las clasificaciones basadas en respuestas espectrales habitualmente presentan precisiones bajas debido a que el algoritmo de clasificación no logra discriminar la confusión radiométrica de las coberturas de suelo (Mas & Ramírez-Ramírez 1996), como en el caso que nos ocupa. Los bajos porcentajes de precisión, provenientes de las clases más representativas del paisaje antrópico, también pueden atribuirse a la continua dinámica de cambio estacional de tipo hídrico y de perturbación antropogénica (López-Hernández 1994). Esto promueve la formación de extensos mosaicos paisajísticos con variedad de fases intermedias (Rzedowski 1986). En la región Sierra se tiene un particular paisaje heterogéneo y complejo, que obstaculizó su directa discriminación espectral mediante el método no supervisado. Al parecer esta dificultad en la aplicación del método mencionado en paisajes de gran diversidad vegetal se ha corroborado en otros estudios en ecosistemas similares (Arango-Gutiérrez *et al.* 2005; García-Mora & Mas 2008).

Aunque la región Sierra comprende cuatro áreas naturales protegidas, la deforestación y perturbaciones en su cobertura de suelo como la ganaderización, el aumento de pastizales, el sistema de tumba-roza-quema, entre otros, denotan lo indispensable de un monitoreo periódico a través de la percepción remota satelital (con la ventaja de la rapidez y el bajo costo en amplias extensiones de terreno) que brinde un marco espacial más sólido para la planeación y gestión ambiental. Para lograr dicho marco, es necesario continuar en el ensayo de nuevos

métodos de clasificación que superen el convencional no supervisado, incluso el supervisado, debido a los errores de asignación que presentan y que se han discutido anteriormente; y tal como lo sugieren García-Mora & Mas (2008) probar “métodos alternativos” tales como Clasificadores no paramétricos (de decisión como el Fuzzy) que permitan además un análisis sub-píxel de la imagen, Análisis de imagen basado en objeto (OBIA, por sus siglas en inglés), Análisis lineal de mezclas espectrales (SMA, por sus siglas en inglés) o bien el de redes neurona-

les, entre otros.

La exploración de las posibilidades espectrales que brinda la percepción remota es de suma importancia dentro de un tema particularmente complejo como es el caso de la definición, por un lado, de coberturas vegetales tropicales debido a su alta biodiversidad; y por el otro la identificación de los constantes cambios antrópicos, que le imprimen una dinámica histórica, con pérdida de parte de esa biodiversidad.

LITERATURA CITADA

- Arango-Gutiérrez M, Branch-Bedoya J, Botero-Fernández V (2005) Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: “Landsat ETM+”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía de Medellín*. 58(1): 2611-2634.
- Buendía-Rodríguez E, Terrazas-Domínguez S, Vargas-Pérez E (2002) Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del oriente del valle de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 8: 13-19.
- Congalton RG (1991) A review of Assessing the Accuracy of Classification of Remotely Sensed Data. En: *Erdas Guide ERDAS Imagine v8.5. Fifth Edition*. 672 p.
- Comité Técnico Interagencial-PNUMA (2000). Conservación y aprovechamiento sustentable de los bosques tropicales húmedos de América Latina y el Caribe. Documento de la Semarnap-Gobierno de México & PNUMA. 18 p.
- Chuvieco E (1985) Aportaciones de la teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 5: 29-48.
- Chuvieco E (2002) *Teledetección Ambiental*. Ediciones Ariel. 586 pp.
- Díaz-Gallegos JR, Mas JF, Velázquez A, Bocco G, Castro R (2001) Evaluación de los procesos de deforestación en el sureste de México (1993-2000). México. Instituto de Geografía, UNAM-SELPER USV-11. <http://www.ugm.org.mx/pdf/geos01-3/SELPER01-3.pdf>
- ERDAS (1999) *Erdas Field Guide ERDAS Imagine v8.5. Fifth Edition*. 672 p.
- García-Mora TJ, Mas JF (2008) Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso de suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas*. 67: 7-19.
- INEGI (2000a) Marco geoestadístico municipal (Tabasco): Jalapa, Macuspana, Tacotalpa y Teapa. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2000b) Anuario Estadístico de Tabasco. Capítulo geográfico. Municipios: Jalapa, Macuspana, Tacotalpa y Teapa. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INE-SEMARNAT (2000) Mapas temáticos (Tabasco). Mapas del Medio Ambiente de México. Instituto Nacional de Ecología y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Lillesand T, Kiefer R (1994) *Remote Sensing and Image Interpretation*. J Wiley and Sons editores.

- López-Hernández E (1994) La vegetación y la flora de la sierra de Tabasco (Municipios de Tacotalpa y Teapa) México. División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 88 pp.
- Manjarrez-Muñoz B, Hernández-Daumás S, De Jong B, Nahed-Toral J, De Dios-Vallejos O, Salvatierra-Zaba E (2007) Configuración territorial y perspectivas de ordenamiento de la ganadería bovina en los municipios de Balancán y Tenosique, Tabasco. *Investigaciones Geográficas*. 64: 90-115.
- Mas JF, Ramírez-Ramírez I (1996) Mejoramiento de las clasificaciones espectrales de cubiertas de suelo por medio de un sistema de información geográfica. *Investigaciones Geográficas*. 4. Número Especial.
- Ochoa-Gaona S, Hernández-Vázquez F, De Jong B, Gurrí-García F (2007) Pérdida de diversidad florística ante un gradiente de intensificación del sistema agrícola roza-tumba-quema: Un estudio de caso en la selva Lacandona, Chiapas, México *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 81: 65-80.
- Pennington T, Sarukhán J (2005) Árboles tropicales de México. Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo de Cultura Económico. 521 pp.
- Rzedowski J (1986) Vegetación de México. Ediciones Limusa. 432 p.
- Salazar-Conde E, Zavala-Cruz J, Castillo-Acosta O, Cámara Artigas R (2004) Evaluación Espacial y Temporal de la Vegetación de la Sierra Madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones Geográficas*. 54: 7-23.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1994). Sistema de Información Geográfica: Inventario Nacional Forestal Periódico 1992-1994, México. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, México DF.
- SERNAPAM (2007) Secretaría de Recursos Naturales y protección Ambiental. Área Naturales protegidas de Tabasco. Gob. Edo. de Tabasco.
- Speranza F, Zerda H (2005) Clasificación digital de coberturas a partir de datos satelitales multiespectrales. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Unidad Manfredi-Universidad Nacional de Santiago del Estero. <http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/boletines>
- Tudela F (1989) La modernización forzada del trópico: El caso de tabasco. Proyecto integrado del golfo. El Colegio de México. 475 pp.
- Valdez-Lazalde J, González-Guillén M, De los Santos-Posadas H (2006) Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Revista Agrociencia*. 40(3): 383-394.
- Vega-Guzmán A, López-García J, Manzo-Delgado L (2008) Análisis espectral y visual de la vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el corredor biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*. 67: 59-75.
- Zetina R, Mas JF (S/f). Evaluación de procesos de cambio de uso del suelo con base en imágenes de satélite. Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche.

