

**ESTRUCTURA ARBÓREA Y VARIABILIDAD TEMPORAL DEL NDVI
EN LOS “BAJOS INUNDABLES” DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN,
MÉXICO****Fernando Jesús Tun-Dzul^{1,2}, Hans Vester¹, Rafael Durán García² y Birgit Schmoock¹**

¹*El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal. Av. del Centenario Km. 5.5
Chetumal, Quintana Roo, México. CP 77000. Teléfono: (983) 8350440
Fax: (983) 8350454. Correo electrónico: fjtun@cicy.mx*

²*Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Unidad de Recursos Naturales.
Calle 43 No 130, Colonia Chuburná de Hidalgo. CP 97200, Mérida, Yucatán. México.
Teléfono: (999) 9428330, Fax: (999) 9813900.*

RESUMEN

La selva baja inundable (SBI) se encuentra en valles cerrados de terreno plano con deficiente drenaje (polje), típico para paisajes cársticos. Está compuesta de pocas especies leñosas, con un dosel que no sobrepasa los 10 m de altura, y cumple un importante papel como refugio de fauna y fuente de germoplasma florístico; se distinguen diversas asociaciones en este tipo de vegetación, como los tintales, pucteales y mucales. Para definir mejor la diferencia entre la SBI y la selva no inundable a su alrededor, se analizó la respuesta espectral de la vegetación de SBI mediante el índice de vegetación NDVI a lo largo del tiempo, en un transecto desde su interior hacia la selva circundante, en tres paisajes sobre un gradiente de humedad captado en imágenes de satélite Landsat ETM. En cada transecto se establecieron parcelas para conocer la estructura y composición vegetal, estado fenológico y niveles de inundación a fin de relacionarlos con la variabilidad de la respuesta del NDVI. Las parcelas de SBI presentaron una riqueza específica (30) similar a la de la selva circundante (29), pero

con mayor densidad de individuos (4570 ind/ha contra 2426 ind/ha) y mayor diversidad (Shannon Wiener, 3.02). Los valores de NDVI aumentan desde el interior de la SBI hacia la selva circundante con mayor contraste en la época de secas, por lo que la imagen de esta época proporcionó una mejor clasificación de la SBI.

Palabras clave: Península de Yucatán, fenología, índice de vegetación, gradiente ambiental, composición y estructura.

ABSTRACT

The Low-statured Inundated Forest (SBI in Spanish) of the Yucatan Peninsula of Mexico occurs in closed valleys with flat terrain and insufficient drainage (polje), typical of karstic landscapes. It is composed of few woody species, has a canopy up to 10 m high, and is important for its role as a refuge for fauna and as a seed source. Various associations are distinguished within this vegetation type, such as tintales, pucteales, and mucales. In order to improve the differentiation between SBI and non-inundated surrounding forest, spectral reflectance of

the SBI was analyzed using NDVI over time along a transect from the interior of a polje to the surrounding forest in three landscapes on a humidity gradient captured on Landsat ETM satellite images. Plots were established along each transect for describing the structure and composition of the vegetation, monitoring phenology and inundation level, and relating these to the NDVI. The SBI plots showed a species richness (30) similar to that of the surrounding forest (29), but had a higher density (4570 ind/ha versus 2426 ind/ha) and higher diversity (Shannon Wiener 3.02). NDVI values increased from the interior of the polje to the surrounding forest and showed a higher contrast in the dry period. Thus, the image of that season yielded a better classification of the SBI.

Key words: Yucatan Peninsula, phenology, vegetation index, environmental gradient, structure and composition.

INTRODUCCIÓN

La selva baja inundable (SBI) es un tipo de vegetación característica de la Península de Yucatán. Es conocida como Ak'alche en la terminología maya, proveniente de las palabras akal, pantano, estanque o aguada, y che, árbol o vegetación, refiriéndose a depresiones del terreno inundadas temporal o permanentemente, más o menos amplias y arboladas que comúnmente se han denominado como "bajos inundables" (Barrera *et al.*, 1976, Duch, 1989). Su formación geomorfológica, conocida como polje, se relaciona con el paisaje cárstico (White, 1988).

Diversos autores han descrito a la selva baja inundable con diferentes nombres, definiendo como característica particular

que la vegetación se desarrolla sobre suelos arcillosos profundos con escaso drenaje y en donde predominan especies típicas como el "palo de tinte" (*Haematoxylum campechianum*), "chechem negro" (*Metopium brownei*), "chechem blanco" (*Cameraria latifolia*), "pucté" (*Bucida buceras*), "muk" (*Dalbergia glabra*) y *Bucida spinosa* (Lundell, 1934; Miranda, 1958; Miranda y Hernández, 1963; Rzedowski, 1978; Orozco y Lot, 1976; Rico-Gray, 1982; Lot, 1983; Olmsted y Durán, 1986; Palacio *et al.*, 2002; Díaz-Gallegos *et al.*, 2002; Cortés e Islebe, 2005). Es una comunidad vegetal constituida por árboles y arbustos capaces de crecer en terrenos inundados buena parte del año y resistir periodos de extrema sequía durante varios meses, formando un dosel que la mayoría de las veces no sobrepasa los 10 m de altura; presentan troncos retorcidos y muchos de ellos son espinosos (Orozco y Lot, 1976; Rico-Gray, 1982; Lot, 1983; Olmsted y Durán, 1986; Martínez y Galindo, 2002).

Trabajos sobre clasificación de la vegetación con base en imágenes de satélite en la Península de Yucatán, particularmente sobre la cobertura de selva baja inundable en el sur de la península (Olmsted *et al.*, 1999, Tun-Dzul *et al.*, 2000, Turner II *et al.*, 2001; Lawrence *et al.*, 2004), han reportado diferencias significativas de superficie en este tipo de vegetación, tanto por su diversidad de condiciones como por su extensión territorial. Estas diferencias se deben a que el comportamiento espectral de la vegetación, en respuesta a su estado fenológico, no es igual en toda la extensión del "bajo" y tampoco durante todo el año.

La clasificación espectral de la vegetación usualmente está basada en la fisonomía de la

misma y en su composición florística, pero la fenología es una fuente útil de información que raramente es utilizada debido a la dificultad para adquirirla, aunque ésta pueda contribuir al conocimiento funcional de los ecosistemas (Hoare y Frost, 2004). Hoy día existe un énfasis creciente en desarrollar métodos de caracterización rápida de la estructura, diversidad y composición de los bosques utilizando técnicas de percepción remota (Sánchez-Azofeifa *et al.*, 2003, Turner *et al.*, 2003, Agrawal *et al.*, 2003, Fairbanks y McGwire, 2004, Feeley, *et al.*, 2005). Una manera de conocer este comportamiento espectral es a través de los índices de vegetación, los cuales se calculan a partir de los valores de reflectividad entre las bandas rojo e infrarrojo cercano (Gilbert *et al.*, 1997). Mediante el uso de estos índices se pretende extraer la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones debidas al suelo y condiciones atmosféricas.

Entre los diferentes índices de vegetación desarrollados, se encuentra el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, Rouse *et al.*, 1974, en Gilbert, *et al.*, 1997) el cual tiene un gran potencial para identificar variaciones en estructura, composición y diversidad de los bosques (Turner *et al.*, 2003, Feeley *et al.*, 2005). Este índice ha sido utilizado, entre otras razones, para conocer la riqueza de especies de tal manera que se pueda lograr la caracterización regional de la vegetación y su ambiente (Fairbanks y McGwire, 2004); para describir la productividad primaria neta de los ecosistemas a nivel global (Feeley *et al.*, 2005); para la interpretación de cambios en la respuesta fenológica de las especies en áreas grandes con vegetación continua

utilizando imágenes que cubren grandes extensiones como las NOAA/AVHRR y Modis (Agrawal *et al.*, 2003; De Beurs y Henebry, 2005; Alcaraz *et al.*, 2006); pero no se ha utilizado desde el punto de vista local y en superficies pequeñas y delimitadas como los bajos inundables, en donde la respuesta espectral de las especies se tiene que abordar con imágenes de baja resolución.

El objetivo de este trabajo es evaluar los cambios fenológicos de la vegetación de SBI en un transecto desde su interior hacia la selva circundante y relacionarlos a la variabilidad de las respuestas espectrales de imágenes de satélite Landsat ETM en diferentes épocas del año, con el propósito de describir su estacionalidad, los cambios del vigor de la vegetación a través del tiempo y obtener la caracterización a nivel local de la vegetación de selva baja inundable.

ÁREA DE ESTUDIO

Las selvas bajas inundables estudiadas se localizan en el área comprendida dentro del proyecto Cambios en el Uso del Suelo en el Sur de la Península de Yucatán (Land-Cover and Land-Use Change (LCLUC) in The Southern Yucatan Peninsular Region-SYPR), una cooperación interinstitucional entre varias universidades y centros de investigación (Turner II *et al.*, 2004). La SYPR es una unidad de estudio definida al norte y al sur por los límites de la Reserva de la Biosfera de Calakmul y al este y oeste por la cota de altitud de 100 m sobre el nivel del mar (Fig. 1) (Klepeis y Turner II, 2001), su extensión ocupa aproximadamente 22 000 km². La región se encuentra en la altiplanicie cárstica que forma la espina dorsal de la península, constituida por grandes

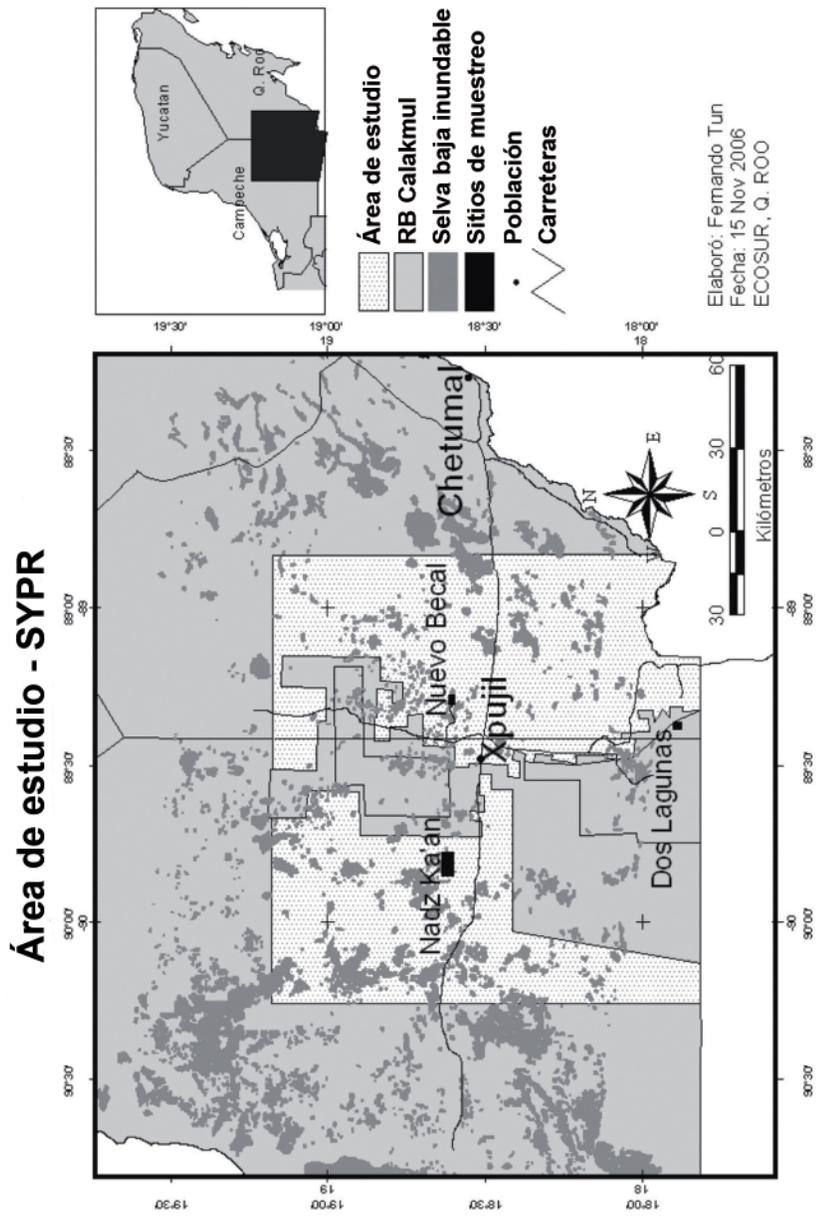


Fig. 1. Área de estudio. Región sur de la Península de Yucatán.

depresiones u hondonadas que se inundan temporalmente. Comprende parte del municipio de Othón P. Blanco, Q. Roo y el de Calakmul, Campeche; se encuentra entre la latitud 17° 50' y 19° 10' N y la longitud 88° 50' y 90° 15' W.

Los suelos sobre los cuales se desarrolla la selva baja inundable corresponden al tipo gleysol (INEGI, 1984); están compuestos por residuos de las fracciones insolubles de las rocas carbonatadas. Muestran, en general, un drenaje deficiente por lo que la formación de suelo depende de la presencia relativa de agua (Palacio *et al.*, 2002). El terreno presenta una topografía plana, con un microrrelieve tipo gilgai, formado por pequeños montículos causados por el constante humedecimiento y secado de las arcillas.

El clima es Ax'(w₁) (i₁)gw", cálido subhúmedo, con temperatura media del mes más frío mayor de 18°C, con un régimen de lluvias de verano-intermedio y con alto porcentaje de lluvia invernal y presencia de sequía intraestival, con poca oscilación térmica (Orellana *et al.*, 1999). La temperatura promedio mensual es superior a 21°C y las oscilaciones térmicas anuales no son mayores a 6°C.

La precipitación anual en la región (SYPR) presenta un gradiente que está en el rango de 900 mm en la parte norte-noroeste a 1400 mm en su extremo sur (Lawrence *et al.*, 2004). El comportamiento de la precipitación en la zona de estudio, tomando como base las estaciones meteorológicas de Nicolás Bravo, Q. Roo y Zoh Laguna y Silvituc, Camp., para los últimos 24 años se muestra en la figura 2. La precipitación total anual (Fig. 2a) y el promedio mensual

(Fig. 2b) tienen un comportamiento similar en las tres estaciones.

La región es dominada por una cubierta de selva mediana subperennifolia y subcaducifolia en su mayor parte y de selva baja inundable en las depresiones inundadas estacionalmente conocidos localmente como “bajos” (Rzedowski, 1978). Estos tres tipos básicos de selva mantienen especies vegetales similares con solamente unas pocas especies exclusivas para cada una, aunque la SBI es más baja en estatura y los árboles presentan una gran cantidad de epífitas (Pérez-Salicrup, 2004). Estos tipos de selva exhiben diferentes niveles de pérdida de follaje durante la estación seca, especialmente en el noroeste de la región, ocupado por vegetación de selva mediana subcaducifolia y Selva baja inundable.

MÉTODOS

Utilizando interpretaciones de imágenes anteriores (Tun-Dzul *et al.*, 2000, Turner II *et al.*, 2004; Lawrence *et al.*, 2004) se seleccionaron tres “bajos inundables” en la región, correspondientes a tres ambientes contrastantes en cuanto al tipo de vegetación selvática circundante, denominándoles: húmedo, al sur de la región e inmerso en una mezcla de selva mediana subperennifolia y alta perennifolia (ejido Dos Lagunas, Q. Roo); subhúmedo, en el centro, con selva mediana subperennifolia a su alrededor (ejido Nuevo Becal, Camp.); y seco, al oeste y bordeado por una selva mediana subcaducifolia (Nadz Ka'an, Camp.).

Para el muestreo de vegetación, realizado durante la primavera de 2006, se definió un transecto del centro de cada uno de los “bajos” de SBI seleccionados hacia tierra



Fig. 2a. Precipitación anual de las tres estaciones climatológicas del área de estudio entre 1982 y 2005.

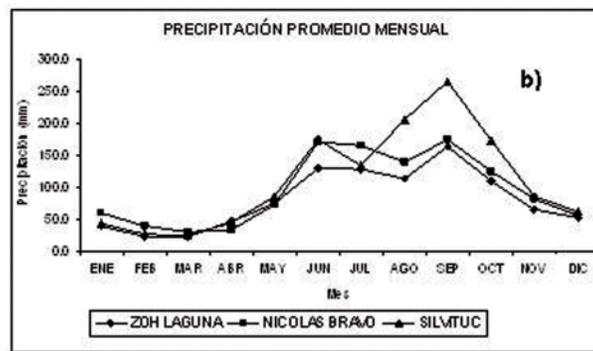


Fig. 2b. Precipitación promedio mensual de las tres estaciones climatológicas del área de estudio entre 1982 y 2005.

alta, es decir, hacia la selva circundante. En cada transecto se establecieron cuatro parcelas circulares de muestreo de 500 m² cada una, correspondiendo esta superficie con otros estudios de vegetación realizados dentro del mismo proyecto (Pérez-Salicrup, 2004), tres de las parcelas correspondieron al “bajo inundable”, desde el centro hasta su borde, y una más en la selva con la que limita. Estas parcelas se denominaron Centro, Intermedio, Borde y Selva, respectivamente (Fig. 3). La diferencia entre selva y bajo fue hecho con base en la fisonomía general de la vegetación para luego confirmarlo con mediciones y un análisis ANOVA para detectar las diferencias significativas. El esquema de muestreo corresponde a un diseño de dos vías anidado fijo, con tres ambientes (fijos), cuatro parcelas (fijas) cada uno y ocho

subparcelas como unidades de frecuencia. En estas mismas parcelas se obtuvieron los datos de cobertura del dosel (fenología) y suelo, así como el nivel de inundación a lo largo del año.

Análisis de la vegetación. Se midieron los parámetros de diámetro a la altura del pecho (D.A.P.), altura total y se realizó la determinación taxonómica a nivel de especie para cada individuo mayor a 3 cm de D.A.P. Para describir la vegetación y determinar las diferencias en composición entre la vegetación de SBI y de la selva circundante, así como para determinar las diferencias entre distintas épocas del año, se obtuvieron los valores de densidad y área basal, valor de importancia relativa de Curtis (Mueller-Dombois y Ellenberg,

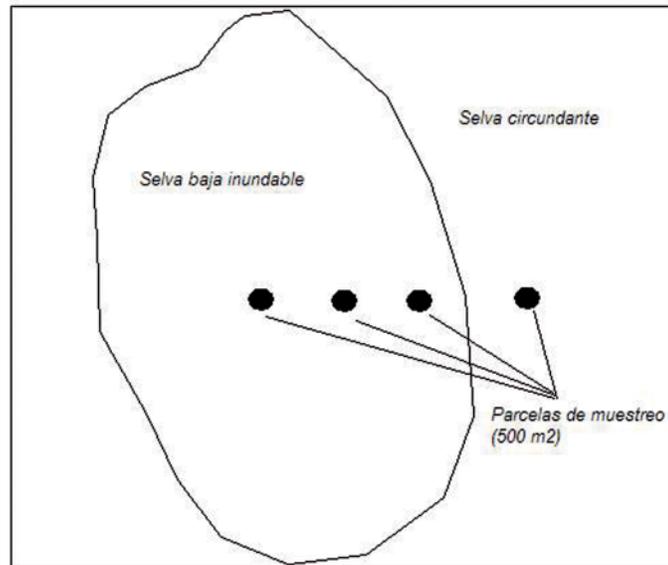


Fig. 3. Esquema del diseño de muestreo. Se esquematiza la representación de la superficie de SBI y el transecto trazado del centro hacia la selva circundante (centro, intermedio, borde y selva).

1974) y de diversidad mediante el índice de Shannon-Wiener (Magurran, 1989).

Se utilizó un método de ordenación de la vegetación utilizando la prueba MDS (Multi-Dimensional Scaling, Kruskal, 1964, en Clarke y Warwick, 2001) para comparar la composición de especies entre los ambientes muestreados.

El nivel de inundación y los valores de las coberturas de suelo y de dosel se obtuvieron en tres censos a lo largo del año 2006 en cada uno de los “bajos” seleccionados, de acuerdo a tres temporadas en el año: secas: de febrero a mayo, lluvias: junio-septiembre y nortes: octubre a enero; esto con el fin de obtener datos respecto a la dinámica de la caducidad del follaje de las especies en la comunidad, del nivel de

inundación y la cobertura del suelo, a fin de determinar si influyen en la respuesta espectral de la vegetación. Estas coberturas se estimaron mediante el porcentaje de cobertura presente utilizando 16 cuadros de 4 m² cada uno en cada parcela.

Análisis temporal. Para lograr la discriminación de la reflectancia entre el efecto del suelo y la vegetación, se usó el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), que refleja la respuesta espectral característica de la vegetación vigorosa, con alto contenido de humedad. Este índice está basado en el hecho de que mientras mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor vigor vegetal se expresa en los valores del NDVI, en un rango que va de -1 a +1. De este rango, sólo los valores

positivos corresponden a zonas de vegetación; los valores negativos pueden indicar presencia de nubes, nieve, agua y zonas de suelo desnudo. El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona.

El análisis temporal se realizó con imágenes Landsat ETM correspondientes a tres épocas del año, el uso de estas imágenes fue por su mejor resolución con respecto a otras con mayor disponibilidad temporal y porque la clasificación de la vegetación en esta zona se ha hecho con este mismo tipo de imágenes. Se usó una imagen del mes de febrero como representativo para la temporada de nortes (5/feb/1996), de mayo para la temporada de secas (imagen de 7/may/2003) y de octubre para la temporada de lluvias (imagen de 29/oct/1994). Se describió el comportamiento fenológico, mediante los valores máximos y mínimos del NDVI, de las especies presentes en los tres sitios.

Análisis estadístico. Las diferencias en las respuestas del vigor de la vegetación a lo largo del transecto se analizaron estadís-

ticamente utilizando el valor del NDVI de un conjunto de nueve píxeles elegidos de tal manera que las coordenadas de las parcelas de muestreo estén ubicadas en el píxel del centro (Oza, 1996, en Feeley *et al.*, 2005). Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para determinar si las diferencias en los resultados de densidad, área basal y valores de NDVI son estadísticamente significativas. Cuando no se cumplieron los supuestos del ANOVA se realizó una prueba no paramétrica (ANOVA de rangos de Kruskal-Wallis) para determinar si existen diferencias significativas.

RESULTADOS

Análisis de vegetación. El “bajo” correspondiente al ambiente subhúmedo presenta mayor riqueza de especies. La riqueza específica registrada en los tres “bajos inundables” es mayor en las parcelas intermedias, menos en el ambiente subhúmedo (tabla 1). La parcela de borde del ambiente seco presenta el menor número de especies. La diversidad de las parcelas de SBI fue mayor que las de selva en el ambiente húmedo y en el seco (tabla 1).

Tabla 1. Riqueza de especies y valores de diversidad de Shannon-Wiener ($H' = -\sum p_i \ln p_i$) por ambiente y parcela de muestreo.

		CENTRO	INTERMEDIO	BORDE	SELVA
Húmedo	SPP	27.00	39.00	28.00	27.00
	H'	2.81	3.14	1.76	2.54
Subhúmedo	SPP	30.00	34.00	39.00	32.00
	H'	2.87	2.67	2.55	3.05
Seco	SPP	29.00	32.00	14.00	28.00
	H'	3.04	3.09	1.74	2.73

El ambiente subhúmedo presenta mayor diversidad en la selva que en las parcelas de SBI. La parcela de borde del ambiente subhúmedo tiene mayor diversidad que las otras dos parcelas de borde.

Los valores de densidad más elevados corresponden a la selva baja inundable (SBI) y los menores a la selva circundante, excepto en el ambiente seco donde el borde tiene una densidad similar a la selva (Fig. 4); en el ambiente húmedo la densidad en la parcela de borde fue mayor que en los demás ambientes. El ANOVA indica que existen diferencias significativas entre las parcelas muestreadas ($F_{11,84} = 21.29$, $p < 0.00$) y sugiere que existen diferencias entre las parcelas de borde de los tres ambientes. En el ambiente seco, la parcela de borde es similar en densidad a la selva circundante. En el ambiente subhúmedo, la parcela de selva presenta marcadas diferencias con las otras tres parcelas y en el ambiente húmedo todas las parcelas son diferentes (tabla 2).

Las parcelas del centro e intermedio de los tres bajos presentan valores de área basal

similares (Fig. 5). Aunque los valores de área basal de la parcela del borde y la selva en el ambiente húmedo son mayores que en todas las demás parcelas, el ANOVA sugiere que estas diferencias no son significativas ($F_{11,84} = 1.39$, $p = 0.19$).

Las especies con mayor valor de importancia son: *Croton nitens*, *Haematoxylum campechianum*, *Cameraria latifolia*, *Eugenia winzerlingii*, *Metopium brownei*, *Bucida buceras*, *Diospyros anisandra*, *Coccoloba cozumelensis* y *Manilkara zapota*. Las especies que dominan en la SBI son *Croton nitens*, *H. campechianum* y *E. winzerlingii* en los ambientes húmedo y subhúmedo, y *H. campechianum*, *Myrcianthes fragans* y *Cameraria latifolia* lo hacen en el ambiente seco. En la parcela de borde de los ambientes húmedo y subhúmedo dominan *Croton nitens*, *Bucida buceras*, *Calophyllum brasiliense* y *Myrcianthes fragans*, y en el ambiente seco *H. campechianum* y *M. fragans*. Las parcelas de selva no comparten las especies con mayor valor de importancia en cada una.

Tabla 2. Valores promedio de densidad y su desviación estándar. Se realizó la prueba MDS (error: entre MS = 33.912, df = 84) para comparar los valores de densidad promedio entre los ambientes (*) y entre parcelas (letras) de muestreo.

	CENTRO	INTERMEDIO	BORDE	SELVA
Húmedo	31.75 ± 5.10 d	23.25 ± 7.42 c	41.00 ± 9.25*b	17.00 ± 3.81 a
Subhúmedo	35.75 ± 5.95 b	33.63 ± 8.6*b	32.13 ± 5.82*b	14.75 ± 3.41 a
Seco	20.0 ± 5.07*b	25.86 ± 4.36 b	13.75 ± 4.46*a	13.75 ± 4.46 a

* Difieren significativamente entre el mismo tipo de parcela; letras diferentes, difieren significativamente entre las parcelas del mismo ambiente.

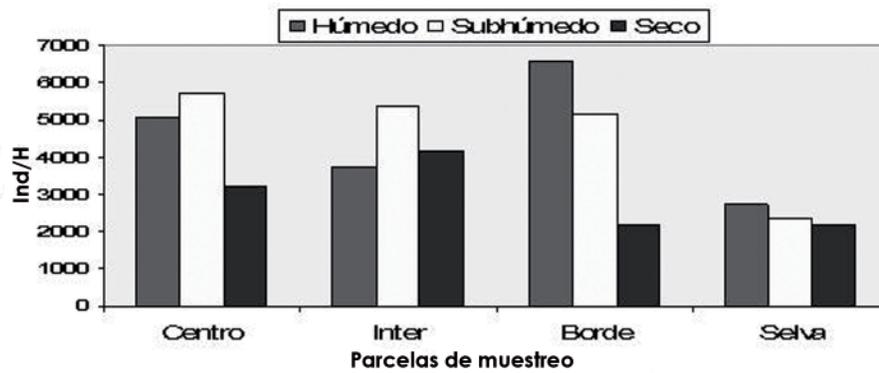


Fig. 4. Densidad (Ind/ha) de individuos por ambiente y parcela de muestreo.

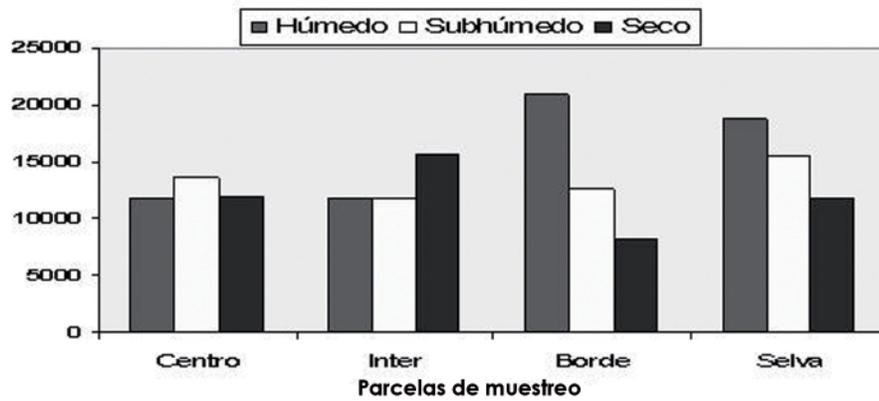


Fig. 5. Valores de área basal ($\text{cm}^2/500 \text{ m}^2$) por ambiente y parcela de muestreo.

La ordenación MDS muestra una separación entre las parcelas de selva y las de SBI (Fig. 6a). La diferencia de abundancias entre las parcelas de selva es mayor entre los ambientes húmedo y subhúmedo; el “bajo” en el ambiente seco tiene menos relación con los otros dos “bajos”. Las selvas circundantes claramente están separadas de las parcelas de SBI; las parcelas de borde tienen mayor relación con las de la SBI. La distribución de la vegetación de selva baja

inundable al interior del bajo muestra que las parcelas denominadas borde de los tres ambientes no se mezclan con las parcelas intermedio y centro pero sí tienen una relación más cercana con éstas que con las de selva circundante. Las parcelas intermedio y centro de los ambientes subhúmedo y seco se agrupan (Fig. 6b).

El porcentaje de cobertura del dosel en la estación de secas fue inferior al registrado

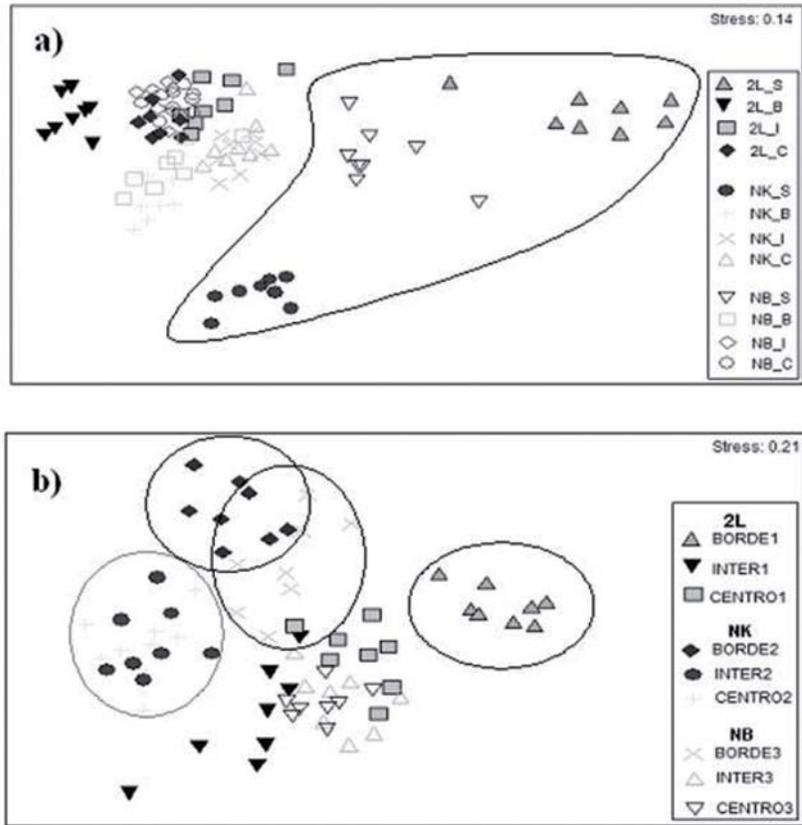


Fig. 6. Ordenación MDS de los tres bajos estudiados, basado en la transformación de las abundancias utilizando la raíz cuadrada. 2L= Dos Lagunas, NK= Nadz Ka’an, NB= Nuevo Becal, S= selva, B= borde, I= intermedio y C= centro.

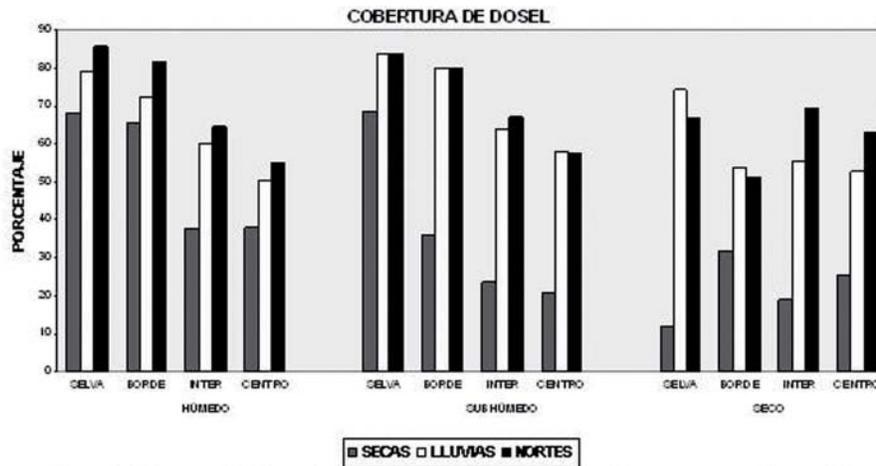


Fig. 7. Porcentajes de cobertura de dosel registrados en las cuatro parcelas en los tres ambientes de muestreo durante las temporadas de secas, nortes y lluvias.

en las estaciones de lluvias y nortes (Fig. 7). En las tres épocas del año el porcentaje de cobertura vegetal es menor en el centro de la SBI, aumentando conforme se aproxima a la selva circundante. En el bajo del ambiente seco, la parcela de selva presenta valores bajos de cobertura durante el periodo de secas.

El porcentaje de cobertura de suelo en los tres ambientes fue mayor en la SBI que en la selva circundante (Fig. 8), y al interior del bajo ésta aumenta conforme se aleja de la parcela de selva circundante. La inundación sólo se observó en los ambientes húmedo y subhúmedo y durante la temporada de lluvias y nortes. El suelo se mantuvo completamente seco en la época de secas en los tres ambientes; el mayor porcentaje de suelo inundado se obtuvo en la época de lluvias, disminuyendo durante la temporada de nortes.

Análisis temporal. En el ambiente húmedo (Fig. 9), la menor diferencia entre el valor mínimo y máximo del NDVI de la selva baja inundable se presentó en la época de secas. La mayor diferencia se presentó en lluvias. El vigor de la vegetación es alto en lluvias y en nortes. La selva circundante registra mayor vigor que la SBI en la temporada de secas pero en lluvias el valor de NDVI es similar. En el ambiente subhúmedo (Fig. 10) la diferencia entre el valor mínimo y el máximo del NDVI en el interior de la SBI es mayor en secas. La selva circundante presenta valores de NDVI mayores que la SBI. El vigor de la vegetación es alto en lluvias y nortes y bajo en secas. En los meses húmedos los valores máximos de la SBI son similares a los mínimos de la selva circundante. Por último, en el ambiente seco (Fig. 11) la diferencia entre el mínimo y el máximo del valor del NDVI fue mayor en época de secas. El valor del NDVI es alto en lluvias y nortes y bajo en secas. En la época seca

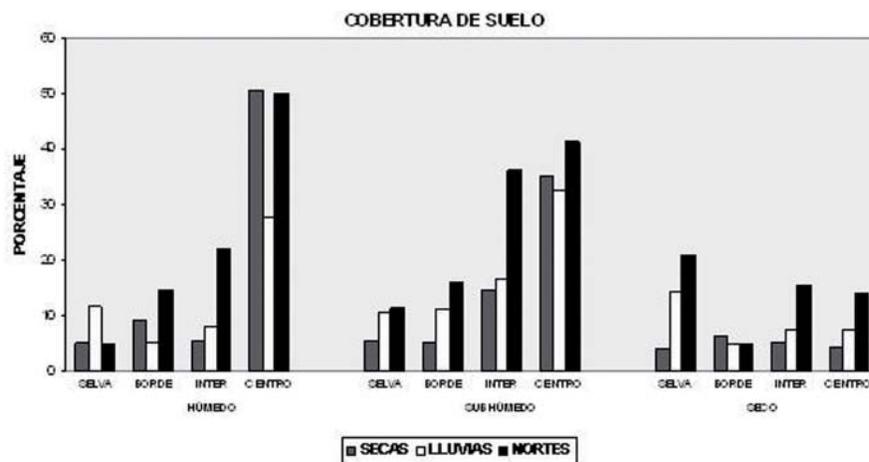


Fig. 8. Porcentajes de cobertura de suelo registrados en las cuatro parcelas en los tres ambientes de muestreo durante las temporadas de secas, nortes y lluvias.

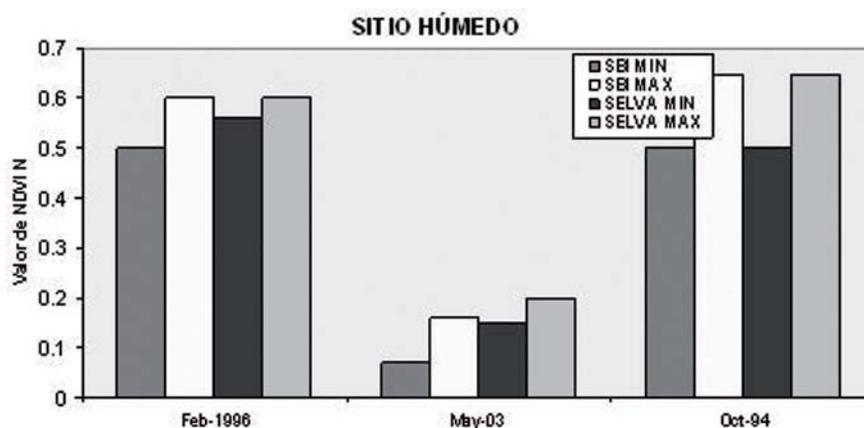


Fig. 9. Valores mínimos y máximos de SBI y selva circundante del ambiente húmedo, correspondientes a las imágenes Landsat ETM analizadas en el periodo de estudio.

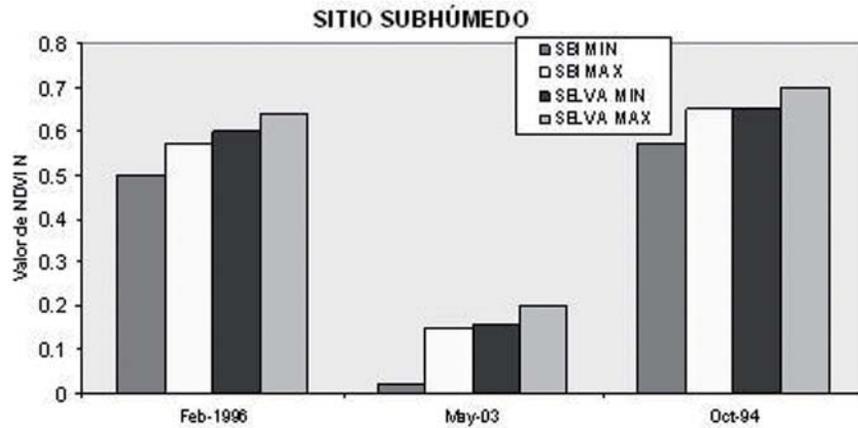


Fig. 10. Valores mínimos y máximos de SBI y selva circundante del ambiente subhúmedo, correspondientes a las imágenes Landsat ETM en el periodo de estudio.

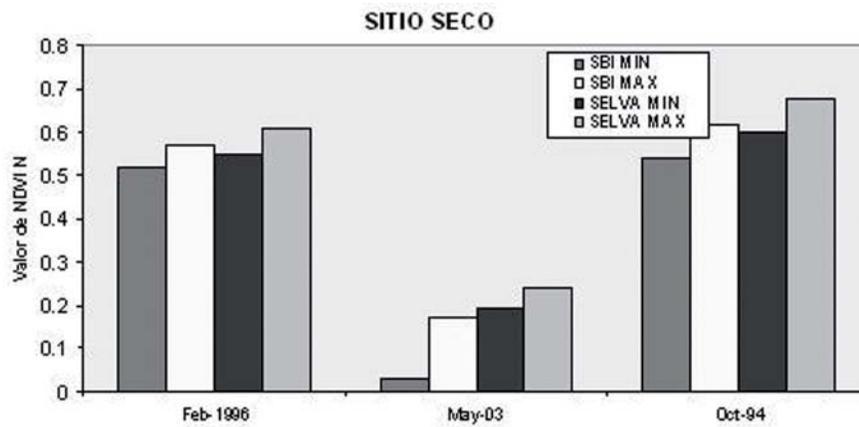


Fig. 11. Valores mínimos y máximos de SBI y selva circundante del ambiente seco, correspondientes a las imágenes Landsat ETM analizadas en el periodo de estudio.

la respuesta del vigor de la vegetación es mayor en la SBI y en los meses húmedos se observa mayor respuesta por parte de la selva circundante.

El análisis estadístico a nivel de temporadas sugiere que se presentaron las mismas tendencias en los tres ambientes. La prueba no paramétrica sugiere que existen diferencias significativas en la respuesta del NDVI a lo largo del tiempo entre las parcelas de muestreo. La prueba Post Hoc indica que existen fuertes diferencias entre las distintas imágenes analizadas (tabla 3).

El análisis por parcelas sugiere que en la temporada de secas existen diferencias significativas entre la selva, borde y SBI observándose un gradiente en la respuesta espectral a lo largo del transecto en cada uno de los tres ambientes analizados. En

lluvias, para los ambientes húmedo y seco, se observaron diferencias significativas entre la selva y las parcelas intermedio y centro, pero no entre selva y borde, por lo que sería difícil delimitarlo ya que presenta respuestas espectrales que pueden ser identificadas como selva circundante o SBI. En nortes, en los ambientes húmedo y subhúmedo, se observaron diferencias significativas entre las parcelas de selva y borde y entre borde, centro e intermedio. En el ambiente seco no se observaron diferencias significativas entre las parcelas selva y borde.

DISCUSIÓN

Los “bajos inundables” estudiados presentaron mayor riqueza específica (105 especies en total) que otros estudios realizados en selva baja inundable (Olmsted y Durán,

Tabla 3. Prueba Newman-Keul para los datos de valor de NDVI para cada parcela de los tres ambientes de muestreo para las épocas de secas, lluvias y nortes.

AMBIENTE	PARCELA	FEBRERO (1996)	MAYO (2003)	OCTUBRE (1994)
Húmedo	CENTRO		0.101 ± 0.007 DEe	0.583 ± 0.017 Cb
	INTER	0.552 ± 0.014 Ac	0.120 ± 0.008 CEd	0.640 ± 0.018 BDb
	BORDE	0.596 ± 0.017 Bc	0.132 ± 0.008 BEd	0.640 ± 0.029 ADb
	SELVA	0.551 ± 0.056 Ac	0.194 ± 0.020 Ad	0.660 ± 0.016 Ab
Subhúmedo	CENTRO	0.575 ± 0.024 Cc	0.071 ± 0.011 Ce	0.616 ± 0.024 CDb
	INTER	0.587 ± 0.022 Cc	0.083 ± 0.031 Ce	0.629 ± 0.021 BDb
	BORDE	0.552 ± 0.020 Bc	0.150 ± 0.014 Be	0.648 ± 0.026 Bb
	SELVA	0.632 ± 0.017 Ac	0.197 ± 0.013 Ae	0.691 ± 0.020 Ab
Seco	CENTRO	0.524 ± 0.012 Cc	0.082 ± 0.009 De	0.599 ± 0.019 Cb
	INTER	0.528 ± 0.008 Bc	0.117 ± 0.005 Ce	0.604 ± 0.011 Bb
	BORDE	0.589 ± 0.025 Ac	0.164 ± 0.014 Ba	0.627 ± 0.010 Ab
	SELVA	0.573 ± 0.025 Ac	0.212 ± 0.012 Aae	0.640 ± 0.022 Ab

Mayúsculas: difieren significativamente entre parcelas del mismo año.

Minúsculas: difieren significativamente a lo largo del tiempo para el mismo tipo de parcela

1986; Díaz-Gallegos *et al.*, 2002; Palacio *et al.*, 2002; Martínez y Galindo, 2002; Cortés e Islebe, 2005); sin embargo, la composición florística en los tres ambientes fue significativamente diferente. No obstante, este tipo de selva es relativamente pobre en especies vegetales en comparación con otros tipos de selvas en la región (Martínez y Galindo, 2002, Palacio *et al.*, 2002).

Los “bajos” estudiados presentaron especies características (*Haematoxylum campechianum*, *Cameraria latifolia*, *Sebastiana adenophora*, *Bucida buceras*, *Byrsonima bucidaefolia*, *Eugenia winzerlingii* y *Myrcianthes fragans*) de este tipo de vegetación (Lundell, 1934, Miranda y Hernández, 1963, Orozco y Lot, 1976; Rico-Gray, 1982; Lot, 1983; Olmsted y Durán, 1986). De estas especies, *H. campechianum*, *C. latifolia*, *C. nitens*, *E. winzerlingii*, *B. buceras* y *M. fragans* fueron las de mayor valor de importancia encontradas en el presente estudio; estas especies son reportadas por Martínez y Galindo (2002) y por Díaz-Gallegos (2002) como las especies más importantes en la SBI del sur de la Península de Yucatán.

La alta densidad de árboles obtenida en la SBI (4570 ind/ha) confirma que ésta es una característica importante de este tipo de selva (Palacio *et al.*, 2002). Esta mayor densidad se manifiesta en un mayor número de árboles con pequeños diámetros, ya que el área basal entre parcelas no difiere significativamente.

Los valores de diversidad obtenidos en la SBI se pueden considerar altos (2.67-3.14) si los comparamos a las selvas medianas estudiadas por White y Hood (2004), y menores a otras selvas bajas como las

reportadas por Trejo y Dirzo (2002) y González-Iturbe *et al.* (2002). Sin embargo, presentan valores de diversidad similares a selvas bajas inundables del sur de la Península de Yucatán como la reportada por Díaz-Gallegos *et al.* (2002) en la selva baja inundable del ejido La Guadalupe, en Calakmul, Campeche, y la de González-Iturbe *et al.* (inédito) en los ejidos de Morcoy, Nachí Cocom y González Ortega en Quintana Roo.

El vigor de la vegetación correspondiente a la época de secas indica que para los tres sitios existe un gradiente en la respuesta del NDVI que va de valores más bajos en el interior de la selva baja inundable a valores intermedios en el borde, y mayores aún en la selva circundante. El ambiente seco es el que mejor representa este comportamiento en el transecto (tabla 4).

Estas diferencias en el vigor de la vegetación de los “bajos inundables” se relacionan al hecho de que no son homogéneos y que al interior de los mismos se presentan pequeñas diferencias en altura y pendiente, por lo que las características no son iguales en toda la superficie lo que promueve diferencias en los niveles de inundación desde el centro hacia el borde de la SBI, esto incide en la respuesta fenológica de las especies y en la composición y estructura de las mismas a lo largo del transecto.

Los resultados de la ordenación MDS (Multi-Dimensional Scaling) confirman estas diferencias, ya que muestran que las parcelas de borde no se ubican idealmente como una zona de transición entre la selva circundante y la SBI sino que tienden a presentar mayor asociación con las parcelas de selva baja inundable, siendo más claro

Tabla 4. Resumen comparativo de los tres sitios estudiados y sus parcelas respectivas. Se presentan los datos de estructura y composición, clasificación espectral y valores de NDVI en las tres temporadas de muestreo para cada parcela estudiada.

SITIO	PARCELA	SPP	DEN	DIV.	COB. DOSEL (% promedio)			NDVI (valor promedio)		
					No.	Ind/Ha	H'	SEC	LLUV	NOR
Húmedo	CENTRO	27	5080	2.810	38.13	50.31	55.00	0.101	0.583	0.512
	INTER	39	3720	3.138	37.50	60.31	64.38	0.120	0.640	0.552
	BORDE	28	6550	1.761	65.63	72.50	81.88	0.132	0.640	0.596
	SELVA	27	2720	2.536	68.13	78.75	85.63	0.194	0.660	0.551
Subhúmedo	CENTRO	30	5720	2.865	20.63	58.13	57.81	0.071	0.616	0.575
	INTER	34	5380	2.668	23.75	63.75	66.88	0.083	0.629	0.587
	BORDE	39	5140	2.551	35.94	80.00	80.00	0.150	0.648	0.552
	SELVA	32	2360	3.046	68.44	83.75	83.75	0.197	0.691	0.632
Seco	CENTRO	29	3200	3.042	25.56	52.81	63.13	0.082	0.599	0.524
	INTER	32	4140	3.091	19.06	55.63	69.38	0.117	0.604	0.528
	BORDE	14	2200	1.737	31.75	53.75	51.25	0.164	0.627	0.589
	SELVA	28	2200	2.733	11.88	74.38	66.67	0.212	0.640	0.573

este comportamiento en los ambientes subhúmedo y seco.

El análisis temporal nos indica que en la temporada de secas la selva baja inundable del ambiente húmedo se delimita mejor con respecto a la selva mediana, debido a que durante esta temporada el dosel de la SBI está 60% más abierto por tirar gran parte de su follaje (tabla 4). En las temporadas de lluvias y nortes el valor del vigor del borde de la SBI es similar al de la selva circundante, lo que provoca que la identificación de los límites entre ambas comunidades sea difícil de establecer.

Con respecto al ambiente subhúmedo, durante la temporada de secas se puede diferenciar el comportamiento espectral de la selva baja inundable al interior de la misma y la selva mediana subperennifolia circundante, ya que existen diferencias significativas a lo largo del transecto. En lluvias y nortes se puede identificar la diferencia entre la SBI y la selva de alrededor, pero no se distinguen zonas al interior de la SBI.

En el ambiente seco, se puede observar la SBI bien delimitada con respecto a la selva mediana subcaducifolia de los alrededores en la temporada de secas. Por el contrario, durante las estaciones de lluvias y nortes el valor del NDVI de la parcela de selva es similar a la de borde, lo que lleva a confundirlas al momento de la interpretación de las imágenes. Los valores del NDVI obtenidos son menores en la temporada de secas debido al comportamiento caducifolio de las especies, lo que acentúa la importancia de la fenología foliar de las especies de SBI para su adecuada interpretación.

Por otra parte, la cobertura del dosel observada en campo a lo largo de las temporadas tiene relación directa con la fenología foliar de las especies y ésta, a su vez, con el comportamiento de la respuesta del NDVI (Hoare y Frost, 2004, Feeley *et al.* 2005). En los “bajos inundables” se observa un aumento en la caída de hojas durante la temporada de secas y su recuperación conforme transcurre la época de lluvias, mientras que en la selva circundante la caducifoliedad es menor y más constante a lo largo del año, con excepción del ambiente seco, donde la selva es subcaducifolia.

Aunque en la época de secas la cobertura de especies herbáceas como *Cladium jamaicense*, característica del estrato herbáceo de la selva baja inundable, adquieren relevancia, la respuesta del NDVI no se ve influenciada por esta presencia. De igual manera, la inundación en sí no influye en la respuesta espectral del NDVI ya que los valores obtenidos están por arriba del valor de cero, lo que indica que se refleja el vigor de la vegetación y no el agua de la superficie. La cobertura del dosel es alta en estas temporadas y no permite que la reflectancia de la superficie inundada sea captada.

CONCLUSIONES

La respuesta del NDVI varió a lo largo del año, presentando valores menores en la época de secas y aumentando su valor de respuesta hacia la temporada de lluvias. Los valores del NDVI estuvieron en relación directa con la cobertura del dosel a lo largo de las temporadas, lo que lleva a confusión en cuanto al tipo de vegetación presente en la zona de transición que separa a ambos tipos de vegetación. Asimismo, la clasificación del NDVI tiene relación

con el resultado obtenido de estructura y composición de la vegetación.

El presente trabajo permite recomendar la utilización de imágenes obtenidas durante la temporada de secas y realizar la valoración a partir del NDVI cuando se requiere hacer una buena separación entre “bajos inundables” y selva circundante, ya que durante esta época se distingue bien la vegetación de ambos tipos de vegetación sobre el gradiente climático que existe en el sur de la Península de Yucatán.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es parte del estudio realizado para la obtención del grado de maestría en el Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal. Se agradece a ECOSUR y a la Coordinación de Posgrado, por la beca de colegiaturas y la ayuda del Programa de Apoyo para Tesis de Maestría (PATM). Asimismo, se agradece el apoyo del proyecto “Vulnerability and resilience in the coupled Human-environment system of the southern Yucatán: Linking remote sensing, field studies, and synthesis”, financiado por la NASA (NNH05ZDA001N-LCLUC) en colaboración con The George Perkins Marsh Institute-Clark University, University of Virginia and Rutgers University. A los doctores Héctor Hernández Arana y Jorge Argáez Sosa, por su ayuda en el diseño del muestreo y en los análisis estadísticos. A Paulino Simá Polanco y Filogonio May Pat por su colaboración en la identificación de los ejemplares botánicos. A Maarten Debruynne y Richard Van Sluis, por su gran apoyo en el trabajo de campo.

LITERATURA CITADA

- Agrawal, S., P. Joshi y P. Roy, 2003. “Spot-Vegetation multi temporal data for classifying vegetation in South Central Asia”. *Communicated to Current Science Journal*, 2003. Indian Institute of Remote Sensing.
- Alcaraz, D., J. Paruelo y J. Cabello, 2006. “Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula”. *Global Ecology and Biogeography*, **15**: 200-212.
- Barrera, M.A., A. Barrera y R.M. López, 1976. *Nomenclatura Etnobotánica Maya*. Colección Científica, Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D.F. 536 pp.
- Clarke, K.R. y Warwick, R.M., 2001. *Change in Marine Communities: An approach to statistical analysis and interpretation*. 2a ed. Primer-E Ltd, Plymouth.
- Cortés, J.C. y G. Islebe, 2005. “Influencia de factores ambientales en la distribución de especies arbóreas en las selvas del sureste de México”. *Rev. Biol. Trop.*, **53**(1-2): 115-133.
- De Beurs, K. M. y G. M. Henebry, 2005. “Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere-Biosphere Program high-latitude transects”. *Global Change Biology* (2005) **11**: 779-790.
- Díaz-Gallegos, J., O. Castillo y G. García-Gil, 2002. “Distribución espacial y estructura arbórea de la selva baja sub-

- perennifolia en un ejido de la reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche, México". *Universidad y Ciencia*, **18**(35): 11-28.
- Duch, G., 1989. "Los Bajos Inundables (ak'alche') de la Península de Yucatán". Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Fairbanks, D. y K. Mewire, 2004. "Patterns of floristic richness in vegetation communities of California: Regional scale analysis with multi-temporal NDVI". *Global Ecology and Biogeography*, **13**(3): 221-235.
- Feeley, K.J., T. Gillespie y J. Terborgh, 2005. "The utility of spectral indices from landsat ETM+ for measuring the structure and composition of tropical dry forests". *Biotrópica*, **37**(4): 508-519.
- Gilabert, M.A., J. González-Piqueras y J. García-Haro, 1997. "Acerca de los índices de vegetación". *Revista de Teledetección*, **8**: 35-45.
- González, J.A., I. Olmsted y F. Tun-Dzul. 2002. Tropical dry forest recovery after long term henequen (sisal, *Agave furcroydes* Lem.) plantation in northern Yucatan, Mexico. *Journal of Forest Ecology and Management*, **167**: 67-82.
- Hoare, D. y P. Frost. 2004. "Phenological description of natural vegetation in southern áfrica using remotely-sensed vegetation data". *Applied Vegetation Science*, **7**: 19-28.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) 1984. *Carta Edafológica, Chetumal E-16-4-7*, escala 1:250,000. 1ª. Ed. México, D.F.
- Klepeis, P. y B.L. Turner II. 2001. "Integrated land history and global change science: The example of the southern Yucatán Peninsular region project". *Land Use Policy*, 27-39.
- Lawrence, D., H. Vester, D. Pérez-Salicrup, J. Eastman, B. L. Turner II y J. Geoghegan, 2004. "Integrated analysis of ecosystem interactions with land-use change: The southern Yucatán Peninsular region". *Geophysical Monograph Series*, **153**: 277-292.
- Lot, A. 1983. "La vegetación acuática del sureste de México". *Ciencia y Desarrollo*, **53**: 115-117.
- Lundell, C., 1934. "Preliminary sketch of the phytogeography of the Yucatan Peninsula". *Carn. Inst. Wash. Publ.*, **436**: 257-321.
- Magurran, A., 1989. *Diversidad Ecológica y su Medición*. Ed. Vera, Barcelona, España. 200 pp.
- Martínez, E. y C. Galindo, 2002. "La vegetación de Calakmul, Campeche, México: Clasificación, descripción y distribución". *Bol. Soc. Bot. Mex.*, **71**: 7-32.
- Miranda, F., 1958. "Estudios acerca de la vegetación". In: Beltrán, E. (editor). *Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento*. Tomo II. Instituto Mexicano de Recursos Naturales no Renovables, México DF. pp 215-271.

- Miranda, F. y E. Hernández, 1963. "Los tipos de vegetación de México y su clasificación". *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, **28**: 29-179.
- Mueller-Dombois, D. y Ellenberg, H., 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. John Wiley y Sons. Nueva York, E.E.U.U. 547 pp.
- Olmsted, I. y R. Durán, 1986. "Aspectos ecológicos de la selva baja inundable de la Reserva de Sian Ka'an, Quintana Roo, México". *Biótica*, **11**(3):151-179.
- Olmsted, I., J.A. González-Iturbe, R. Durán, J. Granados y F. Tun-Dzul, 1999. "Vegetación". In: García Fuentes, A. J. Córdova y P. Chico Ponce de León (Eds.) *Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida. pp. 184-194.
- Orellana, R., M. Balam, I. Bañuelos, E. García, J. González-Iturbe, F. Herrera y J. Vidal, 1999. "Evaluación Climática". In: García de Fuentes, A., J. Córdoba y P. Chico Ponce de León (Eds.) *Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida. 163-182.
- Orozco, A.S. y A. Lot. 1976. "La vegetación de las zonas inundables del sureste de Veracruz". *Publicaciones del Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos*, **1**(1):1-44.
- Palacio, G., R. Noriega y P. Zamora, 2002. "Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como 'Bajos Inundables'". El caso del área natural protegida Balamkín, Campeche. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. **49**: 57-73.
- Pérez-Salicrup, D., 2004. "Forest types and their implications". In B. L. Turner, II, J. Geoghegan, and D. Foster (Eds.). *Integrated land-change science and tropical deforestation in the Southern Yucatan: Final frontiers*, pp. 63-80. Clarendon Press of Oxford University Press, Oxford, UK.
- Rico-Gray, V., 1982. "Estudio de la vegetación de la zona costera inundable del noroeste de Campeche, México: Los Petenes". *Biótica*, **7**(2):171-190.
- Rzedowski, J., 1978. "Vegetación de México". Editorial. Limusa. México. 432 pp.
- Sánchez-Azofeifa, G. A., K. Castro, B. Rivard, M. Kalascka, y R. C. Harris. 2003. "Remote sensing priorities in tropical dry forest environments". *Biotropica*, **35**: 134-142.
- Trejo, I. y R. Dirzo. 2002. "Floristic diversity of Mexican seasonally dry tropical forest". *Biodiversity and Conservation*, **11**: 2063-2048.
- Tun-Dzul, F., J. González-Iturbe y C. Espadas. 2000. "Mapa de vegetación Corredor Sian Ka'an-Calakmul". CICY, Yuc., Mex.
- Turner II, B. L., S. Cortina Villar, D. Foster, J. Geoghegan, E. Keys, P. Klepeis, D. Lawrence, P. Macario Mendoza, S. Manson, Y. Ogneva-Himmelberger,

- A. B. Plotkin, D. Pérez Salicrup, R. Roy Chowdhury, B. Savitsky, L. Schneider, B. Schmook, C. Vance, 2001. "Deforestation in the Southern Yucatán Peninsular Region: An Integrative Approach", *Forest Ecol. Mgt.*, **154**: 343-370.
- Turner II, B.L., Geohehan, J. and Foster, D.R., 2004. *Integrated Land Change Science and tropical deforestation in the Southern Yucatán*. Oxford University Press. 320 pp.
- Turner, W., S. Spector, N. Gardiner, M. Flodeland, E. Sterling, y M. Steininger, 2003. "Remote sensing for biodiversity science and conservation". *Tree*, **18**: 306-314.
- White, W.B., 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press. New York. 464 p.
- White, D. y C. Hood, 2004. "Vegetation patterns and environmental gradients in tropical dry forests of the northern Yucatan Peninsula". *Journal of Vegetation Science*, **15**: 151-160.

Recibido: 4 noviembre 2007. Aceptado: 22 abril 2008.