



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,
A.C.
México

Maya, Yolanda; Lacaze, Bernard; Monteforte, Mario; Passini, Marie-Françoise
Análisis de imágenes SPOT: erosión en la región montañosa del sur de la península de Baja
California, México

Terra Latinoamericana, vol. 22, núm. 1, enero-marzo, 2004, pp. 23-34

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311208003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

ANÁLISIS DE IMÁGENES SPOT: EROSIÓN EN LA REGIÓN MONTAÑOSA DEL SUR DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Analysis of SPOT Satellite Imagery: Soil Erosion in the Mountainous Region of the South of the Baja California Peninsula, Mexico

Yolanda Maya^{1‡}, Bernard Lacaze², Mario Monteforte¹ y Marie-Françoise Passini³

RESUMEN

En el presente trabajo se aplicaron tres índices sobre las sub-escenas de una región con características árido-tropicales tomadas con cinco años de diferencia y en diferentes estaciones, con el fin de evaluar su utilidad en estudios de erosión de suelos y determinar las áreas de riesgo. Los índices que se aplicaron fueron el Índice de Brillo, el Índice de Vegetación Relativo y la Distancia a la Recta de Suelo. De acuerdo con los resultados, el Índice de Brillo sirve para elaborar mapas confiables de zonas potencialmente erosionadas en las condiciones del sitio de estudio. Los otros dos índices permitieron determinar que en los cinco años transcurridos, la erosión había aumentado y que algunas zonas habían cambiado, pudiendo éstas considerarse como potencialmente erosionadas.

Palabras clave: Erosión de suelos, selva baja caducifolia, Índice de Brillo, Índice de Vegetación Relativo, Distancia a la Recta del Suelo.

SUMMARY

This study evaluates the use of three satellite band combinations (indices) for soil erosion studies, particularly to determinate erosion risk areas. Images were taken with a difference of five years, in different seasons. The evaluated indices were: Brightness index, Fractional Vegetation Cover, and Distance from the Soil Line Index. Indices were applied to subscenes of a region with arid-tropical climatic characteristics. The Brightness index generated

reliable cartography of potentially eroded areas in similar climatic conditions to those of the study area. The other two indices allowed us to determine that soil erosion had increased in the five-year period and that, because of the changes, some areas can be considered potentially eroded.

Index words: Soil erosion, tropical dry forest, Brightness index, Fractional Vegetation Cover, Distance from the Soil Line Index.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, los grandes avances en el desarrollo de la Percepción Remota e Informática han posibilitado la gestión de los recursos naturales, beneficiando a la Geología, la Ecología Vegetal y la Edafología con la información numérica de imágenes satelitales que cubren amplias extensiones y abarcan más allá del dominio visible del espectro electromagnético. Sin embargo, en los estudios de suelos existen dos inconvenientes a considerar al utilizar este tipo de información: (1) los sensores registran aquella parte de la radiación solar que es reflejada por la superficie terrestre y es transmitida a través de la atmósfera; así, la información debe ser interpretada en términos de las propiedades particulares de los objetos, y (2) el suelo se encuentra, en general, cubierto por diversos tipos de vegetación; para su estudio debe recurrirse a indicadores indirectos, como la geomorfología, la variación de la vegetación y el uso del suelo, es decir, al análisis del paisaje (Bonn y Escadafal, 1996). En este sentido, el tipo de ecosistema es de suma importancia. Por ejemplo, en ambientes húmedos con vegetación densa y perenne se acentúa el efecto de la radiación reflejada y emitida por la vegetación clorofílica. De acuerdo con lo anterior, regiones de clima seco, con vegetación caducifolia y color de suelo relativamente homogéneo son excelentes candidatas para evaluar fenómenos superficiales del suelo, como la erosión, para lo cual se apoya en los datos numéricos de las imágenes. Esto debido a que la

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Apdo. Postal 128, 23000 La Paz, Baja California Sur, México.

[‡] Autor responsable (ymaya@cibnor.mx)

² CRENAM-Université Jean Monnet. 6, rue Basse des Rives, 42023 Saint-Etienne Cedex2, France.

³ Université Paris 6. Laboratoire de Biologie Végétale Tropicale. 12 Rue Cuvier, 75005 Paris, France.

pérdida del follaje permite considerar que gran parte de la información registrada correspondería al suelo, además de que se elimina la señal de la vegetación clorofílica.

En el presente trabajo, se evalúa la utilidad de tres índices (combinaciones de bandas satelitales) para detectar áreas potencialmente erosionadas en una selva baja caducifolia establecida en un macizo montañoso de geología homogénea. Los índices se aplicaron sobre sub-escenas captadas en dos fechas que cubren un área en la que en la actualidad existen problemas de erosión. Cabe subrayar que este estudio se desarrolló dentro de la selva baja caducifolia y no se contempla que los resultados sean válidos para las zonas aledañas en las que son dominantes los bosques de encino y de encino-pino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se encuentra en la Sierra de la Laguna, en el extremo sur de la Península de Baja California (Figura 1A). Tiene una extensión aproximada de 2400 km², cumbres escarpadas y alcanza una altitud de 2090 m. En su geología predominan granitos y sienitas.

Por su extensión y difícil acceso, el uso de imágenes de satélite resulta una excelente opción en el estudio de zonas erosionadas y en riesgo de erosión. La prospección general e interpretación de fotografías aéreas (junio-julio, temporada seca) en escala 1:75 000 (INEGI, 1993), permitió delimitar varias unidades, la mayoría dentro de la selva baja caducifolia, la cual forma un cinturón en las laderas serranas entre 300 y 750 m de altitud. La información se relacionó con los resultados reales del terreno, a partir de la aplicación de los diferentes índices en las sub-imágenes.

El área de estudio tiene una extensión de 140 km² y se localiza al norte del macizo montañoso (Figura 1A). La fotointerpretación permitió delimitar varias zonas desprovistas de vegetación (Figura 1B); la verificación de campo confirmó que algunas presentaban ya problemas de erosión, donde era dominante la hídrica laminar. De acuerdo con la información de campo, 90% de la superficie de ciertas unidades identificadas durante la fotointerpretación estaba representado por suelo desnudo con diversos grados de erosión (Figura 1C); el 10% restante de la superficie estaba representado por elementos arbóreos

dispersos. Con base en los perfiles descritos de áreas no erosionadas, la erosión hídrica laminar habría logrado eliminar hasta 20 cm de la capa superficial del suelo, exponiendo en ocasiones la roca subyacente. Los suelos en el área de estudio son en su mayor parte jóvenes y poco profundos; las texturas son gruesas y la morfología es con poca agregación de las partículas. Los colores del suelo son predominantemente claros. La Figura 1D muestra la distribución de las geoformas y los colores más representativos del suelo con base en información de campo.

La curva de precipitación es bimodal, en verano e invierno. Entre julio y septiembre ocurre más de 70% del volumen total anual, en general como lluvias torrenciales y fuertes vientos, debido a la influencia de huracanes en el Pacífico. El registro de 10 años en la estación meteorológica más cercana, (aproximadamente a 15 km del área de estudio) muestra que la temperatura promedio anual es de 23 °C y la precipitación total anual es de 460 mm.

La vegetación es muy abierta, en parches de selva baja caducifolia, pastizales y suelo desnudo. En algunas cañadas se encuentran pequeñas poblaciones de encinos. La práctica de actividades económicas, como la ganadería y la minería, ha eliminado la cubierta vegetal, debido a la apertura de caminos y la extracción de madera con fines de construcción, causando la pérdida de la capa edáfica. En algunos sitios de extrema erosión, el material geológico se encuentra descubierto.

Cálculo de Índices a Partir de los Datos Numéricos de las Imágenes

Se extrajeron sub-escenas de 350 000 píxels de imágenes SPOT multibanda 564-303 de dos fechas (febrero 15 de 1987 y octubre 19 de 1992). Se hicieron correcciones geométricas, para lo cual se utilizó una función cuadrática con base en 20 puntos de referencia. Una vez modificadas, se calcularon tres índices: el Índice de Brillo (IB), el cuadrado del Índice de Vegetación Relativo o “fractional vegetation cover” (NDVI relativo) y el cálculo del porcentaje de vegetación a partir de la Recta de Suelo (PVI).

El IB se utiliza frecuentemente en la identificación de tipos de suelos con fines cartográficos y para evaluar su grado de degradación. Este índice destaca la variabilidad en la claridad del color entre suelos de una región determinada, que afecta directamente la reflectividad registrada (Bonn y Escadafal, 1996). Los

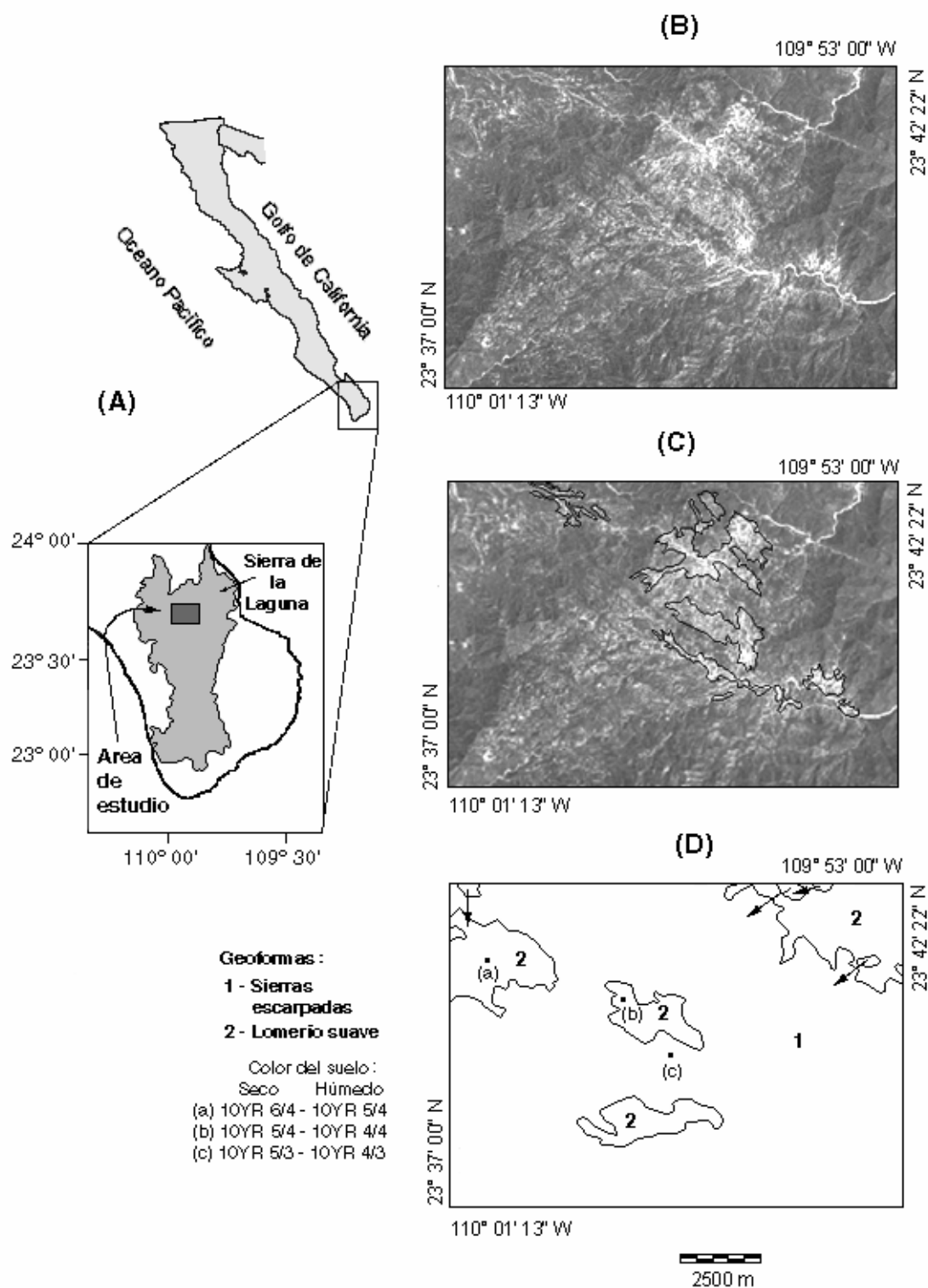


Figura 1. (A) Ubicación del área de estudio; (B) área de estudio, sub-escena SPOT XS1. Las áreas más claras corresponden a las zonas desprovistas de vegetación; (C) unidades cartográficas erosionadas, verificadas en campo; (D) mapa de distribución de geomorfos y colores del horizonte superficial del suelo.

otros dos índices (NDVI relativo y PVI) analizan la vegetación y los posibles cambios en sus patrones de distribución, los cuales son claves en el estudio y en la determinación de las condiciones del suelo, debido a que éste se encuentra en general cubierto por algún tipo de vegetación.

El NDVI relativo y el PVI se basan en la interacción particular que la vegetación clorofílica tiene en los dominios del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético (Tucker y Miller 1977; Bariou *et al.*, 1985). La energía requerida para realizar la fotosíntesis se encuentra en su mayoría en las regiones del rojo y el azul del área visible; la vegetación verde absorbe grandes cantidades de energía en esta área, que da por resultado una baja reflectividad, en tanto que la energía de la región del infrarrojo no se utiliza en la fotosíntesis, lo que se traduce en valores altos de reflectividad. Este gran contraste entre la reflectividad de ambos dominios del espectro se utiliza para calcular diversos índices de vegetación, que caracterizan cuantitativamente la distribución de la vegetación y la condición en la que se encuentra.

Los índices de vegetación pueden clasificarse en “índices de vegetación basados en la pendiente” y en “índices de vegetación basados en la distancia a una recta” (Jackson y Huete, 1991). Los dos tipos de índices analizan la distribución de los valores de reflectividad de los pixels en una gráfica bidimensional, siendo uno de los ejes el rojo y el otro el infrarrojo cercano. En los índices de vegetación basados en la pendiente, los pixels que se agrupan sobre una línea que parte del origen presentan el mismo índice de vegetación. De esta forma, los diferentes niveles del índice de vegetación estarían representados por una serie de líneas con el mismo origen, pero diferente pendiente. El Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), así como el NDVI relativo, son de este tipo.

En los índices de vegetación basados en la distancia, la cantidad de vegetación clorofílica presente en un pixel se estima por la distancia perpendicular que tiene dicho pixel con respecto a la “Recta de Suelo” (**soil line**). La Recta de Suelo se define a partir de la regresión de la nube de puntos que forman los pixels de suelo desnudo, incluyendo las variaciones en color y humedad. El mayor problema es encontrar la Recta de Suelo que realmente represente todas las variaciones del suelo desnudo de la región que cubre la imagen, lo que

significa que no hay una recta única (Thiam e Eastman, 1992).

Cálculo del Índice de Brillo. La ecuación que se utilizó para calcular el IB fue:

$$IB = [(XS1^2 + XS2^2 + XS3^2) / 3]^{1/2} \quad (1)$$

Donde: XS1 es la Banda del amarillo-naranja en el espectro electromagnético (0.5 a 0.59 μm), XS2 es la del rojo (0.61 a 0.68 μm) y XS3 es la del infrarrojo cercano (0.79 a 0.89 μm).

Sobre las imágenes obtenidas al aplicar la Ecuación 1 se hizo una clasificación supervisada en cuatro clases para cada fecha (brillo bajo, brillo medio, brillo alto y sombra) mediante las firmas espectrales generadas a partir de polígonos de entrenamiento. Para ambas fechas, los de brillo alto se ubicaron en el fondo de un arroyo. El resto de los polígonos (brillo medio, bajo y sombra) cubrían partes altas y laderas de lomeríos y montañas. Los valores de cada clase, el número de polígonos considerados para cada una, el número total de pixels contenidos en los polígonos, la frecuencia y la desviación estándar se presentan en el Cuadro 1. Se generaron dos mapas de la clasificación en color para cada una de las fechas que se muestran en las Figuras 2a y b.

Cuadrado del Índice de Vegetación Relativo o “Fractional Vegetation Cover”. La estimación del porcentaje de vegetación mediante el NDVI relativo se basa en el supuesto de que el NDVI de la vegetación se distribuye gradualmente entre el NDVI del suelo desnudo y el NDVI de la vegetación totalmente verde. Para calcular el NDVI de cada fecha se utilizó la ecuación:

$$NDVI = (XS3 - XS2) / (XS3 + XS2) \quad (2)$$

Los valores del NDVI se distribuyeron entre -0.276 y 0.604 para febrero de 1987 y entre -0.192 y 0.610 para octubre de 1992. Posteriormente, se calculó el NDVI relativo de cada una de las fechas mediante la ecuación (a partir de Carlson y Ripley, 1997):

$$F_g = 100 * ((NDVI - NDVI_{sd}) / (NDVI_{vv} - NDVI_{sd}))^2 \quad (3)$$

Donde: F_g es el cuadrado del Índice de Vegetación Relativo o “Fractional Vegetation Cover”, $NDVI_{sd}$ es el NDVI del suelo desnudo y $NDVI_{vv}$ es el NDVI del pixel con la mayor cobertura de vegetación verde en el área (vv = vegetación verde).

Cuadro 1. Valores correspondientes a cada intervalo de clase del Índice de Brillo, obtenidos a partir de polígonos de entrenamiento, número total de pixels contenidos en ellos, frecuencia y desviación estándar.

Clase	Febrero de 1987						Octubre de 1992					
	Min	Max	No. Polig	No. pixels	s.d.	Frec.	Min	Max	No. Polig	No. pixels	s.d.	Frec.
Brillo alto	226	251	1	20	6.37	82	220	255	1	23	8.88	73
Brillo bajo	51	77	2	164	6.26	219899	45	90	2	790	8.11	241425
Brillo medio	107	196	3	48	21.34	26089	94	202	2	179	22.00	19524
Sombra	6	36	2	290	5.32	103930	0	40	3	371	6.57	88978

s.d. = desviación estándar; Frec. = frecuencia.

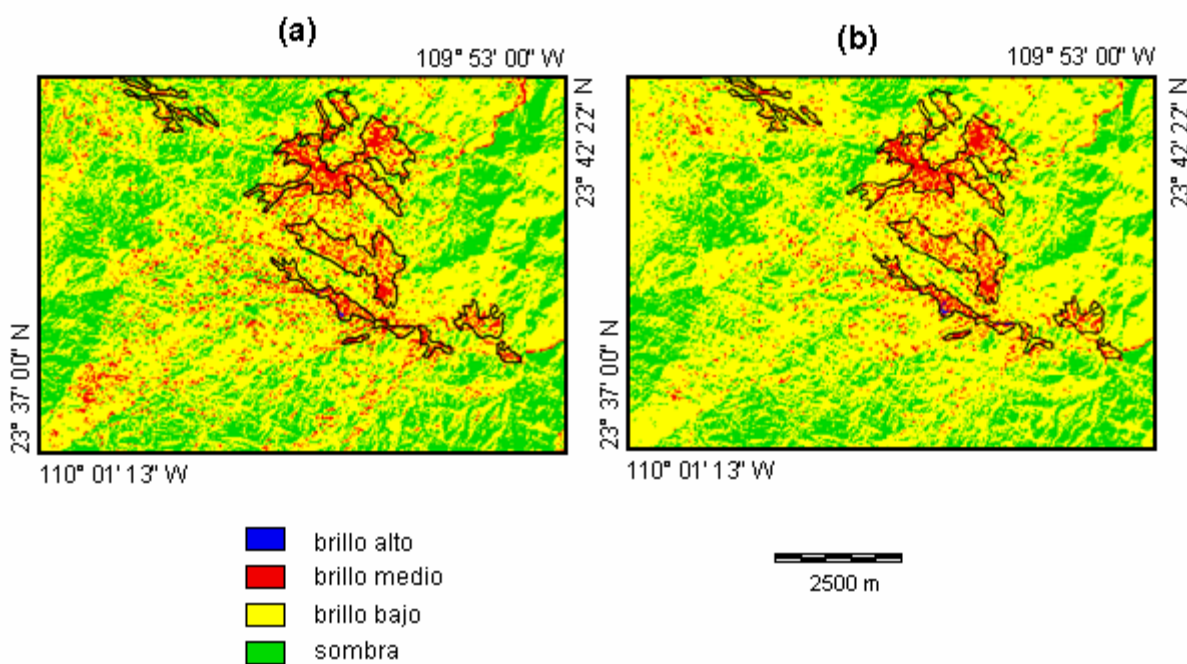


Figura 2. Imagen del Índice de Brillo: (a) febrero de 1987; (b) octubre de 1992.

Para determinar los valores discretos de $NDVI_{sd}$ y $NDVI_{vv}$ en cada una de las fechas se ajustó el histograma de la imagen entre cero y 100. Sobre la imagen en tonos de gris se aplicaron colores aumentando progresivamente en uno, a partir de cero, hasta lograr la coloración de los pixels de sitios previamente identificados en el campo como representativos del suelo desnudo y de la vegetación verde. El valor del NDVI correspondiente se determinó por comparación directa con el histograma que representaba los valores reales, dividido en 100 clases. Los valores identificados de NDVI del

suelo desnudo (28 pixels) y de la vegetación verde (22 pixels) fueron respectivamente -0.07 y 0.45 para febrero de 1987 y 0.00 y 0.50 para octubre de 1992. Se asume que todos los valores del intervalo $NDVI_{min} - NDVI_{sd}$ representan pixels con suelo desnudo; en el intervalo $NDVI_{vv} - NDVI_{máx}$, los valores corresponden a pixels con vegetación verde. Se substituyeron los valores de $NDVI_{sd}$ y de $NDVI_{vv}$ en la Ecuación 3 que, posteriormente, se aplicó a las sub-escenas de ambas fechas. Los histogramas de las imágenes resultantes se ajustaron con límites de cero a 100 y se dividieron en 10 clases, con el fin de analizar

el comportamiento de la frecuencia de pixels en cada fecha.

Cálculo del Porcentaje de Vegetación a Partir de la Recta de Suelo. El cálculo del PVI se basa en que la reflectividad del suelo disminuye progresivamente a medida que aumenta la cobertura vegetal, de tal manera que los valores correspondientes a la vegetación clorofílica más densa son los que se encuentran más alejados de la Recta de Suelo. Para definir ésta se determinaron los pixels relacionados con diversos tipos de suelo desnudo. Para ello, se localizaron en las imágenes las unidades que ya se habían delimitado durante la fotointerpretación y se corroboró que los valores de reflectividad de los pixels se ubicaran en los valores altos de las bandas amarillo-naranja y rojo en la temporada seca, con la posterior verificación en campo. Se crearon las firmas espectrales de los diversos suelos desnudos con la ayuda de polígonos de entrenamiento localizados en imágenes falso-color de ambas fechas (Cuadro 2). Posteriormente, sobre las gráficas bidimensionales en las cuales la variable independiente (eje X) era la banda del rojo (XS2) y la variable dependiente (eje Y)

la del infrarrojo cercano (XS3) y, con base en el promedio de las firmas espectrales, se definió la Recta de Suelo y se calcularon sus coeficientes a (valor de la ordenada del punto de intersección) y b (pendiente) para cada fecha.

Para determinar los valores de la vegetación más densa, se ubicaron las unidades delimitadas durante la fotointerpretación sobre las imágenes falso-color de ambas fechas. Se crearon las firmas espectrales con ayuda de polígonos de entrenamiento, en los que se identificó el pixel con el valor más alto de reflectividad en la banda del infrarrojo cercano. Los valores de este pixel, que corresponden a XS2_{VV} y XS3_{VV} para cada fecha, aparecen en negrillas en el Cuadro 2.

La ecuación que se utilizó para calcular el Porcentaje de Vegetación a Partir de la Recta de Suelo se presenta a continuación (Price, 1993; Lacaze, 1996). Cabe señalar que el F_g de esta ecuación no es el mismo F_g de la Ecuación 3; se han utilizado los mismos símbolos porque así los autores los asignaron originalmente:

Cuadro 2. Valores de las firmas espectrales de cuatro tipos de suelo desnudo y de la vegetación verde, que se utilizaron para obtener la Recta de Suelo y para el cálculo del porcentaje de vegetación a partir de la misma.

Tipo de suelo [†]		Febrero de 1987			Octubre de 1992		
		Banda			Banda		
		XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3
Suelo 1 (n = 39)	Min	93	100	90	62	65	65
	Max	120	133	117	81	91	81
	Prom	111	119	104	72.4	79.8	73.6
	s.d.	7.75	9.43	8.44	6.08	7.64	5.50
Suelo 2 (n = 34)	Min	42	40	57	30	28	47
	Max	57	60	75	42	43	62
	Prom	47.6	47.8	63.9	34.3	33.5	54.7
	s.d.	4.10	5.10	5.19	2.83	3.51	3.62
Suelo 3 (n = 9)	Min	62	66	68	46	51	53
	Max	68	73	75	50	58	58
	Prom	65.3	70.6	72.6	48.4	54.1	55.7
	s.d.	2.00	2.60	2.50	1.24	2.15	1.79
Suelo 4 (n = 18)	Min	68	76	77	49	51	58
	Max	90	92	90	64	72	74
	Prom	78.1	84.9	83.7	54.9	61.5	67.0
	s.d.	6.03	5.62	3.71	5.19	6.92	4.35
Veg. verde (n = 212)	Min	25	15	39	21	14	45
	Max	39	34	72	28	22	57
	Prom	28.25	20.75	54.40	22.80	15.60	49.70
	s.d.	2.89	3.86	5.18	1.01	1.21	2.46

[†] Suelo 1 – arena de cuarzo; Suelo 2 – suelo amarillo; Suelo 3 – suelo amarillo con gravilla; Suelo 4 – suelo rosa con gravilla; n = número de pixels. s.d. = desviación estándar.

$$F_g = 100 * (XS3 - aXS2 - b / XS3_{vv} - a XS2_{vv} - b) \quad (4)$$

Donde: F_g es el porcentaje de vegetación, a es la ordenada del punto de intersección de la Recta de Suelo, b es la pendiente de la Recta de Suelo, $XS2_{vv}$ es el valor en el rojo del pixel con vegetación más densa ($vv =$ vegetación verde) y $XS3_{vv}$ es el valor del mismo pixel en el infrarrojo cercano.

La Ecuación 4 se aplicó sobre las imágenes de cada fecha. Al igual que para el NDVI relativo, los histogramas de las imágenes resultantes se ajustaron con límites entre cero y 100 y se dividieron en 10 clases, con el fin de analizar el comportamiento de la frecuencia de pixels. Se calcularon los coeficientes a y b de la Recta de Suelo ($a = 0.8598$ y $b = 1.6840$ para febrero de 1987; $a = 0.7941$ y $b = 9.472$ para octubre de 1992) y se obtuvieron los valores en el rojo e infrarrojo cercano de la vegetación verde para cada fecha ($XS2_{vv} = 15$ y $XS3_{vv} = 72$ para febrero de 1987; $XS2_{vv} = 14$ y $XS3_{vv} = 57$ para octubre de 1992).

Con las frecuencias, expresadas en número de pixels, calculadas tanto por el NDVI relativo como por el PVI en ambas fechas, se elaboró la Figura 3. Las eventuales diferencias entre los resultados de índices y fechas se analizaron mediante el método de Elliot y Décamps (1973), que se utiliza en la comparación de distribuciones de frecuencia de dos poblaciones en muestras grandes con distribuciones aleatorias, regulares o contagiosas. Este método se basa en la igualdad:

$d =$ diferencia entre la media de las muestras/error tipo de la diferencia

El valor “ d ” puede ser negativo o positivo; la diferencia entre medias es significativa a $P = 0.05$ cuando $d > 1.96$; a $P = 0.01$ cuando $d > 2.58$ y a $P = 0.001$ cuando $d > 3.29$.

Para comparar los resultados entre los dos índices en la misma fecha, se aplicó una prueba de χ^2 , considerando como “frecuencias observadas” las que se definieron tras la aplicación del PVI y como “frecuencias esperadas” las que se obtuvieron a partir de la aplicación del NDVI relativo (Cuadro 3).

Análisis de la Erosión

Clasificación de la cobertura vegetal. Los valores estimados del porcentaje de cobertura vegetal

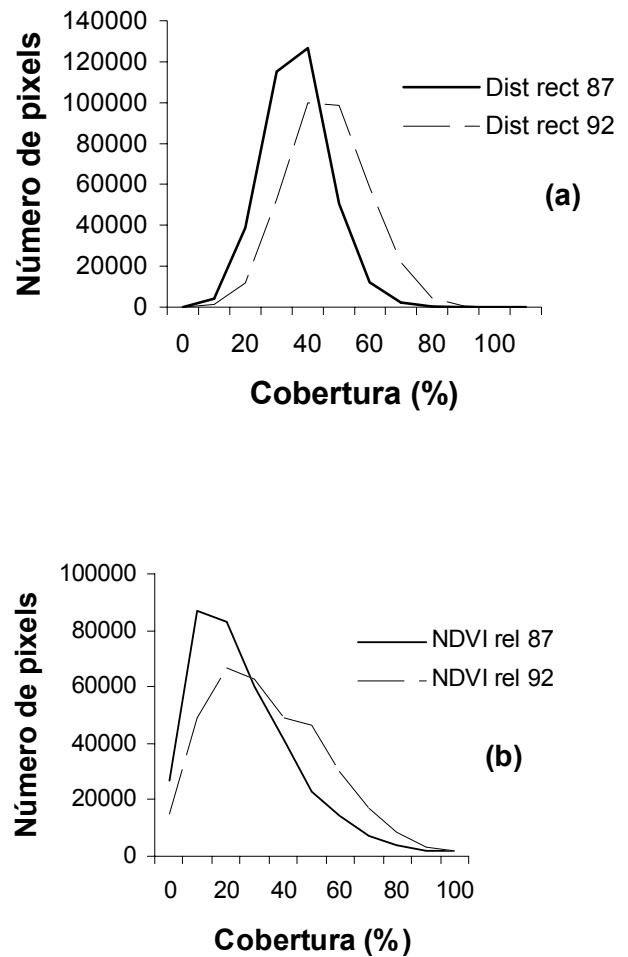


Figura 3. Distribución de frecuencias de pixels para clases de cobertura estimadas por (a) el Índice de Vegetación Relativo y (b) el índice de la Distancia a la Recta del Suelo.

mediante el NDVI relativo y el PVI se reclasificaron, a fin de relacionar esta información con la de sitios que ya presentaban problemas de erosión. El criterio para establecer los límites de las clases se fundamentó principalmente en la información recopilada en el campo, que permitió reconocer las zonas erosionadas con una cobertura vegetal inferior a 30%; por otra

Cuadro 3. Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas sobre las distribuciones de frecuencia de pixels resultantes al aplicar el NDVI relativo (NDVI rel) y el porcentaje de vegetación a partir de la Recta de Suelo (PVI).

PVI 87 vs. PVI 92	$d = 355.38$	
NDVI rel 87 vs. NDVI rel 92	$d = 179.64$	
PVI 87 vs. NDVI rel 87	$\chi^2 = 4862323.0$	$P < 0.0000$
PVI 92 vs. NDVI rel 92	$\chi^2 = 1250910.0$	$P < 0.0000$

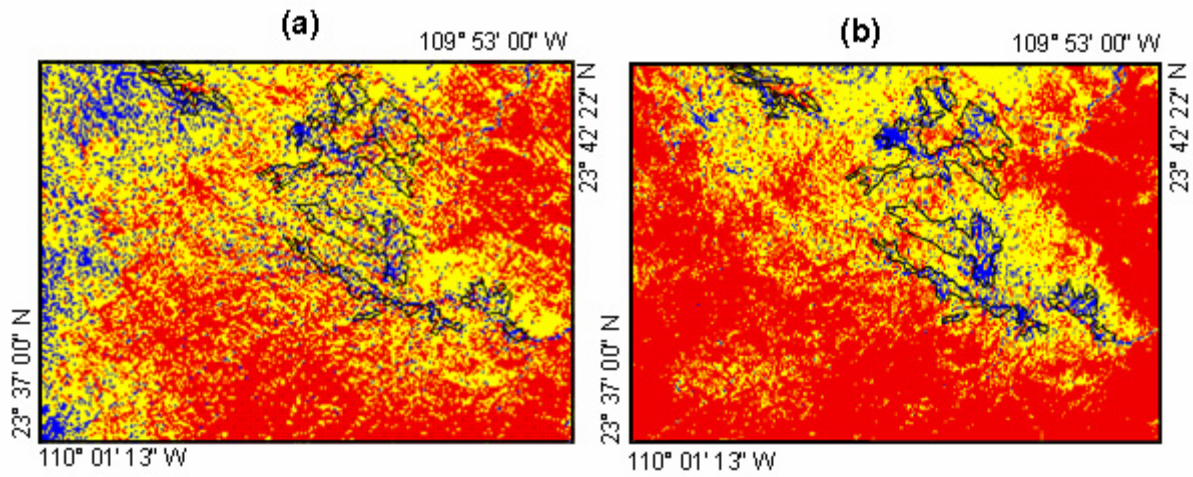


Figura 4. Clasificación de la cobertura vegetal a partir del Índice de Vegetación Relativo: (a) febrero de 1987; (b) octubre de 1992.

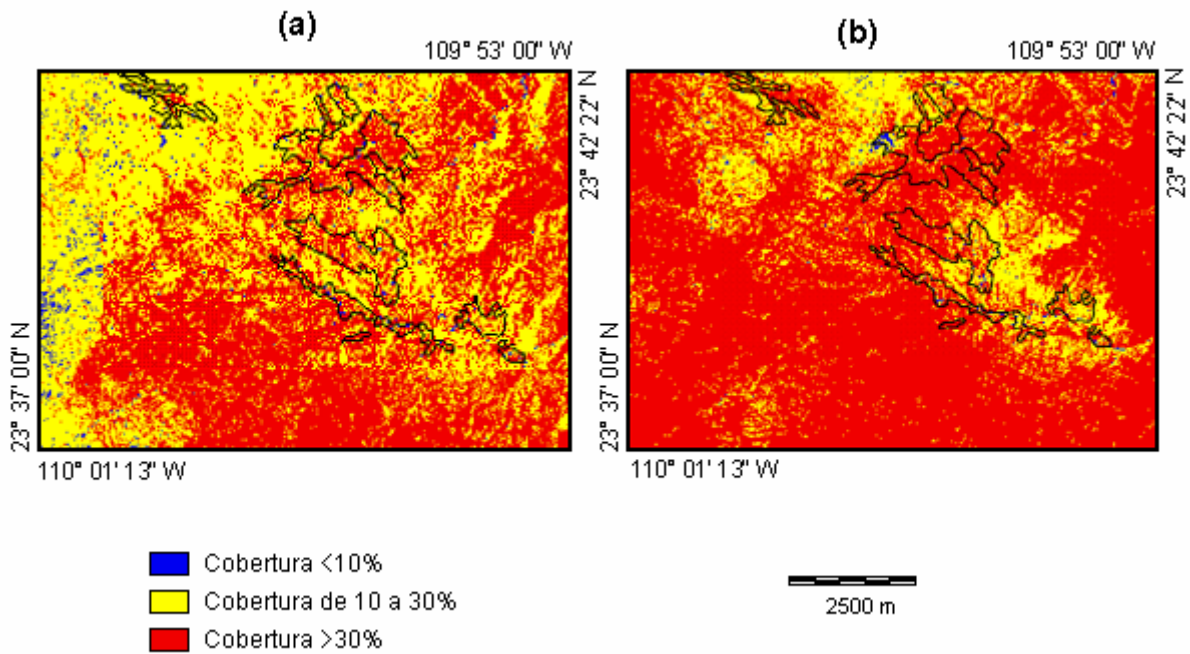


Figura 5. Clasificación de la cobertura vegetal a partir de la Distancia a la Recta de Suelo: (a) febrero de 1987; (b) octubre de 1992.

parte, Girard y Girard (1989) establecieron que la vegetación clorofílica puede detectarse en las imágenes de satélite cuando ésta cubre por lo menos 30% de la superficie del píxel (clase > 30%). El cálculo de la cobertura vegetal por el NDVI relativo y por el PVI permiten establecer clases por debajo del 30% de cobertura. Tomando ventaja de este hecho y con base en la información recopilada en el campo, se establecieron las clases:

1) Superficie con menos de 10% de cobertura vegetal, con afloramientos rocosos o pedregosidad superficial y sin mantillo. Zonas erosionadas.

2) Superficie con 10 a 30% de cobertura vegetal, con posibilidad de afloramientos rocosos y con hojarasca. Zonas potencialmente erosionadas.

3) Superficie con más de 30% de cobertura vegetal. Zonas estables.

Con los resultados de la clasificación se elaboraron cuatro mapas, dos para febrero de 1987 y dos para octubre de 1992 (Figuras 4a y b; 5a y b).

Análisis bitemporal del fenómeno. La cobertura de la vegetación clorofílica está directamente relacionada con la humedad; las áreas donde la cobertura ha disminuido entre la temporada seca (febrero) y la temporada húmeda (octubre) señalan riesgo potencial de erosión. Para enfatizar este fenómeno, se correlacionaron los datos del mapa de febrero de 1987 con el de octubre de 1992, obtenidos con el NDVI relativo (Cuadro 4a) y con el PVI (Cuadro 4b). Con los resultados anteriores, se definieron nueve clases con sus respectivos mapas a color (Figuras 6a y b). En estas figuras se puede apreciar que las Clases I, V y IX (en gris) corresponden a los píxeles cuyas coberturas no cambiaron. Las Clases IV, VII y VIII, en colores oscuros (verde, azul y violeta, respectivamente) contienen los píxeles que presentaron un aumento de cobertura, como era lo esperado. En cambio, las Clases II, III y VI, en colores brillantes (amarillo, rojo y naranja, respectivamente) representan los píxeles cuya cobertura disminuyó y

Cuadro 4. Matrices de correlación de las tres clases de cobertura vegetal estimadas por (a) NDVI relativo y (b) PVI. Las cifras en negrillas representan la frecuencia de píxeles; por debajo se encuentra la proporción que esta frecuencia representa con respecto al total de los píxeles de la sub-escena. Los números romanos en *itálicas* representan la clasificación cartográfica de la Figura 6.

(a)

Fecha	% de cobertura	Febrero de 1987			Total
		< 10%	10 a 30%	> 30%	
Octubre de 1992	< 10%	9939	7488	671	18098
		0.0284	0.0214	0.0019	
	10 a 30%	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	121563
		14795	86628	20140	
	> 30%	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	210339
		8643	75435	126261	
Total		<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>	350000
		33377	169551	147072	
		0.0954	0.4844	0.4202	

(b)

Fecha	% de cobertura	Febrero de 1987			Total
		< 10%	10 a 30%	> 30%	
Octubre de 1992	< 10%	380	1202	154	1736
		0.0011	0.0034	0.0004	
	10 a 30%	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	73461
		2354	57791	13316	
	> 30%	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	274803
		2544	108779	163480	
Total		<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>	350000
		5278	167772	176950	
		0.0151	0.4793	0.5056	

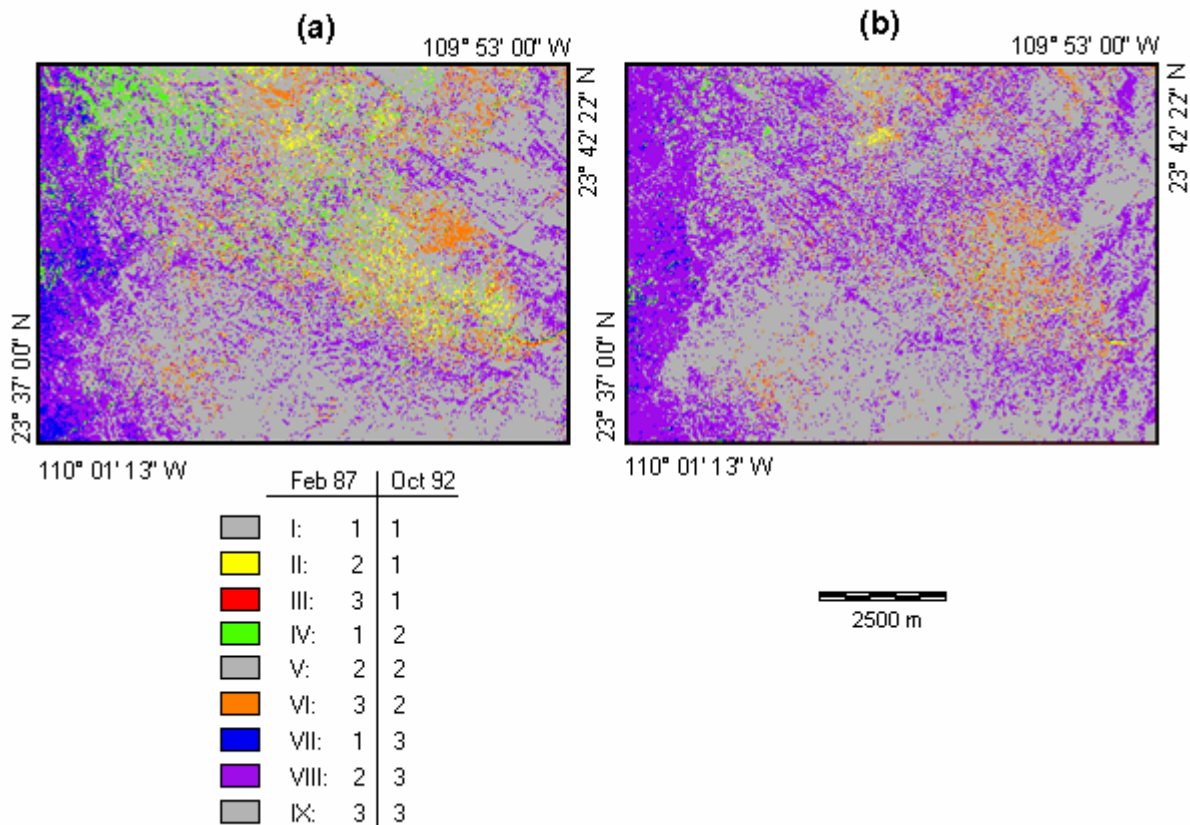


Figura 6. Evaluación de la cobertura vegetal (de acuerdo con la clasificación del Cuadro 4): (a) mediante el Índice de Vegetación Relativo; (b) mediante la Distancia a la Recta de Suelo.

que son los interesantes para el estudio de la erosión: la Clase II (en amarillo) indica las áreas que pasaron de “potencialmente erosionadas” a “erosionadas”; la Clase III (en rojo), las que pasaron de “estables” a “erosionadas”, y la Clase VI (en anaranjado) las que pasaron de “estables” a “potencialmente erosionadas” en el transcurso de los cinco años considerados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índices Calculados

Índice de Brillo. Aunque los resultados numéricos no señalan una diferencia importante en la frecuencia del número de pixels de las clases definidas como de brillo alto y medio entre las dos fechas (Cuadro 1), en los mapas en color (Figuras 2a y b) se distinguen las áreas que, de acuerdo con la información recopilada en campo, se encuentran ya erosionadas.

Como ya se había mencionado, una desventaja en el uso de este índice es que en un área determinada

podría presentarse una variada gama de colores y, dado que los suelos claros tienen valores de IB más altos que los oscuros, los primeros no necesariamente estarían indicando suelos desnudos. Sin embargo, en la región de estudio, los suelos en general tienen colores claros por el material geológico del que se derivan, además de sostener una vegetación muy abierta y de tipo caducifolio. Podría entonces suponerse que los valores altos del IB estuvieran indicando suelos desnudos.

Por otra parte, la humedad oscurece el color de los suelos (Girard y Girard 1989) y fomenta el crecimiento de hierbas anuales; ambos factores disminuyen los valores del IB. Por esta razón, el mapa de IB elaborado con la imagen tomada en temporada seca (febrero de 1987) es el más fiable.

NDVI relativo y PVI. Para ambos índices, la distribución de pixels de las imágenes de 1992 (temporada húmeda) confirma un aumento en el porcentaje de cobertura de la vegetación clorofílica, en relación con las imágenes de 1987 (temporada

seca) (Figura 3). Los resultados de las pruebas estadísticas demostraron que tal aumento es significativo. Por otra parte, al comparar los dos índices se observa una diferencia en la distribución de frecuencias entre ambos, la cual resultó ser también significativa, sobre todo en coberturas menores que 50% (Cuadro 3).

De acuerdo con estos resultados, el cálculo del porcentaje de cobertura de la vegetación por medio del NDVI relativo parece ser más sensible al aumento de la superficie de suelo desnudo en un periodo determinado que el del PVI. Su sensibilidad podría ser suficientemente adecuada para localizar un área desnuda con erosión tan fuerte que ni siquiera permitiera el desarrollo del estrato herbáceo cuando el resto de la vegetación clorofílica estuviera al máximo por la humedad.

Cada índice analiza la información en forma particular; la diferencia en la sensibilidad de ambos podría explicarse por la dificultad de elegir la Recta de Suelo que represente realmente todas las condiciones de los suelos desnudos en el área. Tal afirmación se basa en los resultados de las clases de cobertura más baja para ambos índices, a pesar de que se conocía de antemano el área de estudio y se localizaron con precisión los sitios en los que se presentan diferentes condiciones de suelo desnudo. Ambos índices tienen la desventaja de que se basan en información sobre el terreno, tanto en la localización de sitios representativos necesarios para elaborar las firmas espectrales, como en la validación de los resultados obtenidos. La confiabilidad de los dos índices es además relativa, debido a la forma en la que se determinan tanto los valores del NDVI para el suelo desnudo y la vegetación verde, como los de la Recta de Suelo.

Análisis de la erosión. El cálculo de los porcentajes de cobertura por los dos índices muestra un aumento general en la imagen de octubre directamente relacionado con la humedad, lo que confirma la estimación correcta de los porcentajes. Cabe subrayar que en el sitio de estudio el aspecto de la vegetación clorofílica sufre un cambio dramático entre la temporada húmeda y la seca, por tratarse de la selva baja caducifolia que se ha establecido en las condiciones climáticas más extremas (Arriaga y Ortega, 1988). Los resultados de la correlación se muestran en las Figuras 6a y b, y en el Cuadro 4. En las figuras, los colores brillantes representan las áreas en las que la cobertura estimada disminuyó durante el periodo de cinco años que transcurrió entre la toma de

las dos imágenes. Puede observarse que la superficie de estas áreas es mayor en la imagen del NDVI relativo que en la del PVI.

Los índices aplicados parecen ser complementarios para el estudio de la erosión: los dos señalan un aumento en la superficie de suelo desnudo, aunque de diferentes dimensiones. Al compararlos con observaciones de campo, el NDVI relativo parece sobre-estimar el incremento en la superficie de suelo desnudo, en tanto que el PVI parecería subestimarlos. Esto se debe a la información de la que parten y que puede observarse en las Figuras 4 y 5, en las cuales es evidente la gran diferencia que existe entre ambos resultados, sobre todo al sobreponer las unidades verificadas en campo.

CONCLUSIONES

- Las verificaciones de campo permiten afirmar que con el Índice de Brillo se pueden elaborar mapas confiables de áreas potencialmente erosionadas en condiciones de suelos claros y vegetación caducifolia, condiciones que son típicas de ambientes áridos y semiáridos, en especial a partir de información captada durante la temporada seca. Esto resulta de suma utilidad cuando las características del paisaje dificultan o imposibilitan la verificación *in situ*.
- En cuanto a la aplicación del Índice de Vegetación Relativo o “fractional vegetation cover” (NDVI relativo) y del Porcentaje de Vegetación a Partir de la Recta de Suelo (PVI), los datos de campo se aproximan más a los resultados obtenidos por el primero. No obstante, debe tenerse prudencia al respecto. Los resultados de los cálculos por el PVI servirían para confirmar los resultados del NDVI relativo y siempre será necesario comprobar que éstos sean coherentes con la información de campo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del programa franco-mexicano ECOS-ANUIES No. M94B02. Parte del apoyo financiero provino del proyecto CONACYT 1471P-N9507. La imagen SPOT multibanda 564-303 del 15 de febrero de 1987 se adquirió gracias a un bono ISIS, otorgado en junio de 1991 al Laboratoire de Biologie Végétale Tropicale de la UPMC - Paris 6. La del 19 de octubre de 1992 se adquirió en el marco del Programa ECOS-México, gracias a una promoción comercial de SPOT en 1996.

LITERATURA CITADA

- Arriaga, L. y A. Ortega. 1988. La Sierra de la Laguna de Baja California Sur. Publicación 1 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. México.
- Bariou, R., D. Lecamus y F. Le Henaf. 1985. Réponse spectrale des végétaux. Dossiers de télédétection. Centre Régional de Télédétection. Rennes, France.
- Bonn, F. y R. Escadafal. 1996. Télédétection de la surface du sol. Cap. 3 pp. 92-135. *In*: F. Bonn (ed.). Précis de Télédétection, Vol. 2. Presses de l'Université du Québec/AUPELF. Québec, Canada.
- Carlson, T.N. y D.A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing Environ.* 62: 241-252.
- Elliot, J.M. y H. Décamps. 1973. Guide pour l'analyse statistique des échantillons d'invertébrés benthiques. *Ann. Limnologie* 9(2): 79-120.
- Girard, M. y C. Girard. 1989. Télédétection appliquée: Zones tempérées et intertropicales. Masson. Paris, France.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1993. Cubrimiento fotográfico Escala 1: 75 000 de la Hoja Los Cabos, clave F12-2-3-5-6. Sistema de Información Nacional de Fotografía Aérea. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Jackson, R.D. y A.R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Vet. Medicine* 11: 185-200.
- Lacaze, B. 1996. Spectral characterisation of vegetation communities and practical approaches to vegetation cover changes monitoring. pp. 149-166. *In*: Hill, J. y D. Peter (eds.). The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin: State of the art and future research. EUR 16732. Office for official publications of the European Communities. Luxemburg.
- Price, J.C. 1993. Estimating leaf area index from satellite data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 43(6): 721-726.
- Thiam, A. y R. Eastman. 1992. Vegetation indices. Cap. 13. pp. 1-16. *In*: Eastman, J.R. (ed.). User's guide IDRISI Version 4.0. Clark University. Worcester, MA.
- Tucker, C.J. y L.D. Miller. 1977. Contribution of the soil spectra to grass canopy spectral reflectance. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing* 43(6): 721-726.