

Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense*

Comparison of vegetation indexes in the Sonoran desert incorporating soil and moisture indicators and application to estimates of LAI

Víctor M. Rodríguez-Moreno^{1§} y Stephen H. Bullock¹

¹Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Departamento de Geología y División Ciencias de la Tierra. Carretera Ensenada-Tijuana Núm. 3918, 22860. Ensenada, Baja California, México. Tel +52 646 1750500. (sbullock@cicese.mx). [§]Autor para correspondencia: rmoreno@cicese.edu.mx.

Resumen

Se realizó una comparación multitemporal de cuatro índices de la vegetación en 50 sitios en una región árida subtropical con costa. Los índices de verdor (NDVI, SAVI y TSAVI) y de humedad (NDII) fueron evaluados. NDVI y SAVI estuvieron muy correlacionados mientras que TSAVI fluctuó menos y NDII mostró fuertes variaciones estacionales. La corrección topográfica (superficie iluminada) de los datos crudos causó un incremento en el valor de pendiente de la línea del suelo >20%. Los índices, excepto NDII, se usaron para estimar el Índice de área foliar, y el análisis señal-a-ruido evidenció que SAVI está muy cercano a NDVI, pero TSAVI tuvo mucha mayor señal en los meses secos.

Palabras clave: corrección topográfica, teledetección, índice de área foliar.

Introducción

Los índices de vegetación basados en datos remotos se han utilizado cada vez con más frecuencia como indicadores cuantitativos del funcionamiento de los ecosistemas. Esto es debido a su diseño conceptual y estructural de que, a partir de datos indirectos, se infiera el monto de energía

Abstract

A multi-temporal comparison was made of four spectral vegetation indexes among 50 sites in a subtropical, coastal arid region. Greenness indexes (NDVI, SAVI and TSAVI) and one of moisture (NDII) were evaluated. NDVI and SAVI were very closely correlated, while TSAVI fluctuated less and NDII showed strong seasonal variations. Topographic correction (illuminated surface) of raw data usually increased the slope of TSAVI's soil line by >20%. The indexes, except NDII, were used to estimate Leaf Area Index; signal-to-noise analysis of LAI suggested that SAVI is usually close to NDVI but TSAVI has much more signal in the drier months.

Key words: leaf area index, NDII, NDVI, remote sensing, SAVI, topographic correction, TSAVI.

Introduction

Vegetation indexes based on remote sensing data have been used with increasing frequency as quantitative indicators of ecosystem functioning. This is due to its conceptual and structural design that allows to infer from indirect data, the amount of energy absorbed, reflected or

* Recibido: julio de 2012
Aceptado: enero de 2013

absorbida, reflejada o irradiada por los objetos según sus propiedades ópticas al entrar en contacto con su superficie. Consuetudinariamente se han utilizado para realizar estudios espaciales y multitemporales por la caracterización de ecosistemas, escalando observaciones locales y también para evidenciar la respuesta de la vegetación a las variaciones en los flujos radiante e hídrico.

El índice más empleado es el índice de la vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index- NDVI), un cociente que representa las características funcionales de la planta activa y que contrasta la reflectancia de las bandas infrarrojo cercano (Near Infrared- NIR) y rojo (Red- R). Utilizando las mismas bandas, el índice de vegetación con ajuste de suelo (Soil Adjusted Vegetation Index- SAVI) también representa el vigor y la estructura del dosel, pero además incorpora un ajuste arbitrario para la cobertura incompleta del terreno.

El índice transformado con ajuste de suelo (Transformed Soil Adjusted Index- TSAVI) mejora este ajuste arbitrario mediante la incorporación de una "línea de suelo", calculada a partir de la comparación de todos los píxeles en los dominios NIR y R para obtener indicadores de la cantidad y el color de suelo expuesto (Gosamo-Gosa, 2009). Otra alternativa entre los índices, aunque no ampliamente utilizado, es el Índice infrarrojo de diferencia normalizada (Normalized Difference Infrared Index-NDII), que representa el contenido de agua de la cubierta del suelo, utiliza las longitudes de onda NIR e infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared- SWIR) y puede ser un indicador útil para diferenciar especies de hoja caduca (caducifolios) de especies de plantas suculentas.

El índice NDVI se ha utilizado para la estimación de parámetros importantes del flujo de energía (Asrar *et al.*, 1989; Myneni *et al.*, 1997). Pero, SAVI parece ser menos afectado por las variaciones en el brillo del suelo y por lo tanto sus valores para una cubierta vegetal dada son más bien independientes al reflejo del suelo (Gilabert *et al.*, 2002). Una comparación cuantitativa entre NDVI y SAVI indicó una tendencia sistemática de producir valores altos de NDVI en suelos más oscuros que en ligeros (Gilabert *et al.*, 2002). La influencia del suelo en el valor de los índices se espera que sea frecuente especialmente en áreas de ecosistemas abiertos con cobertura escasa (Huete, 1988).

Por otro lado, la reflectancia en SWIR está primeramente asociada con la absorción de agua, aunque por sí sola no puede usarse para estimar el contenido de humedad a

radiated by objects based on their optical properties. They have been customarily used to perform spatial and multi-temporal studies on the characterization of ecosystems by scaling up local observations, and also to show the response of the vegetation to changes in the radiant and hydric flows.

The most commonly used index is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), a ratio that represents the functional characteristics of the active plant by contrasting the reflectance of the near infrared (Near Infrared-NIR) and red (Red-R) bands. Using the same bands, the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) also represents the vigor and structure of the canopy, but it incorporates an arbitrary adjustment to offset an incomplete field coverage.

The Transformed Soil Adjusted Index (TSAVI) improves this arbitrary adjustment by incorporating a "soil line", calculated from the comparison of all the pixels in the NIR and R domains in order to obtain indicators of the amount and the color of exposed soil (Gosamo-Gosa, 2009). Another index, although not widely used, is the Normalized Difference Infrared Index (NDII), which represents the water content of the soil cover; it utilizes NIR wavelengths and infrared shortwaves (Short-Wave Infrared SWIR) and can be a useful indicator to differentiate deciduous species among succulent species.

The NDVI has been used to estimate important energy flow parameters (Asrar *et al.* 1989; Myneni *et al.*, 1997). But SAVI seems to be less affected by the brightness variations in the soil, making its values for a given plant cover rather independent of the soil reflection (Gilabert *et al.*, 2002). A quantitative comparison between NDVI and SAVI showed a systematic tendency to produce higher NDVI values in darker soils than in light ones (Gilabert *et al.*, 2002). The influence of the soil on the value of the indexes is expected to be especially prevalent in areas with open ecosystems and little plant coverage (Huete, 1988).

Furthermore, SWIR reflectance is primarily associated with water absorption, although it cannot be used alone to estimate moisture content at the landscape scale (Toomey and Vierling, 2005). NDII has been reported as a very accurate indicator of foliar moisture content in various ecosystems (Hardisky *et al.*, 1983; Chuvieco *et al.*, 2002, Cheng *et al.*, 2008).

Because of the role played by green leaves in a wide range of biological and physical processes, the density of the leaf cover on the ground is measured by the Leaf Area Index

escala de paisaje (Toomey y Vierling, 2005). NDII ha sido reportado como un indicador muy preciso del contenido de humedad foliar en variados ecosistemas (Hardisky *et al.*, 1983; Chuvieco *et al.*, 2002; Cheng *et al.*, 2008).

Debido al papel de las hojas verdes en una amplia gama de procesos biológicos y físicos, la densidad de la cobertura de hojas en el terreno es medida a través del índice de área foliar (Leaf Area Index- LAI). El modelado de ecosistemas a gran escala, que se utiliza para simular una gama de respuestas en el terreno a la variabilidad y los cambios en el clima (Myneni *et al.*, 1997), requiere de incorporar un conjunto de variables del terreno entre las cuales LAI es clave por sus implicaciones biológicas, biogeoquímicas y meteorológicas (Montieth, 1977; Jarvis y Leverenz, 1983).

La estimación del LAI se realiza por métodos directos, que implican muestreo destructivo y la colecta de hojarasca, e indirectos, basados en el registro del espectro electromagnético por sensores para radiometría y modelos de transferencia radiativa. La teledetección representa la única alternativa viable por escala, cobertura, temporalidad y costo, para caracterizar y monitorear el estado de la vegetación. Hay evidencia que soporta la estimación del LAI a partir de índices de la vegetación, por lo menos en regiones con cobertura alta (Green *et al.*, 1997; Turner *et al.*, 1999; Berterretche *et al.*, 2005; Tian *et al.*, 2007; Zeng y Moskal, 2009).

Este estudio tuvo como objetivo realizar una evaluación comparativa de la variación temporal y espacial de los índices NDVI, SAVI, TSAVI y NDII en un ecosistema semiárido, cubriendo las temporadas de calor y frío, con la expectativa de documentar una mayor variabilidad en los dos últimos. En el proceso de cálculo de los índices se planteó un objetivo secundario, evaluar el impacto de la aplicación (o no) de una corrección topográfica a los datos crudos antes de calcular la radiación y la reflectancia superficial. El uso de esta corrección no se menciona a menudo pero parece apropiado dada la ecuación para el cálculo de los índices y la geomorfología agreste de la región de estudio. Aquí se explora la sensibilidad multitemporal de la pendiente de la línea de suelo para este tratamiento. Adicionalmente, se evaluó la confiabilidad de NDVI, SAVI y TSAVI, a través de la razón señal-a-ruido, de derivar el LAI.

La región de estudio está en la parte central de la península de Baja California en el noroeste de México (Figura 1). Es un desierto de latitud media, con influencia costera y vientos predominantes procedentes del océano frío. Esta

(LAI). Large-scale ecosystem modeling, which is used to simulate a range of responses on the ground to climatic variability and changes (Myneni *et al.*, 1997), requires the incorporation of a set of ground variables, among which LAI is critical due its biological, biogeochemical and meteorological implications (Montieth, 1977; Jarvis and Leverenz, 1983).

The estimation of LAI is done by direct methods, which involve destructive sampling and collection of plant litter, as well as by indirect methods based on electromagnetic spectrum records from radiometry sensors and radiative transfer models. Remote sensing is the only viable alternative, in terms of scale coverage, timing and cost, to characterize and monitor the condition of the vegetation. There is evidence supporting the estimation of LAI from vegetation indexes, at least in regions with high coverage (Green *et al.*, 1997; Turner *et al.*, 1999; Berterretche *et al.*, 2005; Tian *et al.*, 2007; Zeng and Moskal, 2009).

This study aimed to perform a comparative assessment of the temporal and spatial variation of the indexes NDVI, SAVI, TSAVI and NDII in a semiarid ecosystem, covering the warm and cold seasons, expecting to register a greater variability in the last two indexes. In the process of calculating the indexes, a secondary objective was raised: assessing the impact of the application (or lack of) of a topographic correction to the raw data before calculating surface radiation and reflectance. The use of this correction is not mentioned often, but seems appropriate given the equation for calculating the indexes and the rugged geomorphology of the study region. This study explores also the multi-temporal sensitivity of the slope of the soil line for this treatment. Additionally, we assessed the reliability, through the signal-to-noise ratio, of NDVI, SAVI and TSAVI for deriving LAI.

The study area is in the central part of the Baja California peninsula in northwestern Mexico (Figure 1). It is a mid-latitude desert, with coastal influence and prevailing winds from the cold ocean. This region of the peninsula is <80 km wide, and its eastern end is under the influence of warm currents and winds from the Gulf of California. Annual rainfall is ~ 120 mm in the Pacific side and ~ 80 mm in the Gulf slope (averages of four and two seasons, respectively, from 1957 to 2009) (Figure 2). The characteristic feature of the precipitation regime are the large frontal systems in winter and a monsoon with rainfall in the summer derived from tropical and subtropical storms in the eastern Pacific (Salinas-Zavala *et al.*, 2002).

región de la península es <80 km de ancho, y su extremo oriental está sometido a la influencia de corrientes y vientos cálidos del Golfo de California. La precipitación media anual es de ~120 mm en el lado del Pacífico y de ~80 mm en la vertiente del Golfo (promedios de cuatro y dos estaciones, respectivamente, 1957-2009) (Figura 2). Lo característico del régimen de precipitación son los grandes sistemas frontales en invierno y un monzón con precipitación en el verano derivada de tormentas tropicales y subtropicales del Pacífico oriental (Salinas-Zavala *et al.*, 2002).

La vegetación y la flora corresponden en gran medida a la subregión Vizcaíno del Desierto Sonorense y en menor medida a la subregión de la Costa del Golfo (Shreve, 1964). La vegetación incluye una sorprendente diversidad de formas de vida, incluyendo esclerófilos siempre verdes, plantas suculentas de mesófilo arositado, arbustos de hoja caduca, cactus en una variedad de formas, árboles de madera blanda y otras combinaciones de rasgos en hoja, tallo y raíz. La región de estudio está inmersa en su mayor parte dentro del área natural protegida para flora y fauna "Valle de los Cirios".

Materiales y métodos

Utilizamos imágenes de Landsat 5 TM (*Thematic Mapper*) que constituyen un recurso valioso debido a su acervo histórico y cobertura mundial, adecuada resolución espacial, y registro radiométrico; tiene amplio uso en estudios de seguimiento a los sistemas de producción de especies cultivadas y de ecología. Por otro lado, la línea del suelo representa una relación robusta en reflectancia entre el rojo y el infrarrojo cercano de un tipo de suelo individual (Richardson y Wiegand, 1977; Yoshioka *et al.*, 2010): $NIR = \beta_1 R + \beta_0$, donde β_1 es la pendiente de la línea del suelo y β_0 es el intercepto. El procesamiento de las imágenes incluyó las correcciones radiométrica, ambiental, atmosférica y topográfica, todas aplicadas en ERDAS v.9.2.

La corrección atmosférica, que consiste en restar de cada pixel el valor del objeto más oscuro (Chávez, 1988) es de los tratamientos más importantes debido a la fuerte influencia del Océano Pacífico y del Golfo de California (Figura 1). Las diferencias en iluminación solar por la topografía irregular, se tratan con la corrección topográfica. Según Riaño *et al.* (2003), las zonas sombreadas resultan en reflectancia menor a la esperada, mientras que en áreas iluminadas el efecto es el opuesto. Para derivar la reflectancia superficial, el

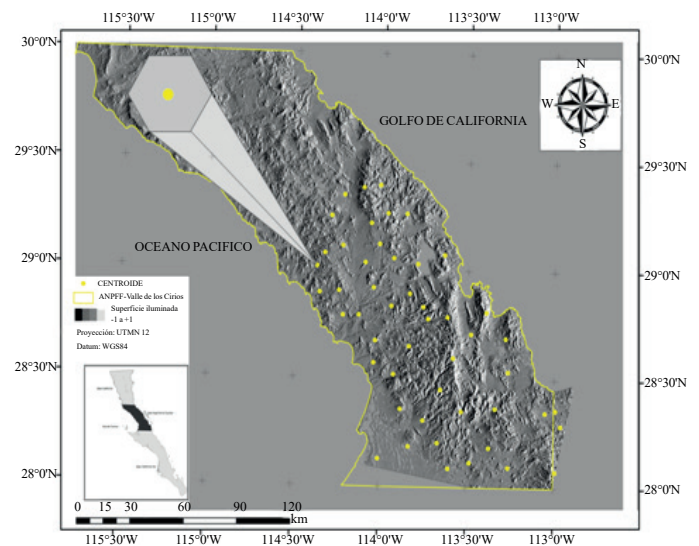


Figura 1. Distribución de los 50 sitios de estudio al sur de Baja California, México.

Figure 1. Distribution of the 50 study sites in southern Baja California, Mexico.

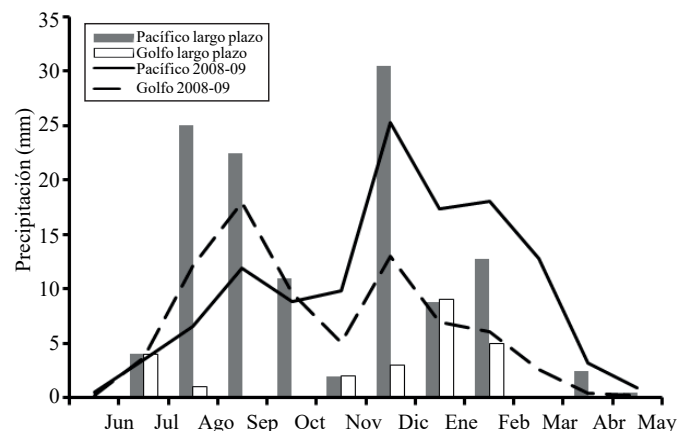


Figura 2. Lluvia histórica promedio (1957-2009) para cuatro estaciones en la península central y cercanas a la costa del Pacífico (Chapala, San Borja, Rosarito y Rancho Alegre) comparadas a dos estaciones en la costa del Golfo (Bahía de los Ángeles y El Barril) y lluvia en el año de estudio (2008-2009) comparado entre estaciones del Pacífico (Chapala y Rosarito) y el Golfo (Bahía de los Ángeles). Datos: Comisión Nacional del Agua (CNA).

Figure 2. Average historical rain (1957-2009) in four stations in the central peninsula near the Pacific coast (Chapala, San Borja, Rosarito and Rancho Alegre) compared to two stations in the Gulf Coast (Bahía de los Ángeles and El Barril); and comparison of rain in the year of study (2008-2009) between stations in the Pacific (Chapala and Rosarito) and the Gulf (Bahía de los Ángeles). Data: National Water Commission (CNA).

método utiliza un modelo digital de elevación (MDE) de un segundo de arco (c. ~28 m; datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Aguascalientes, México), para calcular un valor angular por celda y, de la imagen utiliza el ángulo de elevación solar, los parámetros de calibración para *gain/bias* de cada banda y la fecha de toma de la imagen.

Se calcula la distancia aproximada de la tierra al sol y el ángulo incidente (γ_i), definido como el ángulo entre la normal al terreno y los rayos del sol (Civco, 1989). La superficie de iluminación (SI), la cual varía de -1 a +1, fue calculada según:

$$SI = \cos\gamma_i = \cos\theta_p \cos\theta_z + \sin\theta_p \sin\theta_z \cos(\theta_a - \theta_0) \quad (1)$$

Donde: θ_p es el ángulo de la pendiente; θ_z es el ángulo cenital solar; θ_a es el ángulo de azimut solar; y θ_0 es el ángulo de exposición. El valor así calculado de reflectancia para cada píxel es apropiado para áreas naturales, con cobertura del suelo muy expuesta y baja cobertura vegetal (Vercher *et al.*, 2002).

La estacionalidad de la vegetación se abordó a través de 14 imágenes Landsat, sustancialmente libres de nubosidad. Las fechas corrieron desde comienzos del verano (temporada de secas) pasando por otoño e invierno (temporada de lluvias), hasta finales de primavera de 2009: específicamente, 06 de julio, 07 de agosto, 08 de septiembre, 10 de octubre, 26 de octubre, 11 de noviembre, 29 de diciembre, 14 de enero, 30 de enero, 3 de marzo, 19 de marzo, 4 de abril, 20 de abril y 06 de mayo.

Para enlazar los datos radiométricos y la mejor representación del paisaje, se usaron polígonos hexagonales de de 5.4 ha (~60 píxeles) como la unidad básica de muestreo. En el esquema hexagonal, todos los vecinos son equidistantes y cada par de celdas vecinas es único. En una cuadrícula, no está claro qué parte de la variación se explica por la configuración espacial en sí, cuando los valores entre vecinos en la horizontal y vertical se comparan con los valores en dirección diagonal. Los seis triángulos equiláteros que forman la trama hexagonal pueden usarse para registrar frecuencias y son más fáciles de ubicar en el campo (Jurasinsky, 2010). Los polígonos se ubicaron por criterios estrictamente al azar, con restricción de distancia mínima de separación de 10 km (Figura 1).

La media de la reflectancia para cada sitio, se utilizó para calcular el NDVI (Ec. 2) (Rouse *et al.*, 1973), SAVI (Ec. 3) (Huete, 1988), TSAVI (Ec. 4) (Baret y Guyot, 1991) y NDII (Ec. 5) (Hardisky *et al.*, 1983). LAI se puede aproximar con cierta justificación física con una relación de tres parámetros (Baret y Guyot, 1991; Richter, 2010).

The vegetation and flora largely correspond to the Vizcaino subregion of the Sonoran Desert, and to a lesser extent to the Gulf Coast subregion (Shreve, 1964). The vegetation includes a surprising diversity of life forms, including evergreen sclerophyllous plants, succulent plants with compound leaves, deciduous shrubs, a variety of cactus, softwoods and other combinations of leaves, stems and roots. The study region is mostly within the protected area for flora and fauna "Valle de los Cirios".

Materials and methods

We used images from Landsat 5 TM (*Thematic Mapper*), which constitutes a valuable resource because of its historical and global coverage, adequate spatial resolution and radiometric logging; it is widely used in follow-up studies of the production systems of crop species and in ecological ones. Furthermore, the soil line represents a robust relationship in terms of reflectance between the red and near infrared of a single soil type (Richardson and Wiegand, 1977; Yoshioka *et al.*, 2010): $NIR = \beta_1 R + \beta_0$ where β_1 is the slope of the soil line and β_0 is the intercept. The image processing included radiometric, environmental, atmospheric and topographic corrections, all implemented in ERDAS v.9.2.

The atmospheric correction, which consists in subtracting from each pixel the value of the darkest object (Chávez, 1988), is one of the most important treatments due to the strong influence of the Pacific Ocean and the Gulf of California (Figure 1). The differences in solar illumination that arise because of the irregular topography are treated with the topographic correction. According to Riaño *et al.* (2003), the shaded areas produce a lower than expected reflectance, while the bright areas produce the opposite effect. To derive the surface reflectance, the method uses a digital elevation model (DEM) of a second of arc (c. ~28 m; data from the National Institute of Statistics and Geography (INEGI), Aguascalientes, Mexico) to calculate an angle value per cell; from the image it uses the solar elevation angle, the calibration parameters for *gain/bias* of each band and the date of capture of the image.

The approximate distance from the earth to the sun is calculated, as well as the incident angle (γ_i), defined as the angle between the normal to the ground and the sun's rays (Civco, 1989). The illuminated surface (LS), which ranges from -1 to +1, was calculated as:

$$NDVI = \frac{NIR_{0.76-0.90} - RED_{0.63-0.69}}{NIR_{0.76-0.90} + RED_{0.63-0.69}} \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{(NIR_{0.76-0.90} - RED_{0.63-0.69}) * 1.5}{(NIR_{0.76-0.90} + RED_{0.63-0.69} + 0.5)} \quad (3)$$

$$TSAVI = \frac{\beta_1 (NIR - \beta_1 R - \beta_0)}{\beta_0 NIR + R - \beta_1 \beta_0 + X(1 + \beta_1^2)} \quad (4)$$

$$NSII = \frac{(NIR_{0.76-0.90} - SWIR_{1.550-1.750})}{(NIR_{0.76-0.90} + SWIR_{1.550-1.750})} \quad (5)$$

$$LAI = -\frac{1}{a_2} \ln \left[\frac{a_0 - VI}{a_1} \right] \quad (6)$$

En la Ec. 6, VI es el valor del índice; a_0 está relacionado con el coeficiente de extinción; a_1 es el valor del índice que corresponde a suelo desnudo y a_2 es el valor de índice cuando LAI tiende al valor de saturación (∞). Debido a que es difícil ajustar los parámetros para diferentes sitios y temporadas, el fijarlos ha sido sugerido para estudios multitemporales, y en el presente estudio, a_0 , a_1 y a_2 se mantuvieron constantes en 0.72, 0.61 y 0.65. Los valores absolutos resultantes para LAI pueden no tener correspondencia con la comunidad biótica, pero la tendencia estacional de la cubierta del suelo puede ser capturada (Richter, 2010). La eficiencia de los VI para derivar LAI, según Wu *et al.* (2007), depende de tres factores inherentes al VI: su estabilidad ante otros factores de perturbación, su sensibilidad a una unidad de cambio de LAI, y su rango dinámico. Para evaluar su eficacia, se calculó la relación señal-a-ruido usando la ecuación definida por (LePrieur *et al.*, 1994).

$$C = \frac{\int_{LAImin}^{LAImax} [MaxVI(LAI) - minVI(LAI)] d(LAI)}{VI(max LAI) - VI(min LAI)} \quad (7)$$

En la Ec. 7, el "ruido" se obtiene del área entre las curvas de máximos y mínimos (es decir, el producto del rango de variación del índice debido a cambios en las propiedades espectrales del suelo por el intervalo de LAI para el cual este rango es válido) (Gilabert *et al.*, 2002). Según esta razón, puede ser calculado si C es mayor a la unidad (Borel, 1996).

Resultados

Corrección topográfica de todos los índices

En lo que respecta a la corrección topográfica, la media para todos los índices, excepto para TSAVI, estuvieron altamente correlacionadas entre los tratamientos no corregidos (no

$$SI = \cos \gamma_i = \cos \theta_p \cos \theta_z + \sin \theta_p \sin \theta_z \cos(\theta_a - \theta_0) \quad (1)$$

Where: θ_p is the angle of the slope; θ_z is the solar zenith angle, θ_a is the solar azimuth angle, and θ_0 is the exposure angle. The reflectance value thus calculated for each pixel is appropriate for natural areas, with highly exposed soil cover and low vegetation cover (Vercher *et al.*, 2002).

The seasonality of the vegetation was addressed through 14 Landsat images, substantially free of clouds. The dates ran from early summer (dry season) through autumn and winter (rainy season), until the end of spring 2009; specifically: July 06, August 07, September 08, October 10, October 26, November 11, December 29, January 14, January 30, March 3, March 19, April 04, April 20 and May 06.

We used hexagonal polygons of 5.4 ha (~60 pixels) as the basic sampling unit in order to link the radiometric data and the best representation of the landscape. In the hexagonal pattern, all neighbors are equidistant and each pair of neighboring cells is unique. In a grid, it is unclear how much of the variation is explained by the spatial configuration itself when the values between horizontal and vertical neighbors are compared with the values in the diagonal direction. The six equilateral triangles that form the hexagonal grid can be used to record frequencies and are easier to locate in the field (Jurasinsky, 2010). The polygons were placed by strictly random criteria, with a restricted minimum separation distance of 10 km (Figure 1).

The mean reflectance for each site was used to calculate the NDVI (Eq. 2) (Rouse *et al.*, 1973), SAVI (Eq. 3) (Huete, 1988), TSAVI (Eq. 4) (Baret and Guyot, 1991) and NDII (Eq. 5) (Hardisky *et al.*, 1983). The LAI can be approximated, with some physical justification, using a ratio of three parameters (Baret and Guyot, 1991; Richter, 2010).

$$NDVI = \frac{NIR_{0.76-0.90} - RED_{0.63-0.69}}{NIR_{0.76-0.90} + RED_{0.63-0.69}} \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{(NIR_{0.76-0.90} - RED_{0.63-0.69}) * 1.5}{(NIR_{0.76-0.90} + RED_{0.63-0.69} + 0.5)} \quad (3)$$

$$TSAVI = \frac{\beta_1 (NIR - \beta_1 R - \beta_0)}{\beta_0 NIR + R - \beta_1 \beta_0 + X(1 + \beta_1^2)} \quad (4)$$

$$NSII = \frac{(NIR_{0.76-0.90} - SWIR_{1.550-1.750})}{(NIR_{0.76-0.90} + SWIR_{1.550-1.750})} \quad (5)$$

$$LAI = -\frac{1}{a_2} \ln \left[\frac{a_0 - VI}{a_1} \right] \quad (6)$$

"iluminado") y corregidos. Con excepción de un valor atípico extremo, la correlación fue 0.999 para NDVI y NDII ($p < 0.0001$); para SAVI fue de 0.537 ($p = 0.058$) debido a dos valores atípicos. En el caso de TSAVI, la relación estuvo lejos de ser significativa ($p > 0.5$). Esto no es inesperado dada la estructura simple para calcular los tres primeros. TSAVI se vio fuertemente afectado y la aplicación de la corrección topográfica puede ser considerada un tratamiento esencial para su uso en regiones con topografía accidentada.

Sensibilidad de la línea del suelo a la corrección topográfica

El efecto de la iluminación del terreno sobre la línea del suelo realza la importancia de esta corrección al derivar TSAVI. El rango para la pendiente de la línea del suelo sobre los datos con la corrección topográfica fue de 0.34 a 5.88 entre todos los polígonos y fechas, mientras que sin la corrección fue de 0.30 a 2.61. La mayor dispersión de pendientes con iluminación fue en septiembre, mientras que los valores de no iluminado se observaron más diversos a finales de diciembre. Para el periodo de estudio y todos los polígonos, el coeficiente de regresión fue de 0.89 ± 0.149 para iluminados y 0.84 ± 0.176 para los no iluminados. Las pendientes fueron generalmente mayores para el tratamiento iluminado, hasta en un 20-40%, pero en algunos casos hasta por un orden de magnitud (Figura 3).

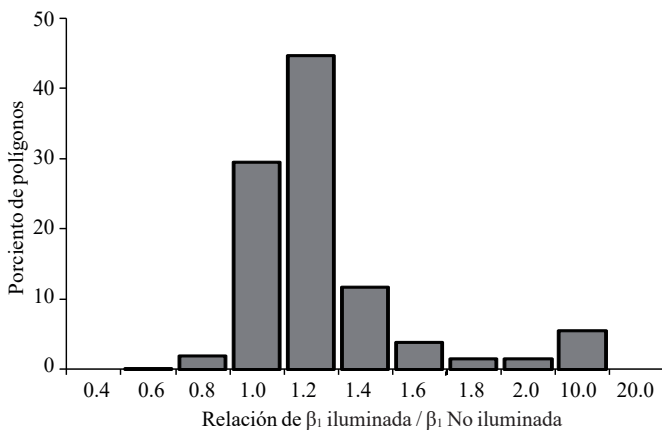


Figura 3. Histograma de la relación de las pendientes entre los tratamientos para la corrección topográfica. Los datos son de cada uno de los 50 polígonos en las 14 fechas ($n = 690$).

Figure 3. Histogram of the ratio between the slopes of each treatment, for topographic correction. The data are from each of the 50 polygons at the 14 dates ($n = 690$).

En los consecuentes análisis, se utilizaron los datos de los índices con la corrección topográfica.

In Equation 6, VI is the index value; a_0 is related to the extinction coefficient; a_1 is the index value corresponding to bare soil, and a_2 is the index value when LAI tends to the saturation value (∞). As it is difficult to adjust the parameters for different sites and seasons, it has been suggested to fix them in multitemporal studies; therefore, in this study a_0 , a_1 and a_2 were held constant at 0.72, 0.61 and 0.65. The resulting absolute values for LAI may not correspond with the biotic community, but the seasonal trend of soil cover could be captured (Richter, 2010). The efficiency of the VI to derive LAI, according to Wu *et al.* (2007), depends on three factors inherent to VI: its stability to other stressors, its sensitivity to a unit change in LAI, and its dynamic range. To evaluate its efficiency, we calculated the signal-to-noise ratio using the equation defined as (LePrieur *et al.*, 1994).

$$C = \frac{\int_{LAI_{min}}^{LAI_{max}} [MaxVI(LAI) - minVI(LAI)]d(LAI)}{VI(max LAI) - VI(min LAI)} \quad (7)$$

In Equation 7, the "noise" is derived from the area between the maximum and minimum curves (i.e., the product between the index variation range due to changes in the spectral properties of the soil, and the LAI interval for which this range is valid) (Gilbert *et al.*, 2002). According to this, it can be calculated if C is greater than the unit (Borel, 1996).

Results

Topographic correction of all indexes

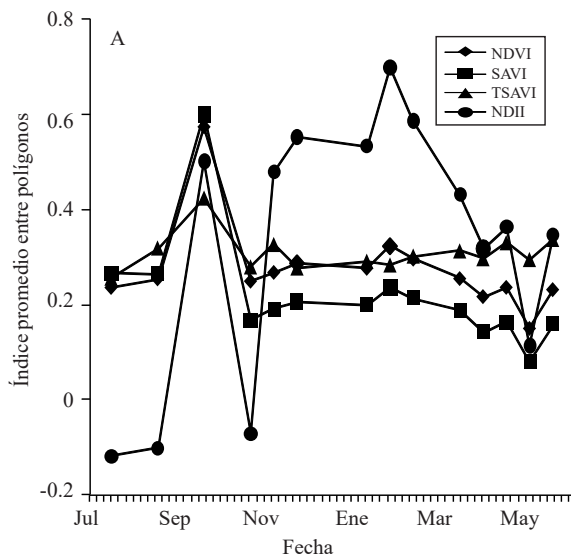
With respect to the topographic correction, there was a high correlation between the means of all indexes, except for TSAVI, for uncorrected (non-illuminated) and corrected treatments. With the exception of an extreme outlier, the correlation was 0.999 for NDVI and NDII ($p < 0.0001$); for SAVI it was 0.537 ($p = 0.058$) due to the presence of two outliers. For TSAVI, the relationship was far from being significant ($p > 0.5$). This is not unexpected given the simple structure needed to calculate the first three. TSAVI was strongly affected by topography, so applying a topographic correction could be considered an essential treatment for using this index in regions of rough topography.

Sensitivity of the soil line to topographic correction

The effect of ground illumination on the soil line highlights the importance of this correction when deriving TSAVI. The range of the slope of the soil line from the data with

Tendencia temporal en los índices

Los cuatro índices registraron su media máxima regional a principios de septiembre de 2008 (Figura 4a), que fue tal vez tan notable por su disminución subsecuente, y que se puede atribuir a la tormenta tropical "julio" de finales de agosto como un pulso al ecosistema. Sólo NDII mostró un patrón que pudiera corresponder a las lluvias de invierno (Figura 4 y 2), mientras que los otros índices, al menos en sus promedios regionales, no difirieron mucho de los valores mínimos observados en julio y a principios de agosto de 2008. TSAVI fue notablemente más plano en su patrón durante todo el periodo de análisis, NDVI fue 150% de SAVI de octubre a mayo. Las correlaciones entre polígonos y entre fechas de NDVI y SAVI fueron de 0.63 y 0.65 antes de una tormenta tropical en agosto, entre 0.77 y 0.91 hasta marzo y más variable en abril y mayo (todos $p < 0.001$). Ambos índices mostraron correlaciones similares con NDII, de -0.42 a -0.22 en pleno verano, un pico de correlación de 0.67 a principios de septiembre, seguido por una disminución gradual hasta aproximadamente 0.5 a principios de marzo, y valores bajos (alternadamente positivos y negativos) avanzada la temporada de crecimiento.



topographic correction was 0.34-5.88 among all polygons and dates, whereas without correction it was 0.30-2.61. The greatest dispersion of slopes with illumination occurred in September, while non-illuminated values were more diverse in late December. For the study period and all polygons, the regression coefficient was 0.89 ± 0.149 for illuminated ones, and 0.84 ± 0.176 for non-illuminated. The slopes were generally higher by up to 20-40% for the illuminated treatment, but in some cases by up to an order of magnitude (Figure 3).

In the consequent analyses we used data from indexes with topographic correction.

Temporal trends in the indexes

The four indexes recorded their maximum regional mean in early September 2008 (Figure 4a), which was perhaps so remarkable because of their subsequent decline, which can be attributed to the tropical storm "July" that occurred in late August as a pulse to the ecosystem. Only NDII showed a pattern that might correspond to the winter rains (Figure 4 and 2), while the other indexes, at least with respect to their

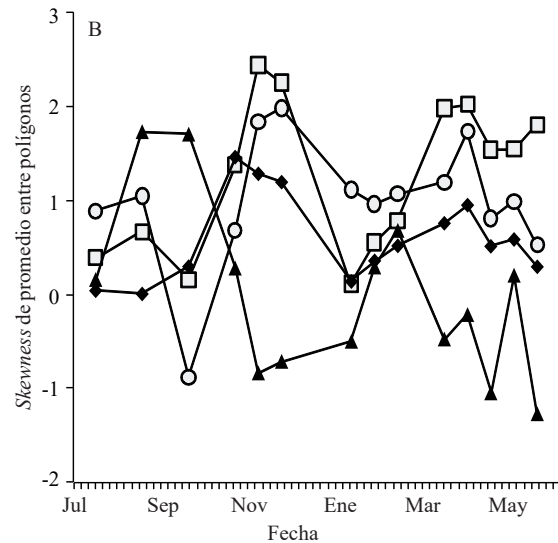


Figura 4. a) Tendencia temporal de la media entre los polígonos de NDVI, SAVI, TSAVI y NDII en 2008-9; y b) Evolución de la asimetría (*skewness*) entre las medias de polígonos. Sólo se muestran valores con $p < 0.05$ en la prueba de Shapiro-Wilks. Figure 4. a) Temporal trend of the mean between the polygons of NDVI, SAVI, TSAVI and NDII in 2008-2009; and b) Evolution of the asymmetry (*skewness*) between the means of the polygons. Only values with $p < 0.05$ in the Shapiro-Wilks test are shown.

La relación entre la media y la desviación estándar entre los polígonos no fue significativa para NDVI ($p > 0.1$) en sorprendente contraste con SAVI ($r = 0.96$, $p < 0.001$) y en menor medida NDII ($r = 0.76$, $p < 0.01$) y TSAVI ($r = 0.64$, $p < 0.02$). Los coeficientes de variación entre la media

regional averages, did not differ much from the minimum values observed in July and early August 2008. TSAVI had a noticeably flatter pattern throughout the period of analysis; NDVI was 150% of SAVI from October to May. The correlations between polygons and dates of NDVI and SAVI

de los polígonos fue similar para NDVI, SAVI y NDII (respectivamente, 0.219, 0.276 y 0.245), pero mayor para TSAVI (0.467).

La asimetría (Joanes y Gill, 1998) fue más variable que la media del índice excepto quizás para NDII (Figura 4b). En general fue positiva (derecha) y significativa en los tres índices en octubre, noviembre y marzo. NDII tuvo un sesgo significativo en 12 de 14 fechas, con un valor negativo solo a principios de septiembre. Para TSAVI, la asimetría fue común, más variable en el tiempo, y negativa cuando los otros índices tuvieron picos de asimetría positiva.

Índice de área foliar estimado y relación señal-a-ruido (SNR)

La relación señal-a-ruido promedio para cada polígono para cada fecha se comparó entre los índices (Figura 5). SAVI y TSAVI tuvieron mayor señal que NDVI, por factores de aproximadamente 2.5 y 4, respectivamente, en el verano de 2008. A finales del otoño e invierno, las SNR's fueron muy similares con erráticas y notables excepciones. En marzo y abril, la SNR en LAI_{TSAVI} aumentó notablemente mientras que la de LAI_{SAVI} disminuyó y se mantuvo ligeramente por debajo de la SNR para LAI_{NDVI} .

Discusión

Para el cálculo de los índices de vegetación, la estructura de los índices de relación simple evita la necesidad de una corrección para topografía. Para un pixel específico, el ángulo normal de visada de la superficie y el ángulo normal solar a la superficie solar son constantes para todas las bandas, por lo tanto, el contraste de bandas puede eliminar el efecto directo de la topografía (Matsushita *et al.*, 2007). Sin embargo, el efecto topográfico no puede pasarse por alto para los índices con ajustes más complejos para los efectos del suelo como TSAVI, y muchos más que resultan de las combinaciones lineales de dos o más bandas espectrales o que incorporan parámetros de ajuste de naturaleza empírica o numérica.

En consideración a que los grupos funcionales de plantas en esta región tienen menos de 30% de cobertura de dosel, lo cual es mayor que la suma de hojas y tallos, dos formas de compensación para reflectancia del suelo se examinaron aquí. La primera conlleva una leve modificación de

were 0.63 and 0.65 before a tropical storm in August; between 0.77 and 0.91 until March, and more variable in April and May (all $p < 0.001$). Both indexes showed similar correlations with NDII; -0.42 to -0.22 in midsummer, a correlation peak of 0.67 in early September, followed by a gradual decline to about 0.5 in early March, and low values (alternately positive and negative) late in the growing season.

The relationship between the mean and the standard deviation of the polygons for NDVI ($p > 0.1$) was not significant, in striking contrast with SAVI ($r = 0.96, p < 0.001$), and to a lesser extent with NDII ($r = 0.76, p < 0.01$) and TSAVI ($r = 0.64, p < 0.02$). The coefficients of variation between the mean of the polygons were similar for NDVI, SAVI and NDII (0.219, 0.276 and 0.245 respectively), but higher for TSAVI (0.467).

The asymmetry (Joanes and Gill, 1998) was more variable than the mean of the index, except perhaps for NDII (Figure 4b). Overall, the asymmetry was positive (straight) and significant in all three indexes in October, November and March. NDII had a significant bias in 12 of 14 dates, with a negative value only in early September. For TSAVI, the asymmetry was common, more variable in time, and negative when the other indexes had peaks of positive asymmetry.

Estimated leaf area index and signal-to-noise ratio (SNR)

The average signal-to-noise ratio for each polygon and date of each index were compared (Figure 5). SAVI and TSAVI had higher signal than NDVI in the summer of 2008, by factors of about 2.5 and 4, respectively. In late fall and winter, the SNR's were very similar, with notable and erratic exceptions. In March and April, the SNR of LAI_{TSAVI} increased significantly, while that of LAI_{SAVI} decreased and remained slightly below the SNR for LAI_{NDVI} .

Discussion

The simple relationship structure of the indexes avoids the need for a topographic correction in the calculation of the vegetation indexes. For a particular pixel, the normal aiming angle of the surface and the normal solar angle to the surface are constant for all bands; therefore, contrasting the bands can eliminate the direct effect of topography (Matsushita *et al.*, 2007). However, the topographic effect cannot be ignored for indexes with more complex adjustments for the effects of

NDVI para SAVI (Ec. 3), pero el valor del parámetro de cobertura es difícil de justificar, y como se mostró aquí, la modificación no produce nueva información significativa. La reflectancia del suelo claramente debería depender de la variación intra-regional por la óptica de los minerales en las rocas, el tamaño de las partículas en la superficie, las costras del suelo para reacciones físico químicas y biológicas, de los desechos de las plantas y la humedad (Escadafal *et al.*, 2011).

Considerando la diversidad de formas y grupos funcionales en el área de estudio, así como su extensión, la estimación de las líneas del suelo sub-regionales la consideramos esencial. Con base en el área de los polígonos, los resultados fueron muy buenos en términos de los coeficientes de regresión de las líneas del suelo. Las variaciones temporales en los parámetros de la línea de suelo se esperaban también (Baret *et al.*, 1993). Esto justifica el procedimiento de cálculo de la línea del suelo para cada polígono para cada fecha.

Debido a que NDVI y SAVI se derivaron de las mismas bandas espectrales y difieren sólo en constantes arbitrarias, no es sorprendente que generalmente estuvieran estrechamente relacionados. Sin embargo, los dos no son equivalentes, como se demostró por: 1) las diferencias estacionales en relación con otros promedios regionales; 2) contrastes en la variabilidad entre los sitios; 3) diferente sensibilidad a la corrección topográfica; y 4) las diferencias estacionales en la relación señal-a-ruido del LAI derivado de uno u otro índice. Estos dos índices podrían variar aún más si las constantes en SAVI estuvieran sujetos a ajustes significativos basados en datos específicos de campo (Gilabert *et al.*, 2002).

El índice NDII, se ha utilizado para mostrar las variaciones en el contenido de agua de la cubierta de suelo (Ceccato *et al.*, 2002). En una región de clima mediterráneo, un resultado notable fue que NDII mostró fuertes patrones correspondientes a la precipitación a pesar de tratar vegetación esclerófila. En nuestra región de estudio, los índices de verdor también se incrementaron brevemente después de la tormenta tropical, pero fue difícil de percibir una respuesta clara a la precipitación de invierno, ni por picos ni por extensión. De hecho, sus valores estuvieron típicamente cerca o por debajo de los observados en condiciones de sequía fuerte a mediados del verano. Los cambios menores de octubre a abril, tal vez convexos para NDVI y SAVI, y el incremento de TSAVI, fueron inesperadamente débiles para un año con precipitación mayor a la normal.

soil such as TSAVI and many more that result from the linear combinations of two or more spectral bands or that incorporate empirical or numerical adjustment parameters.

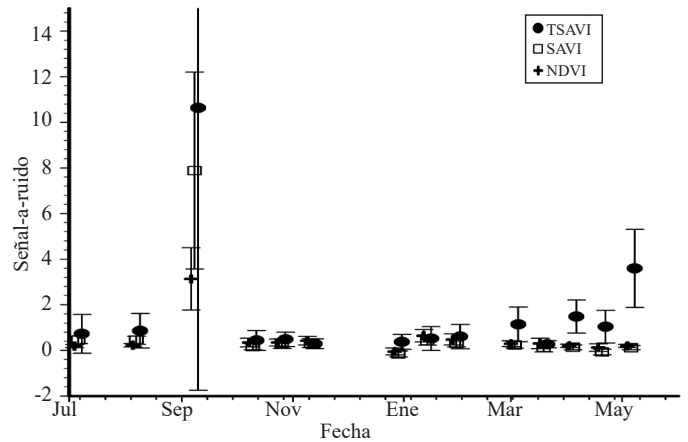


Figura 5. Relación señal-a-ruido para el índice de área foliar estimado a partir de índices de la vegetación. La media entre polígonos para cada fecha de SAVI y TSAVI se compara con la derivada de NDVI.

Figure 5. Signal-to-noise ratio for the leaf area index estimated from vegetation indexes. The mean between polygons for each date in SAVI and TSAVI was compared to the mean derived from NDVI.

Considering that the functional groups of plants in this region have a canopy cover of less than 30%, which is greater than the sum of leaves and stems, we examined two ways of compensating for ground reflectance. The first involves a slight change of NDVI for SAVI (Eq. 3), but the coverage parameter value is difficult to justify, and, as shown here, the change does not produce significant new information. Clearly, soil reflectance should depend on the intra-regional variation due to the optics of the minerals in the rocks, on the size of surface particles, the soil crusts from physico-chemical and biological reactions, the plant wastes and moisture (Escadafal *et al.*, 2011).

Considering the diversity of forms and functional groups in the study area, as well as its extension, we consider essential to estimate the subregional soil lines. Based on the area of the polygons, the results were very good in terms of the regression coefficients of the soil lines. The temporal variations in the parameters of the soil lines were also expected (Baret *et al.*, 1993). This justifies the procedure for calculating the soil line for each polygon for each date.

Because NDVI and SAVI were derived from the same spectral bands and differ only in arbitrary constants, it is not surprising that they were often closely related. However, the

Puede ser productivo para futuras investigaciones, considerar la importancia de las diferentes formas de vida en la cubierta del suelo, ya que éstas pueden ocasionar, por sus características morfológicas y fisiológicas, respuestas diferentes en los cuatro índices, en el espacio y el tiempo. Las bandas NIR y SWIR [utilizadas en NDII] son las bandas necesarias para obtener indicadores de humedad en el dosel y pueden caracterizar mejor las variaciones fotosintéticas en arbustos de hoja caduca o en sequía, en esclerófilo siempre verde o especies de tallo suculento. Por otro lado, el espectro de reflectancia de las hojas en particular y tallos fotosintéticos tan comunes de esta región, no ha sido objeto de investigación exploratoria o sistemática por lo cual se abre un abanico de posibilidades.

Es de notarse el hecho de que todos los índices tuvieran valores más bajos a finales de primavera que en el verano más seco a mediados del año anterior. Una variación estacional fuerte en la reflectancia del suelo requiere de más estudios, pero podría estar relacionado con un cambio generalizado en la humedad cerca de la superficie, o a una disminución de la actividad en las costras criptogámicas que podrían ser favorecidos por neblinas a principios del verano. A este respecto, las micrófitas reflejan de manera similar que las plantas vasculares y sus valores de NDVI pueden ser tan altos como 0.30 unidades (Karnieli *et al.*, 1996, 2002). Además, con los dos índices por debajo de 0.18 a finales de primavera, sus incrementos en Mayo son de notarse.

La variación de los índices de vegetación entre los sitios es claramente no aleatoria en el tiempo, como se muestra arriba. Además, parece probable que las diferencias en el desarrollo de la vegetación podrían estar afectadas por la variación en las características del terreno que deben afectar los balances de energía y del agua a través de procesos tales como el flujo de radiación local, los patrones climáticos regionales y los procesos pedogénicos, que operan en escalas de tiempo diferentes. Desde hace tiempo se reconoce que las variables del terreno (elevación, exposición y pendiente) afectan los balances de calor e hídrico del suelo y de la vegetación (Franklin *et al.*, 2000). El presente análisis sugiere que los índices más apropiados para estudios de estos efectos sería TSAVI en cuanto a verdor y NDII para la humedad de la vegetación.

Conclusiones

La comparación de NDVI, SAVI, TSAVI y NDII, en el contexto de los ecosistemas áridos y semiáridos en la parte central de la península de Baja California, demostró que las

two are not equivalent, as demonstrated by: 1) the seasonal differences in relation to other regional averages; 2) the contrasts in the variability between sites; 3) the different sensitivities to topographic correction; and 4) the seasonal differences in the signal-to-noise ratio of the LAI derived from either index. These two indexes could vary even more if the constants in SAVI were subject to significant adjustments based on specific field data (Gilbert *et al.*, 2002).

The NDII index has been used to show the variations in the water content of the soil cover (Ceccato *et al.*, 2002). In a Mediterranean climate region, a remarkable result was that, despite the sclerophyll vegetation, NDII showed strong patterns corresponding to precipitation. In our study region, the greenness indexes also increased briefly after the tropical storm, but it was difficult to perceive a clear response to winter precipitation, by peaks or by extension. In fact, their values were typically near or below those observed in severe drought conditions in mid-summer. The minor changes from October to April, convex perhaps for NDVI and SAVI, and the increase of TSAVI, were unexpectedly weak for a year with above normal precipitation.

It could be fruitful in future research to consider the importance of the different life forms in the soil cover, as these can cause, due to their morphological and physiological characteristics, different responses in the four indexes, both in space and time. NIR and SWIR bands [used in NDII] are the necessary bands to obtain indicators of moisture in the canopy and can characterize better the photosynthetic variations in deciduous shrubs or in drought, in evergreen sclerophyllous plants or in succulent stem species. Furthermore, the reflectance spectrum of leaves, in particular, and of the photosynthetic stems so common in this region, has not been the subject of systematic or exploratory investigations, which opens a range of possibilities.

It is worth noting that all indexes had lower values in late spring than in the drier summer in the middle of the previous year. A strong seasonal variation in the reflectance of the soil requires further study, but may be related to a widespread change in the moisture near the surface, or to a decrease in the activity of cryptogamic crusts, both of which changes might be favored by the early mists of summer. In this respect, microphytes reflect in a similarly way to vascular plants, and their NDVI values can be as high as 0.30 (Karnieli *et al.*, 1996, 2002). Moreover, considering that the two indexes were below 0.18 in late spring, their increases in May are worth noting.

variaciones espaciales y temporales no son estrictamente paralelas, aunque las diferencias entre NDVI y SAVI son relativamente menores. Los índices difirieron no sólo en sus propiedades estadísticas, sino en ruidosidad cuando se aplicaron para estimar el índice de área foliar, y en sus respuestas al clima cambiante y al sustrato. TSAVI y NDII fueron los más informativos sobre el estado y la variabilidad de los sistemas, aunque sus resultados, y por lo tanto su utilidad potencial, fueron muy distintos. La comparación instructiva de éstos índices se vio muy reforzada por el estudio multitemporal, multifacético en una región vasta y de paisaje heterogénea.

Todos los índices respondieron bruscamente a un evento de lluvia aislado, durante el verano, mientras que su capacidad de reflejar las respuestas de la vegetación a la temporada de lluvias invernales no fueron evidentes en forma de pulsos, sino muy débiles y amplias, con la notable excepción de una respuesta fuerte y clara de NDII. La insensibilidad a la temporada de lluvias en invierno demanda mayores estudios. Valores mayores de los índices a mediados de verano después de una sequía prolongada, que en pleno invierno o a principios de primavera, también merecen atención; se puede indicar que este podría ser un aporte importante al valor de los índices de las costras criptogámicas del suelo.

Agradecimientos

Los autores desean manifestar su gratitud al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (SEMARNAT-CONACYT Proyecto: 23777) por su apoyo técnico y financiero.

Literatura citada

- Asrar, G.; Myneni, R. B.; Li, Y. and Kanemasu, E. T. 1989. Measuring and modeling spectral characteristics of a tallgrass prairie. *Remote Sens. Environ.* 27:143-155.
- Baret, F. and Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35:161-173.
- Baret, F.; Jacquemoud, S. and Hanocq, J. F. 1993. About the soil line concept in remote sensing. *Remote Sens. Rev.* 5:281-284.

The variation of the vegetation indexes between sites is clearly not random with respect to time, as shown above. Furthermore, it seems likely that differences in the development of vegetation could be affected by the variation of terrain features, which should affect the energy and water balances through processes such as the local radiation flow, regional weather patterns and pedogenic processes, all of which operate on different time scales. It has long been recognized that field variables (elevation, slope and exposure) affect the heat and water balances of soil and vegetation (Franklin *et al.*, 2000). This analysis suggests that the most appropriate indexes for studying these effects would be TSAVI for greenness, and NDII for vegetation moisture.

Conclusions

The comparison of NDVI, SAVI, TSAVI and NDII, in the context of arid and semiarid ecosystems in the central part of the peninsula of Baja California, showed that the spatial and temporal variations are not strictly parallel, although the differences between NDVI and SAVI are relatively minor. The indexes differed not only with respect to their statistical properties, but also in noisiness when used to estimate the leaf area index, and in their responses to the changing climate and substrate. TSAVI and NDII were the most informative on the state and variability of the systems, although their results, and, therefore, their potential usefulness, were very different. The instructive comparison of these indexes was greatly enhanced by the multi-temporal, multifaceted study of a vast region with a heterogeneous landscape.

All indexes responded sharply to an isolated rainfall event during the summer, while their ability to reflect the responses of vegetation to the winter rainy season were not pulse-like, but very weak and broad, with the notable exception of a strong and clear response of NDII. The insensitivity to the winter rainy season demands further study. Higher values of the indexes in mid-summer, after a prolonged drought, than in winter or early spring, also deserve attention; it could be indicated that this could be an important contribution to the cryptogamic soil crusts values of the indexes.

End of the English version



- Berterretche, M.; Hudak, A. T.; Cohen, W. B.; Maier-sperger, T. K.; Gower, S. T. and Dungan, J. 2005. Comparison of regression and geostatistical methods for mapping leaf area index (LAI) with Landsat ETM+ data over a boreal forest. *Remote Sens. Environ.* 96:49-61.
- Borel, C. C. 1996. Nonlinear spectral mixing theory to model multispectral signatures. *Proc. Applied Geologic Remote Sens. Conf.* 2:11-30. OSTI 195673.
- Ceccato, P.; Flasse, S. and Grégoire, J. M. 2002b. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data. Part 2. Validation and applications. *Remote Sens. Environ.* 82:198-207.
- Chavez, Jr., P. S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sens. Environ.* 24:459-479.
- Cheng, Y. B.; Ustin, S. L.; Riaño, D. and Vanderbilt, V. C. 2008. Water content estimation from hyperspectral images and MODIS indexes in Southeastern Arizona. *Remote Sens. Environ.* 112:363-374.
- Chuvieco, E.; Riano, D.; Aguado, I. and Cocer, D. 2002. Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. *Int. J. Remote Sens.* 23:2145-2162.
- Civco, D. L. 1989. Topographic normalization of Landsat Thematic mapper digital imagery. *PERS* 55:1303-1309.
- Escadafal, R.; Albinet, F. and Simonneaux, V. Arid land cover change trend analysis with series of satellite images for desertification monitoring in Northern Africa. <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/953.pdf> (consultado marzo, 2011).
- Franklin, J.; McCullough, P. and Gray, C. 2000. Terrain variables used for predictive mapping of vegetation communities in Southern California, en: terrain analysis: principles and applications, Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (Eds.). John Wiley and Sons, Inc. Canada. 331-353 pp.
- Gilabert, M. A.; Piqueras-González, J. García-Haro, F. J. and Meliá, J. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 82:303-310.
- Gonsamo-Gosa, A. 2009. Remote sensing of leaf area index: enhanced retrieval from close-range and remotely sensed optical observations. Academic Dissertation, Department of Geography, Faculty of Science, University of Helsinki, Finland.
- Green, E. P.; Murnby, P. J.; Edwards, A. J.; Clark, C. D. and Ellis, A. C. 1997. Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. *Aquat. Bot.* 58:11-19.
- Hardisky, M. A.; Klemas, V. and Smart, R. M. 1983. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photo Eng. Rem. S.* 49:77-83.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25:295-309.
- Jarvis, P. G. and Leverenz, J. W. 1983. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests, *In: Physiological Plant Ecology IV. Ecosystem processes: mineral cycling, productivity and man's influence.* Lange, O. L.; Nobel, P. S.; Osmond, C. B. y Ziegler, H. (Eds.). Springer-Verlag, Berlin. 233-280 pp.
- Joanes, D. N. and Gill, C. A. 1998. Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *The statistician* 47:183-189.
- Jurasinski, G. Why hexagons? Systematic grids-optimizing cell arrangement. <http://homepage.mac.com/terhorab/gerald/downloads/whyhexagons.pdf>. (consultado abril, 2010).
- Karnieli, A.; Gabai, A.; Ichoku, C.; Zaady, E. and Shachak, M. 2002. Temporal dynamics of soil and vegetation spectral responses in a semi-arid environment. *Int. J. Remote Sens.* 23(19):4073-4087.
- Karnieli, A.; Shachak, M.; Tsoar, H.; Zaady, E.; Kaufman, Y.; Danin, A. and Porter, W. 1996. The effect of microphytes on the spectral reflectance of vegetation in semiarid regions. *Remote Sens. Environ.* 57:88-96.
- LePrieur, D.; Verstraete, M. M. and Pinty, B. 1994. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve cover from AVHRR data. *Remote Sens. Rev.* 10:265-284.
- Matsushita, B.; Yang, W.; Chen, J.; Onda, Y. and Qiu, G. 2007. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors.* 7:2636-2651.
- Myneni, R. B.; Nemani, R. R. and Running, S. W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE T. Geosci. Remote.* 35:1380-1393.
- Riaño, D.; Chuvieco, E.; Salas, J. and Aguado, I. 2003. Assessment of different topographic correction in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *IEEE T. Geosci. Remote.* 41:1056-1061.
- Richardson, A. J. and Wiegand, C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Rem. S.* 43:1541-1552.
- Richter, R. Atmospheric/topographic correction for airborne imagery. ATCOR 4-User guide. DLR German Aerospace Center. Wessling, Germany. ftp://ftp.dfd.dlr.de/put/richter/ATCOR/atcor4_manual_2010.pdf. (consultado marzo, 2010).
- Rouse, J. W.; Hass, R. H.; Schell, J. A. and Deering, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351. 1:309-317.
- Salinas-Zavala, C. A.; Douglas, A. V. and Diaz, H. F. 2002. Inter-annual variability of NDVI in Northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications. *Remote Sens. Environ.* 82:417-430.
- Shreve, F. 1964. Vegetation of the Sonoran Desert. *In: vegetation and flora of the Sonoran Desert.* Shreve, F. y Wiggins, I. Stanford University Press. Stanford, CA. 6-186 pp.
- Tian, Q.; Luo, Z.; Chen, J. M.; Chen, M. and Hui, F. 2007. Retrieving leaf area index for coniferous forest in Xingguo County, China with Landsat ETM+ images. *J. Environ. Manage.* 85:624-627.
- Toomey, M. and Vierling, L. A. 2005. Multispectral remote sensing of landscape level foliar moisture: techniques and applications for forest ecosystem monitoring. *Can. J. Forest Res.* 35:1087-1097.
- Turner, D. P.; Cohen, W. B.; Kennedy, R. E.; Fassnacht, K. S. and Briggs, J. M. 1999. Relationship between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zones sites. *Remote Sens. Environ.* 70:52-68.
- Vercher, A.; Gilabert, M. A.; Camacho de Coca, F. y Meliá, J. 2002. Influencia del ángulo cenital de iluminación en los índices de vegetación. *Revista de Teledetección.* 18:75-89.
- Wu, J.; Wang, D. and Bauer, M. E. 2007. Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. *Field Crop Res.* 102:33-42.
- Yoshioka, H.; Miura, T.; Dematté, J. A. M.; Batchily, K. and Huete, A. R. 2010. Soil line influences on two band vegetation indices and vegetation isolines: a numerical study. *Remote Sensing.* 2:545-561.
- Zheng, G. and Moskal, M. 2007. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors.* 9:2719-2745.