

Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California

Trend in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Southern Part of Baja California Peninsula

Salinas-Zavala César Augusto, * Raúl Octavio Martínez-Rincón* y María Verónica Morales-Zárate*

Recibido: 20/09/2016. Aceptado en versión final: 28/04/2017.

Resumen. El uso de sensores remotos en la investigación ha permitido realizar análisis a escalas que anteriormente resultaba muy difícil llevar a cabo. En este trabajo se utilizaron imágenes de satélite tipo MODIS para analizar el comportamiento promedio y la tendencia sostenida del NDVI por píxel en la región meridional de la península de Baja California durante el periodo 2001-2015. En total se analizaron 1 377 985 píxeles, de los cuales el 67.04% mostró valores de NDVI promedio entre 0.1 y 0.3 consistentes para zonas áridas. No obstante, se observaron valores >0.5 en las porciones de mayor cobertura vegetal en zonas elevadas, y los máximos valores (>0.8) se hallaron dentro de la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna (RBSL), en el sur de la península. El análisis de la tendencia reveló que en esta misma zona de la RBSL, los valores de tendencia del NDVI son negativos, lo que indica pérdida del vigor de la vegetación. Valores de tendencia negativa tuvieron alta correspondencia también con las zonas de mayor densidad poblacional y mayor desarrollo turístico alrededor de la RBSL, lo que permite inferir que en toda la región sur de la península existe una fuerte presión que ocasiona cambios en el sistema. Su magnitud tendrá que ser evaluada para determinar si se trata de cambios estructurales solamente o si ya se presentan también cambios funcionales. Esperamos que este primer esfuerzo sienta las bases para investigaciones futuras que coadyuven a la toma de decisiones y planes de desarrollo en la región.

Palabras clave: uso del suelo, Sierra de la Laguna, MODIS, áreas naturales protegidas, sensores remotos.

Abstract. The use of remote sensing in scientific research has revolutionized our understanding by revealing the diversity and complexity of terrestrial systems, something difficult to appreciate in the past. One of the tools most extensively used in this field is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which is a system for the remote monitoring of vegetation in a synoptic temporal and spatial scale. In this particular case, we are interested in analyzing not only the average spatial or temporal behavior of the NDVI, but any trends it may display. It is a simple but nonetheless important method for the study of temporal series, since it allows to identify, in a general sense, a positive (increase) or negative (decrease) pattern of the elements in a particular environment during a given period.

This paper analyzes the average behavior and sustained trend of NDVI per pixel for the southern portion of the Baja California Peninsula, Mexico, during the period 2001-2015. MODIS images obtained from the public database Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC, <https://lpdaac.usgs.gov/>) of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) were used. The information is in binary format with a 250-m spatial

* Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Avenida Instituto Politécnico Nacional, núm. 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096, México. csalinas@cibnor.mx, mzarate04@cibnor.mx, raul.martinez.rincon@gmail.com

resolution (pixel unit), and a 16-day temporal resolution (MOD13Q1). NDVI data corresponding to the southern portion of the Baja California Peninsula are available in two tiles (h07v06 and H08v06); therefore, techniques for processing tiled images were applied to produce each average 16-day image and, subsequently, work on a monthly basis. MODIS products were cut and reprojected from the Universal Transverse Mercator (UTM) system to the WGS84 geographic coordinate system; MODIS data to obtain the average value and the trend of NDVI per pixel were processed using the programming software R through different libraries. A total of 1 377 985 pixels were analyzed, 67.04% of which showed average NDVI values between 0.1 and 0.3, consistent with arid zones. However, values > 0.5 were recorded in areas with a high vegetation cover in high altitudes, with peak values (> 0.8) within Sierra La Laguna Biosphere Reserve (RBSL), located to the south of the peninsula. The trend analysis revealed that in this same area within RBSL, the NDVI trend values are negative, indicating loss of vegetation vigor. Negative trend values matched closely the areas with the highest population density and tourism development around RBSL, indicating that the southern region of the peninsula is facing a strong pressure that is

leading to alterations in the system. Its magnitude should have to be evaluated to determine if it causes structural changes only or if functional changes are also involved.

Although the tourism sector has boosted economic growth in the southern portion of the Baja California peninsula, this activity has also involved the greatest alterations to the natural system, which is particularly evident in coastal subsystems. These tourism development and urbanization process, in addition to fragmentation, cause disturbance levels not yet measured in a synoptic scale. This first approximation sets the ground to continue searching for patterns of change that may be indicators of the condition of the systems analyzed. In turn, these could be used to establish useful indicators for decision-making, particularly with regard to the planning of tourist development initiatives. As discussed in this paper, the implementation of poorly designed projects may be the main stressors of ecological systems, which eventually may lead structural and functional changes in the system.

Key words: changing land use, Sierra de la Laguna, MODIS, Natural Protected Areas, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

La llegada del monitoreo por satélite hacia finales de la década de 1950 permitió un gran avance en la comprensión del papel crítico que el sistema tierra-océano desempeña en mantener la vida en nuestro planeta (House *et al.*, 1986). El uso de satélites artificiales ha revolucionado nuestro entendimiento y ha revelado la diversidad y complejidad de los ecosistemas terrestres, aspectos que antes no eran fácilmente apreciados (Pfeifer *et al.*, 2012). Además, ha evidenciado el efecto del crecimiento exponencial de las poblaciones humanas a lo largo de los márgenes costeros y peninsulares; la modificación de los procesos naturales y de aquellos efectos que ponen en riesgo a la población (Patino y Duque, 2013). En este contexto, las observaciones científicas desde la escala sinóptica espacial coadyuvan a entender y resolver problemas socio-ambientales, ya que sin datos a esta escala se perdería la capacidad de diagnosticar fenómenos tales como la deforestación, la fragmentación y la desertificación, entre otros.

En las últimas dos décadas se han desarrollado algoritmos que utilizan la tecnología de percepción remota para monitorear en forma regular y sinóptica los cambios de la vegetación como

respuesta a las fluctuaciones ambientales (Kogan, 1997). Una de ellas es el uso del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés). Este índice se basa en las propiedades de reflexión diferencial de la vegetación en las porciones visible e infrarroja del espectro, y constituye un sistema de monitoreo remoto de la vegetación, tanto en tiempo como en espacio (Tucker, 1979; Kogan, 1997; Yengoh *et al.*, 2015). Los estudios realizados utilizando esta técnica son múltiples y muy variados. Entre otros se encuentran aquellos enfocados a los modelos para estimar el índice de área foliar (Friedl *et al.*, 1994; Wang *et al.*, 2005); la cobertura y dinámica vegetal (Cicone y Parris, 1992; Hlavka y Spanner, 1995; Alatorre *et al.*, 2014); la deforestación y fragmentación de hábitats (Hlavka y Strong, 1992; Njomo, 2008; Kumar *et al.*, 2010); la evaluación del suelo y estado de la vegetación (Kozoderov y Kosolapov, 1993; Verhulst *et al.*, 2009) y cambios interanuales del NDVI relacionados con el fenómeno del El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en diferentes regiones (Liu *et al.*, 1994; Li y Kafatos, 2000; Plisnier *et al.*, 2000, Poveda y Salazar 2004; Erasmi *et al.*, 2009; Van Leeuwen *et al.*, 2013) y cambios a nivel global (Kogan, 2000; Peng *et al.*, 2012).

En nuestro caso nos interesa analizar no solamente el comportamiento promedio temporal o espacial del NDVI, sino también observar su tendencia, que si bien es un método simple, es un concepto importante en el estudio de series temporales, pues permite observar en un sentido general el patrón positivo (aumento o alza) o negativo (disminución o a la baja) de los elementos de un entorno particular durante un período determinado, en este caso el comportamiento del NDVI en la porción meridional de la península de Baja California durante los últimos 15 años.

La península de Baja California se encuentra en la región noroeste de México, al norte del Trópico de Cáncer y, por lo tanto, bajo la influencia del cinturón de altas presiones del hemisferio norte. Está influenciada en su costa occidental por la corriente fría de California y en su costa oriental por el agua cálida del Golfo de California. Debido a su origen

geológico, la península cuenta con una orografía muy diversa que presenta valles, planicies, lomeríos y sierras elevadas (INEGI, 1991). Hacia la porción meridional de la península, algunos de sus rasgos orográficos más importantes son las montañas de la Sierra de la Giganta, la Sierra de Guadalupe y la Sierra de la Laguna, que da nombre a la Reserva de la Biosfera localizada en el sitio (Figura 1). En términos generales se trata de una zona árida que recibe en promedio alrededor de 200 mm de precipitación al año durante el verano, su principal época de lluvias (INEGI, 1991).

Respecto a su estatus biogeográfico, Álvarez-Castañeda *et al.* (1995) postularon que esta podría ser clasificada como una subprovincia, que denominaron Subprovincia Sudcaliforniana, y la distinguieron del resto de la provincia del Desierto Sonorense debido a la mayor persistencia árida peninsular.

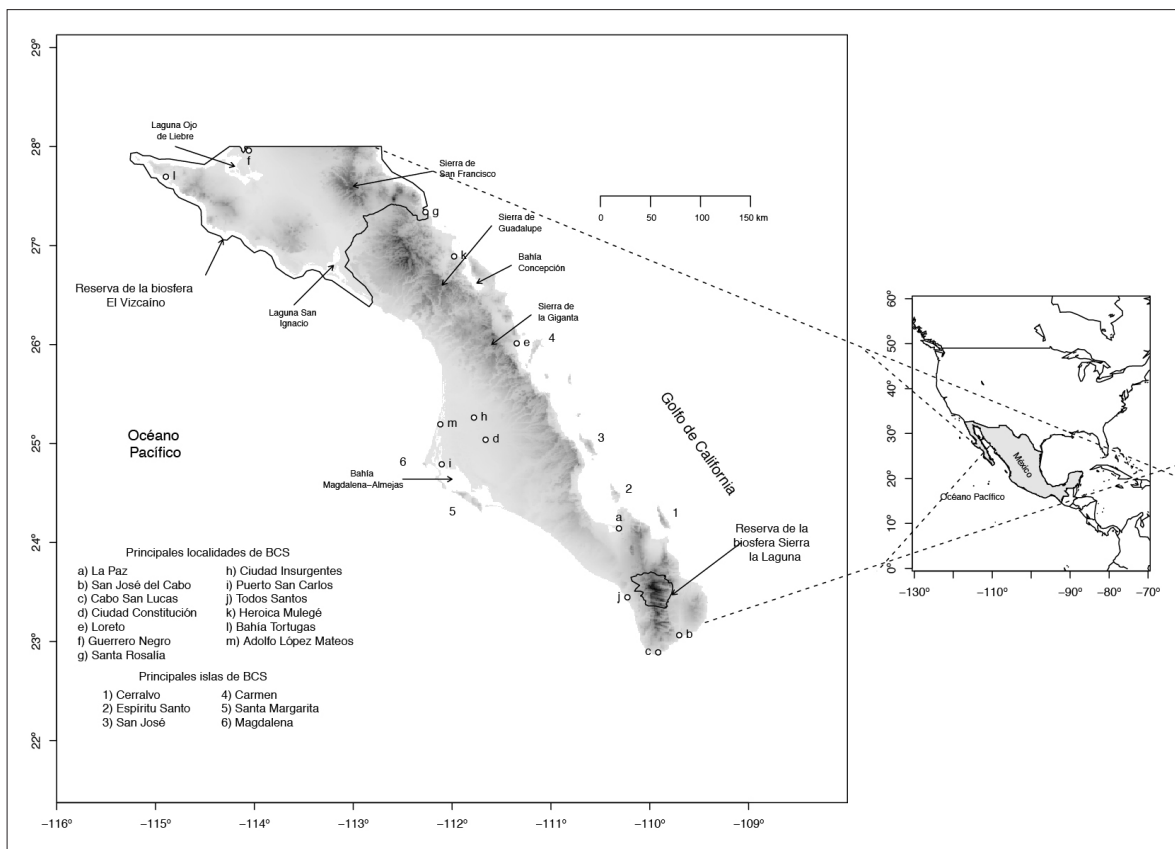


Figura 1. Área de estudio y sitios de referencia.

Debido a su naturaleza árida, la sequía es una de las mayores amenazas de desastre natural a las que se enfrenta la zona, cuyos efectos han sido clasificados de severos a extremadamente severos, y de acuerdo a los pronósticos oficiales esta situación empeorará los próximos años (Ivanova y Gámez, 2012).

Por su parte, una de las mayores amenazas de origen antrópico en la zona es la presión generada al sistema natural por la mala planificación tanto de los centros de población como de los desarrollos turísticos, particularmente evidentes hacia la porción más sureña de la península de Baja California. Esta presión puede potenciar perturbaciones, ya sean de origen natural, como las sequías, o de origen artificial, como la fragmentación inducida, hasta un punto de modificación de no retorno en el sistema natural. Es por ello que su análisis, evaluación y seguimiento, pueden contribuir a la definición de medidas oportunas que prevengan los altos costos, ecológicos y económicos, para la posteridad.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es mostrar el comportamiento promedio del NDVI, así como su tendencia sostenida en alta resolución espacial en el incipiente siglo XXI, con la finalidad de observar si existen patrones claros de cambio en el sistema socio-ambiental de la porción sur de la península de Baja California.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este trabajo se analiza el comportamiento promedio y la tendencia sostenida del NDVI en la región meridional de la península de Baja California para los primeros 15 años de registro completo del siglo XXI, esto es, de enero de 2001 a diciembre de 2015, a partir de imágenes satelitales tipo MODIS. Dichas imágenes se obtuvieron de la base de datos pública de *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC, <https://lpdaac.usgs.gov/>) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio estadounidense (NASA, por sus siglas en inglés). La información se encuentra en formato binario con resolución espacial de 250 m (unidad de un pixel), y con resolución temporal de 16 días (MOD13Q1). Los datos del NDVI correspondientes a la región sur de la península de Baja California

se encuentran disponibles en dos mosaicos ("tiles") (h07v06 y h08v06), por lo que se aplicaron técnicas de mosaico de imágenes para generar cada imagen promedio de 16 días y, posteriormente, trabajar sobre una base mensual. Las imágenes contienen información de alta sensibilidad radiométrica en 36 bandas espectrales que capta el radiómetro Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo del satélite TERRA, en tres diferentes resoluciones espaciales: 250 m 500 m y 1000 m. Las bandas espectrales que se utilizan para monitorear la vegetación son la banda visible y las cercanas al infrarrojo (1, 2, 3 y 7), debido a que los pigmentos de clorofila tienen una reflectancia en la parte visible y cercana al infrarrojo de aproximadamente el 20% en el intervalo espectral de 0.5 a 0.7 micrómetros, y de 60% en el intervalo de 0.7 a 1.3 micrómetros. La reflectancia diferencial de estas bandas se utiliza para clasificar la cobertura de la tierra, estimar áreas de cultivo y detectar estrés de plantas. Hasta la fecha se han propuesto diversos índices que utilizan diferentes combinaciones de bandas espectrales, con el objetivo de identificar cuál es la que representa las condiciones de la vegetación de una manera más contundente (Gutman, 1991). El sistema de imágenes MODIS contiene dos tipos de índices de vegetación, el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que es sensible a la clorofila, y el EVI (Enhanced Vegetation Index), enfocado a las variaciones estructurales de las plantas, como su fisonomía, tipo o área foliar, y que debe ser contrastado con verificaciones en sitio. En este trabajo utilizamos el NDVI que se define como:

$$NDVI = \frac{R_{IRC} - R_R}{R_{IRC} + R_R} = \frac{B_2 - B_1}{B_2 + B_1}$$

donde: R_{IRC} y R_R son, respectivamente, los valores de reflectancia bidireccional de la superficie para las bandas del infrarrojo cercano y rojo, que son las bandas B2 y B1 de la imagen (Tucker, 1979).

Los productos MODIS se recortaron y reproyectaron del sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) al sistema de coordenadas geográficas WGS84; el procesamiento de los datos MODIS se llevó a cabo utilizando el software de programación

R (R Core Team, 2015) a través de diferentes librerías. En total se analizaron 345 imágenes de NDVI que, en conjunto, tuvieron la cobertura espacial y temporal requerida.

El valor promedio del NDVI para cada pixel del área de estudio se calculó de la siguiente manera:

$$\overline{NDVI} = \frac{\sum NDVI_{ij}}{n_{ij}}$$

donde: NDVI es el promedio del NDVI de cada pixel en el área de estudio durante el periodo 2001-2015, $NDVI_{ij}$ es la observación del NDVI del i -ésimo día juliano (ejemplo: 001, 017, 033, etc.) y el j -ésimo año.

Posteriormente, y para obtener los valores de la pendiente de las rectas y observar sus tendencias, se realizaron ajustes de mínimos cuadrados para cada serie de 15 años de cada pixel. Finalmente, se analizaron los coeficientes de variación para observar la consistencia espacial en las bases de datos. Para ello se utilizó el software de programación R (R Core Team, 2015) así como el software QGIS (Quantum GIS), de código libre, para Mac OS, y se generaron mapas para su mejor visualización espacial.

RESULTADOS

Se analizaron un total de 1 377 985 píxeles que, en conjunto, cubren toda la superficie de la porción sur de la península de Baja California, incluyendo islas.

Dado que los valores son normalizados, los valores del NDVI se encuentran entre -1 y 1, siendo los valores más cercanos a 1 los que tienen mayor vigor de la vegetación y los valores negativos corresponden a cuerpos de agua. El total de los porcentajes correspondientes a cada valor de NDVI se muestra en la Tabla 1. Como se puede apreciar el mayor porcentaje se concentra entre valores de 0.1 y 0.3 con el 67.04%, esto es consistente si se considera que se trata de una zona árida. El comportamiento espacial del NDVI promedio para cada pixel se puede apreciar claramente en la Figura 2, donde se observa que los valores por arriba de 0.5

Tabla 1. Porcentaje de los valores de NDVI observados en la zona: N=número de foteles; %=porcentaje de cada categoría respecto al total de foteles; %acumulado= porcentaje acumulado por categorías del NDVI.

NDVI	N	%	% acumulado
(-0.2,0]	20230	1.4681	1.4681
(0,0.1]	81635	5.9242	7.3923
(0.1,0.2]	401504	29.1370	36.5294
(0.2,0.3]	522358	37.9074	74.4367
(0.3,0.4]	248533	18.0360	92.4727
(0.4,0.5]	75003	5.4429	97.9157
(0.5,0.6]	22778	1.6530	99.5686
(0.6,0.7]	5285	0.3835	99.9522
(0.7,0.8]	657	0.0477	99.9999
(0.8,0.9]	2	0.0001	100.0000
(0.9,1]	0	0	100

(2.08%) están asociados claramente con las áreas de mayor cobertura vegetal localizadas hacia las zonas altas de la Sierra de San Francisco, el corredor de la Sierra de la Giganta, la Sierra de Guadalupe y, particularmente, con los valores máximos (>0.8) en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna (RBSL) en la porción más sureña de la península (Figura 2), así como también en la porción del manglar asociado a la zona de canales en la zona norte del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas y, en menor grado, en la región sureste del mismo complejo lagunar (Figura 2).

La tendencia del NDVI se presenta en la Figura 3. Los valores negativos indican que el NDVI está disminuyendo, es decir, que la vegetación presenta menos vigor; los valores positivos indican que se está reverdeciendo o que presenta mayor vigor de la vegetación, y los valores cercanos a cero significan valores neutros o sin cambios significativos. Como se puede apreciar, más del 80% de los píxeles no presenta cambios significativos en su tendencia (valores de -0.005 a 0.005), lo que en principio indica que el mayor porcentaje del área analizada se encuentra en condiciones normales; el 18% presenta tendencia positiva, donde destaca la porción del valle del Vizcaíno y la porción central del área de

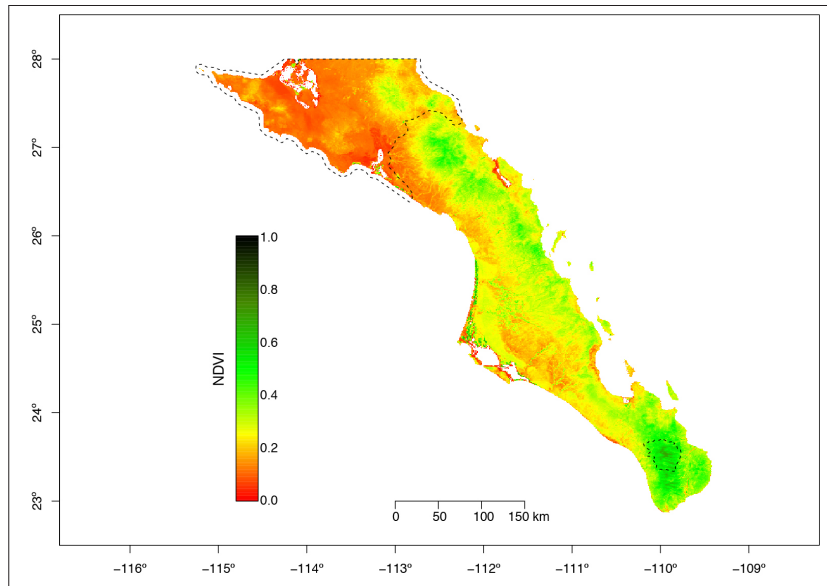


Figura 2. Promedio del NDVI 2001-2015 para cada píxel de 250 x 250 m. Se muestran los polígonos (líneas punteadas) de la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno en el norte y la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna en la porción sur.

estudio, en donde se encuentran los asentamientos poblacionales de Ciudad Constitución y Ciudad Insurgentes, conocido también como el valle de Santo Domingo, y que puede estar asociado a la reactivación de los campos de cultivo. Finalmente, menos del 1% de los píxeles analizados presenta tendencia negativa; sin embargo, es particularmente importante que estas áreas de tendencia negativa coinciden con áreas tradicionalmente verdes, como las porciones elevadas de las sierras. Adicionalmente, se observa un claro patrón de tendencia negativa hacia el sur de la península, específicamente en las inmediaciones de las ciudades de La Paz, Cabo San Lucas, San José del Cabo y el pueblo mágico de Todos Santos. Con respecto a las islas del Golfo de California, destaca la tendencia negativa en la porción sur de las islas Espíritu Santo y Cerralvo (Jacques Cousteau, Figura 3) ambas áreas naturales protegidas que forman parte de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera de la UNESCO como Reserva Especial de la Biosfera (CONANP, 2016). Si bien el porcentaje de píxeles con tendencia negativa es muy bajo en comparación con el área total, destaca la correspondencia con las zonas de mayor densidad poblacional y de mayor desarrollo turístico, particularmente evidente en las inmediaciones de Cabo San Lucas, San José del Cabo, La Paz, Todos Santos y el litoral de la porción sureste

de la península, conocido como Cabo del Este, punto de salida para la isla Cerralvo. También se aprecian áreas dentro de la RBSL que tienen tendencia negativa, lo que es importante debido a la característica endémica de esta unidad fisonómico-florística, que en promedio es la zona más verde del sur de la península (Figura 2); sin embargo, su tendencia indica que en los últimos 15 años ha ido perdiendo vigor de su vegetación (Figura 3).

En la Figura 4 se muestran los valores del coeficiente de variación (CV), expresada en porcentaje para cada serie de tiempo de cada píxel. Se observa que más del 98% de los datos tienen $\leq 20\%$ de variación, lo que respalda la consistencia de los datos. Con valores de CV por debajo del 10% destacan nuevamente las áreas de la Sierra de San Francisco, el corredor de la Sierra de la Giganta, la Sierra de Guadalupe y la Sierra de la Laguna, mientras que la porción occidental de mayor influencia oceánica por el Pacífico mexicano presenta los valores más altos de CV, especialmente hacia la parte suroeste de la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

En el presente trabajo presentamos el análisis del comportamiento promedio y de la tendencia sos-

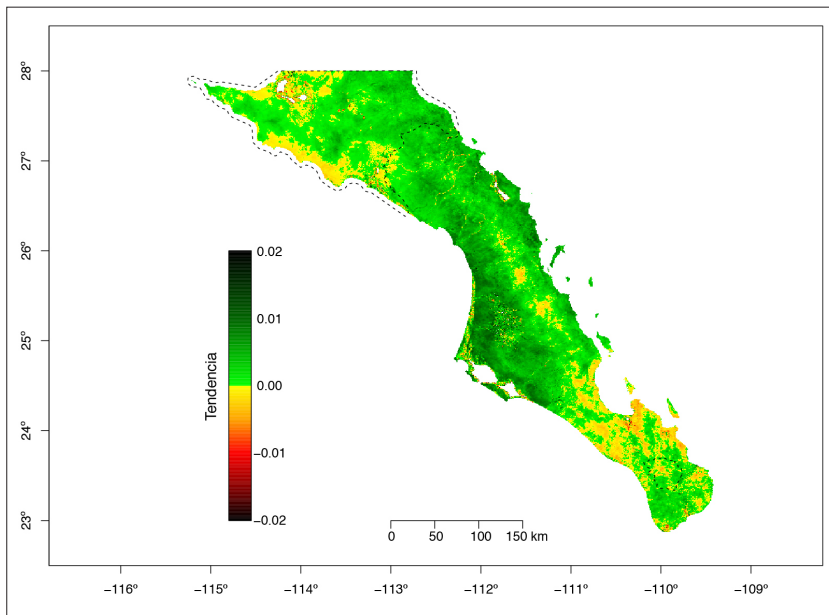


Figura 3. Valores de la tendencia del NDVI (valor de la pendiente de la recta de regresión de cada serie) para el periodo 2001-2015 para cada pixel de 250 x 250 m. Se muestran los polígonos (líneas punteadas) de la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno en el norte y la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna en la porción sur.

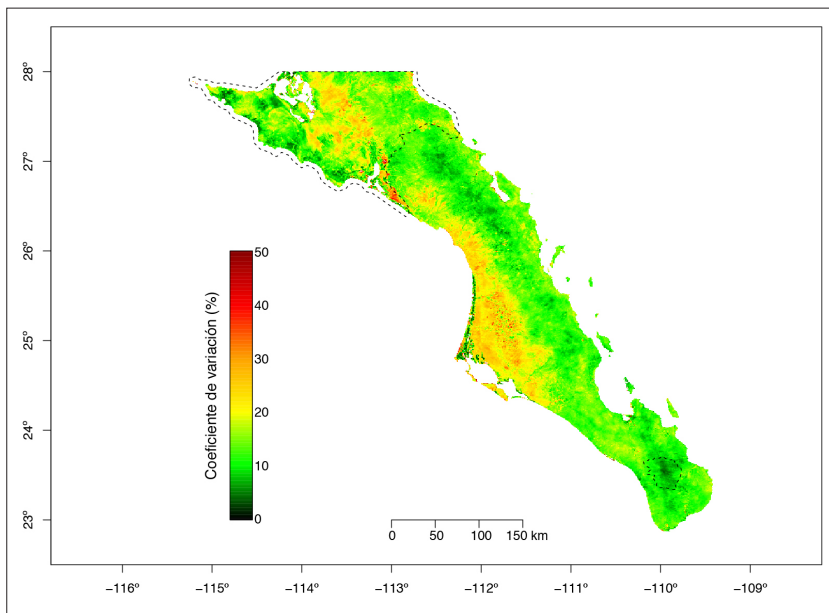


Figura 4. Coeficiente de variación del NDVI para el periodo 2001-2015 para cada serie de tiempo en cada pixel de 250 x 250 m. Se muestran los polígonos (líneas punteadas) de la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno en el norte y la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna en la porción sur.

tenida del NDVI como indicador del vigor de la vegetación en cada pixel de 250 m para la serie de tiempo de 2001-2015 en la porción meridional de la península de Baja California. Se consideró esta herramienta debido a que da una idea sobre el funcionamiento del ecosistema terrestre más que sobre la estructura del mismo; no obstante, el comportamiento promedio del NDVI puede

asociarse con las principales características fisiográficas y climáticas presentes en la región, como se aprecia en la Figura 2. Sin embargo, el enfoque del presente manuscrito se centra en la fluctuación a largo plazo que se observa en cada pixel; es decir, su tendencia lineal, aunque si bien es cierto que la mayor parte del área estudiada no muestra cambios en su tendencia ($NDVI \cong 0$), más del 95% de los

sitios con tendencia negativa se localizan en las zonas que rodean los asentamientos poblacionales de mayor densidad o de mayor desarrollo turístico en la región. Estas áreas con tendencia negativa en su conjunto generan un gradiente de presión antrópica que literalmente rodea a la RBSL y que genera estrés en el sistema, como quedó demostrado con la presencia de valores de tendencia negativa al interior de la RBSL. Este hallazgo cobra mayor importancia si consideramos que esta zona es donde se encuentra la mayor concentración de vegetación perenne del sur la península de Baja California, y cuya asociación florística de tipo bosque encino-pino y pino-encino fue pieza clave para la declaratoria como Reserva de la Biosfera. Esta zona presta una gran cantidad de servicios ecosistémicos, entre los que destaca ser el principal lugar de recarga de los mantos freáticos que abastecen los asentamientos poblacionales de los municipios de La Paz y Los Cabos (Sánchez-Brito et al., 2013). Este comportamiento de tendencias negativas en el NDVI se observa también hacia la ciudad de La Paz, su zona conurbada y las islas cercanas, particularmente en el sur de la isla Cerralvo y el sur de la isla Espíritu Santo.

Con base en estos resultados podemos inferir que en toda la región sur de la península de Baja California existe una fuerte presión estresante en el sistema que ocasiona cambios en su comportamiento y que, debido a la fisiografía de la zona, la presión se observa alrededor de la RBSL generando un gradiente hacia el centro de la misma (Figura 4) que ya muestra las consecuencias del cambio en el sistema.

Debido a su singularidad y belleza escénica, la porción sur de la península de Baja California ha tenido un fuerte impulso turístico, siendo este sector el que mayor aportación ha hecho al crecimiento económico de la región. No obstante, esta actividad económica ha sido también la que mayor modificación ha generado en el sistema natural, asunto particularmente evidente en los subsistemas costeros de la porción sur de la península. Estos procesos de desarrollo turístico y urbanización, además de fragmentación, generan niveles de perturbación que hasta ahora no habían sido medidos de ningún modo en escala sinóptica. Este primer

esfuerzo representa una base para continuar con la búsqueda de patrones de cambio que puedan ser indicadores de la fase en la que se encuentran los sistemas analizados y estos, a su vez, puedan ser utilizados en el planteamiento de indicadores útiles para la toma de decisiones, particularmente en la planeación de desarrollos turísticos, ya que, como se plantea en este trabajo, el desarrollo mal diseñado puede ser uno de los principales generadores de estrés en los sistemas ecológicos, lo que con el tiempo puede derivar en modificaciones no sólo estructurales sino funcionales del sistema.

REFERENCIAS

- Alatorre, L. C., Miramontes-Beltrán, S., García-Peña, A. K., Díaz-Cervantes, R. y Bravo, L. C. (2014). Evolución de la dinámica vegetal mediante una serie de imágenes LANDSAT TM (1986-2011): Región central de Chihuahua, México. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(2), 449-476.
- Álvarez-Castañeda, S. T., Salinas-Zavala, C. A. y de Lachica, F. (1995). Análisis biogeográfico del noroeste de México con énfasis en la variación climática y mastozoológica. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, 66, 59-86.
- Cicone, R. C. y T. M. Parriss (1992). *Data and information access for analysis of global environmental change. International Symposium on Remote Sensing of Environment, 24th*. (pp. 11-21). Río de Janeiro, Brazil.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2016). Área de Protección de Flora y Fauna Islas del Golfo de California. México: CONANP. Recuperado de: <http://islasgc.conanp.gob.mx/>. Consultado en agosto de 2016.
- Erasmí, S., Propastin, P. y Kappas, M. (2009). Spatial Patterns of NDVI Variation over Indonesia and Their Relationship to ENSO Warm Events during the Period 1982–2006. *Journal of Climate*, 22, 6612-6623.
- Friedl, M. A., Davis, S. W., Michaelsen, J. y Mortiz, M. (1994). *Modeling sources of uncertainty in satellite-based estimates of leaf area index using a scene simulation model. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS '94)* (pp. 1826-1828). Pasadena, Calif., EE.UU.
- Gutman, G. G. (1991). Vegetation indices from AVHRR data: An update and future prospects. *Remote Sensing Environment*, 35, 121-136.
- Hlavka, C. A. y Strong, L. L. (1992). Assessing deforestation and habitat fragmentation in Uganda using

- satellite observations and fractal analysis. *Journal of Imaging Science and Technology*, 36, 440-445.
- Hlavka, C. A. y Spanner, M. A. (1995). Unmixing AVHRR imagery to assess clearcuts and forest regrowth in Oregon. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 788-795.
- House, F. B., Gruber, A., Hunt, G. E. y Mecherikunnel, A. T. (1986). History of satellite mission and measurements of the Earth radiation budget (1957-1984). *Reviews of Geophysics*, 24, 357-377. DOI:10.1029/RG024i002p00357.
- INEGI (Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática). (1991). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. México: INEGI.
- Ivanova A. y A. E. Gámez (2012). *Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático para Baja California Sur (PEACC-BCS)*. Baja California Sur, México: UABCS, CIBNOR, CICESE, CICIMAR, SEMARNAT, CONACyT, INE.
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 621-636.
- Kogan, F. N. (2000). Satellite-observed sensitivity of world land ecosystems to El Niño/La Niña. *Remote Sensing Environment*, 74, 445-446.
- Kozoderov, V. V. y Kosolapov, V. S. (1993). Models to assess the soil and vegetation state from multispectral satellite data. *Russian Journal of Remote Sensing*, 5, 33-50.
- Kumar, P., Rani, M., Pandey, P. C., Majumdar, A. y Nathawat, M. S. (2010). Monitoring of Deforestation and Forest Degradation Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Ranchi in Jharkhand (India). *Report and Opinion*, 2(4), 14-20.
- Li, Z. y Kafatos, M. (2000). Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment* 71, 239-247.
- Liu, W. T. H., Massambani, O. y Nobre, C. A. (1994). Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. *International Journal of Climatology*, 14, 343-354.
- Patino, J. E. y Duque, J. C. (2013). A review of regional science applications of satellite remote sensing in urban settings. *Computers, Environment and Urban Systems*, 37, 1-17.
- Peng, D., Zhang, B., Liu, L., Fang, H. Chen, D., Hu, Y. y Liu, L. (2012). Characteristics and drivers of global NDVI-based FPAR from 1982-2006. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, 1-15.
- Pfeifer, M., Disney, M., Quaife, T. y Marchant, R. (2012). Terrestrial ecosystems from space: a review of earth observation products for macroecology applications. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 603-624.
- Plisnier, P. D., Serneels, S. y Lambin, E. F. (2000). Impact of ENSO on East African ecosystems: a multivariate analysis based on climate and remote sensing data. *Global Ecology and Biogeography*, 9, 481-497.
- Poveda, G. y L. F. Salazar (2004). Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia”, *Remote Sensing Environment*, 93, 391-401.
- R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de: www.R-project.org/.
- Sánchez-Brito, I., Almendarez-Hernandez, M. A. Morales-Zárate, M. V. y Salinas-Zavala, C. A. (2013). Valor de existencia del servicio ecosistémico hidrológico de la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, Baja California Sur, México. *Frontera Norte*, 25, 97-129.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation”, *Remote Sensing Environment*, 8, 127-150.
- Van Leeuwen, W. J. D., Hartfield, K., Miranda, M. y Meza, F. J. (2013). Trends and ENSO/AAO Driven Variability in NDVI Derived Productivity and Phenology alongside the Andes Mountains. *Remote Sensing*, 5, 1177-1203.
- Verhulst, N., Govaerts, B., Sayre, K. D., Deckers, J., François, I. M. y Dendooven, L. (2009). Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. *Plant Soil*, 317, 41-59.
- Wang, Q., Adikua, S., Tenhunena, J. y Granierb, A. (2005). On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing Environment*, 94, 244-255.
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E. y Tucker III, C. J. (Eds). (2015). *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales Current Status, Future Trends, and Practical Consideration*. SpringerBriefs in Environmental Science. DOI: 10.1007/978-3-319-24112-8_3.