

Sensibilidad climática, tendencia y periodo de reverdecimiento del NDVI en el suroeste de Chihuahua

Climate sensitivity, trend and greening period of the NDVI in southwestern Chihuahua

Aldo Rafael Martínez-Sifuentes^{1*}, Ramón Trucíos-Caciano¹, Enrique Miguel-Valle¹, Juan Estrada-Ávalos¹, Jesús Arcadio Muñoz-Villalobos², Nuria Aidé López-Hernández¹.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Margen Derecho Canal del Sacramento km. 6.5, Zona Industrial 4ª Etapa, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

² Campo Experimental Delicias, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 2 Carretera Delicias-Rosales C.P. 33000, Centro, Cd. Delicias, Chihuahua

*Autor para correspondencia: martinez.aldo@inifap.gob.mx

RESUMEN

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un índice de vegetación que está íntimamente ligado con la fenología vegetativa. Este índice se ha considerado para monitoreo de gradiente espacial, estructura y función de diversos tipos de vegetación en diferente escala de tiempo o espacial. El objetivo del presente estudio fue analizar la sensibilidad climática de precipitación y temperatura en el NDVI anual, la tendencia y los detectar los periodos de reverdecimiento mensual de suroeste de chihuahua. Se descargaron datos de NDVI de MODIS del 2000 al 2017, así como información climática del modelo NLDAS-02 de precipitación y temperatura para el área de estudio. Para precipitación se encontró relación significativa ($p < 0.05$) en el mes de agosto $r = 0.50$ y para temperatura una correlación significativa de -0.48 , $p < 0.05$ en el mes de agosto. La prueba Mann-Kendall ($p < 0.05$) muestra una tendencia ascendente con pendiente de 0.16 . Esta tendencia es corroborada a través de la prueba de Pettitt con un quiebre en la serie histórica de NDVI en junio de 2015, con una media de 0.43 antes y de 0.47 posterior al quiebre. Se detectaron frecuencias o picos significativos asociadas a reverdecimiento de NDVI ($p < 0.99$) en 2.90 y 2.18 meses.

Palabras clave: Clima, Densidad espectral, índice de vegetación, Modis.

ABSTRACT

The normalized difference vegetation index (NDVI) is a vegetation index that is closely linked to vegetative phenology. This index has been considered for monitoring spatial gradient, structure and function of diverse vegetation types at different time or spatial scales. The objective of the present study was to analyze the climatic sensitivity of precipitation and temperature on the annual NDVI, trend and detect the monthly regreening periods of southwestern Chihuahua. NDVI data were downloaded from MODIS from 2000 to 2017, as well as climate information from the NLDAS-02 model for precipitation and temperature for the study area. For precipitation a significant relationship ($p < 0.05$) was found in the month of August $r = 0.50$ and for temperature a significant correlation of -0.48 , $p < 0.05$ in the month of August. The Mann-Kendall test ($p < 0.05$) shows an upward trend with a slope of 0.16 . This trend is corroborated through the Pettitt test with a break in the historical NDVI series in June 2015, with a mean of 0.43 before and 0.47 after the break. Significant frequencies or peaks associated with NDVI greening ($p < 0.99$) were detected at 2.90 and 2.18 months.

Keywords: Climate, Modis, Spectral density, Vegetation index.

INTRODUCCIÓN

La dinámica de la vegetación se encuentra ligada al clima (Bonan 2002), principalmente a variaciones de precipitación y temperatura (Prasad et al., 2005). La fenología de la vegetación está asociada a ciclos o periodos mensuales, estacionales y anuales de precipitación y temperatura.

La sensoria remota es una útil herramienta para identificar periodos de reverdecimiento y fenología a gran escala (Prasad et al., 2005). El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un índice de vegetación que está íntimamente ligado con la fenología vegetativa. Este índice se ha considerado para monitoreo de gradiente espacial, estructura y función de diversos tipos de vegetación en diferente escala de tiempo o espacial. El NDVI se ha utilizado para evaluar el efecto de las fluctuaciones climáticas de baja frecuencia en la fenología de la vegetación, particularmente bajo condiciones del Niños Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Poveda y Salazar, 2004). El seguimiento o evolución del NDVI se ha analizado como indicador del impacto de la variabilidad climática en el funcionamiento de ecosistemas (Cramer et al., 2001). Un severo problema en México es la inconsistente información climática disponible, por lo que es imperante la reconstrucción de datos mediante técnicas estadísticas (León et al., 2016). El acervo de información de datos climáticos disponibles en plataformas de instituciones de prestigio internacional constituye una opción para obtener datos climáticos, las cuales se fundamentan en datos observados y en modelaciones de la superficie de la tierra (Mocko, 2012; Xia et al., 2012). El objetivo del presente estudio fue i) analizar la sensibilidad climática de precipitación y temperatura en el NDVI anual para el suroeste de chihuahua, ii) detectar tendencia de NDVI y iii) detectar los periodos de reverdecimiento mensual de NDVI.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se desarrolla en la porción suroeste del estado de Chihuahua, localizado entre las coordenadas extremas 26°04' a 29°50" de latitud norte y 104°20' a 107°50' longitud oeste, con un gradiente de elevación de 770 a 3200 msnm. La precipitación promedio anual de 420 mm y una

temperatura promedio anual de 8 °C a 18°C (Figura 1).

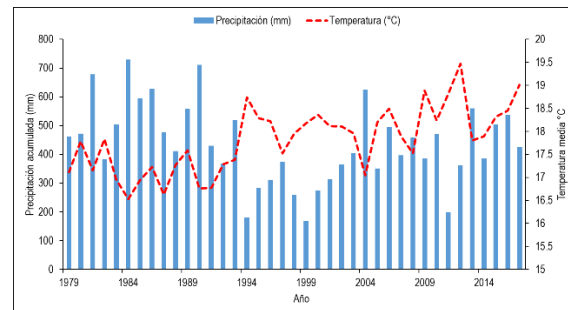


Figura 1. Climograma del área de estudio.

Variables climáticas

La información climática se obtuvo del modelo NLDAS-02, la cual contiene información generada de la integración de datos observados y modelación de la superficie de la tierra. La información descargada fue de precipitación y temperatura mensual desde 1970 a la fecha con resolución espacial de 0.125° x 0.125° (Mocko et al., 2012).

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Se descargó el índice NDVI de la serie de tiempo del satélite MODIS (MOD13Q1), el cual consiste en una composición de intervalos de 16 días a una resolución espacial de 250 m, generado por el Centro de Observación y Ciencias de la Tierra del Servicio Geológico de los Estados Unidos, con resolución temporal del año 2000 a la fecha (Jenkinson et al., 2010). Para incrementar la actividad fotosintética y eliminar las interferencias atmosféricas, se realizó la composición del valor máximo (Stow et al., 2004).

Análisis estadísticos

La sensibilidad climática se realizó con el índice NDVI anual de 2000 al 2017, mediante correlación de Pearson ($p < 0.05$) y las variables climáticas, mediante el software Minitab 19 por ventanas estacionales, mensuales y acumuladas.

La tendencia se analizó con las pruebas de Pettitt y Mann-Kendall. La prueba de Pettitt permite examinar un punto de quiebre en una serie de tiempo derivado de una prueba de Mann-Whitney (Mann y Whitney, 1947). La prueba de Pettitt se fundamenta en el cálculo de U_t , donde T se define a través de la siguiente ecuación (Pettitt, 1979):



$$U_{tT} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T D_{ij}$$

Donde $D_{ij} = -1$ si $(x_i - x_j) > 0$, $D_{ij} = 0$ si $(x_i - x_j) = 0$, $D_{ij} = 1$ si $(x_i - x_j) < 0$.

La prueba Mann-Kendall se emplea para detectar la presencia o ausencia de tendencia lineal en una serie de tiempo (Kendall, 1975). Ya sea la serie A_i ($a_1, a_2, \dots, a_n$), donde se calcula el estándar multivariable UMK de la siguiente forma:

$$U_{MK} = \frac{S}{\sqrt{Var(s)}}$$

Con $S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(a_j - a_i)$, $Var(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$, n es el número de datos en la existencia de tendencia en la serie de tiempo se define a través del coeficiente "UMK", si $U > 0$, la tendencia es hacia arriba y si $U < 0$ la tendencia es hacia abajo. Estos análisis se desarrollaron con el programa R versión 3.4.3 con las librerías "Trend" y "Kendall" (R Core Team, 2014).

El periodo de reverdecimiento se analizó a través del método multi-taper spectral analysis, el cual proporciona las frecuencias dominantes en el tiempo que están asociadas a los registros mensuales de NDVI (Mann y Lees, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sensibilidad climática con precipitación y temperatura

El análisis de sensibilidad climática, permitió conocer la influencia del clima en el NDVI anual regional. Se encontraron correlaciones negativas de NDVI con precipitación mensual de -0.17 y -0.16 para los meses de octubre y noviembre. Solamente se encontró una relación significativa ($p < 0.05$) en el mes de agosto $r = 0.50$. Las demás relaciones oscilaron de 0.12 a 0.40 ($p > 0.05$) en los meses restantes (Figura 2).

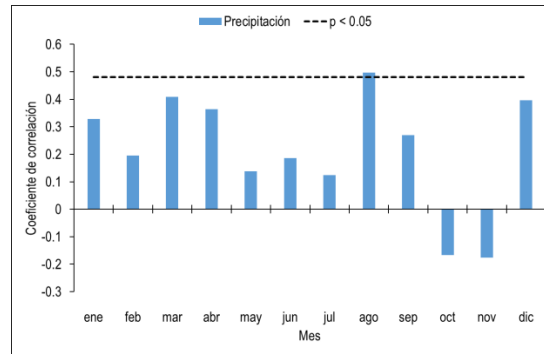


Figura 2. Asociación de precipitación mensual y el índice NDVI.

Se encontraron relaciones positivas y negativas entre la temperatura media mensual y el NDVI. Las correlaciones negativas se encontraron para los meses de enero y de marzo a junio, con la menor de -0.04 para junio y la mayor de -0.48 para el mes de agosto. Las relaciones positivas se encontraron para el resto de los meses con una máxima de 0.44 en el mes de octubre. Solamente se encontró una correlación significativa ($p < 0.05$) que corresponde la de -0.48 para agosto (Figura 3)

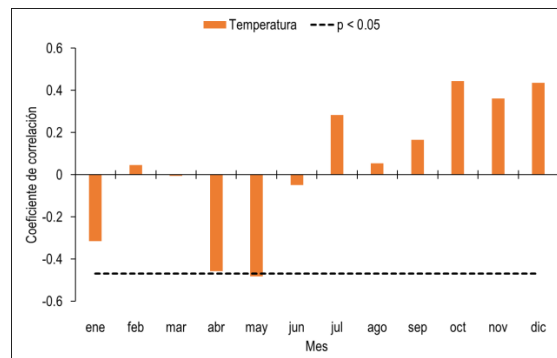


Figura 3. Asociación de temperatura mensual y el índice NDVI.

Tendencia de NDVI mensual del año 2000 al 2017

El NDVI presentó un promedio histórico de 0.44 y la aplicación de la prueba Mann-Kendall ($p < 0.05$) muestra una tendencia ascendente con pendiente de 0.16. Esta tendencia es corroborada a través de la prueba de Pettitt con un quiebre en la serie histórica de NDVI en junio de 2015, con una media de 0.43 antes y de 0.47 posterior al quiebre, con un excedente de 9.3 % (Figura 4).

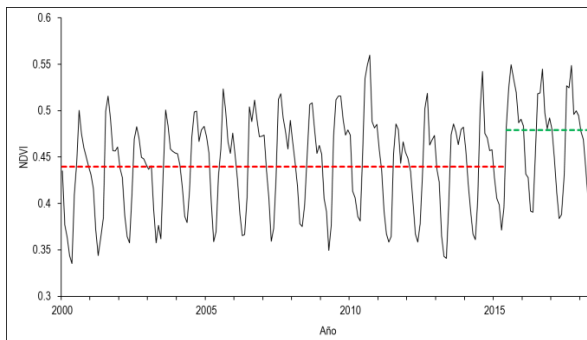


Figura 4. Análisis de tendencia de NDVI mensual del 2000 al 2018 para el suroeste de Chihuahua.

Periodo de reverdecimiento

Mediante el análisis de densidad espectral Multi-taper, se encontraron las frecuencias dominantes o picos significativos de NDVI al 99%, 95% y 90% de confianza. En el presente análisis se detectaron frecuencias o picos significativos asociadas a reverdecimiento de NDVI ($p < 0.99$) en 2.90 y 2.18 meses (Figura 5).

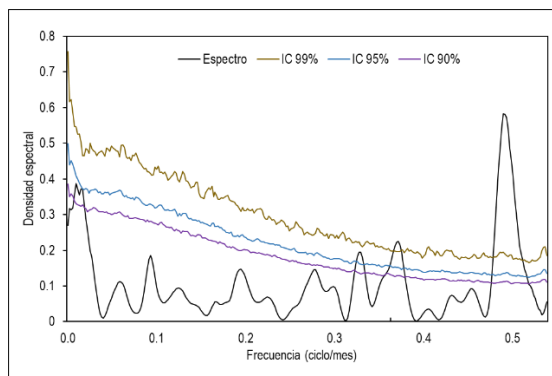


Figura 5. Análisis de densidad espectral de NDVI mensual del año 2000 al 2018.

Diversos estudios sugieren la existencia de una relación positiva entre el índice NDVI y las etapas fenológicas de diferentes tipos de vegetación para diversos ecosistemas (Jobbágy et al., 2002). Lo anterior se traduce en la relación del crecimiento vegetativo a través de las variables climáticas de inferencia y el NDVI. Estudios sugieren que el patrón espacial del NDVI es producto de heterogeneidad espacial en temperatura y precipitación (Shilong et al., 2004).

Gómez-Mendoza et al., (2008) analizó la relación de la precipitación con el NDVI por tipo de vegetación para el sur de México, donde se encontraron

asociaciones interanuales que responden a las condiciones ambientales de la zona, lo cual es equiparable con lo encontrado en este estudio, ya que se encontraron correlaciones que sugieren una influencia de la precipitación con el NDVI espacial, específicamente para el mes de agosto. Esta relación significativa se ubica temporalmente en el periodo del Monzón de Norte América, el cual es un sistema climático que proporciona aproximadamente el 70% de la precipitación anual en el norte de México (Cook et al., 2013). Este fenómeno climático genera escurrimientos hacia la pendiente este de la Sierra Madre Occidental donde se localiza la zona de estudio, lo que permite que este recurso sirva para la vegetación del área.

Otros estudios corroboran la relación positiva entre NDVI y la precipitación en la porción centro-norte de México (Ichii et al., 2002).

En cuanto a la relación de la temperatura con el NDVI, se encontró una relación significativa para el mes de mayo. Este comportamiento se ha encontrado en estudios desarrollados en las grandes planicies de Estados Unidos (Wang et al., 2003). En donde han resultado relaciones negativas para la estación de verano, sin embargo, es necesario identificar dicha causa, ya que puede ser resultado de inhibición de fotosíntesis o estrés hídrico, lo cual, está asociado al tipo de vegetación o sistema de producción. Correlaciones negativas y significativas entre NDVI y temperatura, están asociadas con la fuerte relación entre la precipitación y temperatura (Srivastava et al., 1997). Estudios a nivel global corroboran esta fuerte relación inversa entre NDVI y temperatura media (Ichii et al., 2002).

Los aumentos y la tendencia ascendente del NDVI es atribuible a las transiciones en uso de suelo que ha atravesado la cuenca de estudio a través de los años, al verse sujeta a aumentos en la frontera agrícola y actividades de reforestación y regeneración natural en la zona alta de la cuenca (Martínez-Sifuentes et al., 2020). Los periodos de reverdecimiento o frecuencias, presentan eventos significativos cada dos meses, lo cual, es respuesta a los eventos climáticos locales (Gómez-Mendoza et al., 2008).

CONCLUSIONES

El NDVI es un buen indicador de las condiciones vegetativas de un área específica a través de la reflectancia del espectro en el visible rojo y el



infrarojo cercano. Sin embargo, el presente estudio permitió identificar diversas condiciones ambientales a través del NDVI. Las relaciones encontradas, permiten conocer los meses en donde el NDVI muestra un comportamiento significativo, lo que se traduce en que este índice es capaz mostrar de manera indirecta las condiciones ambientales de la zona suroeste de Chihuahua, en los meses de verano. Las tendencias y periodos de reverdecimiento, proporcionan una visión del comportamiento del índice con impacto en los servicios productivos de la región, llámese sector forestal o agrícola, ya que estas variaciones, repercuten en la posible biomasa efectiva de la vegetación.

LITERATURA CITADA

- Bonan, G. (2002) Ecological climatology: Concepts and applications. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Cook, B. y Seager, R. (2013). The response of the North American Monsoon to increased greenhouse gas forcing. *J. Geoph. Res. Atmos.* 118(4), 1690-1699. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50111>
- Gómez-Mendoza, L., Galicia, L., Vuelas-Fernández, M.L., Magaña, V., Gómez, G. y Palacio-Prieto J.L. (2008). Assessing onset and length of greening period in six vegetation types on Oaxaca, Mexico, using NDVI-precipitation relationships. *Int. J. Biometeorology* 52: 511-520. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0147-6>
- Cramer, W., Olson, R.J., Prince, S.D. y Scurlock, J.M.O. (2001). Determining present patterns of global productivity. In: Roy J, Saugier B, Mooney HA (eds) *Terrestrial global productivity*. Academic, San Diego, pp 429–448
- Ichii, K., Kawabata, A. Y Yamaguchi, Y. (2002) Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990, *International Journal of Remote Sensing*, 23:18, 3873-3878
- Jenkerson, C., Maierasperger, T. y Schmidt, G. (2010) eMODIS: A user-friendly data source, U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1055, 10.
- Jobbágy, E.G., Sala, O.E. y Paruelo, J.M. (2002) Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology* 83:307–319
- Kendall, M.G. (1975). Multivariate nonparametric tests for trend in water quality. *Water Resour Bull* 24(3):505–512
- León, M.J., Simuta, R., Vázquez, I. & Solano, R. (2016). Análisis comparativo de los métodos para interpolación en el estado de Chiapas. *Lacandonia*, 10(2), 53-60.
- Mann, M.E. y Lees, J. (1996). Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Clim. Chang.* 33, 409–445
- Mann, H.B. y Whitney, D.R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann Math Stat* 18: 50–60
- Martínez Sifuentes, A. R., Villanueva Díaz, J., Estrada Ávalos, J., Vázquez Vázquez, C. y Orona Castillo, I. (2020). Pérdida de suelo y modificación de escurrimientos causados por el cambio de uso de la tierra en la cuenca del río Conchos, Chihuahua. *Nova Scientia*, 12(25). 10.21640/ns.v12i25.2321
- Mocko, D. NASA/GSFC/HSL, NLDAS Primary Forcing Data L4 Monthly 0.125 × 0.125 Degree V002; Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center: Greenbelt, MD, USA, 2012.
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl Stat* 28(2):126–135
- Poveda, G. y Salazar, L.F. (2004). Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index



- (NDVI) in Amazonia. *Remote Sens Environ* 93:391–401
- Prasad, V.K., Anuradha, E. y Badinath, K.V.S. (2005) Climatic controls of vegetation vigor in four contrasting forest types of India evaluating from National Oceanic and Atmospheric Administration's Advanced Very High Resolution Radiometer datasets (1990–2000). *Int J Biometeorol* 50:6–16
- R Core Team (2014) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Shilong P, Jingyun F, Wei J, Qinghua G, Jinhu K, Shu T (2004) Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China. *J Veg Sci* 15:219–226
- Srivastava, S.K., Jayaraman, V., Nageswara, R., Manikiam, B., Chandrasekhar, G. (1997). Interlinkages of NOAA/AVHRR derived integrated NDVI to seasonal precipitation and transpiration in dryland tropics. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2931–2952.
- Stow, D., Hope, A. y McGuire, D. (2004). Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 89: 281–308. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.018>
- Wang, J., Rich, P. y Price, K.P. (2003): Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA, *International Journal of Remote Sensing*, 24:11, 2345-2364
- Xia, Y., Mitchell, K., Ek, M., Sheffield, J., Cosgrove, B., Wood, E., Luo, L., Alonge, C., Wei, H., Meng, J., Livneh, B., Lettenmaier, D., Koren, V., Duan, Q., Mo, K., Fan, Y. & Mocko, D. (2012). Continental-scale water and energy flux analysis and validation for the North American Land Data Assimilation System project phase 2 (NLDAS-2): 1. Intercomparison and application of model products. *Journal of Geophysical Research*, 117, 1-27. DOI: 10.1029/2011JD016048