

Del Espacio a la Selva: Uso de Satélites para Monitorear la Salud Vegetal en la Cuenca del Río Pánuco

Rogelio García-Rodríguez ^{1,2,*}, Rogelio Ortega-Izagirre ¹, Fabio Chalé-Lara ¹, Xochitl Altamirano-Herrera ²

¹ Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, Km. 14.5 Carretera Tampico Puerto Industrial Altamira, Altamira, Tamaulipas, C.P. 89600, México.

² Tecnológico Nacional de México Campus Tantoyuca, Desv. Lindero Tametate S/N, colonia la Morita, Tantoyuca, Veracruz, C.P. 92127, México.

* Autor de correspondencia: rgarciardz@gmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 12 de marzo de 2026

Aceptado: 24 de mayo de 2026

Publicado: 3 de junio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.690>

Resumen: El estudio de la cubierta vegetal es una herramienta estratégica para analizar el estado de los ecosistemas. La teledetección mediante satélites artificiales y el análisis de datos meteorológicos y geográficos son herramientas clave para el estudio de la evolución de la cobertura vegetal. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es crucial para estimar el desarrollo vegetal, detectar los efectos del cambio climático y estudiar el impacto de fenómenos como las sequías. En este trabajo, se utiliza el NDVI para analizar la evolución de la cubierta vegetal en la Cuenca del Río Pánuco. Los resultados muestran cambios estacionales en la cubierta vegetal, con menor densidad en invierno/primavera y un máximo de verdor en verano, motivado por las lluvias. En 2024, se observó la recuperación de la vegetación en la cuenca, probablemente asociada a eventos hidrometeorológicos. La integración del NDVI con datos meteorológicos y geográficos es vital para un diagnóstico detallado que apoye el manejo sustentable de los recursos forestales.

Palabras clave: cuenca del río Pánuco, NDVI, cobertura vegetal

Introducción

El término vegetación se refiere al conjunto de plantas, árboles y arbustos propios de un lugar o región. La vegetación constituye la base de los ecosistemas terrestres y representa un vínculo natural entre la atmósfera, el agua y el suelo, por lo que desempeña un papel importante en la salud de nuestro planeta. Los cambios en la vegetación son indicadores de la condición ecológica y ambiental, así como de la salud forestal e hídrica del suelo. Para identificar el estado de la vegetación y cuantificarla, se emplean técnicas de muestreo in situ y basadas en teledetección que utilizan imágenes satelitales y permiten cubrir grandes extensiones de tierra (Reddy *et al.*, 2020).

La teledetección satelital se refiere a la obtención de información sobre la superficie terrestre y la atmósfera mediante sensores instalados en satélites que orbitan la Tierra. Estos sensores capturan imágenes y datos sin necesidad de contacto directo, utilizando distintas longitudes de onda (como la luz visible, la infrarroja o las microondas) para observar fenómenos naturales, cambios ambientales, uso del suelo y océanos, entre otros (Mehmood *et al.*, 2024).

La Figura 1 muestra el proceso de teledetección. El proceso se inicia cuando una fuente de energía, como el sol, emite radiación electromagnética. La radiación atraviesa la atmósfera y llega a la superficie de la Tierra. Al interactuar con la Tierra, la energía puede ser absorbida, emitida o reflejada, según las características del terreno sobre el que incide. La parte de la energía que se refleja viaja a través de la atmósfera hasta los sensores instalados en los satélites. La cantidad de luz reflejada varía según el tipo de superficie con la que interactúa la radiación. Durante su trayectoria hacia la Tierra, una parte de la energía se dispersa debido a las condiciones meteorológicas y ambientales, así como a la presencia de partículas suspendidas en la atmósfera. La información que recogen los satélites se organiza en intervalos específicos de longitud de onda denominados bandas espectrales. La información se envía a una estación receptora en la Tierra, donde se almacena, se georreferencia y se procesa para obtener productos especializados, por ejemplo, estudios sobre la cobertura vegetal (Jensen, 2005).

Los métodos utilizados para monitorear la vegetación deben seleccionarse con base en la escala espacial y temporal del fenómeno que se requiere estudiar. Si se desea estudiar un cultivo de pocas hectáreas, se puede optar por un monitoreo *in situ*; sin embargo, si se desea monitorear la cobertura vegetal de todo el estado de Veracruz o de Tamaulipas, es necesario recurrir a técnicas de teledetección mediante imágenes de satélite.

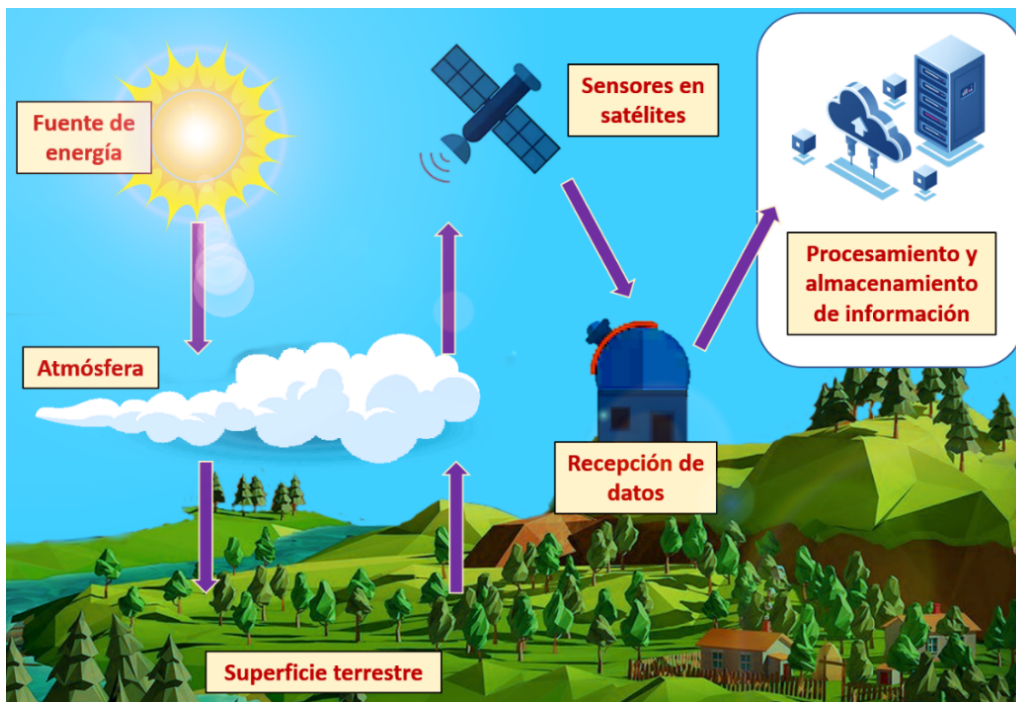


Figura 1. Esquema del proceso de teledetección.

Desarrollo

Caso práctico: monitoreo de la cuenca del río Pánuco

Área de estudio

Se ha seleccionado la cuenca del río Pánuco para ejemplificar el uso del NDVI junto con datos de precipitación para conocer el comportamiento de la vegetación a lo largo del tiempo y observar cómo fenómenos como las sequías afectan a los ecosistemas de la región. La cuenca del río Pánuco es la cuarta más grande del país (CONAGUA, 2022). Cuenta con numerosas reservas ecológicas y en ella habitan más de 15 millones de personas. Se localiza entre las coordenadas 19°00' y 24°00' de latitud norte y 97°45' y 101°20' de longitud oeste y tiene una extensión de 98,227 km² y exhibe un volumen de escurrimientos de 20,323 millones de m³ de agua anuales, ver Figura 2.

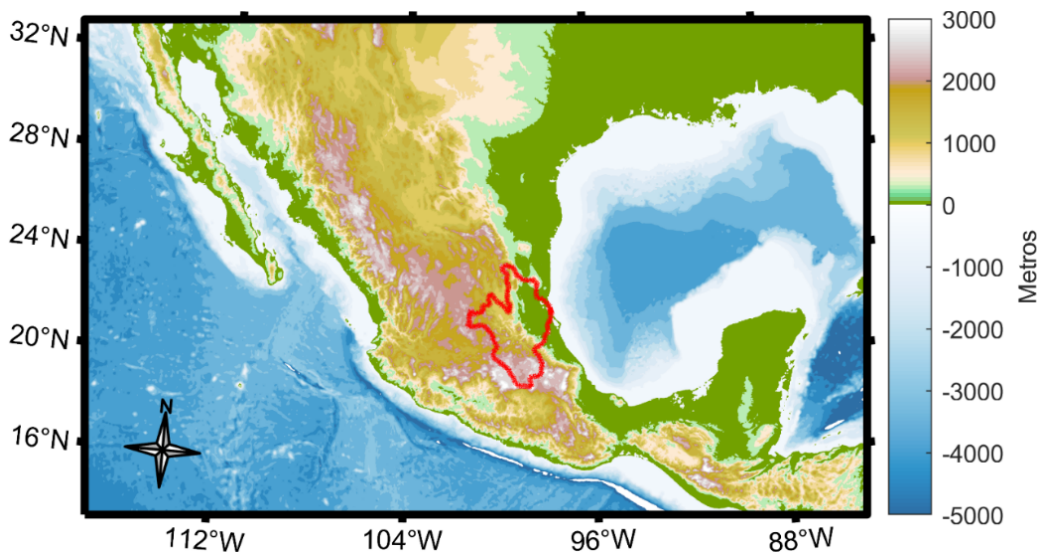


Figura 2. Cuenca del río Pánuco, México.

La cuenca abarca casi todo el estado de Hidalgo y Querétaro, los extremos norte de Veracruz y el sur de Tamaulipas, el oriente y el sur de San Luis Potosí, y el noreste de Guanajuato y partes de la Ciudad de México. Su clima es subtropical, con una precipitación anual de aproximadamente 800 a 1200 mm. La precipitación suele ser mayor de junio a octubre, siendo junio y septiembre los meses más lluviosos. La temperatura varía mucho con la elevación, pero en promedio oscila entre 15 °C en enero y 24 °C en junio. La actividad económica se basa principalmente en la ganadería y la agricultura, con cultivos primarios de caña de azúcar, cítricos y café (Cotler *et al.*, 2010).

La cuenca del río Pánuco se divide en cuatro regiones fisiográficas: (A) Llanura Costera, (B) Sierra Madre Oriental, (C) Meseta Central Mexicana y (D) Eje Transvolcánico. Las regiones, al ser unidades relativamente homogéneas, presentan similitudes incluso en la composición de la cobertura vegetal (Hudson *et al.*, 2005).

Índice de vegetación

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) permite caracterizar la cubierta vegetal y el suelo de una región. Este índice se calcula a partir de las diferencias de absorción entre los intervalos de longitud de onda del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) y del rojo del espectro electromagnético (Nouri *et al.*, 2017). El índice NDVI se define en la Ecuación 1.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (1)$$

donde ρ_{NIR} y ρ_{red} son los factores de reflectancia bidireccional para los intervalos de longitud de onda del Infrarrojo Cercano (841 a 876 nm) y Rojo (620 a 670 nm). El pigmento de la clorofila de una planta sana absorbe la mayor parte de la luz roja visible durante la actividad fotosintética, mientras que refleja la mayor parte de la luz con longitudes de onda en el infrarrojo cercano (Huete *et al.*, 1999).

NDVI se emplea para estimar la cantidad y el desarrollo de la vegetación, así como para detectar cambios en la cobertura y el uso del suelo a nivel regional, gracias a su alta resolución espacial y a la buena calidad de los datos (Gao *et al.*, 2021). Este índice es de gran utilidad porque provee información científica confiable para monitorear la vegetación de forma periódica, detectar los efectos del cambio climático sobre grandes extensiones de tierra, supervisar las actividades agrícolas y de pastoreo y estudiar los efectos de las sequías y de la perturbación de la cubierta vegetal, causada por incendios forestales y volcanes.

Los valores de NDVI varían entre -1 y 1. Valores menores que 0 indican ausencia de vegetación. Valores entre 0 y 0.1, corresponden a superficies sin vegetación, como cuerpos de agua, nieve, hielo o estructuras artificiales, como edificios y casas. Los valores de 0.1 a 0.2 indican suelos desnudos con muy poca cobertura vegetal. La vegetación dispersa se asocia con valores de NDVI entre 0.2 y 0.5, mientras que la vegetación densa y saludable presenta valores superiores a 0.5. Los valores e imágenes mostrados en la Figura 3 son de referencia, ya que pueden cambiar con el tipo de vegetación y las condiciones geográficas de cada región.

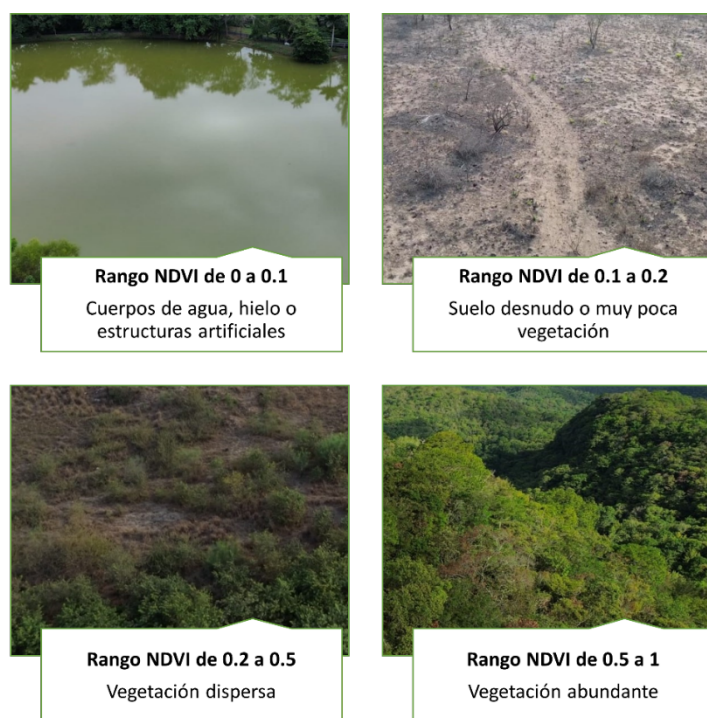


Figura 3. Ejemplos de rango de valores NDVI para imágenes con diferente vegetación.

Obtención de datos de NDVI y precipitación

El producto MOD13Q1 del Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) proporciona información de los índices de vegetación NDVI y EVI en el periodo 2000-2024. MOD13Q1 tiene una resolución espacial de 250x250 m y una resolución temporal de 16 días. El conjunto de datos se descargó del sitio web <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v061/>. MOD13Q1 es un producto de Nivel 3 con datos corregidos atmosféricamente que proporciona datos georreferenciados de latitud y longitud e incluye indicadores de control de calidad. Incluye control de calidad para garantizar la precisión de la información sobre nieve u otras condiciones atmosféricas (Huete *et al.*, 2002).

Los datos de precipitación se obtuvieron de la Unidad de Investigación Climática (CRU, por sus siglas en inglés) de la Universidad del Este de Anglia, en Inglaterra, durante el periodo 2000-2024. Los datos tienen una resolución espacial de 0.5° y una resolución temporal mensual y se descargaron del sitio web: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.08/ (Harris *et al.*, 2020).

Cambios estacionales de la cobertura vegetal en la cuenca del río Pánuco

El comportamiento de la vegetación en la cuenca del río Pánuco varía según las estaciones del año. Durante el invierno y la primavera se registran los valores más bajos de NDVI, lo que refleja una menor densidad vegetal. Abril suele presentar los niveles promedio más bajos, 0.45 de NDVI de todo el año. Con la llegada de las lluvias en verano, a partir de junio, la vegetación comienza a reverdecer y alcanza su máximo desarrollo en septiembre, cuando el NDVI promedio llega a 0.65, coincidiendo con el volumen máximo de precipitación de 208 mm (Figura 4).

En la Figura 5 se muestra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del periodo 2000-2024. En ella se aprecia que cada región fisiográfica presenta valores de NDVI distintos, asociados a las diferencias en su vegetación. En el Eje Volcánico (D) y en la Meseta Central (c) predominan valores bajos de NDVI, lo que indica una vegetación menos densa y escasa. En contraste, en la Sierra Madre Oriental (B) predominan valores altos de NDVI, que indican vegetación densa y saludable; la Llanura Costera (A) también mantiene valores elevados de NDVI, destacando zonas con valores cercanos a cero asociadas a algunos sistemas lagunarios. Además, muestra la variación estacional del NDVI: en verano la vegetación alcanza su máximo verdor, mientras que en invierno tiende a ser más seca y dispersa.

A lo largo de los últimos 25 años, la cobertura vegetal se ha visto afectada por diferentes factores, siendo la sequía la que provoca las mayores afectaciones en periodos prolongados. En la Figura 6 podemos observar los cambios en la cobertura vegetal en septiembre de los años 2000, 2010, 2015, 2020, 2023 y 2024. De 2000 a 2010 se observa una mejora en la vegetación. En 2015 se observa una degradación que se extiende hasta 2020. El año 2023 muestra las consecuencias de la sequía prolongada, siendo uno de los más calurosos y con menor precipitación de las últimas décadas; para el 2024, las precipitaciones del huracán Alberto a finales de junio causaron la recuperación de la vegetación, que se mantiene hasta 2025 (Spring, 2025).

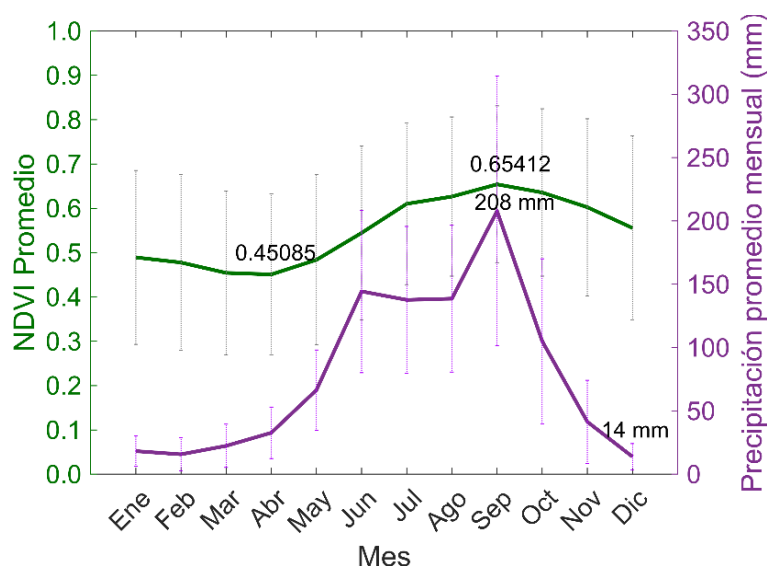


Figura 4. Variación promedio mensual del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y de la precipitación en la cuenca del río Pánuco.

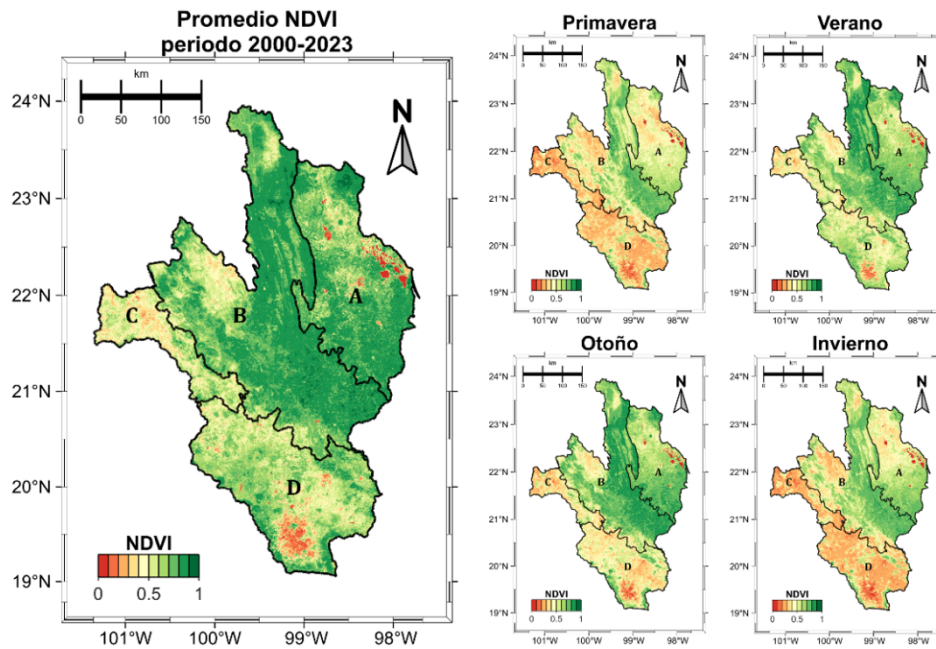


Figura 5. Evolución del Promedio de NDVI y variación estacional de la cuenca del río Pánuco durante el período de 2000 a 2024.

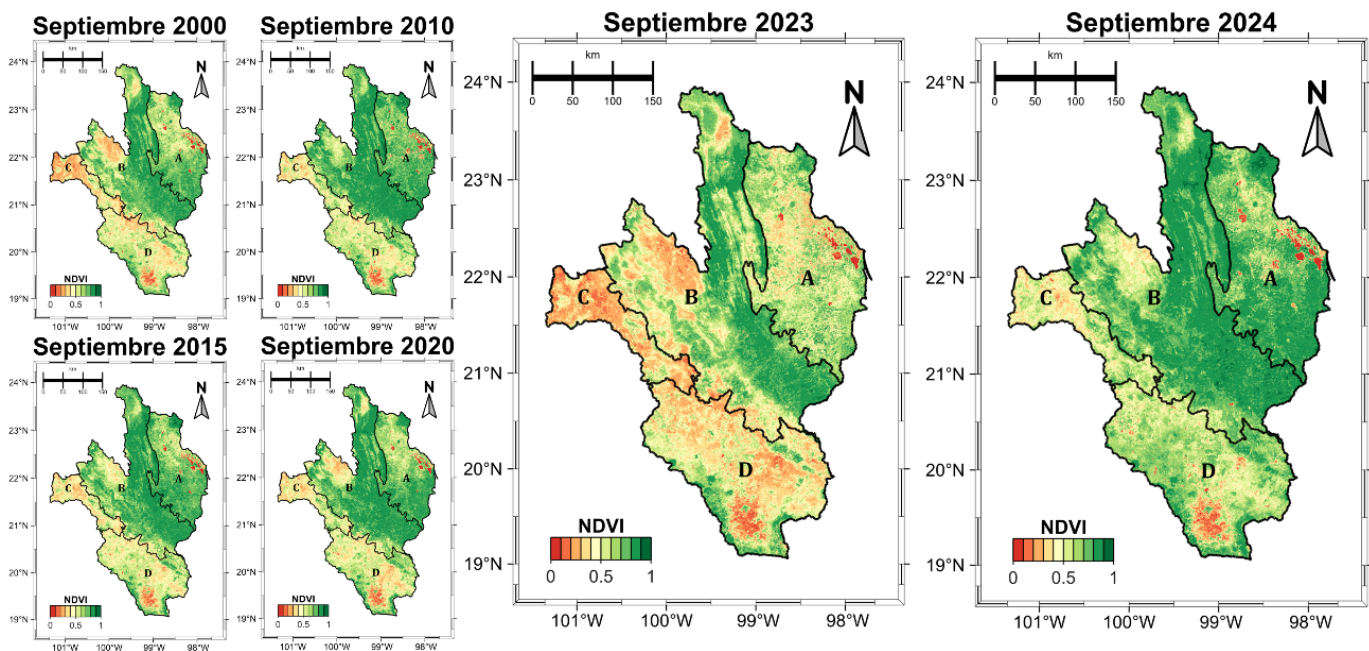


Figura 6. NDVI en los meses de septiembre de los años 2000, 2010, 2015, 2020, 2023 y 2024.

Conclusiones

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se ha consolidado como una herramienta clave para cuantificar los cambios en la cubierta vegetal a lo largo del tiempo en grandes regiones del planeta. Analizar la vegetación de la cuenca del río Pánuco con un enfoque espacial y temporal permite obtener un diagnóstico detallado de su dinámica, distribución y estado de salud. Para ello, es indispensable integrar información de NDVI con datos meteorológicos y geográficos para identificar los factores que inducen cambios en la cubierta vegetal. La vegetación de la cuenca del río Pánuco presenta cambios estacionales: es menos densa en invierno y primavera, y se reverdece en verano debido a la llegada de las lluvias. La sequía ha sido el factor que ha provocado la mayor afectación a la cobertura vegetal, la cual se ha extendido desde 2015 hasta 2024. Las precipitaciones provocadas por el huracán Alberto en 2024 posiblemente favorecieron la recuperación de la salud de la vegetación en la cuenca. La teledetección permite conocer

la magnitud, las causas y la ubicación de los cambios en la cobertura vegetal, con el fin de orientar las acciones de planeación ambiental y el manejo sustentable de los recursos forestales y, con ello, promover el mantenimiento de los ecosistemas y la biodiversidad en la región.

Agradecimientos y financiamiento: Agradecemos al CICATA-Altamira y al Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el apoyo a la investigación, a MODIS por hacer disponibles los datos gratuitamente y a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca para los estudios de doctorado.

Bibliografía

- Comisión Nacional del Agua. (2022). Regiones hidrológicas (nacional). <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrologicas&ver=mapa>
- Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V., & Cuevas, M. L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: priorización y toma de decisiones. En *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización* (Vol. 1). Instituto Nacional de Ecología-Fundación Gonzalo Río Arronte IAP.
- Gao, Y., Quevedo, A., Szantoi, Z., & Skutsch, M. (2021). Monitoring forest disturbance using time-series MODIS NDVI in Michoacán, Mexico. *Geocarto International*, 36(15), 1768–1784. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1661032>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1), 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Hudson, P. F., Hendrickson, D. A., Benke, A. C., Varela-Romero, A., Rodiles-Hernández, R., & Minckley, W. L. (2005). Rivers of Mexico. En *Rivers of North America* (pp. 1030–1084). <https://doi.org/10.1016/B978-012088253-3/50026-2>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A., Justice, C., & van Leeuwen, W. (1999). *MODIS vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document*. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (3rd ed.).
- Mehmood, K., Anees, S. A., Muhammad, S., Hussain, K., Shahzad, F., Liu, Q., Ansari, M. J., Alharbi, S. A., & Khan, W. R. (2024). Analyzing vegetation health dynamics across seasons and regions through NDVI and climatic variables. *Scientific Reports*, 14(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62464-7>
- Nouri, H., Anderson, S., Sutton, P., Beecham, S., Nagler, P., Jarchow, C. J., & Roberts, D. A. (2017). NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands. *Science of the Total Environment*, 584–585, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.130>
- Reddy, G. P. O., Kumar, N., Sahu, N., Srivastava, R., Singh, S. K., Naidu, L. G. K., Chary, G. R., Biradar, C. M., Gumma, M. K., Reddy, B. S., & Kumar, J. N. (2020). Assessment of spatio-temporal vegetation dynamics in tropical arid ecosystem of India using MODIS time-series vegetation indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(15), 704. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05611-4>
- Spring, Ú. O. (2025). Crisis hidrológica y perspectiva de género en la megalópolis del centro de México: Un análisis desde el patriaceno. En El Colegio de Tlaxcala (Ed.), *Problemas socioambientales* (1st ed., Vol. 1).