



Evaluación temporal del índice de vegetación en la presa La Soledad, Puebla

Temporal assessment of the vegetation index at La Soledad Dam, Puebla

Carlos Felipe Luna-Bautista ^{1, *}, Rosalía Castelán Vega ³, Ernesto Mangas Ramírez ², Rosa María Galindo Cortéz ², Víctor Tamariz Flores ³

¹ Complejo Regional Nororiental, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla 73900, Puebla, México, Email: carlos.lunaba@correo.buap.mx

² Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Email: ernesto.mangas@correo.buap.mx, rosa.galindocortez@correo.buap.mx

³ Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Email: rosalia.castelan@correo.buap.mx, jose.tamariz@correo.buap.mx

* Autor de correspondencia: carlos.lunaba@correo.buap.mx; Tel.: (+52) 2331014244.

Fecha de Recepción: 25 de julio del 2025.

Fecha de Revisión: 10 de octubre del 2025.

Fecha de Publicación: 19 de diciembre del 2025.

ISSN: 3061-838X.

DOI: 10.82580/revateh.v1i1.13.

Citación: Carlos Felipe Luna-Bautista, Rosalía Castelán Vega, Ernesto Mangas Ramírez, Rosa María Galindo Cortéz, Víctor Tamariz Flores. Evaluación temporal del índice de vegetación en la presa La Soledad, Puebla. Revista en Ciencia y Tecnología del Valle de Tehuacán, 2025, 1, 61-71.

Copyright: © 2025 por los autores. Enviado para posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la Ley de Creatividad.

Resumen

La calidad y disponibilidad del agua dependen del estado de la cobertura vegetal en las cuencas, ya que la vegetación regula los flujos hídricos y protege el suelo. En el entorno de la Presa La Soledad (Tlatlauquitepec, Puebla) se analizó la dinámica de la cobertura forestal mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con imágenes Landsat de 1994 y 2024. Los valores del NDVI variaron de -0.03 a 0.57 en 1994 y de -0.03 a 0.55 en 2024, evidenciando una cobertura vegetal dominante y estable. Estos resultados indican que la vegetación de pino-encino y las zonas de escorrentamiento se mantienen en buen estado, favoreciendo la regulación hídrica, la conservación del suelo y las actividades ecoturísticas. En conjunto, el análisis sugiere que la presa no ha generado impactos negativos, sino que ha contribuido a mantener condiciones adecuadas para la conservación ambiental, respaldando su designación como Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC).

Palabras clave: Cobertura forestal, conservación, NDVI, servicios ecosistémicos, Tlatlauquitepec.

Abstract

The quality and availability of water depend on the state of vegetation cover in watersheds, as vegetation regulates water flow and protects the soil. In the surroundings of La Soledad Dam (Tlatlauquitepec, Puebla), the dynamics of forest cover were analyzed using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with Landsat images from 1994 and 2024. NDVI values ranged from -0.03 to 0.57 in 1994 and from -0.03 to 0.55 in 2024, indicating a dominant and stable vegetation cover. These results suggest that pine-oak forests and runoff areas remain in good condition, supporting water regulation, soil conservation, and ecotourism activities. Overall, the analysis indicates that the dam has not caused negative impacts but has contributed to maintaining favorable conditions for environmental conservation, supporting its designation as a Voluntarily Designated Conservation Area (VDCA).

Keywords: Forest cover, conservation, NDVI, ecosystem services, Tlatlauquitepec.



1. Introducción

La calidad y la disponibilidad del agua están fuertemente influenciadas por las características de las cuencas hidrográficas (Escalona-Domenech *et al.*, 2022). Numerosas cuencas se encuentran significativamente afectadas por actividades humanas, como la minería, el desarrollo urbano y la agricultura (Jordan & Benson, 2015). Además, la construcción de presas altera los flujos hídricos y los ecosistemas acuáticos, impactando tanto la disponibilidad de agua como la dinámica de las cuencas. Por ello, monitorear la dinámica de la vegetación se vuelve esencial para entender los efectos de dichas actividades. En este sentido, resulta fundamental contar con herramientas que permitan monitorear los cambios en la vegetación, ya que esta cumple funciones esenciales en la regulación hídrica. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es una de las métricas más empleadas para valorar el vigor y la salud de la vegetación, dado que se relaciona con variables biofísicas como la cobertura del dosel, el área foliar y la concentración de clorofila (Macías Domínguez *et al.*, 2023; Sanabria Siles *et al.*, 2023). Un caso representativo de interacción entre cobertura vegetal, cuerpo de agua y aprovechamiento humano es la Presa La Soledad, ubicada en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla. Esta infraestructura se distinguió como un proyecto innovador por su diseño, que certificó la seguridad durante su construcción y funcionalidad (Zamora Flores, 2012). Además de su importancia funcional, la presa se ha consolidado como un destino turístico destacado en la región, gracias a los recorridos en bote con vistas panorámicas y a diversas actividades ecoturísticas como caminatas y exploración de cascadas cercanas. Dado el valor ecológico, social y económico que representa, en 2024 se inició el proceso para declararla Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC), con el objetivo de preservar su riqueza natural y promover el ecoturismo sostenible en la región.

En este contexto, la cobertura terrestre no solo desempeña un papel crucial en la regulación de los recursos hídricos, sino que también sustenta la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y las actividades ecoturísticas. Su rol como hábitat de especies se traduce en múltiples beneficios ecológicos y sociales (Simonit & Perrings, 2013), lo que refuerza la necesidad de monitorear su evolución en el tiempo, por lo que entender su evolución temporal resulta esencial para su manejo y conservación. A partir de lo anterior se planteó el siguiente objetivo, evaluar los cambios en la cobertura vegetal en el entorno de la Presa La Soledad entre los años 1994 y 2024 mediante el análisis del NDVI, con el propósito de comprender sus implicaciones en los servicios ecosistémicos y el potencial de conservación del área.

2. Metodología

Área de estudio

La Presa La Soledad, también conocida como Presa Mazatepec, se encuentra en la zona baja del municipio de Tlatlauquitepec, Puebla (**Figura 1**). Este sitio fue inaugurado en 1962 y destaca por su diseño pionero como la primera presa en México con una cortina de concreto tipo arco-bóveda, que optimiza la resistencia al empuje del agua. Tiene una longitud de cuatro kilómetros y una capacidad de almacenamiento de 13.90 hm³, la presa cumple la función de almacenar las aguas del río Tecolutla, conduciéndolas hacia la hidroeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en Mazatepec, lo que la convierte en una infraestructura clave para la generación de energía eléctrica en la región (Zamora Flores, 2012). El área de influencia de la presa se enmarca dentro del corredor ecológico boscoso de la Sierra Norte, dominado por bosques mixtos de *Pinus-Quercus* con presencia de especies arbóreas como *Pinus patula*, *Quercus crassifolia* y *Alnus acuminata* (García, 2004). Este sistema acuático-terrestre alberga una comunidad biótica diversa, donde destacan aves migratorias y especies endémicas de anfibios. La Presa La Soledad se ha

consolidado como un destino turístico de creciente popularidad, especialmente por las diversas actividades que ofrece a los visitantes. Los paseos en lancha son uno de los principales atractivos, permitiendo a los turistas disfrutar de vistas panorámicas del embalse y su entorno verde (**Figura 2**).

Durante la temporada de luciérnagas, de junio a agosto, se organizan recorridos nocturnos en lancha para observar el espectáculo natural de estos insectos iluminando los bosques.

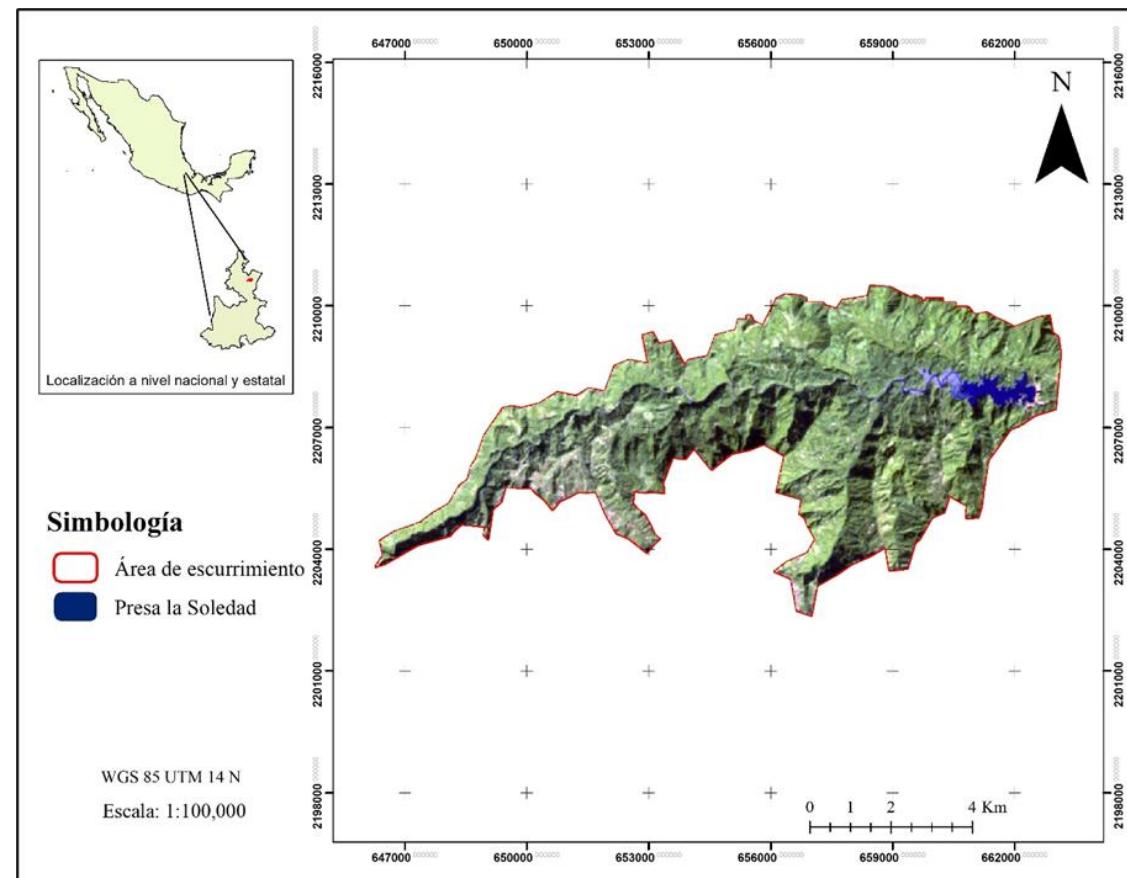
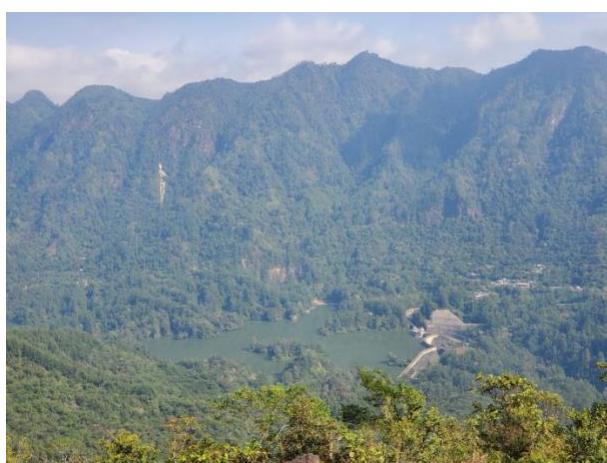


Figura 1. Área de escurrimiento de la Presa La Soledad en Tlatlauquitepec, Puebla.
Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI (2021).



a) Presa La Soledad



b) Presa La Soledad



c) Vegetación circundante



d) Vegetación circundante

Figura 2. Vistas de la Presa La Soledad y la vegetación circundante en el área de estudio.

Fuente: Fotografías de los autores.

Selección y adquisición de las imágenes satelitales

Para el análisis de la dinámica vegetal mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se obtuvieron imágenes satelitales Landsat correspondientes a dos períodos climáticos contrastantes: Landsat 5 TM (Thematic Mapper) para 1994 y Landsat 9 OLI (Operational Land Imager) para 2024. Las imágenes fueron descargadas del portal USGS EarthExplorer (2024) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), seleccionando aquellas con menor porcentaje de nubosidad (<10-15%) y correspondientes a la misma época estacional (diciembre) para garantizar comparabilidad (**Tabla 1**). Para el análisis, se emplearon productos Landsat de Nivel 2, los cuales ya cuentan con correcciones

radiométricas y atmosféricas aplicadas previamente (Teixeira Pinto *et al.*, 2020). Estas correcciones permiten obtener valores de reflectancia de superficie más precisos, lo que mejora la fiabilidad de los índices espectrales derivados, como el NDVI.

Procesamiento digital y cálculo del NDVI

El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó en ArcGis 10.8. Para cada imagen se extrajeron las bandas espectrales relevantes: banda 3 (rojo) y banda 4 (infrarrojo cercano) en Landsat 5; y banda 4 (rojo) y banda 5 (infrarrojo cercano) en Landsat 9 (Huang *et al.*, 2021). El NDVI se calculó mediante la fórmula estándar: $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, donde los valores resultantes oscilan teóricamente entre -1 y 1 (Tucker & Sellers, 1986).

Tabla 1. Características de las imágenes Landsat utilizadas en el análisis de NDVI.

Fecha de adquisición	Satélite	Sensor ID	Path/Row	Resolución	Colección
03-12-1994	Landsat 5	TM	025/046	30 m	2
30-12-1994	Landsat 9	OLI-2	025/046	30 m	2

Control de calidad y validación

Para evaluar la coherencia espacial de los valores del NDVI, se aplicó una validación visual mediante 10 puntos de verificación

seleccionados aleatoriamente dentro del área de escurrimiento hacia la presa La Soledad, utilizando imágenes de alta resolución de Google Earth Pro (Olofsson *et*

al., 2014). Para cada punto se registraron las coordenadas, el valor de NDVI obtenido y el tipo de cobertura observada visualmente. Esto permitió contrastar si los valores altos correspondían a zonas densamente forestadas, y si los valores bajos o negativos se encontraban en áreas de poca vegetación o en la superficie del agua. Esta verificación visual cualitativa fue útil para corroborar la consistencia de los datos obtenidos a partir de imágenes satelitales Landsat 5 (1994) y Landsat 9 (2024). Los puntos de control se seleccionaron estratificadamente para abarcar las coberturas más representativas del área. Esta elección sistemática permitió validar el NDVI estableciendo un criterio claro, que sus valores extremos coincidieran consistentemente con estas coberturas de referencia, verificando así la confiabilidad espectral de las imágenes.

3. Resultados y discusión

Validación de los datos

Con base en los diez puntos de verificación distribuidos en distintas coordenadas dentro del área de estudio (**Tabla 2**), se observa que en la mayoría de los casos la cobertura de vegetación (bosque) se mantiene entre 1994 y 2024, lo que se refleja en valores de NDVI moderados a altos (por encima de 0.15). Sin embargo, uno de los puntos (punto 3) muestra una transición significativa: aunque en 1994 el sitio estaba cubierto por vegetación con un valor de NDVI de 0.154, para el año 2024 se registró una cobertura de agua con un valor de NDVI más alto (0.246), posiblemente relacionado con cambios hidrológicos locales o con la expansión del cuerpo de agua.

Los demás puntos muestran una relativa estabilidad en la cobertura, aunque con

ligeñas fluctuaciones en los valores de NDVI, que pueden estar influenciadas por factores como variabilidad estacional, condiciones atmosféricas, humedad del suelo, o incidencia solar al momento de la captura satelital. A pesar de estos cambios leves, los valores de NDVI en los puntos 1, 4, 6, 8 y 10 se mantuvieron en rangos compatibles con la cobertura boscosa, lo que respalda la interpretación obtenida mediante el análisis espacial.

Monitoreo del NDVI

El entorno de la Presa La Soledad está dominado por un ecosistema de bosque de pino-encino, este tipo de bosque se distribuye principalmente en zonas con pendientes medias a fuertes, donde actúa como una barrera natural contra la erosión y un regulador clave de los flujos hídricos superficiales y subterráneos (Guevara Romero & Montalvo Vargas, 2015). Desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos, los bosques de pino-encino cumplen una función central en la captación de agua, al facilitar la infiltración de lluvia hacia los mantos acuíferos, controlar la escorrentía y amortiguar el impacto de eventos extremos como tormentas intensas (Blanco, 2017). Además, su cobertura vegetal ayuda a estabilizar los suelos y mantener la humedad edáfica, lo cual es particularmente relevante para asegurar la sostenibilidad hídrica de cuerpos de agua como la Presa La Soledad. Una cobertura forestal continua y saludable favorece la regulación del caudal del río de la presa, contribuyendo a un llenado más constante y controlado del embalse (Manson, 2004).

Tabla 2. Puntos de referencia utilizados para la validación del NDVI en el área de estudio.

Punto de verificación	Coordenadas					
	X	Y	NDVI 1994	Cobertura 1994	NDVI 2024	Cobertura 2024
1	662399.77	2207844.91	-0.005	Agua	0.008	Agua
2	660889.32	2209399.87	0.355	Bosque	0.394	Bosque

3	661218.92	2207920.74	-0.005	Aqua	-0.002	Aqua
4	658181.1	2205996.49	0.154	Bosque	0.246	Bosque
5	654552.47	2208386.3	0.412	Bosque	0.458	Bosque
6	649399.09	2206228.66	0.217	Bosque	0.194	Bosque
7	652796.6	2205998.35	0.333	Bosque	0.351	Bosque
8	650534.46	2205928.4	0.344	Bosque	0.325	Bosque
9	655743.04	2207202.52	0.203	Bosque	0.223	Bosque
10	657603.15	2208058.27	0.161	Bosque	0.147	Bosque

El análisis del NDVI permitió evaluar la dinámica de la cobertura vegetal en la zona de escurrimiento de la presa La Soledad entre los años 1994 y 2024. Los valores del NDVI para ambos periodos oscilaron entre -0.03 y 0.57 en 1994, y entre -0.03 y 0.55 en 2024, lo que indica una cobertura vegetal dominante con diferencias sutiles a lo largo del periodo analizado. En 1994, los valores más altos del NDVI (tonalidades azul oscuro) se concentraron en las partes medias y altas del relieve, correspondientes a zonas de bosque de pino-encino con vegetación densa y en buen estado de conservación (**Figura 3**). Esta distribución sugiere una correlación directa entre la altitud, la cobertura vegetal y el vigor fotosintético,

donde las condiciones climáticas y edáficas favorecen el desarrollo del dosel forestal. Por otro lado, las áreas con NDVI más bajo (colores verde claro y amarillo) se ubicaron principalmente en zonas de sombra asociadas a pendientes abruptas o cañadas profundas, donde la incidencia solar fue limitada al momento de la captura satelital, afectando la reflectancia registrada por el sensor. Esta condición topográfica puede generar una subestimación de la vegetación real presente, dado que no necesariamente refleja una menor cobertura vegetal, sino más bien una limitación técnica inherente a la adquisición remota de datos en terrenos complejos.

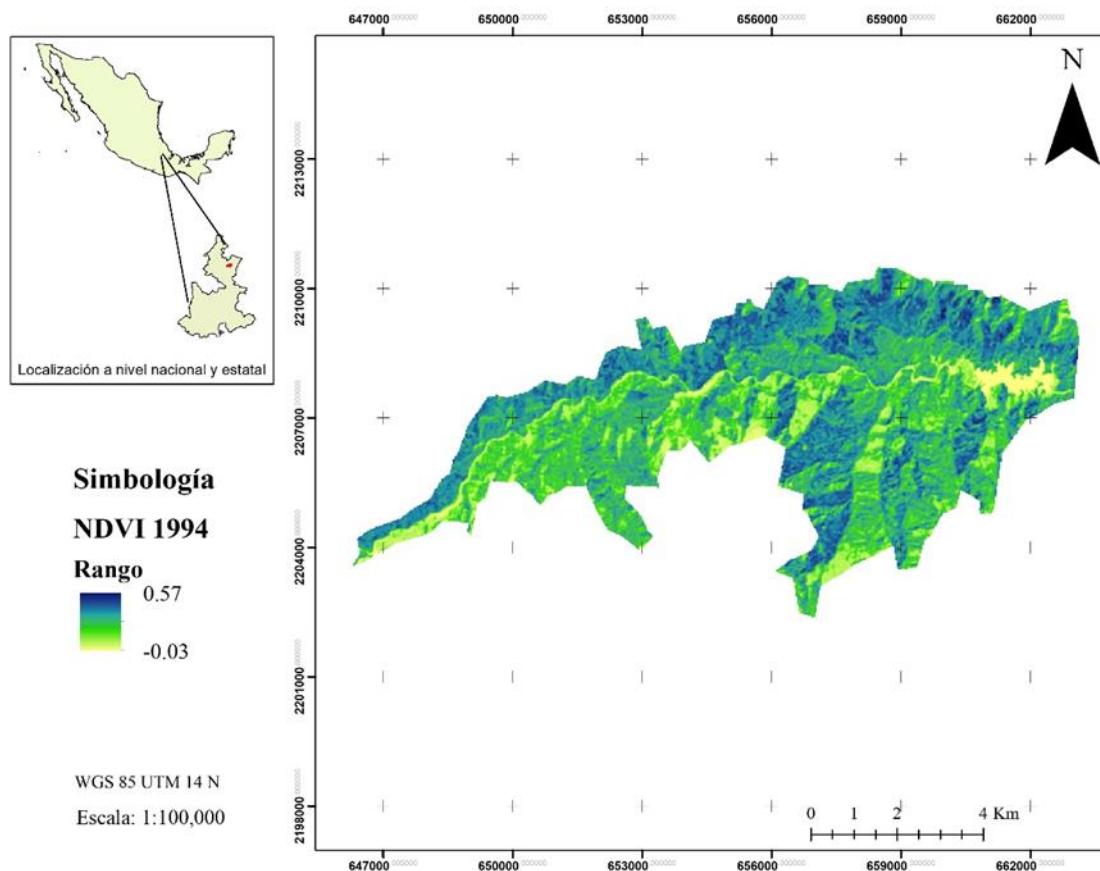


Figura 3. NDVI del área de escurrimiento de la Presa La Soledad en 1994.

Fuente: Elaboración propia con imágenes satelitales Landsat TM 1994.

En 2024, se observa una tendencia similar en la distribución espacial del NDVI, con un patrón general de continuidad en la cobertura vegetal a lo largo de las zonas medias y altas del relieve (Figura 4). No obstante, se aprecia una ligera reducción en los valores máximos del índice en comparación con 1994, así como un incremento en las áreas con valores intermedios (tonalidades verdes y amarillas). Esta variación podría estar asociada a una degradación gradual del dosel forestal, posiblemente derivada de factores naturales como el envejecimiento de la vegetación, una menor disponibilidad hídrica o alteraciones micro climáticas. Además, no se descarta la influencia de condiciones fenológicas distintas entre fechas de captura o cambios estacionales en la vegetación. Estas fluctuaciones también podrían estar vinculadas a una disminución en la productividad primaria neta, lo que sugiere un sistema ecológico con signos

incipientes de estrés, aunque sin indicios claros de transformación por actividades humanas. El análisis temporal del NDVI se ha empleado en distintas regiones del mundo como herramienta eficaz para identificar perturbaciones en los ecosistemas, ya que permite detectar áreas sometidas a procesos de degradación, regeneración o recuperación de la vegetación (Sanabria Siles *et al.*, 2023; Tecuapetla-Gómez *et al.*, 2022; Vela Peláez *et al.*, 2024). En 1994, los valores más altos del índice se concentraron en las zonas medias y altas del relieve, donde predominan bosques de pino-encino con vegetación densa. Para 2024, aunque se conservó en general la distribución espacial del NDVI, se observó una leve disminución en los valores máximos y un aumento en áreas con valores intermedios, lo que podría reflejar un deterioro paulatino en el vigor del dosel vegetal, más que una pérdida absoluta de cobertura.

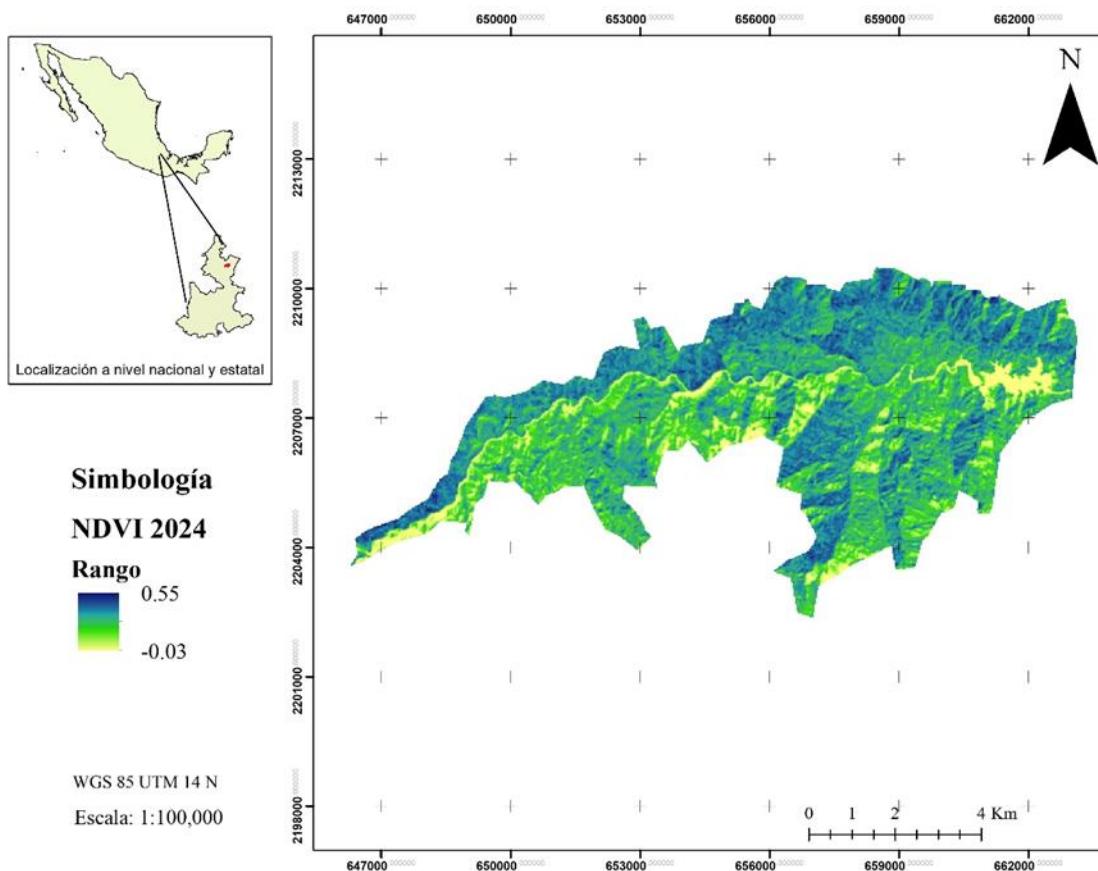


Figura 4. NDVI del área de escurrimiento de la Presa La Soledad en 2024.

Fuente: Elaboración propia con imágenes satelitales Landsat OLI-2 2024.

Estos resultados sugieren una notable estabilidad en la cobertura vegetal durante el periodo analizado, en contraste con lo reportado en otras regiones donde el cambio de uso de suelo ha derivado en pérdidas significativas de vegetación natural (Dávila Luna *et al.*, 2018; Sanabria Siles *et al.*, 2023). Esta estabilidad puede explicarse, en parte, por la función específica de la Presa La Soledad, cuyo propósito principal es la generación de energía eléctrica, y no el impulso a la agricultura o el crecimiento urbano, como se ha documentado en otras presas (Almalki *et al.*, 2023).

Sin embargo, es importante reconocer que ciertas presiones antrópicas locales, como la extracción de leña, el pastoreo o cultivos de pequeña escala, podrían estar incidiendo de forma sutil en la estructura vegetal, acumulando impactos graduales sobre el dosel forestal con el tiempo.

El análisis espacial del NDVI muestra que las áreas con valores altos mantienen condiciones favorables del ecosistema, con potencial elevado para brindar servicios ecosistémicos clave como regulación hídrica, conservación del suelo y captura de carbono. Además, la topografía montañosa y la limitada accesibilidad parecen haber actuado como barreras naturales frente al avance de actividades humanas, reforzando un proceso de conservación pasiva en el entorno de la presa.

Estos hallazgos concuerdan con diversos autores, los cuales sostiene que las áreas remotas con topografía compleja suelen mantener una mayor integridad ecológica debido a la limitada intervención antrópica (Nagendra *et al.*, 2003; Burkhard *et al.*, 2012; Fang *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2021). La correlación observada entre un NDVI alto y la provisión de servicios ecosistémicos en el área de la presa reafirma este principio y



subraya la importancia de gestionar estos espacios como reservorios naturales críticos. Es relevante considerar también que ciertos valores bajos del NDVI en ambos años podrían no reflejar degradación real, sino condiciones de sombra generadas por el relieve accidentado, que reducen la reflectancia registrada por el sensor satelital. Esta limitación ha sido documentada por otros autores (Jiang *et al.*, 2018) y debe tenerse en cuenta al interpretar los resultados en zonas con pendientes pronunciadas.

En conjunto, la estabilidad del NDVI entre 1994 y 2024, sumada a la baja presión antrópica y a las condiciones geográficas restrictivas, sugiere que el ecosistema en torno a la Presa La Soledad ha conservado su funcionalidad. Este escenario refuerza el valor de la zona como remanente de vegetación natural y fuente de servicios ecosistémicos, lo que respalda su reciente iniciativa de ser reconocida como área destinada voluntariamente a la conservación.

4. Reflexiones finales y/o conclusiones

El análisis de la cobertura vegetal mediante el NDVI evidencia que la Presa La Soledad no ha generado impactos negativos en su zona de escurrimiento ni en su área de influencia directa. La estabilidad en la cobertura de bosque de pino-encino sugiere condiciones ambientales favorables y una baja alteración de los ecosistemas circundantes. Asimismo, la presencia de la presa ha favorecido el desarrollo de actividades turísticas sostenibles, contribuyendo a la valorización y conservación de los servicios ecosistémicos locales, en un marco de uso responsable de los recursos naturales.

Con base en estos resultados, se recomienda integrar el análisis espacial de la cobertura vegetal en los instrumentos de gestión ambiental y ordenamiento territorial de la región, así como en los programas de manejo para Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC). Además, se sugiere que los datos generados sirvan de línea base para monitoreos periódicos que fortalezcan

las estrategias de conservación y ecoturismo sostenible, promoviendo políticas públicas que reconozcan el valor ecológico y social de los ecosistemas asociados a la presa.

La metodología aplicada, basada en el procesamiento digital de imágenes mediante la plataforma ArcGIS, facilitó la elaboración e interpretación de mapas del NDVI, los cuales ofrecieron una representación clara y confiable de los cambios espacio-temporales en la cobertura vegetal. Esta herramienta no solo permitió identificar tendencias en la transformación del paisaje, sino que también proporcionó insumos clave para reflexionar sobre la conservación de los servicios ecosistémicos y la necesidad de implementar estrategias de manejo sustentable en la región.

Además, se recomienda realizar un análisis complementario aguas abajo de la presa La Soledad, a fin de evaluar los posibles efectos generados por su operación sobre la dinámica del paisaje y la vegetación riparia. Si bien en el área inmediatamente circundante a la presa no se identificaron presiones ambientales significativas atribuibles directamente a su construcción, un estudio más amplio hacia el cauce bajo permitiría comprender mejor los impactos hidrológicos y ecológicos asociados, particularmente en términos de alteración del caudal, fragmentación de hábitats y cambios en la cobertura vegetal.

Contribución de los autores: Conceptualización, C.F.L.B. y R.C.V.; metodología, C.F.L.B.; software, C.F.L.B y R.C.V.; validación, E.M.R y V.T.F.; análisis formal, C.F.L.B y R.M.G.C.; redacción: C.F.L.B y R.M.G.C.; revisión y edición, C.F.L.B. Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Referencias

Almalki, R., Khaki, M., Saco, P. M., & Rodriguez, J. F. (2023). The impact of dam construction on downstream vegetation area



in dry areas using satellite remote sensing: A case study. *Remote Sensing*, 15(21), Article 5252. <https://doi.org/10.3390/rs15215252>

Blanco, J. (2017). Bosques, suelo y agua: Explorando sus interacciones. *Ecosistemas*, 26(2), 1–9. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.01>

Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S., & Müller, F. (2012). Mapping ecosystem service supply, demand, and budgets. *Ecological Indicators*, 21, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>

Dávila Luna, J., Díaz Caravantes, R. E., Navarro Navarro, L. A., & Romeo Méndez, E. (2018). Las presas de jales en el noroeste del estado de Sonora: Una aproximación geográfica mediante percepción remota. *Investigaciones Geográficas*, (97), Article 00008. <https://doi.org/10.14350/ig.59624>

Escalona-Domenech, R. Y., Infante-Mata, D., García-Alfaro, J. R., Ramírez-Marcial, N., Ortiz-Arrona, C. I., & Macías, E. B. (2022). Evaluación de la calidad del agua y de la ribera en la cuenca del río Margaritas, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, Article 54092. <https://doi.org/10.20937/rica.54092>

Fang, J., Guo, Z., Hu, H., Kato, T., Muraoka, H., & Son, Y. (2014). Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. *Global Change Biology*, 20(6), 2019–2030. <https://doi.org/10.1111/gcb.12512>

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) (5th ed.). Instituto de Geografía, UNAM. Guevara Romero, M. L., & Montalvo Vargas, R. (2015). Cambio de uso de suelo y vegetación derivados de la dotación de infraestructura: Sierra norte del Estado de Puebla. *Nova Scientia*, 7(13), 314–336. <https://doi.org/10.21640/ns.v7i13.374>

Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000, Serie VII. Conjunto Nacional (1st ed.) [Data set]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842360>

Jiang, H., Wang, S., Cao, X., Yang, C., Zhang, Z., & Wang, X. (2018). A shadow-eliminated vegetation index (SEVI) for removal of self and cast shadow effects on vegetation in rugged terrains. *International Journal of Digital Earth*, 12(9), 1013–1029. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1495770J>

Jordan, S. J., & Benson, W. H. (2015). Sustainable watersheds: Integrating ecosystem services and public health. *Environmental Health Insights*, 9(Suppl. 2), 1–7. <https://doi.org/10.4137/EHI.S19586>

Macías Domínguez, L. Á., Hernández González, M. H., Navarro Rodríguez, C., & Pérez-Vega, A. P.-V. (2023). Degradación de la vegetación y azolvamiento en presas periurbanas de zonas templadas de México: Contribuciones para su evaluación y prospección. *Jóvenes en la Ciencia*, 21, 1–12. <https://www.jovenesenlacienca.ugto.mx/index.php/jovenesenlacienca/article/view/3975>

Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3–20. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011252>

Nagendra, H., Southworth, J., & Tucker, C. (2003). Accessibility as a determinant of landscape transformation in Western



Honduras. *Landscape Ecology*, 18(2), 141–158.
<https://doi.org/10.1023/A:1024430026953>

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>

Sanabria Siles, N. J., Sandoval Gómez, M. R., & Dalence Martinic, J. S. (2023). Área de influencia aguas abajo de la presa La Cañada mediante series de tiempo de índices espectrales de vegetación (Periodo de estiaje 1990 - 2022). *Acta Nova*, 11(2), 105–118. <https://doi.org/10.35319/acta-nova.20233>

Simonit, S., & Perrings, C. (2013). Bundling ecosystem services in the Panama Canal watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(23), 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1112242110>

Tecuapetla-Gómez, I., Carbajal-Domínguez, A., & Montesinos-Chica, V. (2022). Clasificación de tendencias de NDVI en la península de Yucatán, México, de 2014 a 2020. *Investigaciones Geográficas*, (109), Article e60629. <https://doi.org/10.14350/rig.60629>

Teixeira Pinto, C., Jing, X., & Leigh, L. (2020). Evaluation analysis of Landsat level-1 and level-2 data products using in situ measurements. *Remote Sensing*, 12(16), Article 2597. <https://doi.org/10.3390/rs12162597>

Tucker, C. J., & Sellers, P. J. (1986). Satellite remote-sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395–1416. <https://doi.org/10.1080/01431168608948913>

United States Geological Survey (USGS). (2024). Landsat Collection 2 Level-2 Science Products [Data set]. USGS EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Vela Peláez, A. A., Navarro Martínez, M. A., Mendoza Briseño, M. A., Sánchez Sánchez, J. A., & Esparza Olguín, L. G. (2024). Análisis multitemporal de cambios en el NDVI en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(81), 160–186. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425>

Yang, H., Viña, A., Winkler, J., Chung, M. G., Huang, Q., Dou, Y., McShea, W. J., Songer, M., Zhang, J., & Liu, J. (2021). A global assessment of the impact of individual protected areas on preventing forest loss. *Science of The Total Environment*, 777, Article 145995. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145995>

Zamora Flores, A. (2012). Informes de inspección 2012 de la presa la Soledad. Comisión Federal de Electricidad.