

Estimación de la concentración de clorofila-a y turbidez con imágenes Sentinel-2 en la presa Cointzio, Michoacán, México

Estimation of chlorophyll-a and turbidity concentrations using Sentinel-2 imagery in the Cointzio dam, Michoacán, Mexico

Luisa Fernanda Chávez Zamora,* Rosaura Páez Bistrain,** Azucena Pérez-Vega,*** Alberto Gómez-Tagle Chávez,‡ Margarito Álvarez-Jara,¶ Roberto Iván Villalobos Martínez§ y Jean François Mas&

Recibido: 21/01/2026. Aceptado: 2/03/2026. Publicado: 1/04/2026.

Resumen. La percepción remota ofrece ventajas operativas, temporales y espaciales en el monitoreo ambiental, frente al muestreo tradicional, particularmente en la evaluación de la calidad del agua de reservorios como presas. Por lo

que en este estudio se evaluó el desempeño de 17 índices espectrales derivados de Sentinel-2 para la estimación indirecta de clorofila-a, transparencia, turbidez y sólidos suspendidos totales (SST) en la presa Cointzio, Michoa-

* Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria, Colonia Felicitas del Río, 58030. Morelia, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4309-289X>. Email: 2148192a@umich.mx

Área de Análisis y Modelado Espacial, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Colonia Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México.

** Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Colonia Ex Hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7019-1058>. C.P. 58190. Email: rpazzb@ciga.unam.mx

*** Departamento de Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato, sede Belén. Avenida Juárez No. 77, Colonia Centro, 36000, Guanajuato, Guanajuato, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9683-4207>. Email: azupv@ugto.mx

‡ Laboratorio de Ecohidrología y Suelos, Departamento de Ciencias de la Tierra, Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida San Juanito Itzicuaró S/N, Colonia Arboledas, 58330. Morelia, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7640-5205>. Email: alberto.gomez@umich.mx

¶ Desarrollo Sustentable, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera a Huecorio Km. 3, Huecorio, Pátzcuaro, 61614, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-5425>. Email: margarito.alvarez@uiim.edu.mx

§ Área de Análisis y Modelado Espacial, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Colonia Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8292-5153>. Email: roberto.villalobos.m@hotmail.com

& Área de Análisis y Modelado Espacial, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Colonia Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6138-9879>. Email: jfmas@ciga.unam.mx. Autor de correspondencia.

cán, México. Entre noviembre de 2023 y marzo de 2025 se recolectaron 92 muestras *in situ* y se procesaron 162 imágenes multispectrales con el paquete *waterquality* en lenguaje R. Se emplearon tres ventanas temporales según la coincidencia espaciotemporal entre índices y datos de campo: coincidencia exacta (0 días), desfase de 1-2 días y una combinada. Los análisis de la base combinada mostraron correlaciones significativas ($p < 0.0001$), destacando la correlación negativa entre transparencia y turbidez, así como entre transparencia y SST. Los índices *TurbBow06RedOverGreen* y *Be16NDTIblue* representaron eficazmente la transparencia. La clorofila-a mostró correlación con turbidez y transparencia, destacando el índice *Am092Bsub*. Se observó relación entre turbidez y SST, siendo los índices *Be16NDTIblue* y *TurbLath91RedOverBlue* los más representativos, así como también los mejores estimadores de SST. Estos resultados respaldan el uso de índices espectrales como herramientas eficaces en la estimación remota de parámetros clave de calidad del agua. Los hallazgos contribuyen al desarrollo de marcos metodológicos adaptables que pueden orientar el diseño de protocolos replicables, pero sujetos a calibraciones específicas para cada cuerpo de agua, que coadyuven en la toma de decisiones en políticas hídricas.

Palabras clave: calidad de agua, percepción remota, sólidos suspendidos, teledetección, transparencia.

Abstract. Compared to traditional sampling methods, remote sensing offers operational, temporal and spatial advantages in environmental monitoring, particularly in

INTRODUCCIÓN

En el escenario global actual, caracterizado por los efectos del cambio climático y la creciente presión sobre los recursos hídricos, el monitoreo de los cuerpos de agua ha adquirido una relevancia estratégica sin precedentes. Las presas, a pesar de ser estructuras artificiales, no deben considerarse únicamente como infraestructuras de almacenamiento, pues, al igual que otros cuerpos acuáticos, son ecosistemas complejos, dinámicos y vulnerables, cuyo equilibrio ecológico y calidad pueden verse alterados por múltiples factores, tanto antropogénicos como naturales. Además, la calidad del agua en estos sistemas repercute directamente en la salud pública, la producción agrícola, la biodiversidad y la economía (Macías-Domínguez *et al.*, 2023; Pech *et al.*, 2020; SEMARNAT, 2016).

No obstante, llevar a cabo monitoreos frecuentes y con alta resolución espacial sigue representando un desafío logístico y económico cuando se

the assessment of water quality in reservoirs and dams. This study therefore evaluated the performance of 17 spectral indices derived from Sentinel-2 imagery for indirectly estimating chlorophyll-a, transparency, turbidity and total suspended solids (TSS) in the Cointzio Dam in Michoacán, Mexico. Between November 2023 and March 2025, 92 *in situ* samples were collected, and 162 multispectral images were processed using the *waterquality* package in the R programming language. Three temporal windows were defined based on the spatiotemporal coincidence between the spectral indices and the field data: exact coincidence (0 days); a lag of 1–2 days, and a combined dataset. Analysis of the combined dataset revealed significant correlations ($p < 0.0001$), highlighting the negative correlations between transparency and both turbidity and TSS. The *TurbBow06RedOverGreen* and *Be16NDTIblue* indices effectively represented transparency. Chlorophyll-a showed correlations with turbidity and transparency, with the *Am092Bsub* index being particularly notable. A relationship was also observed between turbidity and TSS, with the *Be16NDTIblue* and *TurbLath91RedOverBlue* indices being the most representative and the best estimators of TSS. These findings contribute to the development of adaptable methodological frameworks that can guide the design of replicable protocols while remaining subject to specific calibrations for each body of water, thereby supporting decision-making in water policy.

Keywords: Water quality, remote sensing, suspended solids, teledetection, transparency.

depende exclusivamente de muestreos tradicionales *in situ* (Yang *et al.*, 2022). Ante estas limitaciones, la percepción remota se ha consolidado como una alternativa rápida, poderosa y accesible. Los avances en tecnología satelital permiten la detección indirecta de variables ópticas del agua, como pigmentos fotosintéticos, turbidez, transparencia y sólidos en suspensión, a través del análisis espectral de la radiación reflejada en la superficie (Chawla *et al.*, 2020; Fisher *et al.*, 2018; Zabaleta *et al.*, 2023). Uno de los primeros trabajos en México que explora estas posibilidades es el de Chacón-Torres (1989), quien utilizó imágenes SPOT-1 para evaluar la aplicación del análisis remoto en la estimación de parámetros de calidad del agua en el lago de Pátzcuaro, México.

Entre los satélites de libre acceso, Sentinel-2 destaca por disponer de productos con corrección atmosférica y alta resolución espacial, temporal y espectral. Diversas investigaciones han validado su utilidad para estimar parámetros como turbidez

y concentración de clorofila-a, usando índices espectrales y modelos empíricos. Por ejemplo, en el embalse de Palmar (Uruguay), Guigou (2022) demostró la utilidad de este enfoque para el seguimiento temporal de la turbidez, mientras que Zhan *et al.* (2022), en la laguna del Mar Menor (España), aplicaron relaciones espectrales como $(R560 + R705)/(R560 + R665)$ para clorofila-a y $R705 \cdot R705/R490$ para turbidez; también estimaron transparencia y sólidos suspendidos, logrando errores relativos inferiores al 11 %. Por su parte, Delegido *et al.* (2019) evaluaron y calibraron modelos de percepción remota para analizar la profundidad del disco de Secchi y la turbidez en embalses de la Comunidad Valenciana, reforzando la aplicabilidad de este enfoque.

Por su parte, el desarrollo de interfaces de programación de aplicaciones (API), como el Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE), junto con el uso de herramientas de código abierto como el ambiente de programación R y paquetes especializados como *waterquality* (Johansen *et al.*, 2019; Karaman, 2026), han facilitado el procesamiento automatizado de grandes volúmenes de datos satelitales. Estas tecnologías permiten aplicar filtros específicos, como la delimitación de áreas de interés, la selección de bandas y el nivel de nubosidad, así como ejecutar índices espectrales de forma reproducible y escalable. Con ello, se optimiza el proceso de adquisición de datos, se minimizan los requerimientos de almacenamiento local y se agiliza el monitoreo ambiental.

En el estado de Michoacán, México, existen oficialmente 18 presas; entre ellas se encuentra la presa Cointzio, que abastece de agua a la ciudad de Morelia y a los campos agrícolas del distrito de riego 020 (Morelia) (OOAPAS, 2017; CONAGUA, 2021, 2022).

Esta investigación se enfoca principalmente en la estimación de clorofila-a y turbidez mediante campañas de muestreo en campo y el uso de teledetección en la presa Cointzio.

OBJETIVOS

Analizar la relación entre los parámetros de transparencia, turbidez, concentración de clorofila-a y sólidos suspendidos totales, obtenidos de mediciones en campo y laboratorio, y los índices espectrales derivados de percepción remota en la presa Cointzio, con la finalidad de establecer protocolos que permitan un mayor uso de la teledetección en la evaluación de la calidad del agua en reservorios.

METODOLOGÍA

Descripción del sitio de estudio

La presa Cointzio está ubicada en el estado de Michoacán de Ocampo, México, al sur de la ciudad de Morelia. Se encuentra en la microcuenca Estación Jacuaro (colonia La Reunión). Su cortina se localiza en las coordenadas 19°37'47.06" de latitud norte y 101°15'33.52" de longitud oeste (FIRCO, 2005; INEGI, 2019) (Figura 1). Este cuerpo artificial, cuya construcción se terminó en 1939, forma parte de la Región Hidrológica Administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico. Su cauce principal es el río Grande de Morelia (CONAGUA, 2021). Tiene una capacidad de almacenamiento de 79.233 millones de metros cúbicos a nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME), con una elevación de 2,001.32 metros sobre el nivel del mar (msnm). Además, el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) permite un almacenamiento de 68.52 Mm³ a una elevación de 1,999.47 msnm, mientras que el Nivel de Aguas Mínimas de Operación (NAMINO) presenta 0.907 Mm³ (Rojas-Flores, 2019; CONAGUA, 2022).

Los usos del agua de la presa Cointzio son irrigación (riego agrícola) y abastecimiento público (distribución de agua potable a través de redes de suministro). Representa hasta un 37 % del agua potable anual para los habitantes de la ciudad de Morelia (CONAGUA, 2021; 2022; OOAPAS, 2017).

La microcuenca Estación Jacuaro presenta una diversidad de características físicas relevantes para su análisis ambiental. De acuerdo con la capa de uso

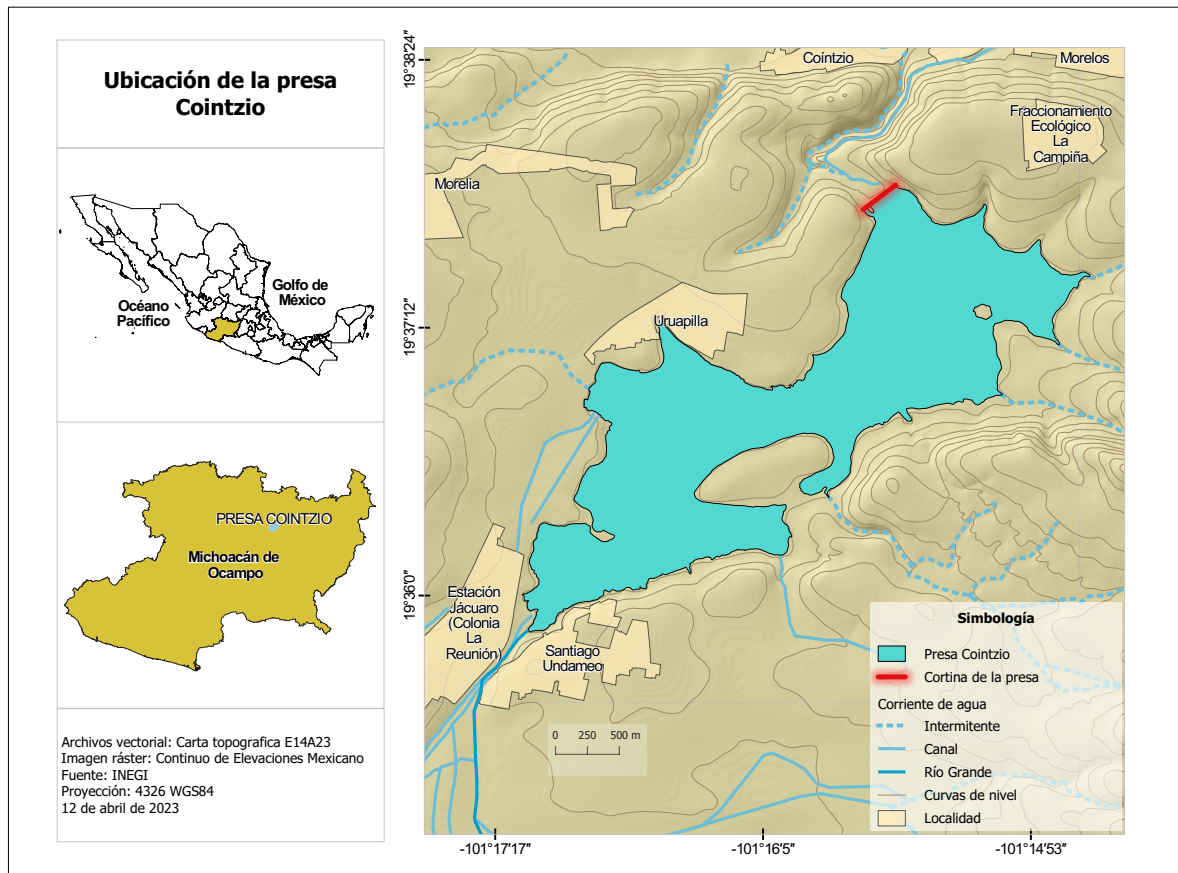


Figura 1. Ubicación de la presa Cointzio, en el estado de Michoacán, México.

de suelo y vegetación serie VII (INEGI, 2021), están presentes nueve categorías, siendo la agricultura de temporal anual la más común con 1,884 hectáreas (ha), mientras que el bosque de pino ocupa apenas 3.2 ha (Figura 2). En cuanto a los tipos de suelo, el INEGI reporta siete clases distintas, donde el acrisol órtico domina con 1,677 ha y el feozem háplico es el menos representado con 117 ha (INEGI, 2005).

El clima predominante corresponde a la clasificación C(w1), templado subhúmedo con lluvias de verano, que presenta entre el 5 % y el 10.2 % de precipitación anual. En menor medida, también se encuentra la zona C(w2) (INEGI, 2008). Geológicamente, la microcuenca está conformada por rocas ígneas extrusivas de origen cuaternario y neógeno (INEGI, 1998).

Trabajo de campo

Se realizaron nueve campañas de muestreo en la presa Cointzio, utilizando una embarcación sin motor para recorrer el vaso y recolectar muestras de agua superficial de forma aleatoria. Se muestreó entre noviembre de 2023 y marzo de 2025, evitando los días muy nublados o con lluvia y buscando coincidir con el paso del satélite Sentinel-2. La planificación de coincidencia satelital y la campaña de muestreo se realizó con la herramienta interactiva *sentiboard*, mediante la cual se consultaron los pases orbitales con las próximas adquisiciones.

Se realizaron 46 tomas de muestra, ubicadas en 36 puntos distribuidos a lo largo del embalse. De este conjunto, 20 tomas correspondieron a 13 puntos que coincidieron con fechas de adquisición del satélite Sentinel-2 (Figura 3).

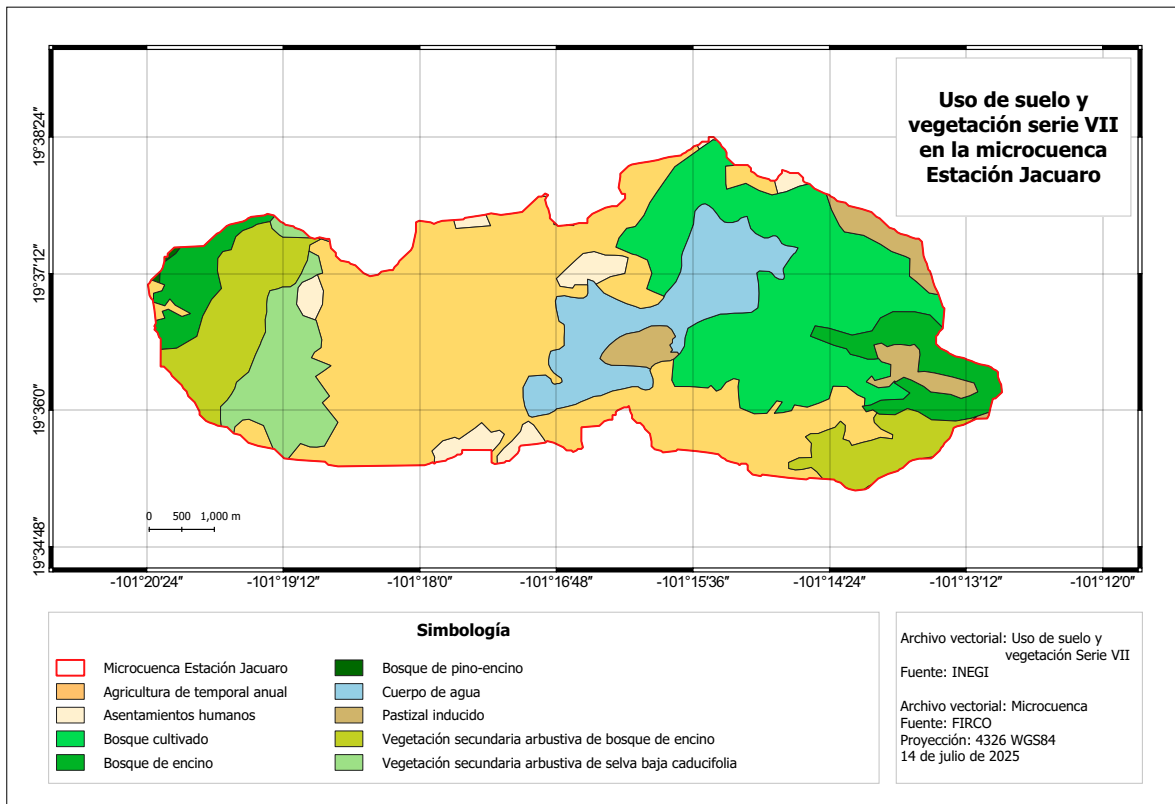


Figura 2. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca donde se encuentra la presa Cointzio, de acuerdo con INEGI Serie VII.

La georreferenciación de los puntos en campo se llevó a cabo con el apoyo de un GPS Montana 650, marca Garmin, y la caracterización fisicoquímica en campo se realizó empleando un equipo multiparamétrico HQ40d, marca HACH, y un disco de Secchi. Se registró en cada toma de muestra: fecha, hora, coordenadas, pH, oxígeno disuelto, temperatura y transparencia.

Las colectas de agua destinadas a la estimación de la concentración de clorofila-a, sólidos suspendidos totales (SST), alcalinidad, dureza, turbidez, conductividad eléctrica y pH se obtuvieron a 10 cm de profundidad con una botella Van Dorn de tres litros, cuyo contenido fue transferido a recipientes herméticos previamente etiquetados. Estas fueron almacenadas inmediatamente en una hielera con elementos refrigerantes, protegidas de la luz solar, para preservar su integridad y posteriormente trasladadas al Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua (LASA), en el Centro de Investigación en

Geografía Ambiental (CIGA), donde se realizaron los análisis correspondientes.

Procesamiento de muestras en laboratorio

Las muestras fueron registradas al llegar al laboratorio y procesadas inmediatamente para los parámetros que así lo requerían. Posteriormente, fueron refrigeradas a 4 °C para su conservación y análisis.

La determinación de clorofila-a se realizó mediante el método de Holm-Hansen y Riemann (1978), para lo cual se utilizaron filtros Whatman GF/F 1825-047 en la retención, y se realizó la extracción con filtros tipo HVPL de 0.45 μm y metanol en lugar de acetona (Bursztyn Fuentes *et al.*, 2022), al 90 % y a temperatura ambiente, seguida de lectura en un espectrofotómetro marca JENWAY modelo 6405, a 665 y 750 nm.

La turbidez se evaluó conforme al método descrito en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001b),

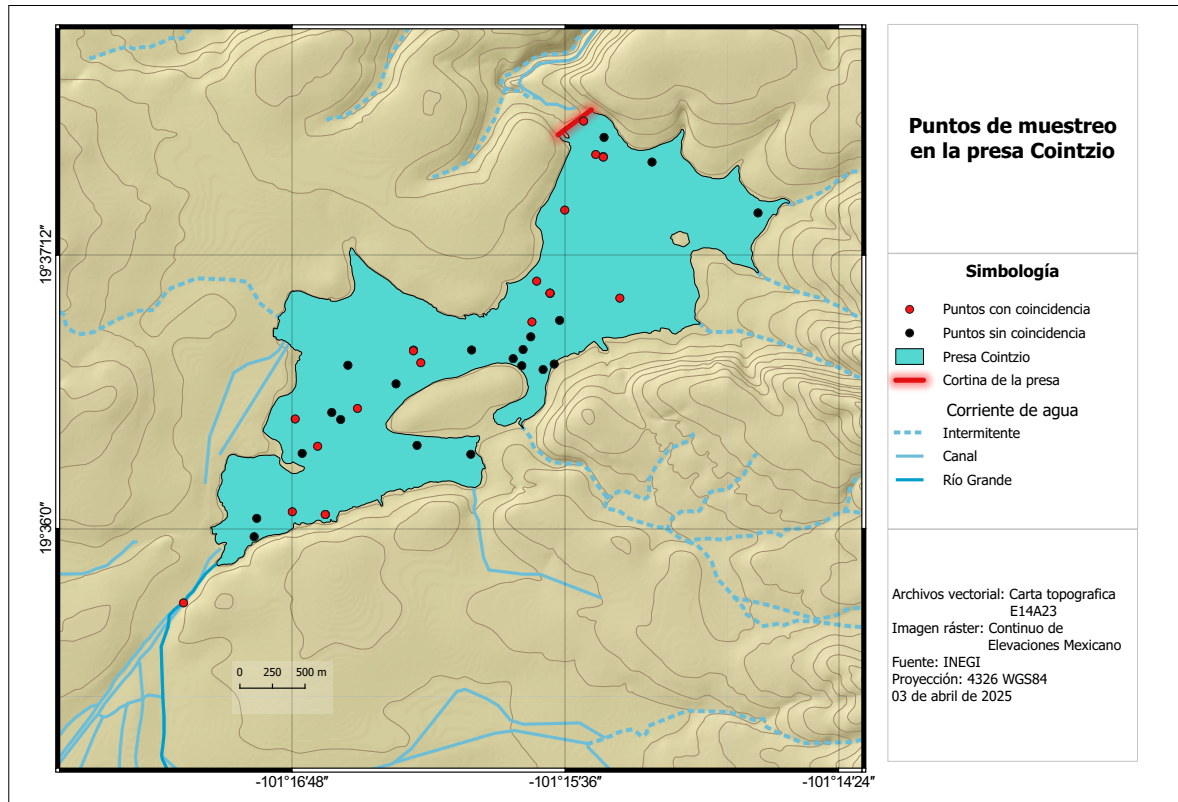


Figura 3. Puntos de muestreo en la presa Cointzio, en el estado de Michoacán.

mediante un turbidímetro marca HACH modelo 2100N, mientras que los SST se cuantificaron según el método de la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2015), por diferencia de masa en filtros PRAT DUMAS 875, antes y después del secado en horno a 105 °C.

Los parámetros de conductividad eléctrica y pH fueron determinados siguiendo los métodos de las Normas Oficiales Mexicanas NMX-AA-093-SCFI-2018 (Secretaría de Economía, 2018) y NMX-AA-008-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2016), respectivamente, mediante un conductímetro marca OAKTON modelo CON 510 y un potenciómetro marca Metrohm modelo 827. La alcalinidad se midió empleando un titulador automático marca Metrohm modelo 848 Titrino Plus, con base en la metodología descrita en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001a), y la dureza total se estimó conforme a NOM-127-SSA1-2021

(Secretaría de Salud, 2021), por titulación con EDTA utilizando indicador negro de eriocromo T en medio alcalino.

Trabajo de gabinete

El análisis de gabinete se llevó a cabo mediante herramientas libres de código abierto que permiten el procesamiento espacial, estadístico y espectral. Se emplearon el Sistema de Información Geográfica QGIS (v. 3.28.10) y el lenguaje de programación R (v. 4.3.2), este último para automatizar procesos de descarga, filtrado, análisis de imágenes y cálculo de índices espectrales mediante el paquete especializado *waterquality* (Johansen *et al.*, 2019; QGIS Development Team, 2023).

Se descargaron capas de Sentinel-2A a una resolución de 10 m/píxel. Esto se realizó de manera sistemática y automatizada mediante la implementación de la API CDSE en entorno R, y se aplicaron filtros rigurosos para asegurar la calidad

de los datos:

1. Delimitación espacial: restricción al área de interés (ROI). Coordenadas UTM (xmin = 259,797; xmax = 265,102; ymin = 2,168,206; ymax = 2,172,704).
2. Rango temporal: del 1 de enero de 2023 al 20 de junio de 2025.
3. Condiciones atmosféricas: se excluyeron imágenes con nubosidad superior al 70 %.
4. Zona UTM: únicamente zona 14.
5. Selección por *sourceId*: se conservaron los productos más recientes en fechas repetidas.

Se descargaron tres productos raster para cada fecha única:

1. Imagen MSL o multispectral (B1 a B8A).
2. Capa de clasificación temática (SCL, por sus siglas en inglés: *Scene Classification Layer*).

3. Capa de probabilidad de nubosidad (CLD, por sus siglas en inglés: *Cloud Probability Layer*).

Posteriormente, en una etapa de preprocesamiento basada en las bandas auxiliares SCL y CLD, se generaron máscaras de nubosidad y de cuerpo de agua. Estas máscaras se aplicaron a las imágenes MSL con un umbral del 50 % de nubosidad, lo que permitió conservar información en zonas parcialmente cubiertas.

Las imágenes multispectrales previamente enmascaradas se procesaron con el paquete *waterquality* para el cálculo de los 17 índices específicos para Sentinel-2. El conjunto incluyó ocho índices orientados a la estimación de clorofila-a y nueve índices para turbidez (Tabla 1). Este procesamiento de índices espectrales se realizó de forma automatizada, lo que permitió generar una base de datos robusta para la correlación con mediciones *in situ*, modelado estadístico y validación empírica.

Con el objetivo de vincular los índices espec-

Tabla 1. Fórmulas que hacen referencia a las longitudes de onda usadas en cada índice y su autor, a partir de la documentación del paquete *waterquality*.

#	Índice para Chl-a	Fórmula	Autor
1	Al10SABI	$(w857 - w644) / (w458 + w529)$	Alawadi, 2010.
2	Am092Bsub	$(w681 - w665)$	Amin, et al., 2009.
3	Be16FLHblue_S2	$(w529) - (w644 + (w458 - w644))$	Beck et al., 2016.
4	Be16FLHviolet_S2	$(w529) - (w644 + (w429 - w644))$	Beck et al., 2016.
5	Be16NDTlblue	$(w658 - w458) / (w658 + w458)$	Beck et al., 2017.
6	Be16NDTlviolet	$(w658 - w444) / (w658 + w444)$	Beck et al., 2017.
7	Gi033BDA	$((1 / w672) - (1 / w715)) * (w757)$	Gitelson et al., 2003.
8	MM12NDCI	$(w715 - w686) / (w715 + w686)$	Mishra y Mishra, 2012.
#	Índice para Turbidez	Fórmula	Autor
1	TurbBe16GreenPlusRedBothOverViolet	$((w558 + w658) / w444)$	Beck et al., 2017.
2	TurbBe16RedOverViolet	$(w658 / w444)$	Beck et al., 2017.
3	TurbBow06RedOverGreen	$(w658 / w558)$	Bowers & Binding, 2006.
4	TurbChip09NIROverGreen	$(w857 / w558)$	Chipman et al., 2009.
5	TurbDox02NIRoverRed	$(w857 / w658)$	Doxaran et al., 2002.
6	TurbFrohn09GreenPlusRedBothOverBlue	$((w558 + w658) / w458)$	Frohn & Autrey, 2009.
7	TurbHarr92NIR	$(w857)$	Schiebe et al., 1992.
8	TurbLath91RedOverBlue	$(w658 / w458)$	Lathrop et al., 1991.
9	TurbMoore80Red	$(w658)$	Moore, 1980.

trales obtenidos mediante imágenes Sentinel-2 con los datos recolectados en campo, se realizó un proceso automatizado de extracción de valores por coordenada en 36 sitios georreferenciados de muestreo. Estos puntos corresponden a las ubicaciones donde se realizaron mediciones *in situ* y abarcan el mismo periodo temporal que las imágenes satelitales consideradas (enero de 2023 a junio de 2025).

En cada imagen procesada, se identificaron los píxeles que coincidían espacialmente con las coordenadas de los puntos de muestreo. Sobre estos píxeles se extrajeron los valores correspondientes a los 17 índices espectrales calculados, junto con la fecha exacta de adquisición de la imagen. Este emparejamiento temporal es clave para garantizar una comparación precisa entre datos satelitales y mediciones en campo.

El procedimiento se implementó con funciones automatizadas desarrolladas en R, lo que permitió una extracción eficiente de miles de valores espectrales. Estos datos fueron organizados en matrices por fecha y punto, y constituyen la base para los análisis estadísticos de correlación, ajuste de modelos y validación cuantitativa entre ambas fuentes de información.

Compaginación de bases de datos

Con el propósito de vincular las observaciones *in situ* con los índices espectrales derivados de percepción remota, se integraron dos fuentes de información georreferenciada: 1) la base de datos generada a partir de muestras recolectadas en campo y procesadas en laboratorio, y 2) los valores de los índices espectrales calculados a partir de imágenes Sentinel-2. Ambas bases contienen identificadores únicos de muestreo, coordenadas geográficas y fechas asociadas a cada observación.

Dado que la adquisición satelital no coincide en todos los casos con las fechas de muestreo en campo, se aplicó una estrategia de emparejamiento flexible mediante el método *fuzzy join*. Esta técnica permitió vincular registros que compartían el mismo ID espacial y cuyos valores de fecha se ubicaban dentro de un rango de ± 5 días. En los casos con múltiples coincidencias, se seleccionó automáticamente el par con menor diferencia

temporal, asegurando así la mayor proximidad posible entre ambas fuentes.

A partir de la base de datos combinada que vinculó todos los registros de laboratorio con todos los índices espectrales derivados de percepción remota, se crearon dos subconjuntos diferenciados según la proximidad temporal entre las fechas de muestreo y las de adquisición satelital. El primer subconjunto incluye únicamente los registros cuyo muestreo en campo coincidió exactamente con la fecha de adquisición de la imagen Sentinel-2, es decir, con 0 días de diferencia. El segundo subconjunto contiene los registros sin coincidencia exacta, en los que se identificó una diferencia temporal de ± 2 días.

Análisis de correlación

Se aplicó un análisis de correlación para cada combinación de variable de campo e índice espectral, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (r), adecuado para evaluar relaciones lineales entre variables continuas (Zar, 1996). Se calcularon indicadores estadísticos complementarios: 1) número de observaciones válidas (n), 2) coeficiente de determinación (R^2), 3) valor p de significancia estadística, 4) error cuadrático medio (RMSE) y 5) parámetros de ajuste lineal simple (LM).

El análisis se ejecutó en entorno R mediante funciones automatizadas que permitieron procesar sistemáticamente todas las combinaciones entre parámetros ópticos e índices espectrales. Al mismo tiempo, se generaron gráficos exploratorios para cada par de variables, con el fin de facilitar la visualización de tendencias, dispersión

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros evaluados en campo y laboratorio

Durante el periodo de muestreo comprendido entre noviembre de 2023 y marzo de 2025 se colectaron 92 muestras (incluyendo duplicados), que permitieron caracterizar las propiedades fisicoquímicas del cuerpo de agua.

La base de datos con la información de las muestras conformó el primer insumo para los análisis estadísticos (<https://drive.google.com/drive/folders/1-Z0cMKcg7oQ2EPepFndSythiDK>

[7r1LQK?usp=drive_link](#)).

Los muestreos se realizaron en cinco periodos distintos: 15 y 17 de noviembre de 2023, 8 de diciembre de 2023, 14 y 18 de abril de 2024, 12 de junio de 2024 y una campaña intensiva entre el 24 y el 27 de marzo de 2025. Esta distribución temporal permitió capturar condiciones estacionales contrastantes, correspondientes a la temporada seca y el inicio del periodo de lluvias, lo cual se reflejó en la variabilidad observada en los parámetros fisicoquímicos evaluados. Prat *et al.* (2007; 2011) ya habían reportado factores que afectaban la erosión arrastrada hacia la presa Cointzio, variables según la temporada de lluvias, aunque también señalaban que los eventos de lluvia no son tan erosivos; asimismo, reportaron que los sedimentos, al ser arcillas, no se acumulaban, sino que eran transportados. Por su parte, Susperregui *et al.* (2007) señalaron que se da un intercambio total de agua en la presa Cointzio, además de una alternancia de fases: entre junio y diciembre de tipo fluvial y el resto del año de tipo lacustre, así como una alta turbidez que disminuye en mayo.

En las mediciones en campo se encontró que el pH fluctuó entre un mínimo de 7.49 y un máximo de 9.06, con una media de 8.33, lo que indica condiciones ligeramente alcalinas. Por su parte, el oxígeno disuelto registró concentraciones entre un mínimo de 3.35 mg/L y un máximo de 8.43 mg/L, con una media de 6.48 mg/L; mientras que la temperatura del agua osciló entre 18.80 °C y 25.70 °C, con una media de 22.92 °C. La transparencia mostró valores entre 0.10 m y 1.15 m, con una media de 0.71 m, lo que sugiere que la presa Cointzio podría clasificarse como mesotrófica (Delegido *et al.*, 2019).

En el laboratorio, la clorofila-a presentó valores entre 0.79 µg/L y 27.35 µg/L, con una media de 10.54 µg/L. La turbidez varió entre un mínimo de 3.89 UNT y un máximo de 44.40 UNT, con una media de 15.05 UNT; los SST oscilaron entre 3.20 mg/L y 64.80 mg/L, con una media de 16.37 mg/L. La conductividad eléctrica presentó valores entre 80.80 µS/cm y 199.30 µS/cm, con una media de 144.77 µS/cm. La alcalinidad osciló entre 74.50 mg/L y 115.28 mg/L, con una media de 87.51 mg/L, y la dureza total entre 62.00 mg/L

y 94.00 mg/L de CaCO₃, con una media de 71.72 mg/L.

Estos parámetros fisicoquímicos ofrecen una visión integral del estado ambiental del cuerpo de agua durante el periodo de estudio. La temperatura y el oxígeno disuelto reflejan condiciones compatibles con entornos templados y niveles adecuados de oxigenación. La transparencia y la turbidez, al mostrar niveles variables, sugieren fluctuaciones en la carga de sedimentos y la productividad, posiblemente influidas por eventos de lluvia, escorrentía o actividad biológica, como los indicados por Prat *et al.* (2007) en cuanto a la erosión en cada temporada de lluvias; e igualmente Susperregui *et al.* (2007), reportaron dinámicas de tipo fluvial y lacustre.

La clorofila-a puede considerarse un indicador directo de biomasa fitoplanctónica, lo que apunta a una productividad moderada pero dinámica (Tyler *et al.*, 2022). No obstante, los estudios existentes en la presa Cointzio han analizado principalmente coliformes y señalan contaminación microbiológica, sin identificar otras especies potencialmente involucradas (Calix-Pacheco *et al.*, 2018).

Por su parte, los valores de pH, conductividad eléctrica, dureza y alcalinidad reflejan una química del agua que favorece la estabilidad ecológica y una adecuada capacidad de amortiguamiento frente a perturbaciones externas, dentro de los límites aceptables establecidos por las Normas Mexicanas correspondientes (Secretaría de Economía, 2000, 2001a, 2001b, 2005, 2016; Secretaría de Salud, 2021). Finalmente, los SST y la clorofila-a como materia suspendida complementan el diagnóstico, evidenciando la presencia variable de partículas que influyen en la calidad visual, la penetración de luz y los procesos biogeoquímicos en la columna de agua (Batina *et al.*, 2025).

Volúmenes de datos descargados y procesados

Se descargaron 486 archivos Sentinel-2 correspondientes a tres años consecutivos (2023–2025), organizados en tres categorías: imágenes multiespectrales (MSI), máscaras de clasificación de escena (SCL) y máscaras de cobertura nubosa (CLD). Se obtuvieron para 2023, 192 archivos (64 por categoría), para 2024 un total de 186 archivos (62 por categoría), y para el primer semestre de 2025

se descargaron 108 archivos (36 por categoría). Posteriormente se enmascararon y procesaron con el paquete *waterquality* un total de 162 imágenes multiespectrales. Los índices procesados incluyeron los ocho orientados a la estimación de clorofila-a y los nueve asociados a turbidez. La base de datos espectral resultante constituyó el segundo insumo para los análisis estadísticos, al integrarse con la información de laboratorio y campo. Esta fusión permitió generar una matriz de datos compaginada entre las fechas de muestreo y los valores correspondientes de los índices espectrales (https://drive.google.com/drive/folders/1-Z0cMKcg7oQ2EPepFndSythiDK7r1LQK?usp=drive_link).

Relación entre parámetros de laboratorio e índices espectrales

Los análisis de correlación revelaron asociaciones significativas entre los parámetros fisicoquímicos - transparencia, clorofila-a, turbidez y SST - y distintos índices espectrales derivados de imágenes Sentinel-2.

La transparencia presentó correlaciones inversas muy altas con turbidez ($r = -0.9165$, $R^2 = 0.8401$) y SST ($r = -0.8522$, $R^2 = 0.7263$), y fue representada de manera efectiva por los índices Be16NDTlblue ($r = -0.7839$, $R^2 = 0.6145$) y TurbBow06RedOverGreen ($r = -0.9066$, $R^2 = 0.8219$), especialmente en fechas con emparejamiento exacto (Tabla 2).

La clorofila-a mostró relaciones significativas con la turbidez ($r = 0.7098$, $R^2 = 0.5039$) y transparencia ($r = -0.8318$, $R^2 = 0.6919$), siendo más altas en registros con diferencia de 1-2 días ($r = 0.7925$ y -0.8666 , respectivamente), lo cual podría ser resultado del desfase en tiempo y espacio, debido a que las condiciones del agua pueden cambiar incluso en horas, y a lo que habría que agregar que la muestra en campo se obtiene de manera prácticamente puntual, mientras que la información espectral se extrae usando información de un pixel de 10 metros por lado, con lo que se cubre un área mayor que puede tener condiciones distintas (Delegido *et al.*, 2019). Entre los índices, destacan Am092Bsub y TurbMoore80Red, ambos con $r > 0.72$ y $R^2 > 0.51$ en todos los casos evaluados (Tabla 2).

En el caso de la turbidez, se observó una

correlación muy fuerte con la transparencia ($r = -0.9165$, $R^2 = 0.8401$) y SST ($r = 0.8943$, $R^2 = 0.7998$) cuando la diferencia temporal ha sido nula. Estos valores decrecen ligeramente en la base combinada, pero se mantienen elevados ($r = -0.8791$ y 0.8344 , respectivamente), lo que sugiere consistencia en la respuesta espectral. Entre los índices espectrales, destacan Be16NDTlblue ($r = 0.7571$, $R^2 = 0.5732$) y TurbLath91RedOverBlue ($r = 0.7831$, $R^2 = 0.6132$) en registros con 0 días de diferencia (Tabla 2).

Los valores de SST muestran asociaciones consistentes con turbidez ($r = 0.8943$, $R^2 = 0.7998$), transparencia ($r = -0.8522$, $R^2 = 0.7263$) y los índices TurbLath91RedOverBlue y Be16NDTlblue, con r superiores a 0.79 y R^2 por encima de 0.63 cuando la diferencia temporal ha sido nula (Tabla 2).

En conjunto, los resultados evidencian que las correlaciones más sólidas se obtienen cuando la fecha de muestreo coincide exactamente con la fecha de sobrepaso del satélite, aunque algunas relaciones se conservan en los rangos de ± 2 días. Esto respalda la utilidad de estos índices espectrales como estimadores de calidad del agua, especialmente para variables ópticamente activas como turbidez y clorofila-a. De manera particular, aquellos cuyo valor de correlación (r) fuera igual o superior a 0.75-0.8 pueden ser considerados robustos (Macías Domínguez *et al.*, 2023; Sòria-Perpinyà *et al.*, 2019).

Relación entre turbidez y el índice espectral TurbLath91RedOverBlue

Con base en los resultados de correlación que integran todas las observaciones emparejadas —incluyendo aquellas con 0 y con 1-2 días de diferencia respecto a la fecha de adquisición satelital— se construyó la gráfica de correlación de Pearson entre la turbidez del agua (*turbidez_unt*) y el índice espectral TurbLath91RedOverBlue, seleccionado como el más representativo entre los nueve índices evaluados para esta variable. El análisis consideró 60 registros emparejados, provenientes de siete de las nueve campañas de muestreo realizadas. El valor del coeficiente de correlación de Pearson muestra una asociación positiva fuerte entre ambas

Tabla 2. Correlación entre variables evaluadas en laboratorio e índices derivados de teledetección.

Variable dependiente	0 días de diferencia					1 a 2 días de diferencia					Datos combinados (todos los días)					
	N_obs	Pearson_r	LM_R2	RMSE	N_obs	Pearson_r	LM_R2	RMSE	N_obs	Pearson_r	LM_R2	RMSE	N_obs	Pearson_r	LM_R2	RMSE
chl_a_µg_l	36	0.7098	0.5039	8.0816	31	0.7925	0.628	2.5822	67	0.6498	0.4222	6.7654				
	30	-0.9165	0.8401	4.8322	16	-0.9119	0.8316	1.9674	46	-0.8791	0.7729	4.8511				
transparencia_m	37	0.8943	0.7998	5.0646	32	0.5729	0.3282	3.4201	69	0.8344	0.6963	4.835				
	32	0.7571	0.5732	7.7043	28	0.773	0.5975	2.7377	60	0.745	0.555	6.0879				
turbidez_unt	32	0.7831	0.6132	7.3345	28	0.7649	0.5851	2.7796	60	0.7749	0.6005	5.7677				
	36	0.7098	0.5039	3.2807	31	0.7925	0.628	2.5137	67	0.6498	0.4222	3.6224				
transparencia_m	31	-0.8318	0.6919	3.3011	18	-0.8666	0.751	3.7088	51	-0.8269	0.6838	3.746				
	36	0.5153	0.2655	3.9916	43	0.2927	0.0857	3.7698	79	0.3586	0.1286	4.5001				
chl_a_µg_l	32	0.717	0.5141	4.2078	39	0.6884	0.4738	3.7133	71	0.7237	0.5238	4.0201				
	32	0.783	0.6131	3.755	39	0.8092	0.6548	3.0077	71	0.6375	0.4064	4.4882				
TurbMoore80Red	30	-0.9165	0.8401	0.1043	16	-0.9119	0.8316	0.0693	46	-0.8791	0.7729	0.1127				
	31	-0.8318	0.6919	0.1698	18	-0.8666	0.751	0.1202	51	-0.8269	0.6838	0.1655				
transparencia_m	30	-0.8522	0.7263	0.1365	16	-0.8388	0.7036	0.0919	46	-0.8072	0.6515	0.1396				
	30	-0.7839	0.6145	0.1882	14	-0.9219	0.8499	0.1031	44	-0.8083	0.6534	0.1726				
Bel6NDT1blue	30	-0.9066	0.8219	0.1279	14	-0.8358	0.6986	0.1461	44	-0.8441	0.7125	0.1572				
	37	0.8943	0.7998	6.2208	32	0.5729	0.3282	5.5696	69	0.8344	0.6963	6.2051				
turbidez_unt	36	0.5153	0.2655	12.0764	43	0.2927	0.0857	8.0475	79	0.3586	0.1286	10.6131				
	30	-0.8522	0.7263	7.9727	16	-0.8388	0.7036	3.7032	46	-0.8072	0.6515	7.6901				
transparencia_m	31	0.7979	0.6366	8.9992	38	0.1393	0.0194	8.5507	69	0.6153	0.3786	9.404				
	31	0.8321	0.6923	8.2804	38	0.1243	0.0155	8.5678	69	0.6563	0.4307	9.0011				
TurbLath91RedOverBlue	31	0.8321	0.6923	8.2804	38	0.1243	0.0155	8.5678	69	0.6563	0.4307	9.0011				

variables ($r = 0.775$), lo que pone en evidencia la sensibilidad del índice ante variaciones en los niveles de turbidez registrados en campo. El error cuadrático medio ($RMSE = 5.768$) indicó que el modelo logró capturar con precisión la dispersión observada en los datos, superando significativamente el desempeño de una estimación basada en la media. La significancia estadística del modelo lineal ($p\text{-value} = 3.69 \times 10^{-13}$) respalda la solidez del ajuste (Figura 4). Estos resultados perfilan al índice TurbLath91RedOverBlue como una herramienta espectral robusta para la estimación indirecta de la turbidez en cuerpos de agua con elevada actividad óptica.

Relación de la turbidez con las variables transparencia y SST

La correlación entre turbidez y transparencia resultó negativa, con un valor de $r = -0.879$ (Figura 5), lo que sugiere que niveles más altos de turbidez se asocian con una menor penetración de la luz en la columna de agua, de manera similar a lo observado por Delegido *et al.* (2019), quienes también señalan que se trata de un comportamiento reportado por otros autores. Por el contrario, la turbidez presentó una correlación positiva con los SST, de acuerdo con el coeficiente de Pearson ($r = 0.834$) (Figura

6), lo que indica que, a medida que aumenta la concentración de partículas en suspensión, también lo hace la turbidez. Estos resultados son consistentes con el comportamiento físico esperado en ecosistemas acuáticos, donde una mayor carga particulada reduce la transparencia y eleva la turbidez, ya que las partículas suspendidas dispersan y absorben la luz (Tyler *et al.*, 2022). En conjunto, estas relaciones fortalecen la interpretación de la turbidez como un buen indicador indirecto tanto del contenido de sólidos como de la transparencia del agua.

Relación entre el índice espectral Am092Bsub y clorofila

La relación entre el índice espectral Am092Bsub y las concentraciones de clorofila-a ($chl_a_µg_l$) se analizó usando las observaciones emparejadas con diferencias de 0 y 1-2 días respecto a la adquisición satelital, ya que fue identificado como el más representativo para esta variable. El análisis incluyó 71 registros, recopilados durante ocho de las nueve campañas de muestreo realizadas entre 2023 y 2025. El coeficiente de Pearson ($r = 0.724$) indica una correlación positiva fuerte y consistente entre ambas variables, lo que sugiere que el índice responde adecuadamente al

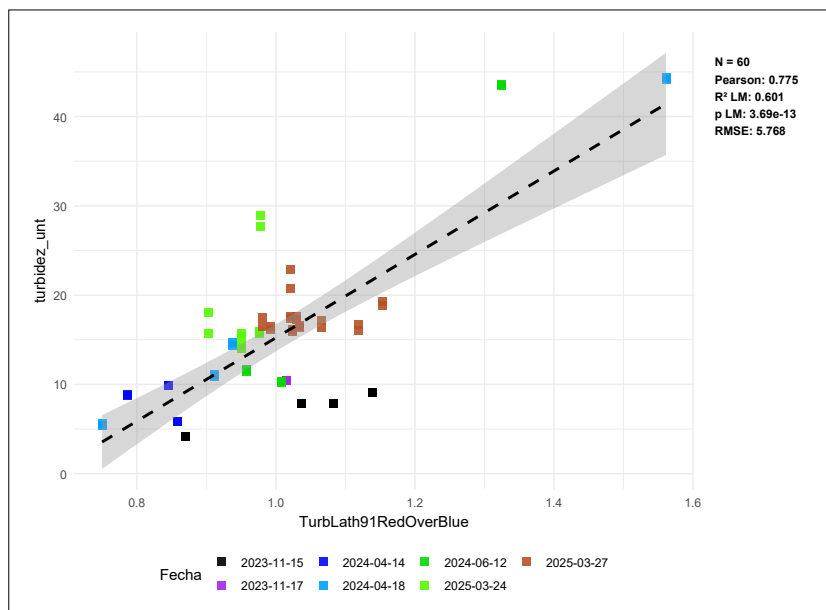


Figura 4. Correlación entre el índice espectral TurbLath91RedOverBlue y turbidez para 60 muestras de siete fechas distintas.

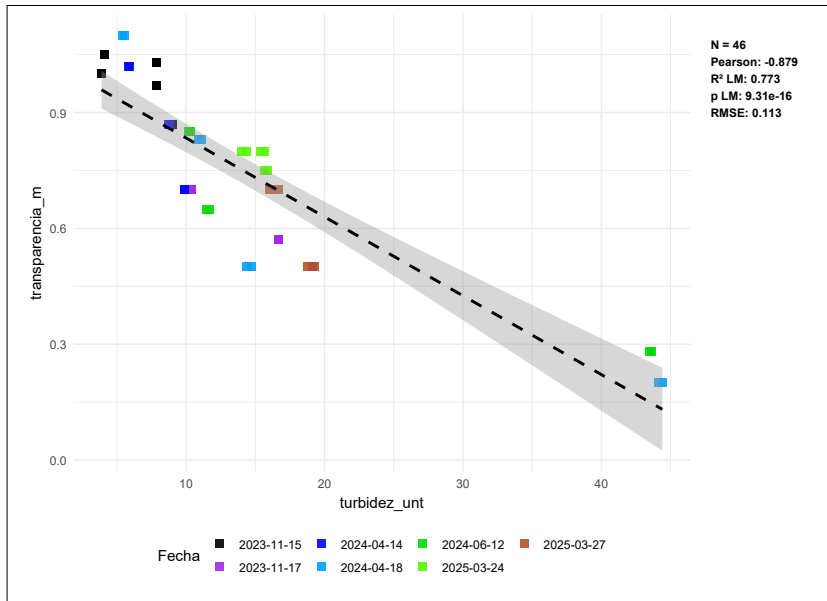


Figura 5. Correlación entre turbidez y transparencia para 46 muestras en siete fechas.

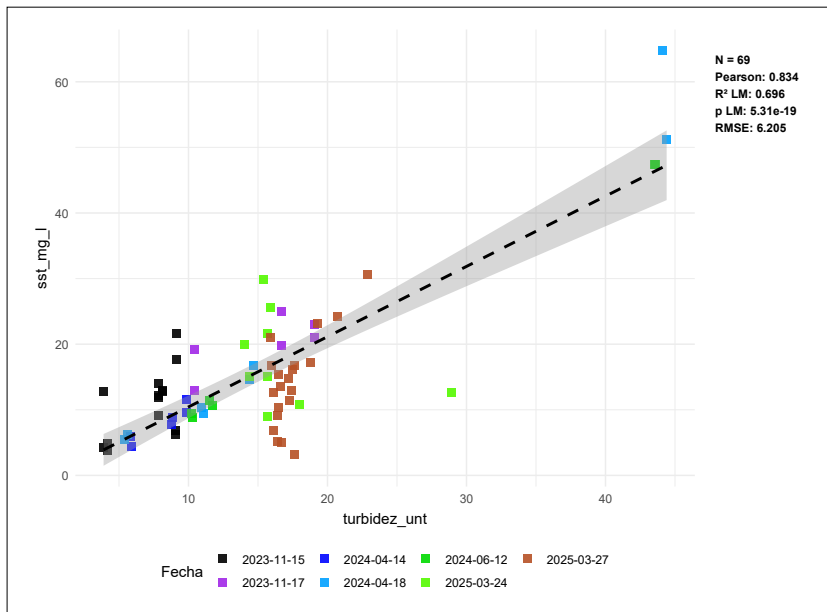


Figura 6. Correlación entre turbidez y sólidos suspendidos totales para 69 muestras en siete fechas.

incremento de biomasa fitoplanctónica detectada en laboratorio. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.524$) señala que el modelo explica el 52.4 % de la variabilidad en los datos observados, mientras que el error cuadrático medio ($RMSE = 4.02$) confirma su capacidad predictiva bajo condiciones espectrales y ambientales favorables, como poco movimiento por el viento y escaso efecto espejo (Figura 7).

Relación de clorofila con las variables transparencia y SST

Se identificó una correlación negativa entre la concentración de clorofila-a y la transparencia del agua (*transparencia_m*), con un coeficiente de Pearson de $r = -0.827$, lo que evidenció que niveles más altos de clorofila-a se asociaron con una menor penetración de luz en la columna de agua. Este resultado coincidió con el comportamiento

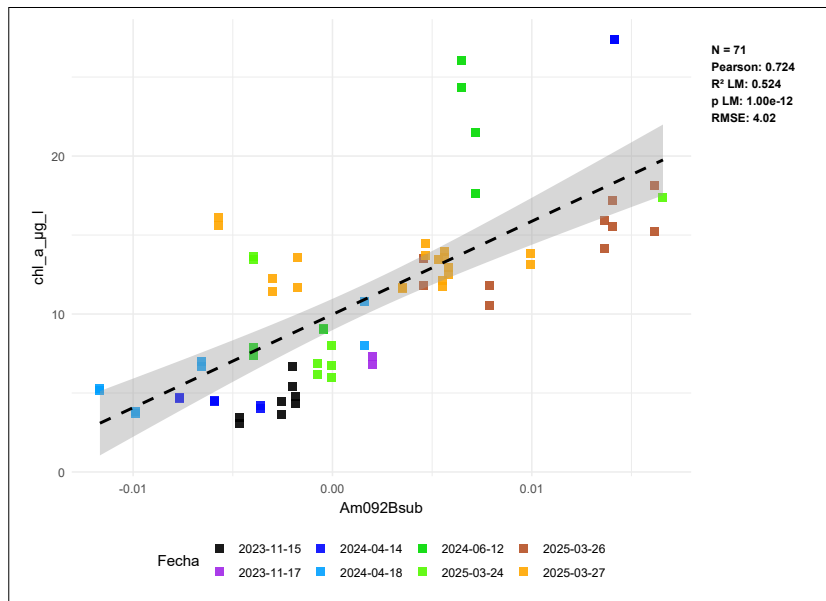


Figura 7. Correlación entre el índice espectral $Am092B_{sub}$ y la concentración de clorofila-a para 71 muestras de ocho fechas.

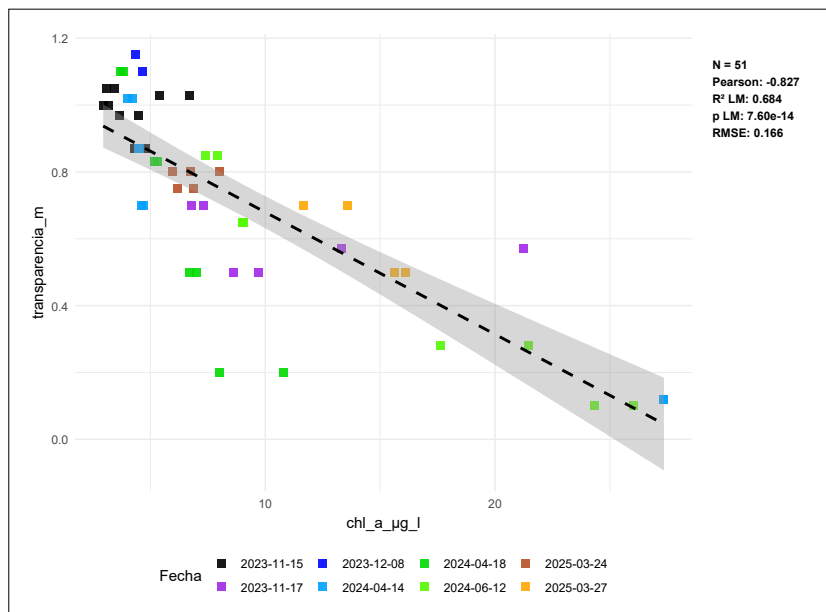


Figura 8. Correlación entre la concentración de clorofila-a y la transparencia para 51 muestras de ocho fechas.

óptico esperado en sistemas acuáticos, donde el aumento en biomasa algal y carga particulada reduce la transparencia mediante la dispersión y absorción de la radiación solar, de manera similar a lo reportado por Delegido *et al.* (2019) para embalses hipertróficos que presentan más clorofila y, por lo tanto, menor transparencia, además de más sólidos en suspensión (Figura 8). Asimismo, se observó una correlación positiva moderada entre

la concentración de clorofila-a ($chl_a_µg_l$) y los SST, con un coeficiente de Pearson de $r = 0.359$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.129$, lo que indicó que aproximadamente el 12.9 % de la variabilidad en los valores de SST pudo ser explicada por los cambios en la concentración de clorofila-a (Figura 9). Aunque el modelo presentó una capacidad predictiva baja, reflejó una asociación funcional entre ambas variables. Este patrón sugiere

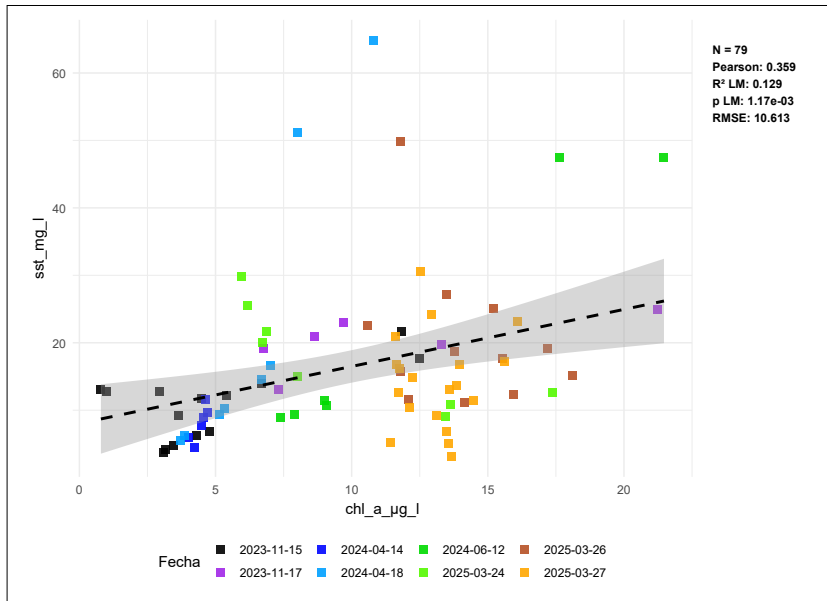


Figura 9. Correlación entre la concentración de clorofila-a y la concentración de sólidos suspendidos totales para 79 muestras de ocho fechas.

que los SST podrían estar relacionados con procesos biológicos, como el crecimiento del fitoplancton, o con fenómenos físicos simultáneos, como la resuspensión de sedimentos en zonas someras, como en el estudio de Delegido *et al.* (2019), en cuyo caso los sólidos suspendidos tuvieron mayor influencia en la transparencia, con una correlación inversa más evidente que en el caso de la clorofila-a, por lo que incluso llegan a suponer que en sus

dos sitios de estudio la transparencia es afectada principalmente por sólidos en suspensión de origen mineral u orgánico.

Relación entre índices espectrales con mejor predicción para SST y transparencia

Como los índices más efectivos para estimar la concentración de SST, se identificaron el índice Be16NDTblue, originalmente propuesto para re-

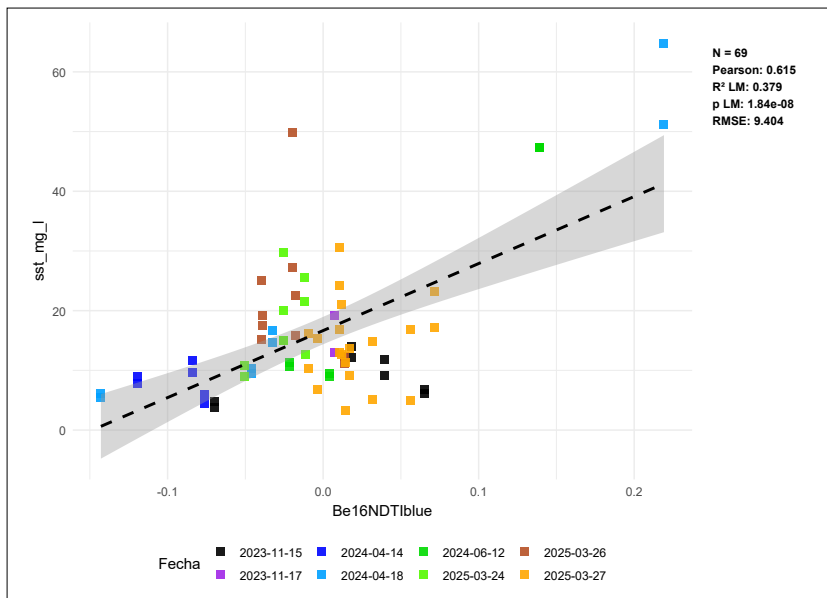


Figura 10. Correlación entre el índice Be16NDTblue y la concentración de sólidos suspendidos totales para 69 muestras de ocho fechas.

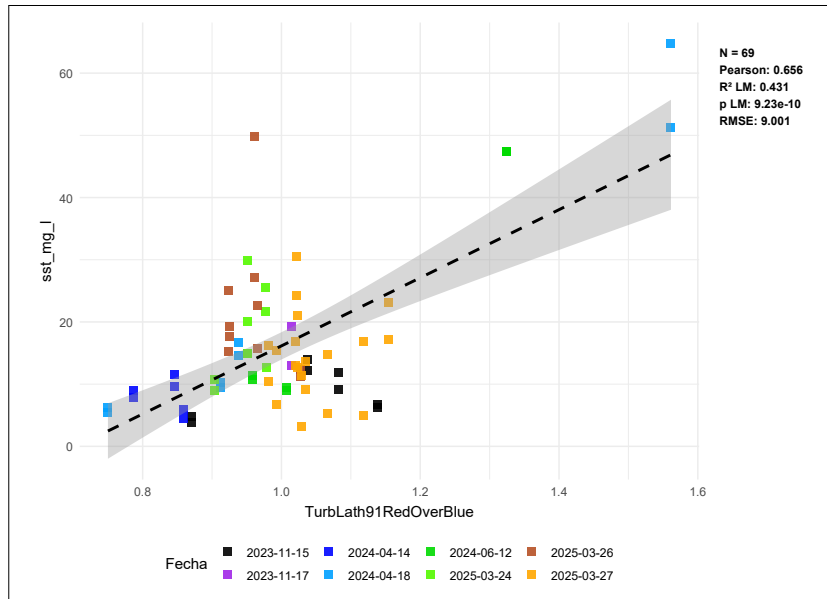


Figura 11. Correlación entre el índice TurbLath91RedOverBlue y la concentración de sólidos suspendidos totales para 69 muestras en ocho fechas.

presentar clorofila-a, y el índice TurbLath91RedOverBlue, diseñado para turbidez. Ambos mostraron coeficientes de correlación de Pearson superiores a 0.6, lo que evidenció una capacidad moderada para capturar las variaciones en los niveles de SST observados en campo (Figuras 10 y 11).

Asimismo, se encontró que los índices

Am09Bsub, Be16NDTlblue, TurbLath91RedOverBlue y TurbBow06RedOverGreen, y la transparencia, presentan coeficientes de correlación negativos elevados, superiores a -0.6, y valores de R² cercanos o mayores a 0.5 (Figuras 12, 13, 14 y 15). Esta relación inversa reflejó el vínculo espectral esperado entre reflectancia y penetración de luz en cuerpos de agua con presencia variable de partículas

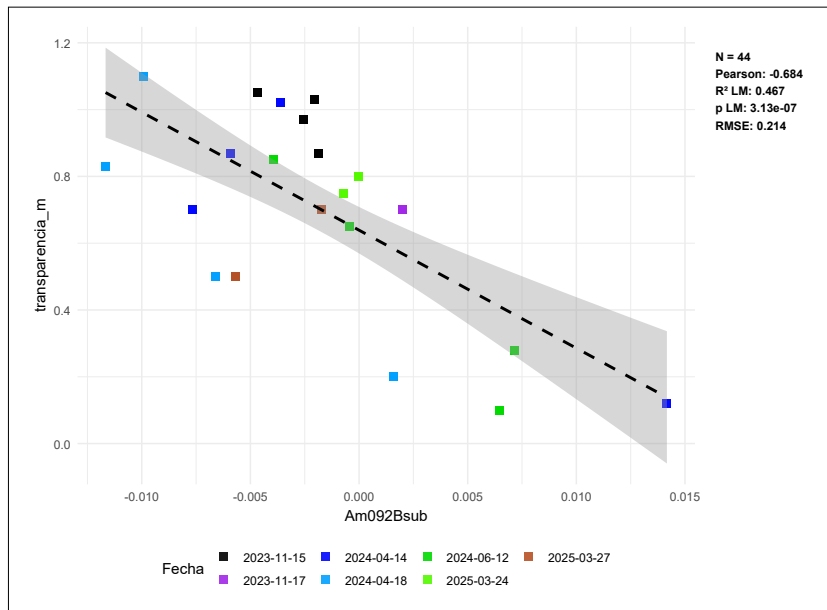


Figura 12. Correlación entre el índice Am09Bsub y la transparencia para 44 muestras de siete fechas.

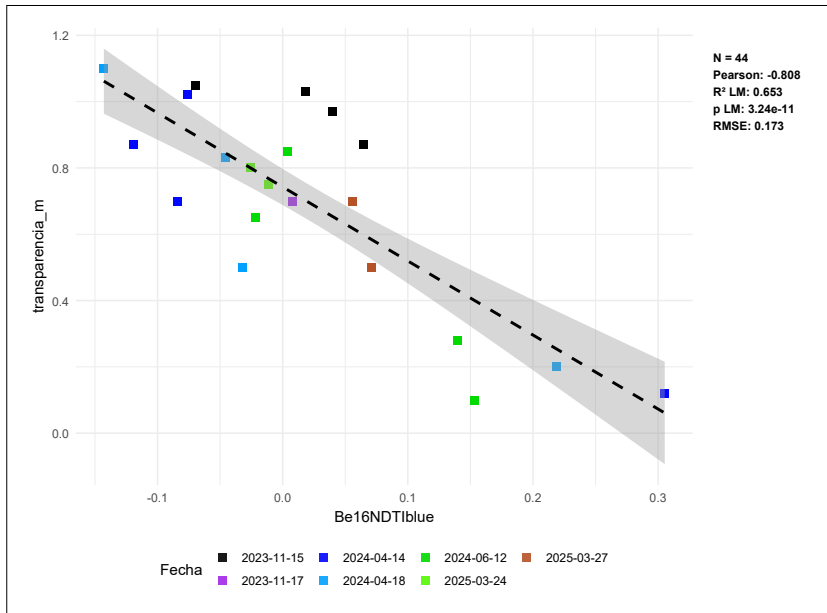


Figura 13. Correlación entre el índice Be16NDTlblue y la transparencia para 44 muestras de siete fechas.

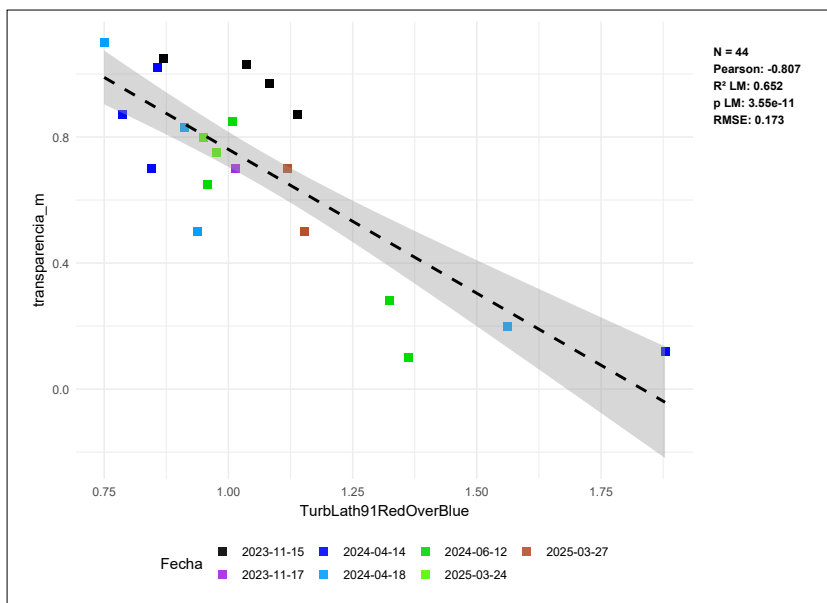


Figura 14. Correlación entre el índice TurbLath91RedOverBlue y la transparencia para 44 muestras de siete fechas.

en suspensión (Tyler *et al.*, 2022). En conjunto, estos resultados confirmaron que, aunque los índices fueron diseñados para distintos parámetros ópticamente activos, algunos de ellos lograron representar indirectamente, con consistencia, variables complementarias como SST y transparencia, ampliando su aplicabilidad en estudios de calidad

del agua basados en teledetección (Figura 16).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo pone de manifiesto que es factible realizar estimaciones de diversos parámetros de calidad del agua, como la concentración de clorofila-a, la concentración de SST, la turbidez

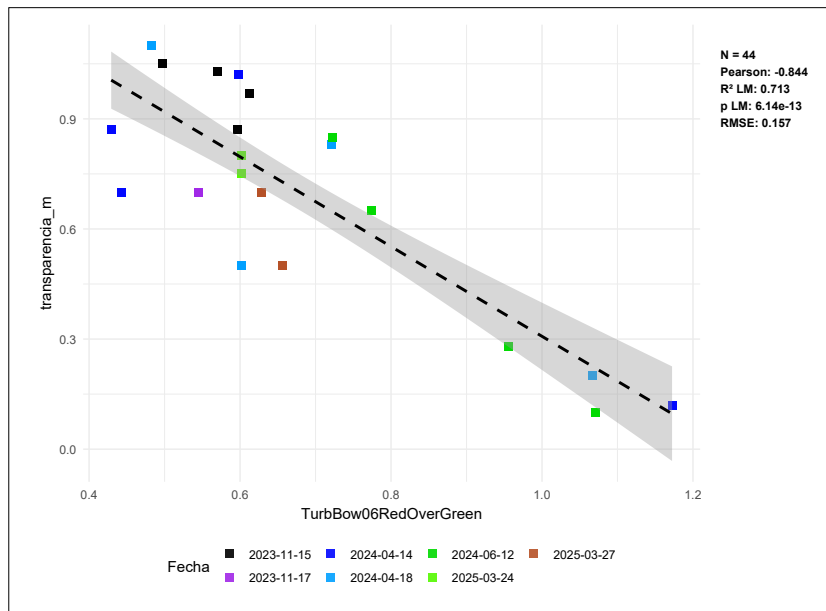


Figura 15. Correlación entre el índice TurbBow06RedOverGreen y la transparencia para 44 muestras de siete fechas.

y la transparencia, en cuerpos de agua lénticos artificiales pequeños, a partir de indicadores derivados del procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2. Este ejercicio permite establecer líneas base para definir modelos generalizados locales o regionales capaces de predecir o estimar parámetros de calidad del agua empleando información derivada de percepción remota. Sin embargo, tanto los ejercicios como la investigación futura deberán estar enfocados en incluir otros cuerpos de agua, a fin de probar si los modelos predictivos son estables a nivel local y regional o si son específicos para distintos cuerpos de agua. La aplicación de herramientas de teledetección, así como de indicadores derivados de estas, en el análisis de la calidad del agua de cuerpos de agua superficial, es un área clave que permitiría el monitoreo eficiente de estos sistemas, en especial para detectar florecimientos algales con potencial epidemiológico y efectos en la calidad del agua para uso humano y agrícola. Se espera que su aplicación permita también la rápida atención y solución de estos problemas de contaminación del agua, al contar con reportes tempranos, fuentes adicionales de comprobación con métodos tradicionales, gran alcance espacial y menores costos operativos y de análisis.

En este trabajo también resaltan las ventajas

prácticas de trabajar en lenguaje R, como la posibilidad de repetir exactamente los mismos cálculos cuando sea necesario, porque están guardados en un script; también es posible manejar muchos datos al mismo tiempo (series largas, varias estaciones o datos satelitales) sin que ello resulte complicado; además, se pueden realizar diferentes análisis estadísticos, comparaciones entre modelos y uso de datos de distinto tipo sin costo alguno. Asimismo, se reducen los errores que suelen presentarse cuando se aplican fórmulas manuales. También existe la posibilidad de automatizar el proceso, desde los datos crudos hasta las gráficas finales.

En cuanto al paquete *waterquality*, su principal ventaja es que cuenta con varias fórmulas integradas y organizadas de distintos autores en un mismo lugar y para diferentes sensores satelitales, lo que evita programar cada ecuación por separado y mantiene consistencia en unidades, transformaciones y uso de bandas. También facilita aplicar y comparar varios modelos —por ejemplo, para clorofila-a y turbidez, o de forma indirecta, para transparencia y SST— de manera rápida y ordenada, lo que hace el trabajo más eficiente y fácil de replicar metodológicamente.

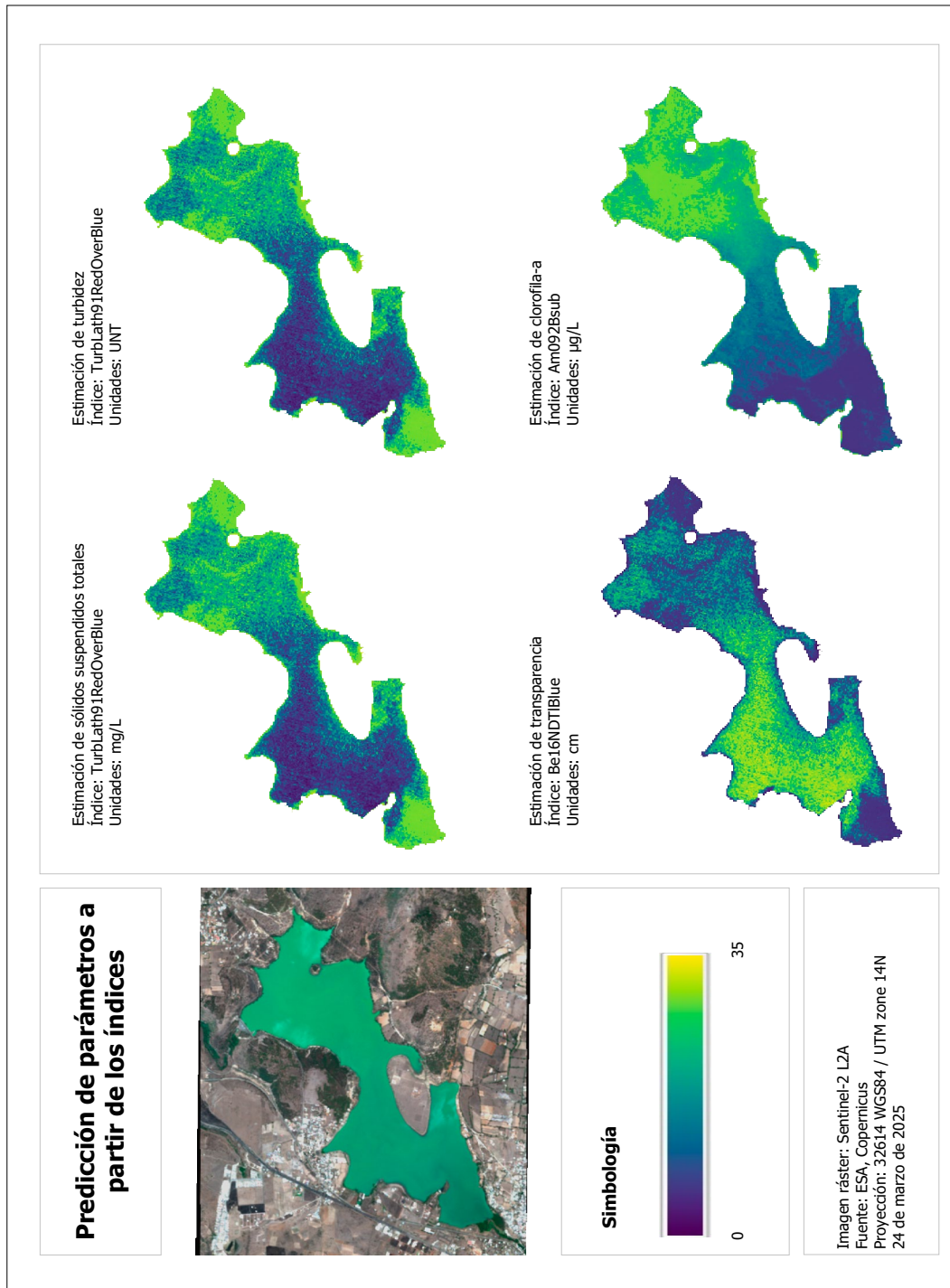


Figura 16. Predicción espacial de parámetros de calidad del agua a partir de índices espectrales derivados de un recorte de una imagen Sentinel-2 nivel L2A, adquirida el 24 de marzo de 2025. Se presentan sólidos suspendidos totales y turbidez con el índice TurbLath91RedOverBlue; transparencia con el índice Be16NDTIBlue; y la concentración de clorofila-a, a partir del índice Am092Bsub.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el proyecto “Azolvamiento y eutroficación en presas periurbanas de zonas templadas de México: contribuciones para su evaluación y prospección”, Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), Clave IN112823, <https://lae.ciga.unam.mx/proyectos/agua/>. Se reconoce por su ayuda en campo a Raúl Álvarez Jara, Christian Jesús Dueñas León y Eduardo Iván López Ortiz.

REFERENCIAS

- Alawadi, F. (2010). Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI). *Proceedings of SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions*, 7825, 782506. <https://doi.org/10.1117/12.862096>
- Amin, R., Zhou, J., Gilerson, A., Gross, B., Moshary, F. y Ahmed, S. (2009). Novel optical techniques for detecting and classifying toxic dinoflagellate *Karenia brevis* blooms using satellite imagery. *Optics Express*, 17(11), 9126–9144.
- Batina, A., Šiljeg, A., Pedić, G. y Parać, M. (2025). Utilizing Sentinel-2 remote sensing for water quality monitoring in Deran Lake, Bosnia and Herzegovina. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-4/W13-2025*, 65–72. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W13-2025-65-2025>
- Beck, R., Xu, M., Zhan, S., Liu, H., Johansen, R. A., Tong, S., Yang, B., Shu, S., Wu, Q., Wang, S., Berling, K., Murray, A., Emery, E., Reif, M., Harwood, J., Young, J., Martin, M., Stillings, G., Stumpf, R., Su, H., Ye, Z. y Huang, Y. (2017). Comparison of satellite reflectance algorithms for estimating phyco-cyanin values and cyanobacterial total biovolume in a temperate reservoir using coincident hyperspectral aircraft imagery and dense coincident surface observations. *Remote Sensing*, 9, Article 538. <https://doi.org/10.3390/rs9060538>
- Beck, R. A., Zhan, S., Liu, H., Tong, S., Yang, B., Xu, M., Ye, Z., Huang, Y., Wu, Q., Wang, S. y Stumpf, R. (2016). Comparison of satellite reflectance algorithms for estimating chlorophyll-*a* in a temperate reservoir using coincident hyperspectral aircraft imagery and dense coincident surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 178, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.002>
- Bowers, D. G. y Binding, C. E. (2006). The optical properties of mineral suspended particles: A review and synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1–2), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.11.010>
- Bursztyn Fuentes, A. L., Granitto, M., Maluendez Testoni, M. C., Castro Riglos, M. V. y Rodríguez, P. L. (2022). Revisión y optimización metodológica para extraer clorofila-a fitoplanctónica en ambientes acuáticos. *Ecología Austral*, 32(3), 1019–1028. <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.3.0.2031>
- Calix Pacheco, A., Raya García, V., Hernández Morales, R. y Zurita Valencia, W. (2018). Calidad del agua de la presa de Coitazio y fuentes de disposición final intradomiciliarias. En *XVII Congreso Internacional y XXIII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales* (Memoria en extenso, pp. 996–1006). *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 9(21).
- Chacón Torres, A. (1989). *A limnological study of Lake Pátzcuaro, Mexico, with a consideration of the applicability of remote sensing techniques* [PhD. thesis, Institute of Aquaculture, University of Stirling]. University of Stirling.
- Chawla, I., Karthikeyan, L. y Mishra, A. K. (2020). A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes. *Journal of Hydrology*, 585, 124826. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124826>
- Chipman, J. W., Olmanson, L. G. y Gitelson, A. A. (2009). *Remote sensing methods for lake management: A guide for resource managers and decision makers*. North American Lake Management Society.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2021). *Atlas del agua en México*. SEMARNAT.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2022). *Monitoreo de las principales presas de México*. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Presas/>
- Delegido, J., Urrego, P., Vicente, E., Sòria-Perpinyà, X., Soria, J. M., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Peña, R. y Moreno, J. (2019). Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana. *Revista de Teledetección*, 54, 15–24. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.12603>
- Doxaran, D., Froidefond, J. M. y Castaing, P. (2002). A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment dominated coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5079–5085. <https://doi.org/10.1080/0143116021000009912>

- FCEA (Fundar, Centro de Análisis e Investigación), ITRN (Índice de Transparencia de los Recursos Naturales), CartoCrítica & Causa Natura. (2020). *Índice de transparencia de los recursos naturales: Agua. Informe de resultados*. https://files.conagua.gob.mx/gobiernoabierto/documentos/Informe_final_ITRN.pdf
- FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido). (2005). *Plan nacional de microcuencas*. SAGARPA.
- Fisher, J. R. B., Acosta, E. A., Dennedy-Frank, P. J., Kroeger, T. y Boucher, T. M. (2018). Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2), 137–149. <https://doi.org/10.1002/rse2.61>
- Frohn, R. C. y Autrey, B. C. (2009). *Water quality assessment in the Ohio River using new indices for turbidity and chlorophyll-a with Landsat-7 imagery* (Draft internal report). U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.rdocumentation.org/packages/waterquality/versions/0.2.5/topics/TurbFrohn09GreenPlusRedBothOverBlue>
- Gitelson, A. A., Gritz, Y. y Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 271–282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>
- Guigou, B. (2022). *Evaluación de modelos de turbidez con imágenes Sentinel 2 en el embalse de Palmar, Río Negro, Uruguay* (Serie Técnica Big Data y Gestión Ambiental). Ministerio de Ambiente.
- Holm-Hansen, O. y Riemann, B. (1978). Chlorophyll a determination: Improvements in methodology. *Oikos*, 30(3), 438–447. <https://doi.org/10.2307/3543338>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2005). *Conjunto de datos edafológicos de México. Escala 1:1 000 000 serie I*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). *Información topográfica E14A23 Morelia escala 1:50 000*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463870937>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000, serie VII*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s7gw
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1998). *Conjunto de datos vectoriales geológicos. Con-*
- tinuo nacional, escala 1:1 000 000*.
- Johansen, R. A., Reif, M., Emery, E., Nowosad, J., Beck, R., Xu, M. y Liu, H. (2019). *waterquality: An open-source R package for the detection and quantification of cyanobacterial harmful algal blooms and water quality* (ERDC/EL TR-19-20). U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Environmental Laboratory. <https://doi.org/10.21079/11681/35053>
- Karaman, Z. (2026). *CDSE: Copernicus Data Space Ecosystem API Wrapper* (Version 0.3.2) [Software]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.CDSE>
- Lathrop, R. G., Lillesand, T. M. y Yandell, B. S. (1991). Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters. *International Journal of Remote Sensing*, 12(10), 2045–2063. <https://doi.org/10.1080/01431169108955235>
- Moore, G. K. (1980). Satellite remote sensing of water turbidity. *Hydrological Sciences*, 25(4), 407–421. <https://doi.org/10.1080/02626668009491950>
- OOAPAS (Organismo Operador De Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia). (2017). *Informe anual 2017 del director general*. Ayuntamiento de Morelia. <https://morelos.morelia.gob.mx/Arch-TranspOOAPAS/Art35/InfPub/XXVIII/Informe%20Director%20OOAPAS%202017.pdf>
- QGIS Development Team. (2023). *QGIS geographic information system*. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org>
- Macías Domínguez, L. Á., Hernández González, M., Navarro Rodríguez, C. y Pérez-Vega, A. (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.
- Mishra, S. y Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
- Pech May, F., Sánchez Hernández, J. V. Sánchez Jacinto, H. G. y Magaña Govea, J. (2020). Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2. *Lámpasakos*, 24, 48–59. <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>
- Prat, C., Márquez, A. y Esteves, M. (2007). *Estudio batimétrico de la presa de Cointzio y de Umécuaro*. Ponencia presentada en el Simposio Acciones y Resultados para el Desarrollo Sostenible de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Morelia, México.
- Rojas-Flores, J. (2019). *Análisis de precipitaciones y de escurrimientos máximos anuales para estimar avenidas de diseño para la presa Cointzio, Mich.* [Tesis de licen-

- ciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Facultad de Ingeniería UNAM.
- Tyler, A., Hunter, P., De Keukelaere, L., Ogashawara, I. y Spyarakos, E. (2022). Remote sensing of inland water quality. En T. Mehner y K. Tockner (Eds.), *Encyclopedia of Inland Waters* (2ª ed.) (vol. 4) (pp. 570–584). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00213-9>
- Schiebe F. R., Harrington J. A., Ritchie J. C. (1992). Remote sensing of suspended sediments the Lake Chicot, Arkansas Project. *International Journal of Remote Sensing*, 13(8), 1487–1509. <https://doi.org/10.1080/01431169208904204>
- Secretaría de Economía. (2018, 10 de abril). NMX-AA-093-SCFI-2018. Análisis de agua-determinación de la conductividad electrolítica-método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Economía. (2001^a, 1 de agosto). Norma mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua-determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Economía. (2001b, 19 de julio). Norma mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua-determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Economía. (2015, 11 de febrero). Norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua-medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Economía. (2016, 25 de agosto). Norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua-medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Salud. (2021, 2 de mayo). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*.
- Sòria-Perpinyà, X., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Peña, R., Soria, J. M., Delegido, J., Vicente, E. y Moreno, J. (2019). Monitoring the ecological state of a hypertrophic lake (Albufera of València, Spain) using multitemporal Sentinel-2 images. *Limnetica*, 38(1), 457–469. <https://doi.org/10.23818/limn.38.26>
- Susperregui, A. S., Gratiot, N., Esteves, M., Duwig, C. y Prat, C. (2007). *El funcionamiento hidro-sedimentario de la presa de Cointzio*. Ponencia presentada en el Simposio Acciones y Resultados para el Desarrollo Sostenible de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Morelia, México.
- Yang, H., Kong, J., Hu, H., Du, Y., Gao, M. y Chen, F. (2022). A review of remote sensing for water quality retrieval: Progress and challenges. *Remote Sensing*, 14(8), 1770. <https://doi.org/10.3390/rs14081770>
- Zabaleta, B., Aubriot, L., Olano, H. y Achkar, M. (2023). Satellite assessment of eutrophication hot spots and algal blooms in small and medium-sized productive reservoirs in Uruguay's main drinking water basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 43604–43618. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25334-9>
- Zar, J. H. (1996). *Biostatistical analysis* (3ª ed.). Prentice Hall.
- Zhan, Y., Delegido, J., Erena, M., Soria, J. M., Ruiz-Verdú, A., Urrego, P., Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E. & Moreno, J. (2022). Mar Menor lagoon (SE Spain) chlorophyll-*a* and turbidity estimation with Sentinel-2. *Limnetica*, 41(2), 305–323. <https://doi.org/10.23818/limn.41.18>