

Monitoreo de fenómenos sociales y ambientales mediante observaciones de la superficie terrestre

Se desarrolló un sistema de información geográfica (SIG) utilizando técnicas de inteligencia artificial (IA) para monitorear fenómenos sociales y ambientales mediante datos satelitales. El sistema detecta asentamientos humanos y analiza la vegetación en las áreas naturales protegidas de la CDMX, e infiere la claridad del agua en la Presa de Valle de Bravo, para tomar decisiones informadas.

Técnicas avanzadas para el monitoreo ambiental

Un sistema de información se establece para recopilar, guardar y examinar datos concernientes a un tema particular. Dichos sistemas adquieren una dimensión geográfica al integrar datos de geolocalización. Su origen se remonta a 1964, cuando la oficina del censo de EUA publicó los primeros 43 000 códigos de geolocalización. Los sistemas de información geográfica contemporáneos han evolucionado junto con la tecnología informática. Actualmente, Roger Tomlinson es reconocido como el pionero de los sistemas de información geográfica (SIG), pues en 1967 presentó uno para recolectar, examinar y manejar datos sobre los recursos de suelos, agricultura, recreación, fauna (incluidas aves en cuerpos de agua), bosques y la gestión del uso del suelo en una escala de 1:50 000 en Canadá. Una nota interesante sobre Tomlinson es que pasó sus últimos días en México, donde falleció en San Miguel de Allende en 2014.

Las áreas naturales protegidas (ANP) son zonas designadas donde se evitan actividades como desarrollos residenciales, industriales y comerciales, y donde la intervención humana está restringida. Las ANP permiten conservar la diversidad biológica. Son fundamentales para los ciclos del agua y del carbono, y tienen un papel importante en la regulación de la temperatura y los patrones climáticos. Por estas razones, las sociedades han optado por resguardar estas áreas de las actividades humanas, incluida la expansión de asentamientos cercanos. En el caso de la



Ciudad de México. Imágenes Landsat cortesía del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA y del Servicio Geológico de Estados Unidos o USGS/NASA Landsat.

Ciudad de México (CDMX), nos interesa saber cuál es su estado y cuál es la tendencia que su comportamiento histórico permite vislumbrar.

Este documento presenta un SIG diseñado para monitorear las 25 ANP de la Ciudad de México y la Presa de Valle de Bravo. El SIG emplea imágenes satelitales para analizar la dinámica de la vegetación, identificar patrones de crecimiento urbano y evaluar la claridad del agua. Estas imágenes captan la interacción de la luz solar con la superficie terrestre, revelando información valiosa sobre la composición de los suelos, la salud de la vegetación y la turbidez del agua. Al analizar múltiples bandas espectrales de las imágenes, podemos distinguir entre diferentes tipos de cobertura terrestre, como bosques, cuerpos de agua y áreas urbanizadas, y así detectar cambios en estos elementos a lo largo del tiempo. Nuestra propuesta consiste en combinar el monitoreo remoto con la inteligencia artificial (IA) para generar conocimiento útil en la toma de decisiones.

■ **Importancia del monitoreo ambiental**

■ Las ANP son albergues para la preservación de la biodiversidad de plantas y animales. La participación de cada especie dentro de las cadenas alimentarias propicia la generación de elementos ecológicos de gran valor. Considérense los bosques, que son el sumidero más importante de bióxido de carbono dentro de las masas continentales de la Tierra y tienen un papel importante en la captura y almacenamiento de carbono a través de la fotosíntesis. Las actuales estimaciones sugieren que 1 km² de bosque contiene entre 7.97 y 8.4 toneladas de CO₂ (Taylor y Marconi, 2019); si bien existe una gran incertidumbre asociada al carbono orgánico contenido en los suelos. Aunque el cambio climático nos obliga a buscar la eliminación de las emisiones de gases de efecto invernadero, la persistencia del CO₂ en la atmósfera tiene horizontes de miles de años, lo cual incrementa la importancia de los bosques.

La CDMX alberga 25 ANP, que abarcan un área de 232.6 km². Considerando que la superficie total de la CDMX es de 1 494.3 km² y que su población en 2020 era de 9 209 944 habitantes, el porcentaje del terri-

torio dedicado a ANP es del 15.6 % o 25.3 m² por individuo. Estas cifras son relevantes ya que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, según sus siglas en inglés) ha elevado su recomendación a un 30 %, sobre su anterior recomendación de 17 % (Watson y cols., 2023). Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un mínimo de 9 m² por persona (Rivera y cols., 2018). La comparación con estándares permite determinar si nos encontramos dentro de los límites aceptables.

La CDMX requiere un poco más de 84 m³/s de agua para cubrir las necesidades de consumo humano (Palma y cols., 2022). Las fuentes de agua varían de acuerdo con la estacionalidad y el consumo. Sin embargo, estas fuentes incluyen el acuífero, sistemas externos y manantiales. Mediante pozos se extrae aproximadamente el 63 % de las necesidades de agua. Un 27 % adicional proviene de los sistemas Cutzamala y Lerma, mientras que los manantiales y el agua reciclada aportan el 10 % restante. Actualmente, la CDMX cuenta con 63 plantas potabilizadoras distribuidas en ocho de sus delegaciones. Si bien estas plantas están encargadas de generar agua de calidad apta para consumo humano, resulta importante darles seguimiento en cada etapa de su distribución y tratamiento.

■ **Un sig soportado en IA**

■ Gracias a las observaciones históricas de las **plataformas satelitales**, podemos inferir que en los últimos años se ha presentado una reducción de las áreas vegetales en las ANP de la CDMX debido al crecimiento de asentamientos irregulares. Por su parte, la claridad del agua contenida en la Presa de Valle de Bravo ha tenido fluctuaciones importantes debido al cambio de los patrones de las lluvias y las descargas irregulares.

Sistema de información geográfica

El SIG se compone de tres módulos: detección de asentamientos irregulares, monitoreo de la claridad del agua y evaluación de la vegetación. El módulo de vegetación permite analizar las tendencias estacionales

Plataformas satelitales
Sistemas artificiales que circundan otros objetos para la observación y comunicación.

para cuantificar el nivel de procesamiento de clorofila de las plantas, indicativo de su salud y la pigmentación verde. Por otra parte, la medición de la claridad del agua se hace con el **disco de Secchi**, con el cual se estima la penetración luminosa en el agua. Por último, los asentamientos irregulares se miden por la proporción de área con asentamientos en las ANP.

Las imágenes satelitales para la determinación de la claridad del agua y el estudio de la vegetación provienen de la plataforma Landsat, la cual brinda una resolución de 30 metros por pixel. Para la detección de asentamientos, utilizamos Sentinel-2, con una resolución de 10 metros por pixel. Las imágenes satelitales son extraídas de repositorios públicos. Una vez recopiladas las imágenes, el análisis se realiza considerando las delimitaciones poligonales que identifican cada zona de interés. Posteriormente, se analizan los píxeles que componen los polígonos de las ANP. En el caso de los asentamientos, se utilizan bloques de 60×60 píxeles, que se introducen en un modelo de redes neuronales. Para los módulos de claridad del agua y vegetación, el análisis se realiza pixel por pixel. Sin embargo, en el caso de la vegetación, se emplea el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), mientras que la claridad del agua se analiza mediante un ensamble de modelos de **regresión** que incluyen Support Vector Regression (svr), redes neuronales (NN) y Extreme Gradient Boosting (XGB). El NDVI puede variar entre -1 y 1 , donde los valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que los valores cercanos a 0 , o negativos, representan suelos descubiertos, cuerpos de agua o áreas urbanizadas. Un NDVI alto refleja una mayor biomasa y actividad fotosintética, lo que es indicativo de una vegetación vigorosa.

El SIG desarrollado es una herramienta para la visualización y análisis de datos geoespaciales, diseñada para facilitar la toma de decisiones. Su interfaz permite la selección de ANP, así como la especificación de año, mes y día del análisis. Los usuarios pueden navegar entre los módulos de vegetación, asentamientos y claridad del agua, interpretando la información mediante escalas de colores. Además, es posible descargar los datos utilizados para las visualizaciones. En la **Figura 1** podemos observar el mó-

dulo de vegetación, el cual muestra por medio de polígonos de colores los niveles del NDVI del Bosque de Tlalpan, en 2017, sobre un mapa de la CDMX.

Los asentamientos humanos

El SIG evalúa la expansión de los asentamientos humanos en las ANP. Para ello, utiliza **imágenes satelitales multiespectrales** y redes neuronales convolucionales (CNN). Empleamos un enfoque que combina las imágenes de Sentinel-2 con datos geográficos del World Settlements Layer. Al utilizar imágenes con una resolución espacial de 10 metros, podemos identificar cambios en la ocupación del suelo a lo largo del tiempo. El World Settlements Layer nos proporciona una referencia inicial de la ubicación de los asentamientos. Para obtener estimaciones más robustas y precisas de la dinámica de estos asentamientos, utilizamos el filtro de Kalman, el cual nos permite incorporar iterativamente información de mediciones, mejorando así nuestras predicciones sobre la expansión de los asentamientos.

En la **Figura 2a** presentamos el resultado del proceso de detección de asentamientos para el Bosque de Tlalpan. La línea azul denota la estimación de la proporción de ocupación, la cual rondaba el 0.8% en enero del 2021, y la zona sombreada refleja la incertidumbre en la estimación. En la ilustración observamos un crecimiento sostenido, tal que ahora nuestro estimado es de aproximadamente 1.6% hacia junio del 2024. También observamos algunas ANP para las cuales nuestra estimación muestra un decrecimiento, ya sea por desocupación o por una combinación entre la calidad de las imágenes y el umbral seleccionado para clasificar una zona como un asentamiento. Éste es el caso de San Miguel Topilejo, que mostraba una proporción de 0.22% en julio del 2021 y 0.14% en junio del 2024 (véase la **Figura 2b**) por la variabilidad de clasificación de unos pocos píxeles. En ambos casos, hemos superpuesto una línea punteada roja a los últimos tres años, entre junio del 2021 y junio del 2024. Al hacer este ejercicio con las 25 ANP de la CDMX observamos un patrón interesante (véase la **Figura 2c**). La ANP con menor proporción de ocupación es San Miguel Ajusco, con 0.04% , y la mayor es Lomas de Padier-

Disco de Secchi

Instrumento de medición de la transparencia del agua, formado por un disco que se sumerge y se observa desde la superficie.

Imágenes satelitales multiespectrales

Fotografías capturadas por satélites que registran información en varias bandas del espectro electromagnético.

Regresión

Técnica estadística que modela la relación entre variables independientes para predecir una variable de respuesta.

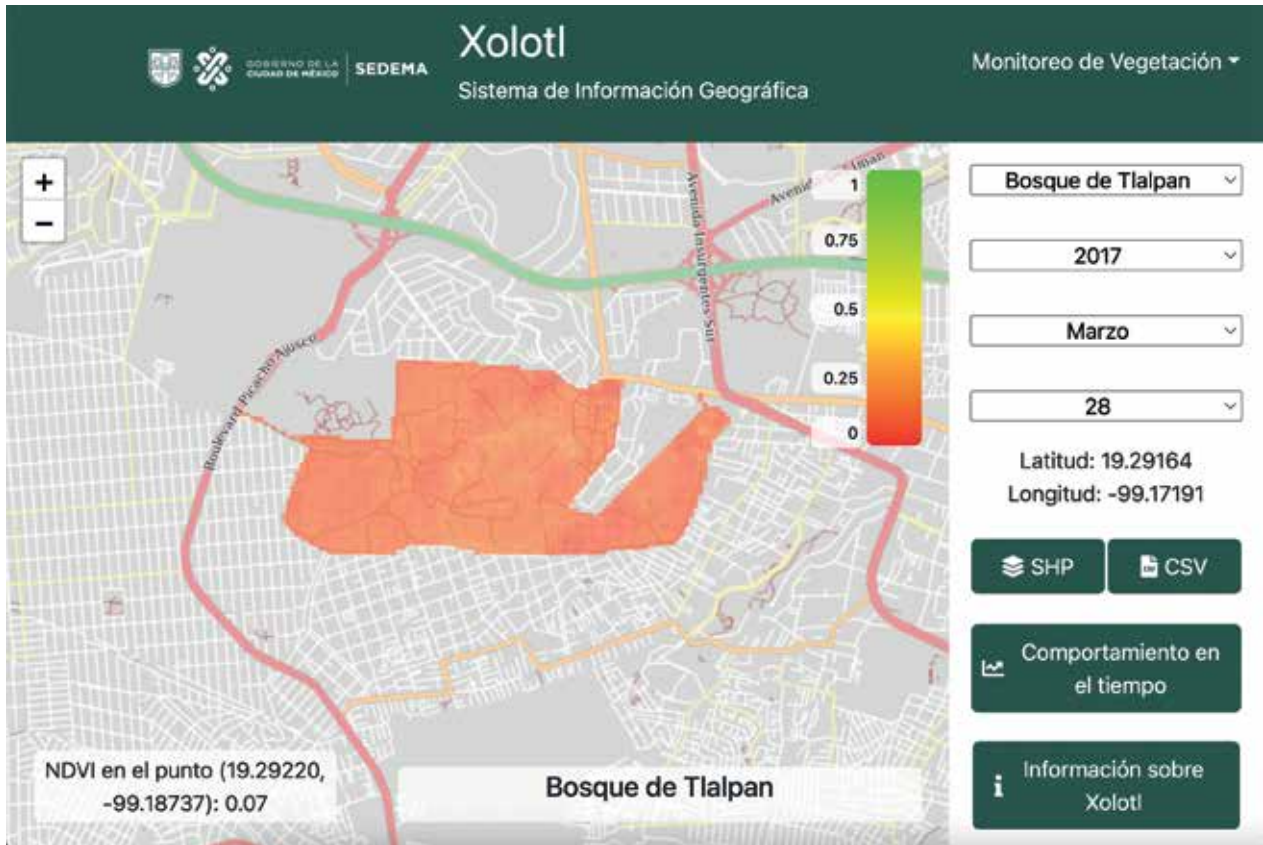


Figura 1. Un sistema de información geográfica (SIG) para el monitoreo ambiental. La interfaz del SIG puede mostrar, a través de polígonos de colores, los datos obtenidos en cada módulo. En este caso, se pueden ver los niveles del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) del Bosque de Tlalpan, el 28 de marzo de 2017. El valor de NDVI está entre 0.2 y 0.25, lo cual indica una cobertura vegetal débil o intermitente.

na, con 53%. También observamos que la tasa de crecimiento guarda una relación muy cercana con la proporción de la ocupación; es decir, entre mayor es la proporción de ocupación, mayor es el crecimiento de la ocupación en los últimos tres años. De hecho, el coeficiente de determinación (R^2) es de 0.97 entre ambas variables.

La vegetación

El seguimiento del estado de la vegetación lo realizamos mediante la observación de su NDVI. Analizamos las tendencias temporales de la vegetación en las 25 ANP de la CDMX usando las imágenes satelitales Landsat. El proceso metodológico se divide en tres etapas principales: cálculo del NDVI por pixel, enmascaramiento de nubes y aplicación del filtro de Kalman. Dado que las bandas espectrales necesarias para el cálculo del NDVI pueden verse afectadas por nubes y sombras, se aplica un procesamiento adi-

cional para detectar su presencia. La serie Landsat proporciona las bandas espectrales necesarias, y la corrección mediante el filtro de Kalman aumenta la cantidad de las mediciones.

Para profundizar en la comprensión de las dinámicas de la vegetación, utilizamos un análisis de tendencia estacional (STL o Seasonal Trend Loess), que permite separar la tendencia de la estacionalidad y el ruido residual, lo que facilita observar las tendencias subyacentes del NDVI en las ANP. Esta etapa se puede visualizar en la **Figura 3a**, donde se ve la tendencia del NDVI en Bosques de las Lomas.

Los resultados sugieren que la mayoría de las ANP mostraron un aumento en el NDVI durante el periodo de estudio (2000-2023), lo que indica una tendencia positiva en la salud y densidad de la vegetación. Sin embargo, ocho ANP presentaron una disminución en el NDVI, lo que podría requerir esfuerzos de conservación focalizados. Las excepciones identificadas subra-

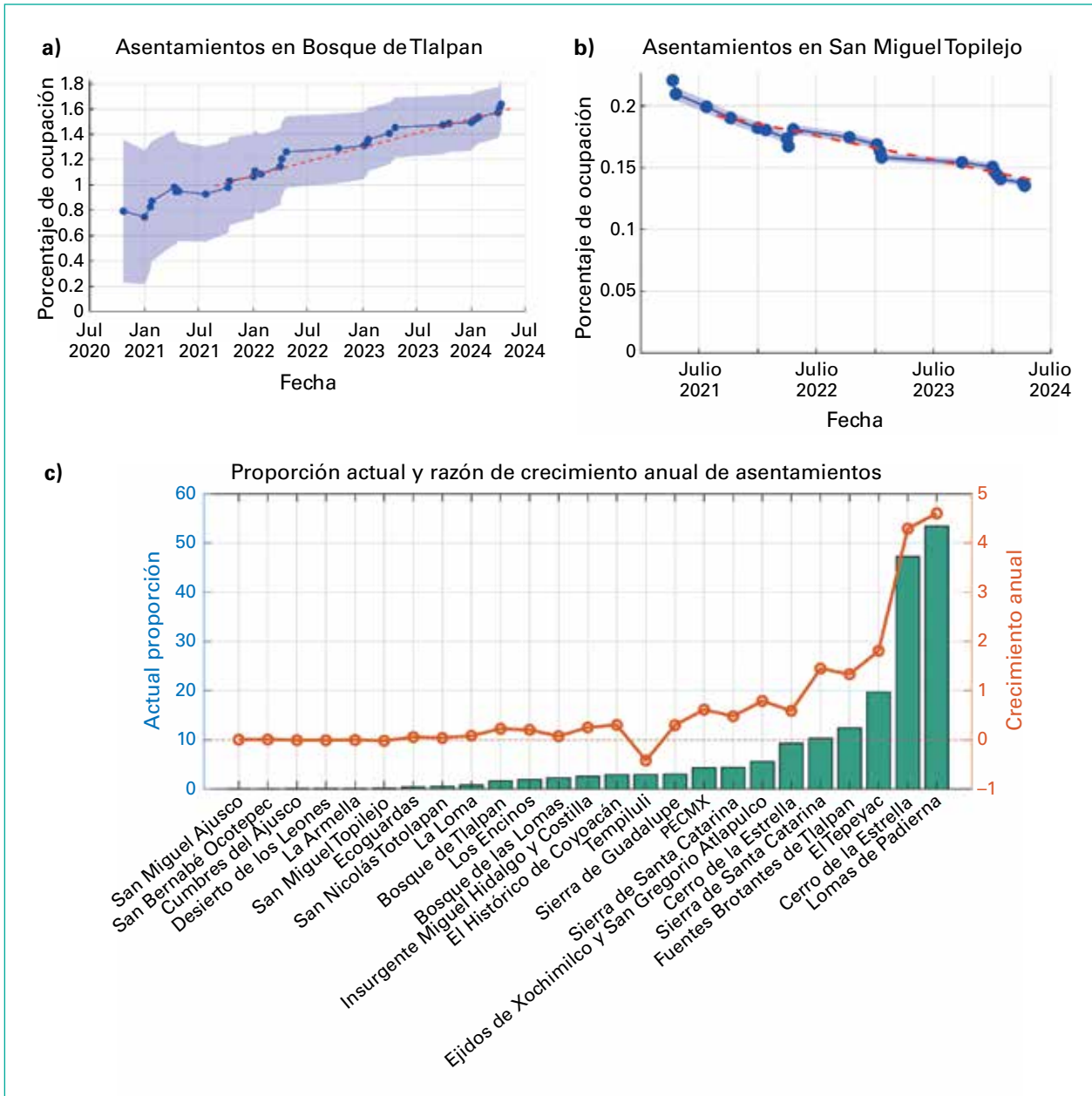


Figura 2. Asentamientos humanos en las ANP de la CDMX. La mayor parte de las ANP de la CDMX experimentan: a) crecimiento de los asentamientos humanos; aunque algunas experimentan, b) un decrecimiento sostenido. En general, el crecimiento anual ha dependido linealmente de la proporción de la ocupación durante los últimos tres años.

yan la complejidad de las dinámicas ecológicas y la necesidad de estrategias de manejo adaptadas a cada ANP.

La claridad del agua

El SIG permite la inferencia de la claridad del agua utilizando imágenes satelitales y técnicas de aprendizaje automático. Nuestra aproximación se centra en predecir la profundidad del disco de Secchi (SDD

o Secchi Disk Depth), como un símil de la transparencia del agua. Para ello, utilizamos imágenes del satélite Landsat y un conjunto de datos de AquaSat actualizados para Landsat 8. El estudio empleó modelos de regresión y un método de ensamblaje para mejorar la exactitud y precisión de las inferencias.

Durante la preparación de los datos, se actualizaron 33 261 observaciones multispectrales y de profundi-

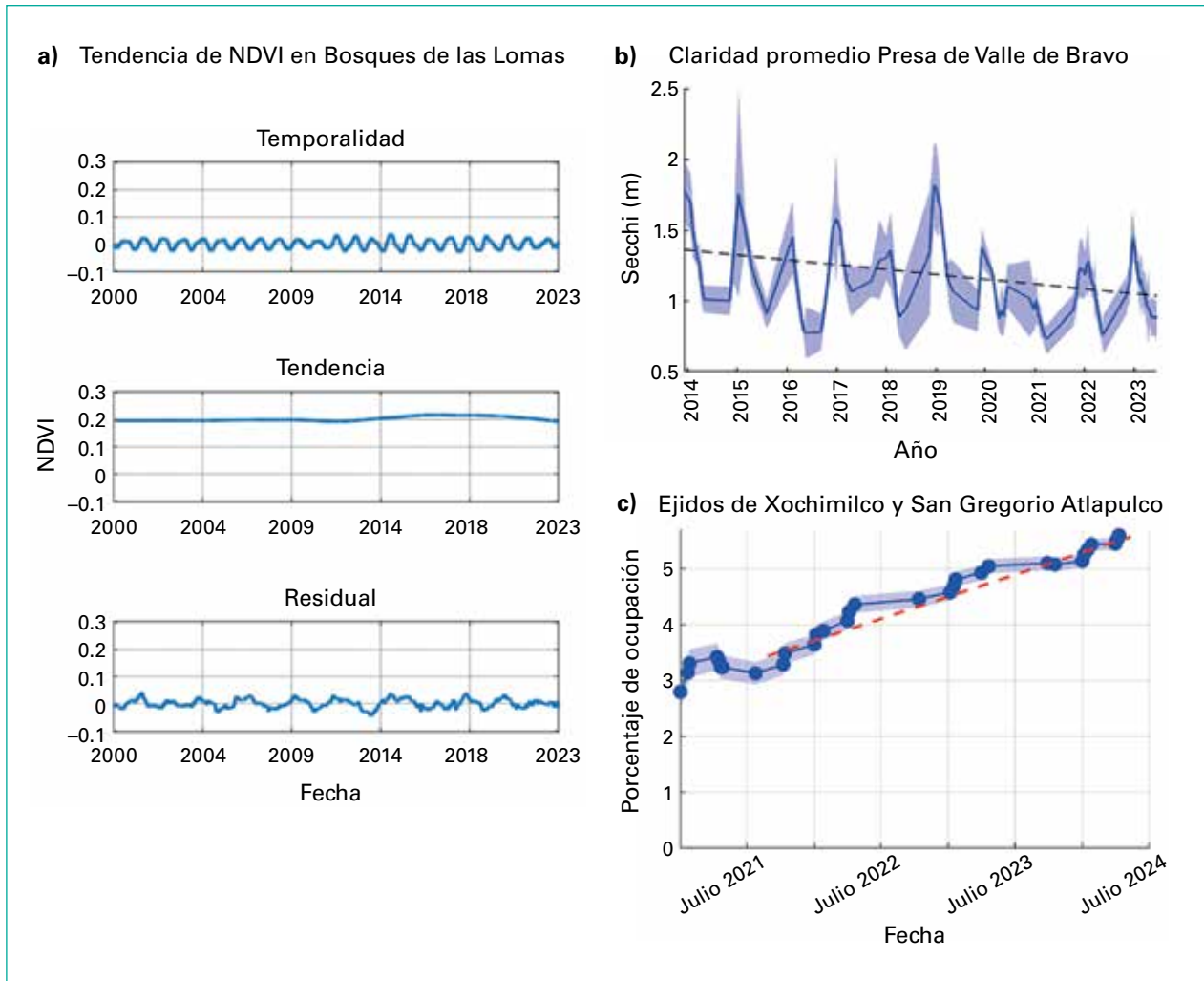


Figura 3. Variables ambientales de interés. El sistema permite dar seguimiento a las tendencias del estado de la vegetación, la claridad del agua y los asentamientos humanos en ANP a lo largo del tiempo. Por ejemplo: a) se determina el estado de la vegetación fuera de sus fluctuaciones estacionales; b) la claridad del agua, y c) la proporción de territorio que ocupan los asentamientos humanos para el ANP de Xochimilco.

dad con correcciones atmosféricas. Se entrenaron modelos de regresión como SVR, NN y XGB. El modelo de ensamblaje resultante mostró un rendimiento con un coeficiente de determinación promedio (R^2) de 0.663 y una desviación estándar de 0.007, mientras que la validación con datos de campo alcanzó un R^2 de 0.667. Estos resultados son prometedores, pues el SIG permite determinar la profundidad del agua en los cuerpos de agua sólo con el paso del satélite sobre el área de interés en un día sin nubosidad. Por ejemplo, la **Figura 3b** muestra la evolución de la claridad del agua durante los últimos diez años, donde se puede apreciar que ésta disminuye aproximadamente unos tres centímetros por año.

Adopción del sistema

El SIG que se describe fue desarrollado en el marco de un proyecto financiado por la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la CDMX (Sectei). Durante su desarrollo, participó la Secretaría de Medio Ambiente (Sedema). El proyecto contó con la colaboración de profesores y estudiantes del Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Al final del proyecto, se puso en funcionamiento un SIG en los servidores del IPN. El acceso al servidor que contiene el SIG está restringido a los usuarios de la Sedema. Así, mientras que el SIG se mantiene

en operación en las instalaciones del IPN, tanto los códigos fuente como los manuales de instalación y operación fueron entregados a la Sedema.

■ Conclusión

■ Conocer la claridad de un cuerpo de agua, la extensión de los asentamientos humanos y la tendencia de la dinámica de la vegetación en las ANP tiene el potencial de permitir la definición de políticas públicas basadas en datos que refuercen lo que está bien y remedien lo que requiere corrección. El SIG que aquí se describe se apoya en nuestro más reciente entendimiento colectivo sobre cómo establecer el mapeo entre predictores obtenidos mediante observaciones satelitales y variables de respuesta para aplicaciones en la superficie relacionadas con fenómenos sociales y ambientales. El SIG opera con componentes de *software* abierto e imágenes de acceso libre, por lo que su funcionamiento requiere sólo una computadora y una conexión a internet para adquirir la información necesaria. Actualmente, este sistema es utilizado por la Sedema para su integración al monitoreo de las ANP y la Presa de Valle de Bravo. El SIG resuelve el problema de la obtención cuantitativa de indicadores que influyen en la toma de decisiones sobre las ANP y el agua que llega a la CDMX.

Este documento muestra que la IA puede aportar soluciones que faciliten la operación y conservación de las ANP, y que contribuyan a garantizar la calidad del agua que se consume en los centros urba-

nos. El desarrollo del SIG ejemplifica una aplicación que aprovecha las oportunidades que brinda el uso de observaciones remotas para resolver necesidades medioambientales de la CDMX. En el futuro, continuaremos refinando los algoritmos desarrollados en busca de incrementar sus niveles de desempeño y reducir sus márgenes de incertidumbre.

Agradecimientos

Este proyecto fue posible gracias al apoyo económico de la Sectei. Su alcance se ha visto fortalecido por la participación de estudiantes y profesores del IPN, la UNAM y el MIT, investigadores del Inegi y personal de la Sedema. Los autores agradecen a Sandra Navarro, Rubén Ulloa, Priscilla Baltezar, Jorge Prado, Sharaf Rashid, Jack Reid, Rodrigo Sepúlveda, Ranyart Suárez, Elio-Atenógenes Villaseñor y Danielle Wood por su participación en el proyecto.

Joaquín Salas

Instituto Politécnico Nacional.
jsalasr@ipn.mx

José Carlos Arenas

Instituto Politécnico Nacional.
red2013@hotmail.com

Antonio Briseño

Instituto Politécnico Nacional.
jcar.elias@gmail.com

Lecturas recomendadas

Palma, A., T. Parker y R. Carmona (2022), "Challenges and Experiences of Managed Aquifer Recharge in the Mexico City Metropolitan Area", *Groundwater*, 60(5):675-684. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1111/gwat.13237>>, consultado el 28 de enero de 2025.

Rivera, C., A. Stähle, C. Spacescape, M. Kamiya, G. Aguinaga e Y. Siegel (2018), "Developing Public Space and Land Values in Cities and Neighbourhoods", *UN Habitat* [en línea]. Disponible en: <<https://shorturl.at/8ssGS>>, consultado el 28 de enero de 2025.

Taylor, S. y S. Marconi (2019), "Rethinking global carbon storage potential of trees. A comment on Bastin *et al.*, 2019", *Annals of Forest Science*, 77:1-7. Disponible en: <<https://doi.org/10.1101/730325>>, consultado el 28 de enero de 2025.

Watson, J., R. Venegas-Li, H. Grantham, N. Dudley, S. Stolton *et al.* (2023), "Priorities for protected area expansion so nations can meet their Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework commitments", *Integrative Conservation*, 2(3):140-155. Disponible en: <<https://doi.org/10.1002/inc3.24>>, consultado el 28 de enero de 2025.