

REDMONGEO: RED de MONitoreo GEOambiental en Ensenada, Baja California

Reneé González Guzmán^{1*}, Alejandro Rodríguez Trejo², Héctor Enrique Ibarra Ortega²

¹Departamento de Geología, División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

²Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, C.P. 76230, Querétaro, Querétaro, México.

*renee@cicese.mx

Resumen

Las redes de monitoreo ambiental son sistemas integrados de estaciones que recopilan datos en tiempo real sobre las condiciones temporales del ambiente. Para la operatividad a largo plazo, las redes de monitoreo tienen diversos retos en común, incluyendo el costo de las estaciones y su mantenimiento. Para abordar la necesidad de monitoreo ambiental urbano a bajo costo se desarrollaron instrumentos nombrados Estación de Monitoreo Geoambiental (EMGA) y su plataforma de gestión, almacenamiento, visualización y descarga de datos. Este artículo de divulgación describe una red de monitoreo geoambiental basada en dispositivos EMGA. La red de monitoreo se encuentra en desarrollo, con nueve estaciones operativas en Ensenada, Baja California y con la capacidad de expandirse a otras zonas urbanas y rurales de la entidad. Las EMGA son capaces de medir seis parámetros ambientales: (i) concentración de partículas suspendidas en el aire (PM2.5 y PM10; $\mu\text{g m}^{-3}$), (ii) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (iii) presión atmosférica (mbar), (iv) humedad relativa (%), (v) ruido ambiental (μPa) y (vi) variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre (μT). Los datos se transmiten a una base de datos cada cuatro minutos y la visualización de los datos es mediante una plataforma en la red: <https://monitoreoambiental.com.mx/serie2/index.html>. Esta plataforma permite el procesamiento de la información en tiempo real a través de la web, la cual facilita su almacenamiento y visualización. Este sistema permitiría a las autoridades tomar decisiones informadas para, por ejemplo, activar alertas de contingencia que son cruciales para que la ciudadanía responda a las condiciones de su entorno. Además, un examen exhaustivo de los datos que arroja esta red de monitoreo ofrece una excelente oportunidad para desarrollar proyectos educativos e investigaciones científicas futuras.

Palabras Claves: redes de monitoreo, EMGA, contaminación ambiental, sensores de bajo costo, actividades antropogénicas

Abstract

Environmental monitoring networks are integrated systems of stations that collect real-time data on temporary environmental conditions. For long-term operation, these networks face several common challenges, including the cost of stations and their maintenance. To address the need for low-cost urban environmental monitoring, the Geo-Environmental Monitoring Station (known as EMGA by its acronym in Spanish) and its platform for managing, storing, visualizing, and downloading data were developed. This article describes a geo-environmental monitoring network based on EMGA instruments. The network is currently under development, with nine operational stations in Ensenada, Baja California, and the capacity to expand to other urban and rural areas of the state. EMGAs are capable of measuring six environmental parameters: (i) concentration of suspended particles in the air (PM2.5 and PM10; $\mu\text{g m}^{-3}$), (ii) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (iii) atmospheric pressure (mbar), (iv) relative humidity (%), (v) ambient noise (μPa) and (vi) variations

in the intensity of the Earth's magnetic field (μT). The data are transmitted to a database every four minutes. Data visualization is provided through a web-based platform: <https://monitoreoambiental.com.mx/serie2/index.html>. This platform enables real-time data processing via the web, facilitating data storage and visualization. The system allows authorities to make informed decisions, such as activating contingency alerts. These data are also crucial for citizens to understand the state of their environment. Moreover, a comprehensive analysis of the data generated by this monitoring network offers an excellent opportunity to develop educational projects and future scientific research.

Key words: monitoring networks, EMGA, environmental pollution, low-cost sensors, anthropogenic activities

Introducción

Las redes de monitoreo ambiental son sistemas integrados de dispositivos que detectan, transmiten y en algunos casos, analizan datos en tiempo real sobre las condiciones de calidad del aire, el agua y el suelo en un área determinada (Messer *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2025). Las redes de monitoreo que pueden ser locales, nacionales o internacionales, son cruciales para entender el estado del medio ambiente y desarrollar políticas públicas adecuadas (Perkins y Nachmany, 2019; Zhao *et al.*, 2025). En este sentido, el objetivo principal de establecer las redes de monitoreo es evaluar las condiciones ambientales, generar indicadores, registrar las actividades antropogénicas y ayudar a tomar decisiones para proteger la salud pública y el medio ambiente. Los datos que generan las redes de monitoreo son indispensables para evaluar la variabilidad natural y la causada antropogénicamente en el ambiente, la efectividad de las medidas de mitigación, así como los resultados de programas regulatorios de índole ambiental que se implementan a nivel local con base en la monitorización constante de estas redes (Zhao *et al.*, 2025). Algunas de las repercusiones de las actividades antropogénicas afectan globalmente, tales como fenómenos ambientales extremos en el marco del cambio climático, pero el impacto local en la calidad del aire o aumento del ruido ambiental también es cuantificable para la mayoría de las redes de monitoreo atmosférico.

Todas las redes de monitoreo tienen en común algoritmos rígidos que incluyen la recolección, transmisión, almacenamiento, procesamiento e interpretación de datos. Todo el proceso incluye hardware, software y otras herramientas informáticas que enfrentan retos similares, tales como el mantenimiento de equipos, capacitación, financiamiento y continuidad en el largo plazo de la red de monitoreo (Al-Aboosi y Hasan, 2020; Wallace, 2022; Yumalin *et al.*, 2023; Rodríguez Trejo *et al.*, 2024a, b). La efectividad de estas redes depende críticamente de la capacidad de los sensores para operar de manera autónoma y transmitir datos en tiempo real para su almacenamiento a una red de servidores remotos para almacenar y procesar datos. Esta autonomía se logra mediante la integración de sensores, transceptores inalámbricos y capacidades de procesamiento de señales en dispositivos, optimizando así la robustez operativa (Kelly *et al.*, 2017; Rodríguez Trejo *et al.*, 2025). El desarrollo y uso de sensores de bajo costo en combinación con sistemas de microcontroladores como los Raspberry Pi, Arduino y ESP32 ofrecen soluciones accesibles y flexibles para el establecimiento de redes de monitoreo ambiental en un tiempo relativamente corto con un uso de recursos eficientes (Kelly *et al.*, 2017; Rubio *et al.*, 2016; Rodríguez Trejo *et al.*, 2024a, b). La Estación de Monitoreo GeoAMbiental (EMGA) ofrece una solución práctica para establecer redes de monitoreo urbanas ya que usa un microprocesador ESP32 y sensores de bajo costo para la medición de diferentes variables ambientales. Estas estaciones de monitoreo son

herramientas versátiles que permiten registrar diversos parámetros ambientales incluyendo la densidad del particulado atmosférico, variaciones de la temperatura y la humedad atmosféricas, así como variaciones del campo geomagnético terrestre.

En el municipio de Ensenada, B.C., instituciones académicas y gubernamentales han realizado esfuerzos por monitorizar la calidad del aire y condiciones atmosféricas mediante dispositivos comerciales de gama alta, e.g., ICAARO (<https://aqicn.org/station/@376594/es/>), EMASQUI (<http://iio.ens.uabc.mx/estaciones-meteorologicas>), EMMCA (unidad móvil para el monitoreo ambiental del gobierno del estado). Sin embargo, suele ser un solo dispositivo activo de manera temporal, que no permite establecer la resolución espacial necesaria que describa las condiciones de toda la zona urbana. En este trabajo, se describe la primera red de monitoreo ambiental que pretende cubrir las necesidades de monitoreo de la ciudad de Ensenada. El establecimiento de esta red local se basa en la generación de nodos de monitoreo en puntos estratégicos de la ciudad. Dadas las ventajas probadas de los dispositivos de bajo costo, la REDMONGEO se establece en Ensenada con dispositivos EMGA. Esta red de monitoreo ofrece una excelente oportunidad para realizar investigaciones exploratorias y proyectos educativos. La información integrada en la red de monitoreo es de acceso público. Esto fomenta la democratización de las decisiones que mitiguen la afectación de la población debido a factores que afectan el ambiente. Se espera que el establecimiento de este tipo de red de monitoreo ambiental también fomente la difusión de los dispositivos EMGA en otros sectores públicos y privados, así como en otros puntos y ciudades importantes de la región.

2. Dispositivo EMGA

La Estación de Monitoreo Geo Ambiental (Figura 1) es un dispositivo innovador diseñado para el monitoreo en tiempo real de diversas condiciones

ambientales (Rodríguez Trejo *et al.*, 2024a, b, 2025). La EMGA integra sensores precisos, pero de bajo costo. Fue desarrollada en el laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas del Instituto de Geociencias (IGc) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para competir con dispositivos de gama alta y facilitar su distribución para generar redes urbanas de monitoreo ambiental. Estas estaciones monitorean seis parámetros ambientales: (i) concentración de partículas atmosféricas de tamaño de 2.5 y 10 μm (PM2.5 y PM10; $\mu\text{g m}^{-3}$), (ii) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (iii) presión atmosférica (mbar), (iv) humedad relativa (%), (v) ruido ambiental (μPa) y (vi) variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre (μT). Los datos obtenidos por los sensores se transmiten en tiempo real a la plataforma de visualización cada cuatro minutos. Esta frecuencia de muestreo es común en las estaciones de monitoreo geoambiental y meteorológicas (Rodríguez Trejo *et al.*, 2025).

El desarrollo de las EMGA se llevó a cabo en tres etapas: (i) elección e integración del hardware; (ii) desarrollo y programación de la plataforma de almacenamiento, procesamiento y visualización de datos; (iii) calibración de los dispositivos e instalación de las redes de monitoreo (Rodríguez Trejo *et al.*, 2025). La base instrumental de las EMGA es un microcontrolador NodeMCU ESP32 desarrollado por Espressif Systems® (Figura 1a). El microcontrolador tiene un procesador de doble núcleo Xtensa LX6 de 32 bits. La placa tiene 40 pines de entrada/salida y la posibilidad de integrar las funciones a través de un conector USB-C, así como una fuente de alimentación externa de 7-12V. El sistema de sensores está conectado a esta placa. El microcontrolador tiene soporte para múltiples entornos de desarrollo integrados (IDE) y dentro del sistema tiene una doble función: (i) procesar la adquisición de los datos y (ii) realizar la transmisión de la información a través de redes WiFi, pudiendo utilizar frecuencias de 2.4 GHz y 5.0 GHz. Las características de los sensores se resumen en la Tabla 1. La programación del microcontrolador

y de los sensores se desarrolló con el lenguaje C++ con el IDE de Arduino. Las estaciones EMGA se disponen en un gabinete cilíndrico de PVC (Figura 1b), con un volumen aproximado de 0.75 dm³, así como de un soporte de material PLA (ácido poliláctico) diseñado e impreso en 3D con precisión milimétrica (Figuras 1c y 1d). La programación del sistema EMGA incorpora las funcionalidades y calibraciones proporcionadas por el fabricante de cada sensor. Adicionalmente,

la calibración respecto a la exactitud de los datos fue realizada mediante la comparación con mediciones en dispositivos de gama alta, tal como el dispositivo desarrollado por Purple Air®, obteniendo correlaciones lineales, $r^2 = 0.95$ (o superior), en promedios a diferentes intervalos de tiempo, desde 30 minutos hasta 6 horas, midiendo todos los parámetros (Rodríguez Trejo *et al.*, 2025).

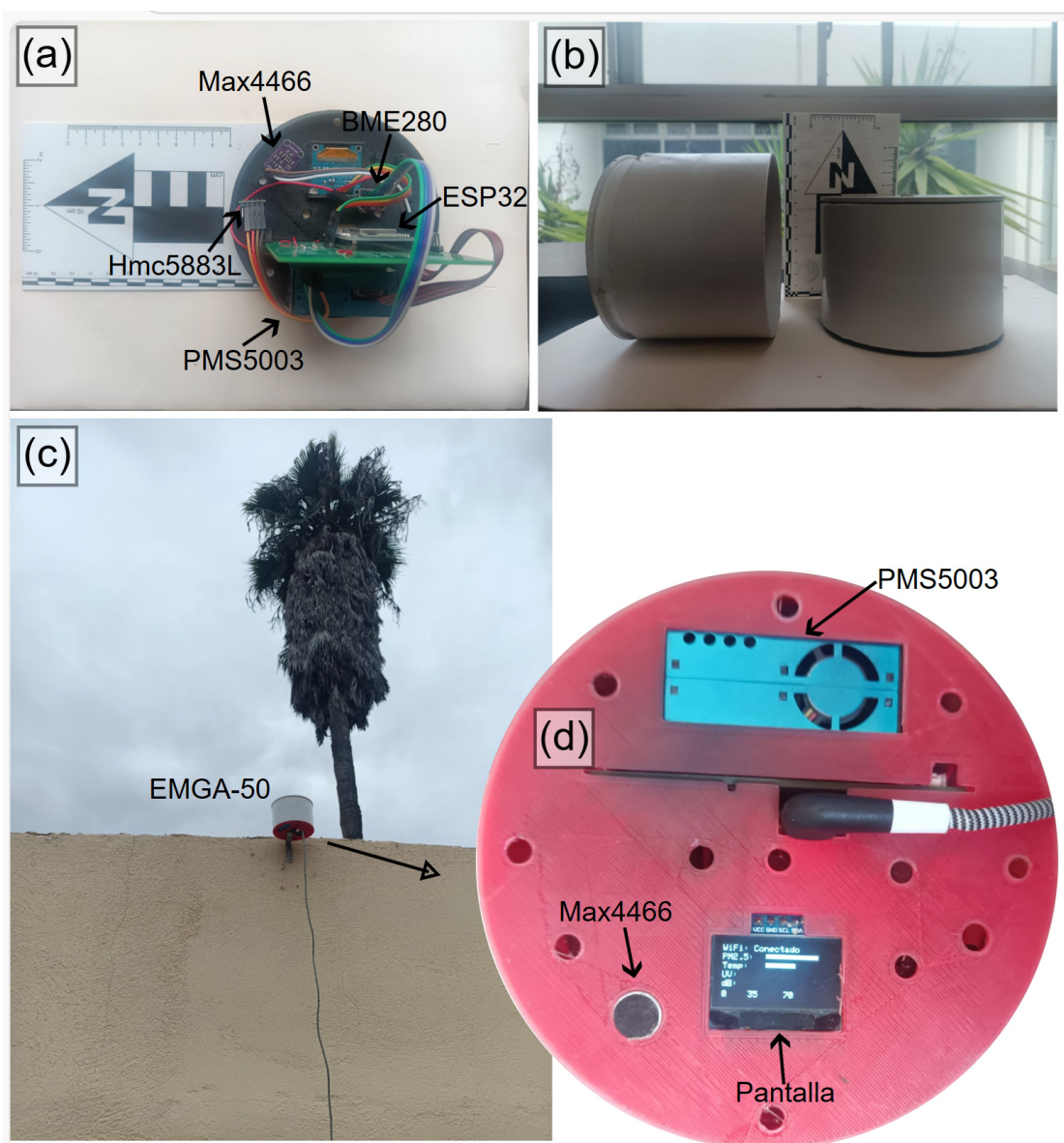


Figura 1. (a) Partes electrónicas del EMGA, incluyendo el microprocesador y los sensores; (b) Vista del cilindro de PVC que recubre las partes electrónicas; (c) vista del dispositivo EMGA-50 instalado y operando; (d) Vista inferior del dispositivo (soporte de material PLA).

Tabla 1. Resumen de las características de los sensores integrados en el dispositivo EMGA.

Tipo de sensor	Nombre del sensor	Tipo de conexión	Parámetro	Unidad de medición	Intervalo de mediciones	Resolución	Incertidumbre máxima	Referencia
Sensor del particulado atmosférico	PMS5003	Puerto UART	PM2.5 y PM10	µg/m ³	0 - 500 µg/m ³	1 µg/m ³	±10 %	Kelly et al., 2017; Wallace, 2022
Sensor de campo magnético terrestre	HMC5883L	Puerto estándar I2C	Intensidad del campo magnético	µT	130-800 µT	0.2 µT	± 2 %	Zheng et al., 2016, Lubis et al., 2020
Sensor de ruido	Max4466	Análogo	Presión	µPa	20 Hz -20 kHz.	N.D.	±1 Hz	Najahy et al., 2023; Jufri y Sehab, 2023
Sensor de temperatura, humedad y presión atmosférica	Bme280	Puerto estándar I2C	Temperatura	°C	-40 °C a +85 °C	0.25 °C	± 0.5 %	Warnakulasooriya et al., 2018, Shevchenko et al., 2020
			Humedad	% HR	0% a 100% HR	0.008 % HR	± 3 %	
			Presión atmosférica	hPa	300-1100 hPa	0.18 Pa	±1 hPa	

3. RED de MONitoreo GEOambiental

La REDMONGEO está compuesta, al momento, de nueve dispositivos distribuidos por toda la ciudad de Ensenada, B.C. (Figura 2), con el potencial de instalar dispositivos adicionales dentro de la zona urbana y rural del norte de Baja California, y ampliar la cobertura espacial en la región. La red inició sus operaciones a partir de septiembre de 2025. Todos los dispositivos fueron instalados a la intemperie (Figura 1c), en primera o segunda planta, y se les asignó un número de identificación único. La instalación de dispositivos a la intemperie implica la exposición libre a los parámetros ambientales de interés. Para garantizar su correcto funcionamiento y seguridad a largo plazo, cada dispositivo se vinculó con una residencia. Esta vinculación asegura la conectividad WiFi a un punto de acceso definido durante la instalación y funcionamiento del equipo. La ubicación geográfica de cada nodo de instalación fue registrada mediante coordenadas (datum WGS84; Figura 2) obtenidas con un equipo GPS convencional. Cada dispositivo EMGA se vinculó a la zona horaria central (UTC-6), con una frecuencia de muestreo de los parámetros ambientales cada 4 minutos. Para la transmisión de datos a la plataforma de almacenamiento y procesamiento, se establece una conexión con el servidor vía HTTPS. Para proteger la información se utiliza una clave de cifrado de 24 bits.

La plataforma para el almacenamiento, procesamiento y visualización de los datos utiliza

varias herramientas informáticas, incluyendo un sistema de base de datos relacional MySQL. La base de datos está alojada en un servidor tipo Apache y administrada mediante phpMyAdmin. La interfaz de gráfica de la plataforma es intuitiva y fácil de usar. Esta interfaz está diseñada con HTML para la estructura, CSS para el estilo visual, y JavaScript para la interactividad (front-end). Se pueden visualizar los datos tanto en forma gráfica, como en modo tabla (Figuras 3-5). Cualquier usuario puede acceder a la información procesada por los sensores, pudiendo descargar hasta 1000 datos por consulta o solicitar un histórico de los datos a los administradores de la plataforma. Desde la plataforma en línea, los datos se pueden exportar en varios formatos, como .pdf, .txt y .xls.

4. Almacenamiento y visualización de datos

La fortaleza de las EMGA radica en su arquitectura elegante, versatilidad, bajo costo de producción y durabilidad, así como en una plataforma de visualización de datos intuitiva y de fácil uso (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2025). El monitoreo y mejoras en el código fuente y el constante mantenimiento de los servidores remotos hacen único este sistema. Los datos recopilados por los sensores se transmiten a un servidor mediante conexión WiFi, lo que permite su procesamiento y visualización en tiempo real. La información que arroja la REDMONGEO es pública y se puede acceder mediante la plataforma de procesamiento y visualización de datos: <https://>

monitoreoambiental.com.mx/serie2/index.html. En la plataforma de visualización se accede a la información de todos los dispositivos instalados en varias localidades de Ensenada, así como de otras ubicaciones en México. Se destacan las redes de monitoreo ambiental instaladas en el estado de Querétaro y Ciudad Juárez. También se observa la información que arrojan las EMGA instalados en ciudades como Morelia, Guadalajara y CDMX. En la plataforma, a partir de un mapa interactivo, se puede seleccionar el nodo individual para visualizar su información.

La información se despliega en seis ventanas donde se muestra lo siguiente: (i) gráfica de correlación entre dos parámetros (Figura 3a), (ii) tabla de lecturas (Figura 3b), (iii) gráfica de barras comparativas del promedio diario de valores (Figura 3c), (iv) histogramas de las mediciones para visualizar la frecuencia de los valores en relación con el tiempo (Fig. 3d), (v) series de tiempo comparativas entre los valores de PM_{2.5} en relación con la temperatura (°C) y la humedad (%) (Figura 4) y (vi) series de tiempo del parámetro seleccionado (Figura 5).

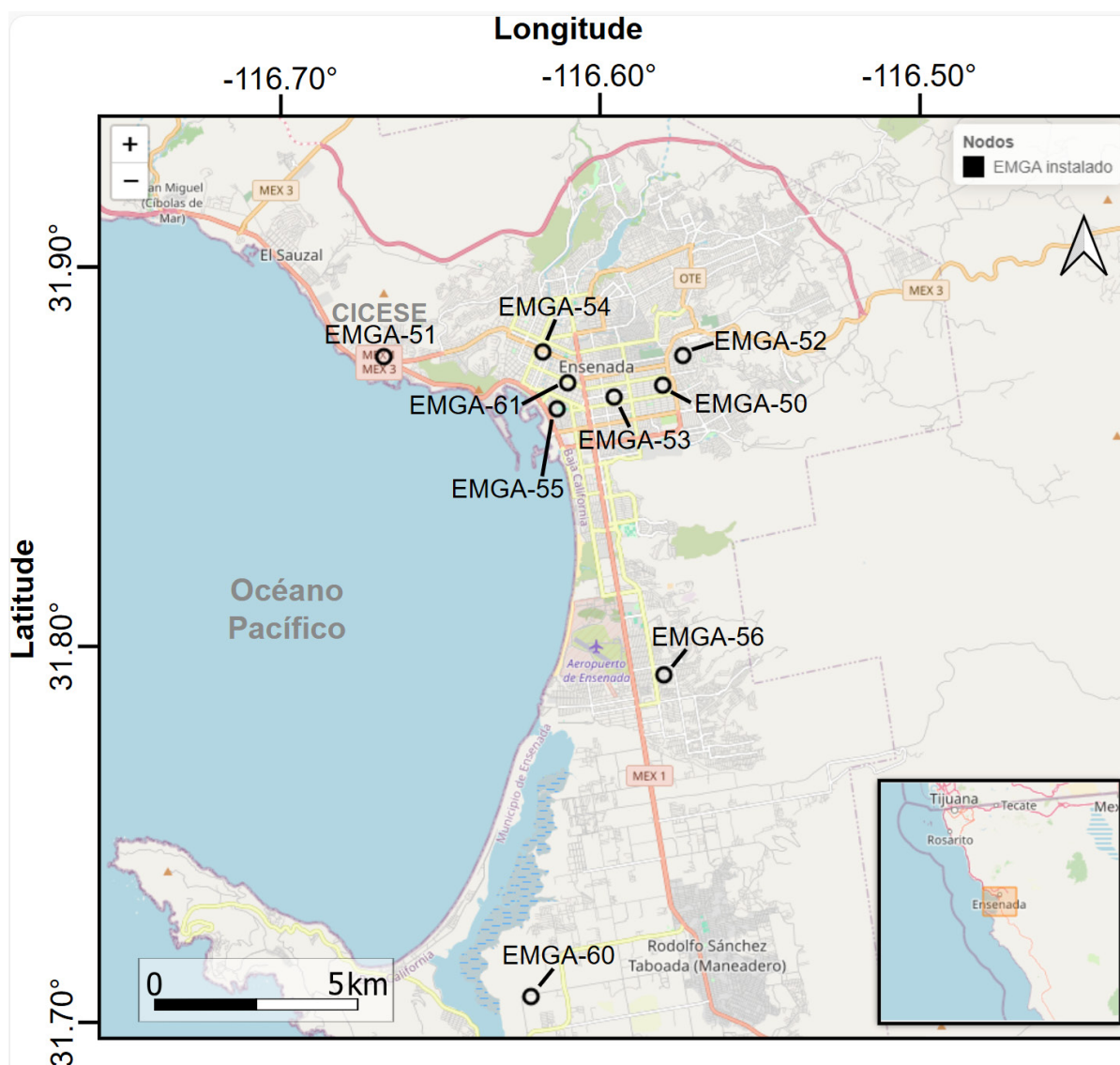


Figura 2: Mapa de Ensenada B.C., donde se muestran los nodos donde se han instalado las EMGAs de la REDMONGEO.

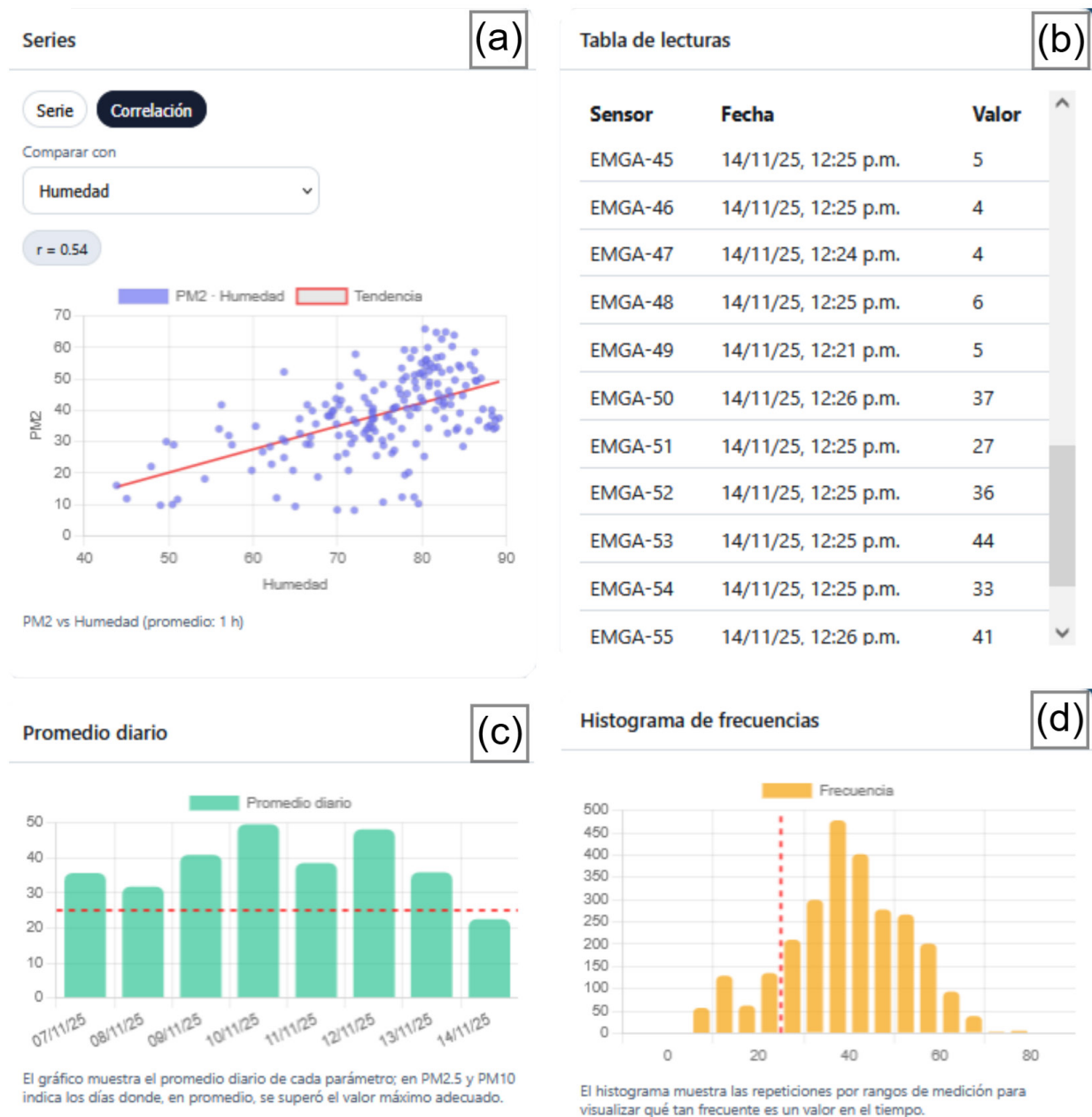
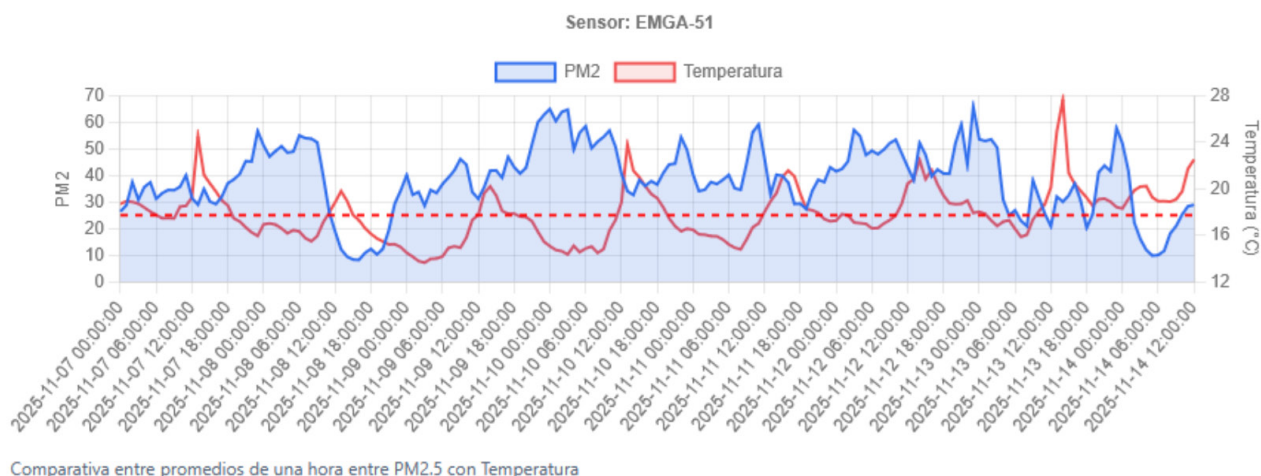


Figura 3. Ventanas de la plataforma para visualización de los datos que arrojan las EMGAs. (a) Gráfica de correlación entre la humedad y el PM2.5; (b) Tabla de lecturas para las EMGAs instalados; (c) Gráfica de barras comparativas del promedio diario de valores de PM2.5, indicando los días donde el valor máximo superó el promedio semanal; (d) Histograma que muestra las repeticiones por rango de las mediciones para visualizar la frecuencia de los valores en relación con el tiempo.

Comparativa: PM vs Temperatura

(a)



Comparativa: PM vs Humedad

(b)

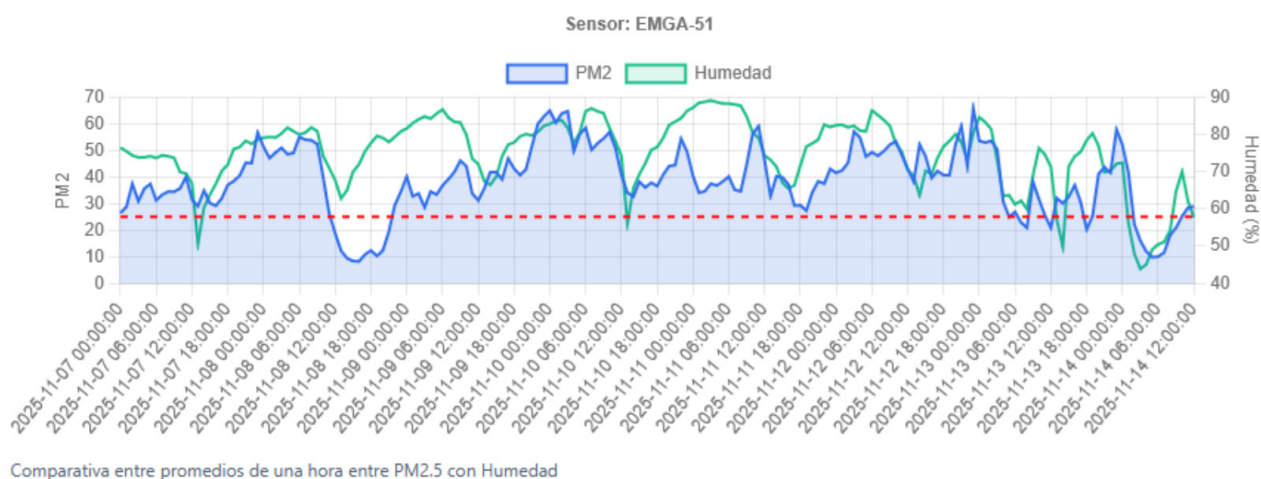


Figura 4: Comparativa de los valores de PM2.5 detectados por el EMGA-51 (instalado en CICESE, al noroeste de la ciudad) en relación con (a) temperatura (°C) y (b) humedad (%). Mediciones durante la semana del 7-noviembre al 14-noviembre del 2025.

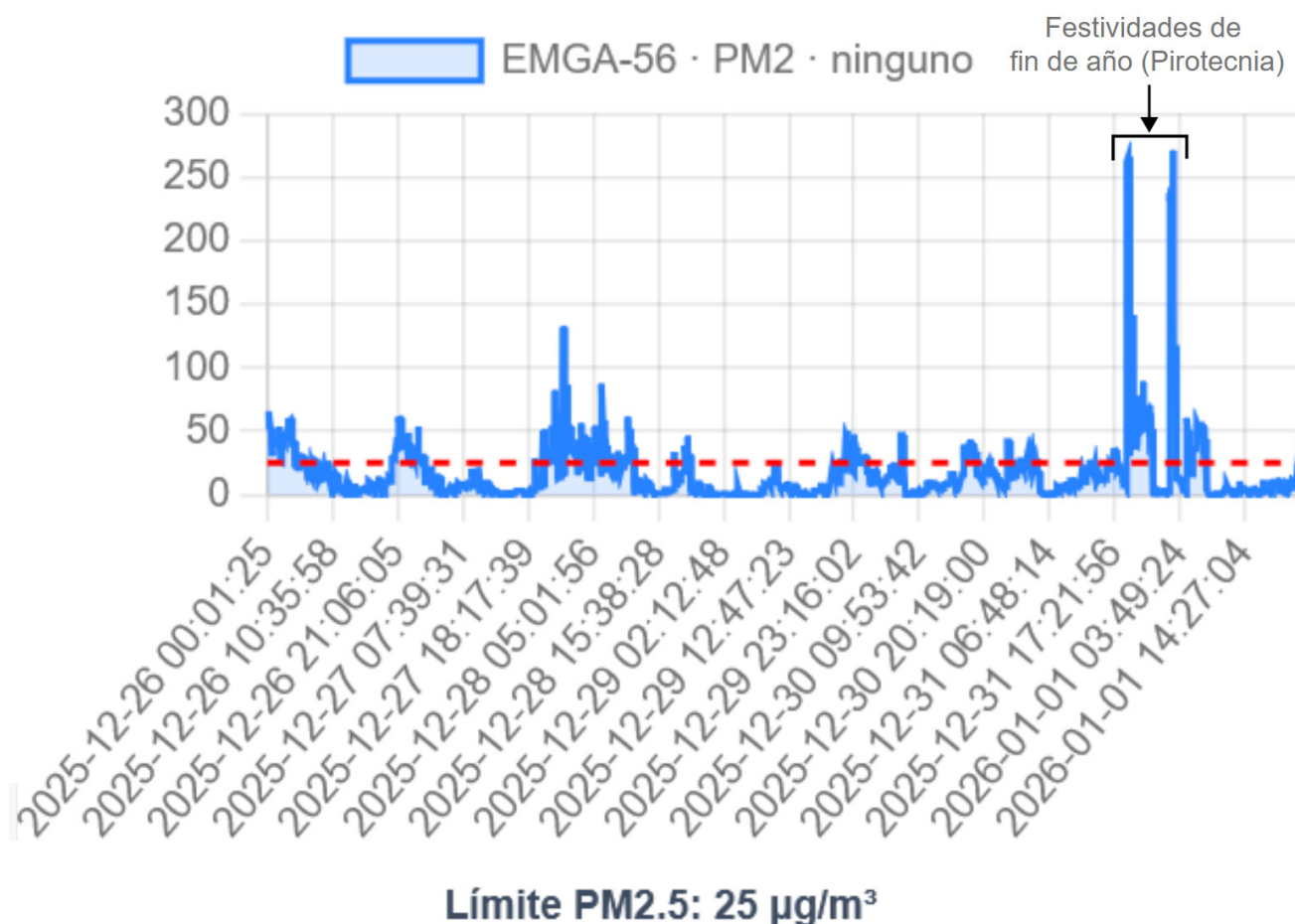


Figura 5: Serie de tiempo para los valores de PM2.5 detectados por el EMGA-56 (instalado al sur de la ciudad), durante la semana del 26-diciembre de 2025 al 01-enero de 2026.

5. Aplicaciones de las redes de monitoreo basadas en el dispositivo EMGA

Las redes de monitoreo ambiental de alta gama ofrecen una precisión y exactitud superiores en la medición de parámetros atmosféricos, en comparación con las redes de monitoreo basados en los dispositivos de bajo costo. Sin embargo, las ventajas de implementar redes de monitoreo ambiental basados en dispositivos de bajo costo incluyen la accesibilidad de los datos, simplicidad en el mantenimiento de los dispositivos y la capacidad de instalar una alta densidad de nodos de muestreo. La elección de establecer la REDMONGEO basados en dispositivos EMGAs no solo radica en su bajo costo y fácil operación, sino que se basa en su enfoque local y su factibilidad

para reproducir redes de monitoreo de este tipo en cualquier zona urbana del país. En este sentido, se pretende que gobiernos municipales, universidades estatales u organizaciones civiles adopten este tipo de redes para la factibilidad a largo plazo de los proyectos, con la inyección de financiamiento gubernamental o institucional.

Los dispositivos EMGAs han sido instalados y probados en otras ciudades y bajo condiciones ambientales y urbanas diferentes, como son Querétaro y Ciudad Juárez. Rodríguez Trejo *et al* (2024a) presenta un estudio sobre el aumento del particulado en la ciudad de Querétaro producto de eventos de corta duración atribuibles a la actividad humana, como la quema de pirotecnia. En este trabajo, se estudia un aumento súbito

en los niveles de concentración del PM_{2.5} en la atmósfera (de menos de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a más de 340 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el periodo de observación de las fiestas decembrinas que abarcó del 10 de diciembre de 2023 al 10 de enero de 2024. Por otra parte, Rodríguez Trejo *et al* (2024b) a través de un caso de estudio centrado en la detección de tormentas geomagnéticas, presentan la fiabilidad del magnetómetro HMC5883L integrado en los EMGA con el objetivo principal de mostrar sus aplicaciones prácticas tanto en contextos académicos como en proyectos comunitarios. En este trabajo se observa el descenso en el campo magnético (entre 5% y 10%) registrado en la ciudad de Querétaro durante los días de la tormenta magnética ocurrida entre el 5 y el 15 mayo de 2024, en un evento conocido a nivel mundial como “la tormenta del día de las madres” (Lazzus y Salfate, 2024). Por último, Chaparro *et al.* (2024) monitorizaron la emisión de partículas PM_{2.5} en algunos hogares de fumadores utilizando dispositivos EMGAs, caracterizando el conjunto de datos mediante un análisis de series tiempo. Este trabajo proporciona información sobre la emisión del particulado por el hábito de fumar y su impacto en áreas cerradas, información clave para los consumidores y los fumadores pasivos expuestos al humo de segunda mano.

Es importante señalar que los objetivos principales para establecer la REDMONGEO es monitorizar alteraciones atmosféricas tanto de la actividad antropogénica, así como las producidas por condiciones naturales que podrían ser registradas por la red, tales como el incremento del particulado debido a los vientos de Santa Ana (Trasviña *et al.*, 2003) o la proliferación de bancos de niebla producidas por la Corriente de California del Pacífico norte. Un excelente ejemplo de monitorización para un evento extraordinario son las actividades antropogénicas derivadas de los festejos de fin de año. En ellos se observa un incremento súbito del particulado atmosférico (PM_{2.5} y PM₁₀), por encima del promedio semanal, durante un periodo relativamente corto. Este aumento de las partículas suspendidas se observó claramente en la estación 56 (Figura

5), ubicada al sur de la ciudad de Ensenada. Esta tendencia se interpreta que es debida al uso de la pirotecnia, ya que la quema de petardos libera concentraciones importantes de partículas microscópicas a la atmósfera (Rodríguez Trejo *et al.*, 2024a).

6. Comentarios finales

La REDMONGEO es una red local urbana que está diseñada para ser un sistema de monitoreo continuo, robusto, fiable, de bajo costo y accesible para la sociedad, gobiernos, e instituciones educativas. Estas capacidades y su enfoque en la accesibilidad son fundamentales para abordar los desafíos ambientales que enfrenta el norte de Baja California. A través del desarrollo de esta red de monitoreo, se pueden identificar patrones y tendencias en las condiciones ambientales que están directamente vinculados a la actividad antropogénica, tales como tránsito vehicular, actividad industrial y marítima, incluso festividades y eventos puntuales, como el carnaval o carreras off-road. Además, condiciones naturales propias de la región pueden ser registradas y cuantificadas por la red de monitoreo. Esta información puede ser utilizada para desarrollar modelos predictivos que evalúen el impacto en el ambiente de actividades como las mencionadas, permitiendo una mejor planificación urbana y la implementación de políticas que promuevan un desarrollo más sostenible. Debido a que la información es pública, es posible la participación de la población en general, así como de sectores públicos y privados en decisiones sobre materia ambiental. En este sentido, los administradores de la REDMONGEO hacen un llamado a académicos que quieran colaborar en el tratamiento de los datos que arrojan los sensores asociados a la red. Además, se exhorta a asociaciones civiles y sectores gubernamentales a adoptar y expandir esta red por medio de financiamiento, con el objetivo de garantizar la continuidad de la red en Ensenada y expandir el monitoreo ambiental a otras áreas del norte de Baja California.

Agradecimientos

Agradecemos a los amigos y familias que apoyan este proyecto permitiendo la instalación de una EMGA en sus hogares, en especial a las Fams. Brown, Collins, Cordero, Monasterio (Fatman), González (Conchita), Rioyos (R3), Martínez (Maggie, Delfina y Misifus). También al Ing. Jorge Escalante por el apoyo técnico brindado en la fabricación de las EMGAs. Finalmente, agradecemos las indicaciones y correcciones del Dr. Luis Delgado Argote, editor en jefe de la revista GEOS, y a un revisor anónimo. Este trabajo es otra contribución de “Los caballeros de la materia”.

Referencias

- Al-Aboosi, Y., Hasan, S., 2020. Environmental monitoring systems using wireless sensor networks: an overview. *Journal of Engineering and Sustainable Development* 24. <https://doi.org/10.31272/jeads.conf.1.33>
- Chaparro, Marcos A. E., Marié, D.C., Chaparro, Mauro A. E., Rodríguez Trejo, A., Alba, B., Buitrago Posada, D., Ibarra-Ortega, H.E., Gargiulo, J.D., Böhnelt, H.N., 2024. Nano to micron-size combustion particles in smokers' homes: Magnetic properties of tobacco and cigarette ashes. *Environmental Pollution* 363, 125276. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125276>
- Jones, J.A., Groffman, P.M., Blair, J., Davis, F.W., Dugan, H., Euskirchen, E.E., Frey, S.D., Harms, T.K., Hinckley, E., Kosmala, M., Loberg, S., Malone, S., Novick, K., Record, S., Rocha, A.V., Ruddell, B.L., Stanley, E.H., Sturtevant, C., Thorpe, A., White, T., Wieder, W.R., Zhai, L., Zhu, K., 2021. Synergies Among Environmental Science Research and Monitoring Networks: A Research Agenda. *Earth's Future* 9, e2020EF001631. <https://doi.org/10.1029/2020EF001631>
- Jufrida, Falah, H.S., Sehab, N.H., 2023. Development of An Audio Frequency Meter with Arduino and MAX4466 Sound Sensor. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* 9, 10280–10286. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i11.6144>
- Kelly, K.E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., Martin, R., Butterfield, A., 2017. Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental Pollution* 221, 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039>
- Lazzús, J. A., Salfate, I. (2024). Report on the effects of the May 2024 Mother's day geomagnetic storm observed from Chile. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 261, 106304. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106304>
- Lubis, S., Pasaribu, F.I., Damanik, W.S., Siregar, M.A., Siregar, I., Hasibuan, E.S., 2020. The Design and Qibla Direction by Using the Hmc 5883 L Sensor as a Compass Rhi in the UMSU Science Laboratory (OIF). *Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx) Journal* 2, 376–381. <https://doi.org/10.33258/birex.v2i3.1077>
- Messer, H., Zinevich, A., Alpert, P., 2006. Environmental Monitoring by Wireless Communication Networks. *Science* 312, 713–713. <https://doi.org/10.1126/science.1120034>
- Najahy, M.K.A.N., Supurwoko, Rahmasari, L., 2023. Innovation of Arduino Uno-Based Physics Practicum Tool with MAX4466 Sound Sensor. *Airlangga Journal of Innovation Management* 4, 100–113. <https://doi.org/10.20473/ajim.v4i1.45314>

- Perkins, R., Nachmany, M., 2019. ‘A very human business’—Transnational networking initiatives and domestic climate action. *Global Environmental Change* 54, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.11.008>
- Rodríguez-Trejo, A., Böhnelt, H.N., Ibarra-Ortega, H.E., Salcedo, D., González-Guzmán, R., Castañeda-Miranda, A.G., Sánchez-Ramos, L.E., Chaparro, Mauro A. E., Chaparro, Marcos A. E., 2024a. Air Quality Monitoring with Low-Cost Sensors: A Record of the Increase of PM2.5 during Christmas and New Year’s Eve Celebrations in the City of Queretaro, Mexico. *Atmosphere* 15, 879. <https://doi.org/10.3390/atmos15080879>
- Rodríguez-Trejo, A., Ibarra-Ortega, H.E., Böhnelt, H., Escalante-González, J., 2025. Estación de monitoreo geoambiental (EMGA): dispositivo de monitoreo ambiental en tiempo real con sensores de bajo costo para entornos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 41, 399–413. <https://doi.org/10.20937/RICA.55355>
- Rodríguez-Trejo, A., Ibarra-Ortega, H.E., González-Guzmán, R., 2024b. La utilidad de los sensores de bajo costo en las Geociencias: Caso de estudio para la detección de tormentas geomagnéticas. *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias* 3, 60–68. <https://doi.org/10.22201/cgeo.29928087e.2024.3.2.9>
- Rubio, J. de J., Hernández-Aguilar, J.A., Ávila-Camacho, F.J., Stein-Carrillo, J.M., Meléndez-Ramírez, A., 2016. Sistema sensor para el monitoreo ambiental basado en redes Neuronales. *Ingeniería, investigación y tecnología* 17, 211–222.
- Shevchenko, G.V., Glubokov, N.A., Yupashevsky, A.V., Kazmina, A.S., 2020. Air Flow Sensor Based on Environmental Sensor BME280, in: 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Presented at the 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), pp. 432–435. <https://doi.org/10.1109/EDM49804.2020.9153474>
- Trasviña, A., Ortiz-Figueroa, M., Herrera, H., Cosío, M.A., González, E., 2003. ‘Santa Ana’ winds and upwelling filaments off Northern Baja California. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 37, 113–129. [https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(03\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(03)00018-6)
- Wallace, L., 2022. Intercomparison of PurpleAir Sensor Performance over Three Years Indoors and Outdoors at a Home: Bias, Precision, and Limit of Detection Using an Improved Algorithm for Calculating PM2.5. *Sensors* 22, 2755. <https://doi.org/10.3390/s22072755>
- Warnakulasooriya, K., Jayasuriya, Y.P., Sudantha, B., 2018. Generic IoT Framework for Environmental Sensing Researches: Portable IoT Enabled Weather Station, in: 2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). Presented at the 2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2018.8520238>
- Yumalin, T., Salikhov, R., Salikhov, T.R., 2023. Integrating Wireless Sensor Networks with Organic Polymers for Sustainable. <https://doi.org/10.3233/ATDE230840>

- Zhang, D., 2025. Establishing a nation-wide eco-environment monitoring network for sustainable governance. *Environmental Science and Ecotechnology* 26, 100585. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100585>
- Zhao, J., Tang, Y., Zhu, X., Zhu, J., 2025. National environmental monitoring and local enforcement strategies. *Nat Cities* 2, 58–69. <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00173-y>
- Zheng, J., Wang, Q., Xu, B., Bi, W., Tao, Y., Xiao, Y., Ozdemir, S., 2016. Non-intrusive Traffic Data Collection with Wireless Sensor Networks for Intelligent Transportation Systems. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks* 34, 41–57.

Manuscrito recibido: 26 de noviembre de 2025

Recepción del manuscrito corregido: 9 de enero de 2026

Manuscrito aceptado: 9 de febrero de 2026