

## ESTACIÓN DE MONITOREO GEOAMBIENTAL (EMGA): DISPOSITIVO DE MONITOREO AMBIENTAL EN TIEMPO REAL CON SENSORES DE BAJO COSTO PARA ENTORNOS URBANOS

Geo-environmental monitoring station (EMGA): Real-time environmental monitoring device using low-cost sensors for urban environments

Alejandro RODRÍGUEZ-TREJO\*, Héctor Enrique IBARRA-ORTEGA,  
Harald BÖHNEL y Jorge ESCALANTE-GONZÁLEZ

Instituto de Geociencias, Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla La Mesa, Juriquilla, C.P. 76230, Querétaro, México.

\*Autor para correspondencia: alexrt@geociencias.unam.mx

(Recibido: julio 2024; aceptado: diciembre 2024)

Palabras clave: PM<sub>2.5</sub>, calidad del aire, contaminación ambiental, redes de monitoreo.

### RESUMEN

El impacto humano en las condiciones ambientales de las zonas urbanas se traduce en un aumento de la contaminación y una disminución de la calidad de vida de los habitantes. Para comprender cómo cambian las condiciones ambientales en el tiempo y el espacio, y su relación con la actividad humana, es esencial contar con equipos que puedan monitorear estas condiciones en tiempo real. Para abordar esta necesidad se desarrolló el dispositivo Estación de Monitoreo Geo Ambiental (EMGA) y su plataforma de gestión, almacenamiento, visualización y descarga de datos. Este dispositivo, diseñado y programado en el Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas del Instituto de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), permite realizar un monitoreo ambiental en tiempo real en entornos urbanos, facilitando el análisis del impacto de las actividades humanas en las condiciones ambientales. Las EMGA son capaces de medir en tiempo real ocho variables diferentes mediante sensores de bajo costo: calidad del aire (partículas suspendidas PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1.0</sub> y PM<sub>10</sub>), temperatura (°C), presión atmosférica, humedad relativa (%), ruido ambiental (μPa) y variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre (μT). Los datos recopilados por los sensores se envían en tiempo real a la plataforma de visualización cada cuatro minutos y pueden ser consultados desde cualquier computadora o dispositivo móvil. La información obtenida por las EMGA permite desarrollar y adaptar redes de monitoreo ambiental de bajo costo, lo que facilita el análisis de las condiciones ambientales en zonas urbanas a lo largo del tiempo y el espacio.

Key words: PM<sub>2.5</sub>, air quality, environmental pollution, monitoring networks.

### ABSTRACT

Human impact on the environmental conditions of urban areas translates into increased pollution and a decline in the quality of life for residents. To understand how environmental conditions change over time and space, and their relationship to human

activity, it is essential to have equipment that can monitor these conditions in real time. To address this need, the Geo-Environmental Monitoring Station (EMGA, for its acronym in Spanish ) and its data management, storage, visualization, and download platform were developed. This device, designed and programmed at the Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas of the Institute of Geosciences at Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), allows for real-time environmental monitoring in urban environments, facilitating the analysis of the impact of human activities on environmental conditions. EMGA stations are capable of measuring eight different variables in real time using low-cost sensors: air quality (particulate matter  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{1.0}$ , and  $PM_{10}$ ), temperature ( $^{\circ}C$ ), atmospheric pressure, relative humidity (%), ambient noise ( $\mu Pa$ ), and variations in the intensity of the Earth's magnetic field ( $\mu T$ ). The data collected by the sensors is transmitted to the visualization platform every four minutes, allowing access from any computer or mobile device. The information obtained from EMGA stations enables the development and adaptation of low-cost environmental monitoring networks, facilitating the analysis of environmental conditions in urban areas over time and space.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las zonas urbanas crecen a un ritmo acelerado. Este crecimiento conlleva un aumento en la demanda de servicios esenciales, como el transporte, la actividad industrial, la educación, el comercio y la construcción de infraestructura (de la Torre 2010, Daude et al. 2017). A su vez, esto genera un incremento significativo en la generación de desechos y contaminantes, lo que provoca cambios profundos en el entorno urbano. Este fenómeno también contribuye al cambio climático, reflejado en condiciones extremas como la sequía (Ortega-Gaucin et al. 2018) y un aumento en la frecuencia de incendios en áreas cercanas a las zonas urbanas (Moreno et al. 2015, Ibarra-Montoya et al. 2016).

Las condiciones ambientales resultantes de esta rápida urbanización afectan principalmente la calidad del aire, un factor crítico que repercute directamente en la calidad de vida de los habitantes. La contaminación del aire puede llevar a una serie de problemas de salud que van desde enfermedades respiratorias hasta afecciones cardiovasculares, lo que resalta la urgencia de abordar estos desafíos (Romero-Placeres et al. 2006, Catalán-Vázquez et al. 2009, Montaña et al. 2016).

En este contexto, el estudio del impacto de la actividad humana en las condiciones ambientales de las zonas urbanas se ha convertido en un tema de vital importancia a nivel global. La comprensión de cómo estas actividades afectan el ambiente es fundamental para desarrollar estrategias que mitiguen sus efectos adversos. El monitoreo y la medición de las variaciones en las condiciones ambientales asociadas con la actividad humana son cruciales para informar políticas públicas y acciones comunitarias efectivas.

Para abordar este desafío, se desarrolló la Estación de Monitoreo Geo Ambiental (EMGA), un dispositivo diseñado para el monitoreo en tiempo real de diversas condiciones ambientales en áreas urbanas. Este innovador sistema integra sensores de bajo costo y permite el procesamiento en tiempo real de los datos a través de una plataforma web, que facilita su almacenamiento y visualización. Las estaciones EMGA son capaces de medir ocho parámetros ambientales: concentración de partículas atmosféricas ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{1.0}$  y  $PM_{10}$ ) en  $\mu g/m^3$ , temperatura ( $^{\circ}C$ ), presión atmosférica, humedad relativa (%), ruido ambiental ( $\mu Pa$ ) y variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre ( $\mu T$ ).

Los datos recopilados por los sensores se transmiten a un servidor mediante conexión wifi, lo que permite su procesamiento y visualización en tiempo real a través de la plataforma, de acceso libre por internet. Este enfoque no solo democratiza la posibilidad de acceder a información ambiental valiosa, sino que también empodera a las comunidades locales para que participen activamente en la toma de decisiones relacionadas con su entorno.

A través de la integración de los sensores, se pueden identificar patrones y tendencias en las condiciones ambientales que están directamente vinculadas a la actividad humana, como tránsito vehicular, actividad industrial, incluso festividades y celebraciones (Rodríguez-Trejo et al. 2024). También pueden emplearse para monitoreo en interiores para situaciones diversas como puede ser el tabaquismo y otras fuentes de contaminación atmosférica (Chaparro et al. 2024). Esta información puede ser utilizada para desarrollar modelos predictivos que evalúen el impacto antrópico en el ambiente, permitiendo una

mejor planificación urbana y la implementación de políticas que promuevan un desarrollo sostenible. Además, las estaciones EMGA se pueden adaptar para realizar estudios específicos sobre eventos de corta duración, como la quema de pirotecnia o los incendios forestales que, aunque breves, tienen un impacto considerable en la calidad del aire.

Los dispositivos EMGA están diseñados para ser un sistema de monitoreo continuo, de bajo costo y accesible para la sociedad, gobiernos, universidades y empresas privadas, siendo funcionales para cualquier entorno urbano sin importar su tamaño. Esta capacidad de adaptación y su enfoque en la accesibilidad son fundamentales para abordar los desafíos ambientales que enfrentan las ciudades contemporáneas.

El desarrollo de las EMGA se llevó a cabo en tres etapas: a) desarrollo del *hardware* y programación del dispositivo; b) desarrollo y programación de la plataforma de almacenamiento, procesamiento y visualización de datos; c) prueba del dispositivo y comparación de resultados con otro dispositivo comercial similar. Los sensores utilizados para el desarrollo del equipo se describen a continuación. Sin embargo, para mayor detalle se puede consultar las especificaciones descritas por cada fabricante. Además del código utilizado para la funcionalidad del *hardware* y la plataforma de visualización de datos, el dispositivo se desarrolló íntegramente en el laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas del Instituto de Geociencias (IGc) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al igual que el circuito impreso que integra el microcontrolador con todos los sensores y su fuente de alimentación; de igual manera se diseñó la base que conforma el soporte del circuito impreso y los sensores.

## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO

### Diseño electrónico

El equipo está compuesto por cinco sensores integrados de distintos fabricantes, que miden nueve variables ambientales independientes. Estos sensores están interconectados y controlados por un módulo microcontrolador NodeMCU ESP32 de 40 pines, lo que permite la adquisición y preprocesamiento de los datos (Maier et al. 2017, Babiuch et al. 2019, Hercog et al. 2023) así como la transmisión de datos a través de wifi utilizando el protocolo IEEE 802.11. El sistema se alimenta vía USB a 5V, que se conecta eléctricamente a una fuente de alimentación de 120 V

y 2 A. Para el montaje del microcontrolador y el cableado de los sensores, se desarrolló una placa en circuito impreso de 78 x 78 mm. Para su diseño se utilizó el programa de licencia libre KiCad V7.0, se fabricó en materiales de plástico, cobre y resina (**Fig. 1a y 1b**). Es un diseño original del laboratorio de Paleomagnetismo del IGc. La **figura 1a** muestra el diseño original y la disposición de cada sensor para su conexión y ensamblaje al módulo ESP32.

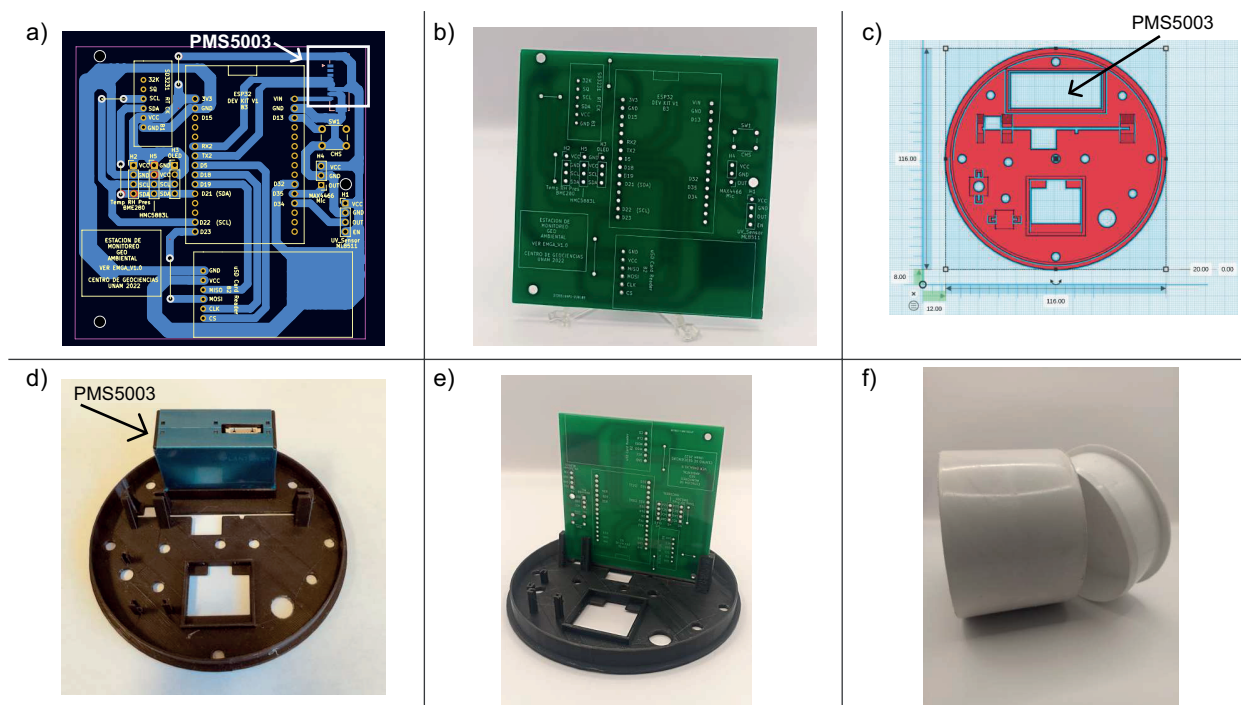
### Diseño del embalaje

El ensamblaje de los sensores, el microcontrolador y la placa de circuito impreso también es un diseño original desarrollado en el laboratorio de Paleomagnetismo del IGc, utilizando tecnología de diseño e impresión en 3D con ácido poliláctico (PLA) de alta resistencia térmica. La estructura consiste en un soporte circular de 116 mm de diámetro (**Fig. 1c y 1d**), que incorpora montajes específicos para el microcontrolador y los sensores, con aberturas laterales que facilitan su acceso y ventilación (**Fig. 1e**).

El prototipo se desarrolló con el programa Tinkercad-Autodesk, un *software* en línea de licencia libre para diseño 3D. Para su instalación y operación en exteriores, las estaciones EMGA se alojan en un gabinete cilíndrico fabricado en policloruro de vinilo (PVC, por su sigla en inglés) de uso comercial, con un diámetro de 110 mm y una altura de 35 mm, acoplado a un tubo del mismo material, con 110 mm de diámetro y 78 mm de altura (**Fig. 1f**). Este gabinete protege los componentes de las condiciones meteorológicas adversas, reduciendo el riesgo de ingreso de humedad y polvo y previniendo posibles daños por la exposición directa a la luz solar, que podría generar incrementos considerables en la temperatura. Los componentes están sellados utilizando pegamento para PVC de uso comercial, lo que asegura su resistencia al agua y a la radiación solar.

El PVC utilizado en el embalaje corresponde al de uso en instalaciones sanitarias y está disponible comercialmente en tiendas especializadas. Este gabinete puede ser sustituido por uno de dimensiones similares impreso en 3D. La conexión a la red eléctrica se realiza mediante un cable tipo USB-C o micro-USB, según el modelo del microcontrolador, con extensiones selladas contra la humedad que varían entre 3 y 10 metros, garantizando un sellado hermético para evitar daños por infiltración de agua.

Los equipos EMGA pueden ser instalados en exteriores, ya sea en el primer o segundo nivel de viviendas o edificios. También es posible su uso en interiores, como residencias, hospitales, oficinas, escuelas u otros espacios cerrados.



**Fig. 1.** (a,b) Diseño del circuito impreso; (c,d) diseño de la base para montaje de microcontrolador y sensores; (e) montaje del circuito impreso en la base impresa en 3D; (f) embalaje para los componentes.

## DESCRIPCIÓN DEL MICROCONTROLADOR Y SENSORES

### Microcontrolador ESP32

El dispositivo usa un microcontrolador de tipo No-deMCU ESP32 (**Fig. 2d**), desarrollado por Espressif Systems. Es una placa de desarrollo de bajo costo y bajo consumo de energía, diseñada para proyectos de Internet de las cosas (IoT) para domótica y sistemas integrados (Maier et al. 2017). El microcontrolador tiene un procesador de dos núcleos Xtensa LX6 de 32 bits que permite la ejecución de múltiples tareas y el procesamiento de operaciones complejas. El microcontrolador cuenta con módulo de conectividad wifi y *Bluetooth* integrados (**Fig. 2a**). También cuenta con puertos periféricos de tipo: UART, SPI, I2C, GPIO, ADC, DAC, PWM, lo que permite la conexión y comunicación con una gran diversidad de sensores. La placa tiene soporte para múltiples entornos de desarrollo integrados (IDE) como son para Arduino, MicroPython, ESP-IDF y PlatformIO. Se utiliza este microcontrolador por su bajo costo y rendimiento, así como por su capacidad para procesamiento de operaciones diversas.

### Sensor de partículas atmosféricas

La calidad del aire es uno de los principales parámetros a definir al momento de desarrollar un

dispositivo de monitoreo ambiental, esto por todas las implicaciones ambientales y sociales que implican, con efectos que van desde la calidad de vida de los ciudadanos, hasta implicaciones de salud y diversidad faunística en entornos urbanos. A fin de detectar concentraciones de diferentes tamaños de partículas en la atmósfera, en proporción de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , la EMGA utiliza un sensor óptico de detección de tipo Plantower PMS5003 (**Fig. 2b**), el cual está diseñado para medir la concentración de partículas en la atmósfera. Para la detección, emplea un diodo láser para generar un haz de luz que se dispersa al contacto con cualquier partícula, utiliza esta dispersión para calcular su concentración en la atmósfera (He et al. 2020, Kaur et al. 2023). El sensor es capaz de diferenciar partículas con tamaños inferiores a los  $2.5 \mu\text{m}$  y  $10 \mu\text{m}$ . Emplea un algoritmo para compensar interferencias en las mediciones, asegurando la precisión de los resultados. Tiene un rango de medición efectivo de  $0 \sim 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y máximo de  $\sim 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a una resolución de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El error estándar máximo asociado de  $\pm 10 \%$  en un rango de  $100 \sim 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y de  $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $0 \sim 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El sensor se conecta al microcontrolador mediante su interfaz de comunicación en serie a través del puerto UART, para la transmisión y procesamiento de datos. Funciona con un consumo bajo de energía, menor a  $100 \text{ mA}$  y



opera en un rango de temperatura amplio (5° a 60° C). El sensor se acopla a la base de PLA mediante un espacio rectangular de 50 x 20 mm para el adecuado flujo de aire que permita la lectura de concentración de partículas (**Fig. 1c y 1d**).

Este tipo de sensores de bajo costo, es una alternativa eficiente para la medición de calidad del aire en zonas urbanas, permitiendo establecer redes densas para cubrir espacial y temporalmente las variaciones en la concentración de partículas atmosféricas (Kelly et al. 2017). Su uso y distribución se ha incrementado considerablemente en años recientes. El sensor PMS5003 es uno de los más utilizados en diferentes equipos similares a las EMGA (Wallace 2022). Su funcionamiento y precisión están en función del ambiente donde se utilice, con variaciones asociadas a variables como la temperatura, la humedad, la altitud y otras. Diferentes autores han propuesto diferentes métodos de calibración de los sensores con base en diferentes parámetros, algoritmos y equipos de referencia (Levy-Zamora et al. 2019, Zusman et al. 2020, Wallace et al. 2021).

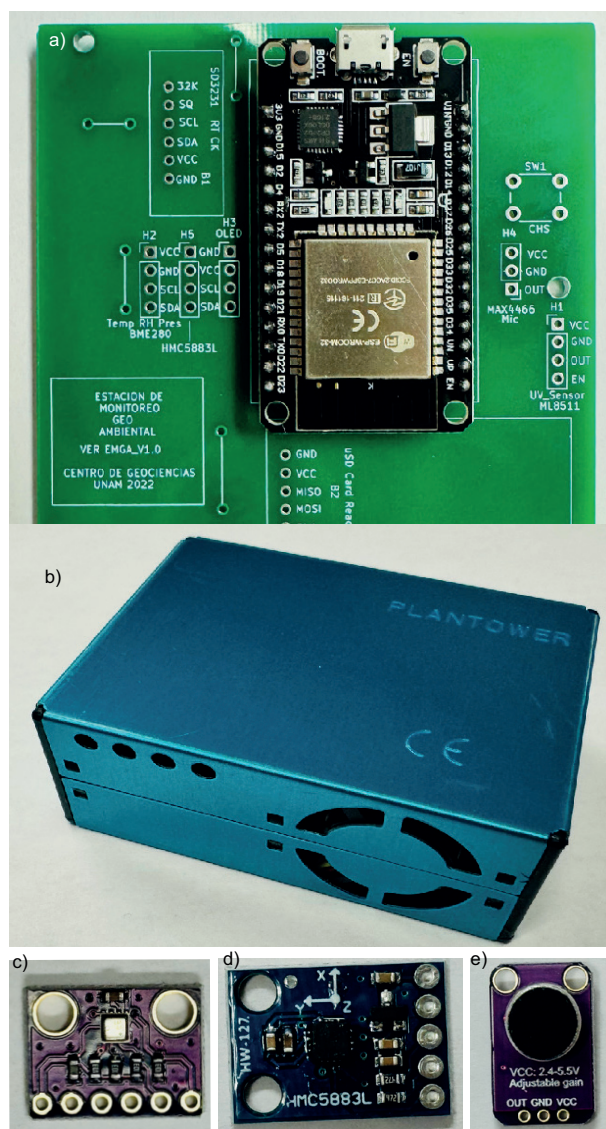
Para el sensor PMS5003 la humedad relativa puede representar un factor de variación en la toma de datos (Bulot et al. 2019), que puede provocar sobre estimaciones en la concentración de las partículas. Para mejorar esto, se propone una calibración basada en la corrección de los datos respecto a valores de humedad relativa (HR %) y temperatura (T °C) (Levy-Zamora et al. 2019) mediante las ecuaciones (1) y (2). Las estaciones EMGA están dotadas con un sensor (BME280) de temperatura, humedad relativa y presión barométrica (**Fig. 2c**), con lo que se puede realizar el ajuste con los datos generados por las mismas estaciones.

$$PM_{HR\_corr} = \frac{PM_{EMGA}}{(0.025 * HR + 0.17)} \quad (1)$$

$$PM_{corr} = \frac{PM_{HR\_corr}}{(-0.0007 * T + 0.9918)} \quad (2)$$

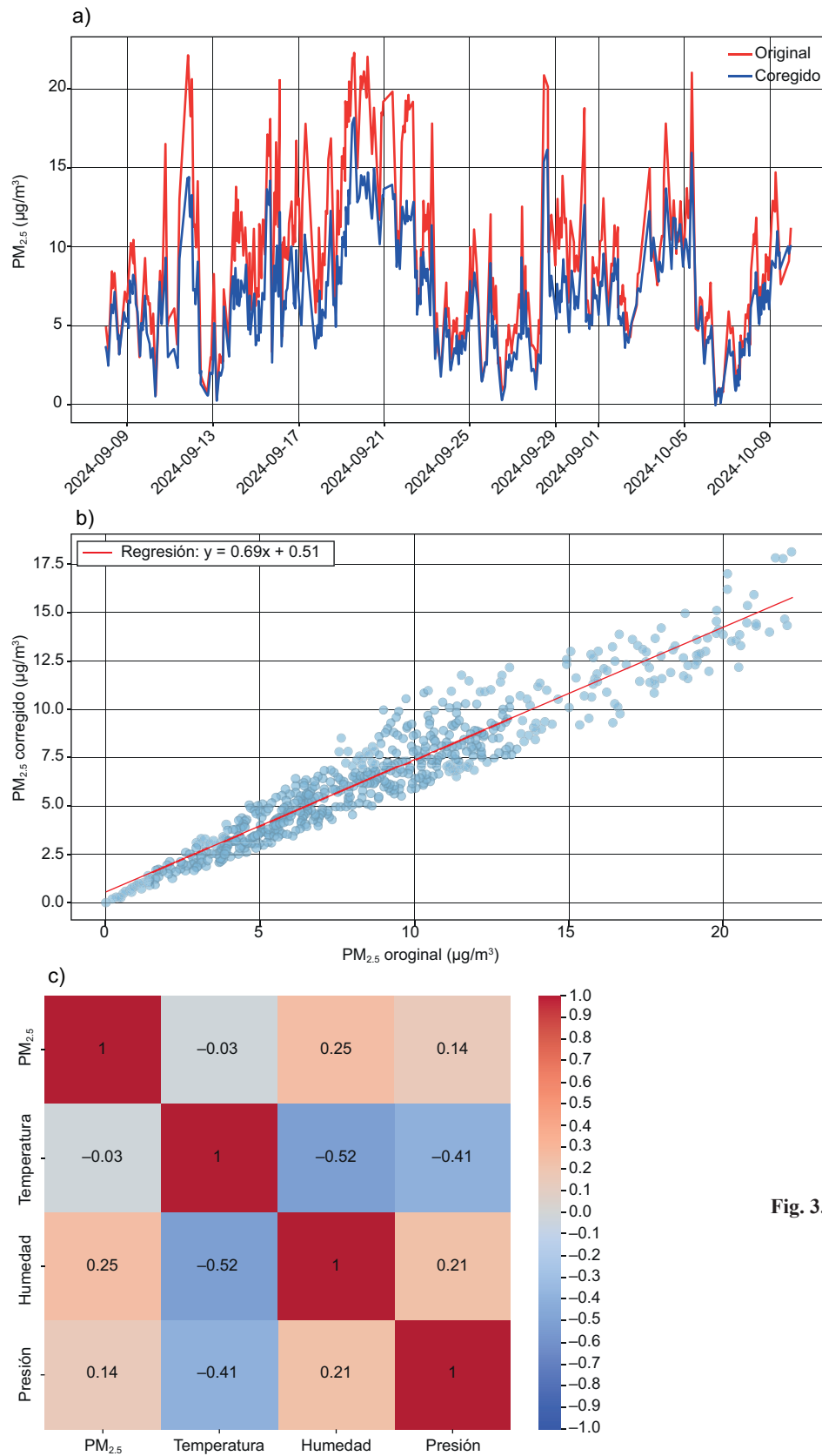
PM = partículas atmosféricas

Donde  $PM_{HR\_corr}$  es el valor corregido respecto a la humedad relativa;  $PM_{EMGA}$  es el valor de la concentración de partículas obtenido por el sensor (PMS5003) de la estación EMGA;  $PM_{corr}$  es el valor corregido de PM luego de las correcciones por humedad relativa y temperatura. La **figura 3** muestra resultados de datos obtenidos por una estación EMGA instalada en exteriores durante 30 días. La **figura 3a** muestra las series de tiempo originales y



**Fig. 2.** Componentes y sensores que integran las Estaciones de Monitoreo Geo Ambiental. a) Microcontrolador Esp32 montado en el circuito impreso. b) Sensor de partículas atmosféricas PMS5003. c) Sensor de temperatura, humedad y presión atmosférica, Bme280. d) Sensor de campo magnético terrestre Hmc5883L. e) Sensor de ruido Max4466.

los datos corregidos por las ecuaciones 1 y 2. Se observa cómo los datos se ajustan luego de la corrección por humedad y temperatura. La **figura 3b** muestra la dispersión existente entre los datos originales y los datos corregidos, con una buena correlación a concentraciones inferiores a los 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y que disminuye conforme aumenta la correlación. Esto es indicador de la relación existente entre la temperatura y humedad con las lecturas de partículas del sensor.



**Fig. 3.** Serie de tiempo a 30 días de datos de las partículas suspendidas PM<sub>2.5</sub>. a) Comparativa entre la serie de tiempo de datos originales (curva roja) y los datos corregidos luego de la calibración propuesta (curva azul). b) Dispersión y regresión lineal entre los datos originales y los datos corregidos. c) Matriz de correlación entre los datos de PM<sub>2.5</sub>, humedad, temperatura y presión atmosférica.

La **figura 3c** muestra la correlación observada entre la concentración de las partículas, la temperatura, la humedad y la presión atmosférica observadas en la serie de tiempo, donde se aprecia que existe una correlación significativa entre la concentración de las partículas y la humedad (0.25) y una fuerte correlación entre la temperatura y la humedad (−0.52). La **figura 3** muestra un ejemplo de la variación en concentración de partículas PM<sub>2.5</sub> en un entorno urbano cotidiano.

### Sensor de campo magnético terrestre

El sensor HMC5883L de Honeywell (**Fig. 2d**), es un sensor triaxial de campo magnético terrestre que utiliza el efecto Hall para medir campos magnéticos en tres dimensiones (Zheng et al. 2016, Lubis et al. 2020). Está diseñado para aplicaciones que requieren detección precisa y sensible de campos magnéticos, como navegación, guía y posicionamiento. Opera en un rango de medición, a lo largo de tres ejes (X, Y, Z) de  $\pm 130 \pm 800 \mu\text{T}$ . Con una resolución de hasta  $0.2 \mu\text{T}$  por bit, para una detección precisa de cambios sutiles en el campo magnético terrestre. Proporciona precisión de hasta  $\pm 2 \%$  del rango completo, asegurando mediciones en condiciones ambientales diversas, como variaciones de temperatura y humedad. Su frecuencia de muestreo es programable hasta 75 Hz. Se conecta con el ESP32 a través de la interfaz serie estándar I2C. Funciona con bajo consumo de energía, con una corriente de hasta  $100 \mu\text{A}$  y en un amplio rango de temperaturas, desde  $-40^\circ\text{C}$  hasta  $+85^\circ\text{C}$ . El sensor adquiere datos del campo magnético mediante sus componentes vectoriales X, Y, Z, de los cuales se obtiene el valor del campo total del campo magnético terrestre (Intensidad  $\mu\text{T}$ ), mediante el cálculo de la magnitud del vector magnético.

$$I = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Con este dato, es posible determinar la influencia del ser humano en la deformación del campo magnético terrestre en el espacio y el tiempo, como pueden ser alteraciones propias de las construcciones urbanas por las varillas de construcción o por cables de alta tensión, la circulación de vehículos o hasta la posible relación con aspectos climáticos (Courtilot et al. 2007). De igual manera, es una fuente de datos espacio temporal de la actividad geomagnética que puede ser monitoreada a bajo costo en entornos urbanos, donde incluso se puede observar el efecto de tormentas geomagnéticas de alta intensidad.

Si bien la intensidad del campo magnético terrestre se puede ver afectada por una gran diversidad de

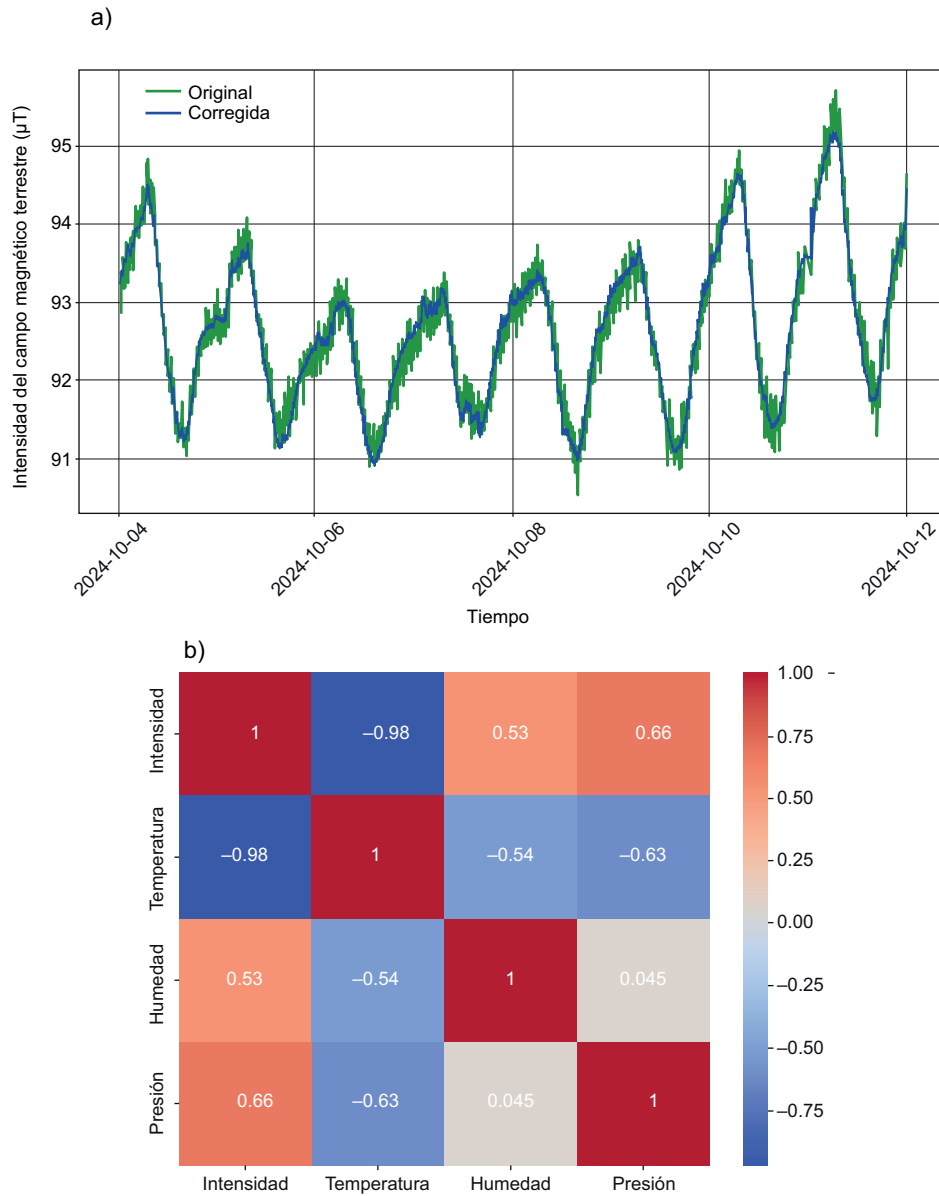
factores en entornos urbanos, la idea de tener este tipo de sensores es precisamente observar cómo los entornos urbanos alteran esta señal, con el magnetómetro HMC5883L se pretende determinar este efecto. Sin embargo, algunos factores como la temperatura, la humedad y la presión atmosférica pueden influir en la señal obtenida por el sensor. Para mejorar esto se propone un ajuste de regresión lineal múltiple para aminorar su efecto (Draper 1998). La calibración de los datos se realizó aplicando un modelo de regresión lineal múltiple, expresado como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \epsilon_y$$

Donde Y representa la intensidad medida, y  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  corresponden a los parámetros meteorológicos de temperatura, humedad y presión medidos por el sensor BME280, respectivamente. Los coeficientes  $\beta_0$  (término independiente) y  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  se estimaron mediante la minimización de la suma de los errores al cuadrado. Este proceso permite obtener una serie de tiempo de intensidad corregida, ajustando los valores originales de intensidad a las condiciones meteorológicas, lo que minimiza las distorsiones causadas por estos factores externos y mejora la precisión de las mediciones del campo magnético terrestre. La **figura 4a** muestra una serie de tiempo de campo magnético terrestre tomada por la estación EMGA durante ocho días (curva verde) y el efecto de la corrección luego de la calibración realizada (curva azul). La relación de las variables ambientales con los datos medidos de campo magnético terrestre se observan en la **figura 4b**, donde se muestra una matriz de correlación, con una fuerte relación entre la intensidad medida con la temperatura y la humedad relativa. La **figura 4** ilustra las variaciones usuales del campo magnético terrestre y sus cambios diurnos en un día habitual. Se observa una intensidad (ca.  $92 \mu\text{T}$ ) considerablemente mayor a la usual (ca.  $50 \mu\text{T}$ ), esto ocasionado por las alteraciones urbanas, en el caso de este sensor esta diferencia es resultado de la interferencia ocasionada por las varillas de hierro en la construcción donde se alojó el sensor (Campus UNAM). De igual manera, en la **figura 4a** se puede observar un efecto urbano que consiste en un incremento del tránsito de vehículos en diferentes puntos del tiempo.

### Sensor de ruido

La detección de ruido permite determinar el nivel de contaminación sonora en entornos urbanos, la cual

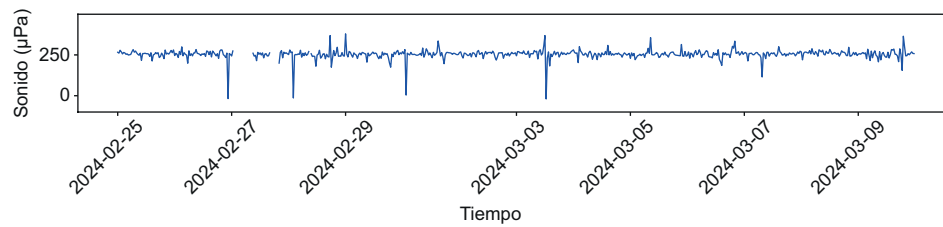


**Fig. 4.** a) Serie de tiempo de datos de intensidad de campo magnético terrestre (campo total) obtenidos por una Estación de Monitoreo Geo Ambiental durante 14 días (curva verde) y los datos corregidos por la calibración propuesta (curva azul) con datos de temperatura y humedad. b) Matriz de correlación entre los datos obtenidos de campo magnético terrestre y variables ambientales de presión atmosférica, temperatura y humedad.

pueden tener consecuencias adversas en la salud humana (Zannin et al. 2006, De Paiva et al. 2015). Las EMGA integran un sensor de ruido a fin de hacer un monitoreo espacio temporal de los puntos de ruido ambiental en entornos urbanos. El sensor de ruido Max4466 (**Fig. 2e**) incluye un amplificador de alta sensibilidad y bajos niveles de ruido. Con una arquitectura interna optimizada y una ganancia ajustable de hasta 125 dB, permite una amplificación precisa

de señales de baja amplitud. Tiene una respuesta de frecuencia plana de 20 Hz a 20 kHz, así como una impedancia de entrada de 6 k $\Omega$  para minimizar la carga en las señales del micrófono. Funciona en un rango de voltajes de alimentación que va de 2.4 V a 5.5 V. La **figura 5** muestra datos obtenidos por la EMGA mediante el sensor de ruido Max4466. Los datos mostrados son sin promediar durante 14 días de manera continua para valores de ruido en  $\mu\text{Pa}$ . El uso





**Fig. 5.** Serie de tiempo de datos de ruido obtenidos por una Estación de Monitoreo Geo Ambiental durante 14 días.

de esta unidad de presión ( $\mu\text{Pa}$ ) facilita la conversión a otras unidades deseadas, como pueden ser decibelios ( $\text{dB}$ ). La **figura 5** muestra la serie de tiempo donde se observan las diferencias en ruido generado por un entorno urbano, derivado de la actividad humana cotidiana.

### Sensor de temperatura, humedad y presión atmosférica

La relación entre la calidad del aire, determinada por la concentración de partículas suspendidas y los parámetros meteorológicos, como la temperatura, presenta una correlación y variabilidad directa, como lo señalan Barmpadimos et al. (2012). Para medir dichas variables ambientales, el sensor Bme280, desarrollado por Bosch (2016; **Fig. 2c**), ha sido ampliamente utilizado en diversas aplicaciones mediante la integración con microcontroladores como el Esp32 y Raspberry Pi (Warnakulasooriya et al. 2018, Shevchenko et al. 2020, Flurry y Flurry 2021). Este sensor es capaz de medir tres variables ambientales clave: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa (% HR) y presión atmosférica ( $\text{hPa}$ ), utilizando tecnología de sistemas micro electro mecánicos (MEMS, por su sigla en inglés) para garantizar mediciones precisas en un amplio rango de condiciones ambientales.

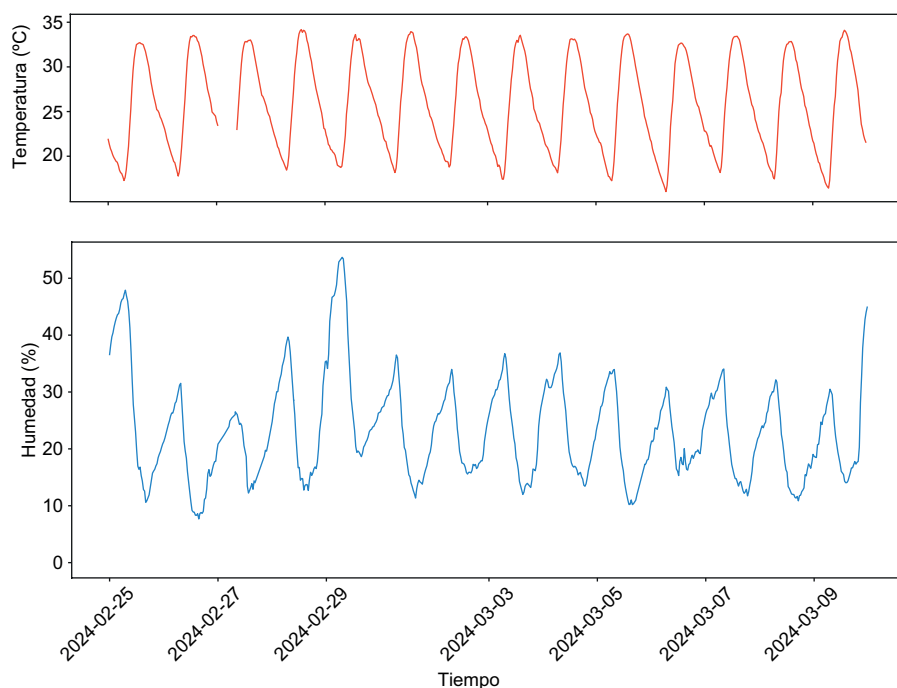
El sensor de temperatura incorpora un termistor de alta precisión, con una resolución de  $0.01^{\circ}\text{C}$ , y un circuito de compensación interno que corrige las variaciones de temperatura, permitiendo operar en un rango de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ . El sensor de humedad relativa emplea un sensor capacitivo con una precisión de  $\pm 3\%$  y una resolución de  $0.008\%$ . Finalmente, el sensor de presión atmosférica utiliza un sistema piezoeléctrico de alta resolución, con una precisión de  $\pm 1\text{ hPa}$  y una resolución de  $0.18\text{ Pa}$ , ofreciendo mediciones precisas de presión absoluta, compensadas por temperatura y altitud (Bosch 2016). La comunicación entre el Bme280 y el microcontrolador Esp32 se realiza a través de una interfaz digital por el puerto I2C, y su consumo energético es menor a  $5\text{ }\mu\text{A}$ , lo que lo convierte en un dispositivo eficiente

para mediciones prolongadas. La **figura 6** muestra datos recopilados por la EMGA mediante el sensor, presentados como promedios horarios durante un periodo continuo de 14 días para temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa (% HR).

Con el fin de aumentar la precisión de los datos de calidad del aire obtenidos mediante el sensor Bme280, es recomendable realizar una calibración de los mismos a través de un modelo de regresión múltiple. Este modelo ajusta las mediciones de temperatura, humedad y presión atmosférica en función de datos de referencia provenientes de estaciones meteorológicas certificadas. La calibración permite corregir las posibles influencias ambientales que podrían afectar las mediciones del sensor, asegurando así una mayor precisión en la evaluación de la calidad del aire, particularmente en lo que respecta a la concentración de partículas atmosféricas.

### Programación

Para el desarrollo y operación de los sensores descritos junto con el microcontrolador Esp32 en el sistema EMGA, se programó usando el lenguaje C++ con el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino. Este entorno proporciona una interfaz de usuario optimizada e integra funciones como conectividad wifi y *bluetooth*, múltiples puertos de entrada/salida (GPIO), convertidores analógicos a digitales (ADC), generadores de señales de modulación de ancho de pulso (PWM), entre otros. La programación del sistema incorpora las funcionalidades y calibraciones proporcionadas por el fabricante de cada sensor y la recopilación de datos de forma individual, con una frecuencia de muestreo de un dato cada 4 minutos, pero se puede adaptar a los requisitos específicos de cada aplicación. Además, incluye conectividad wifi a un punto de acceso definido durante la instalación del equipo. 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 utilizando una clave de cifrado de 24 bits.



**Fig. 6.** Serie de tiempo a 14 días de datos de temperatura (rojo) y de humedad relativa (azul) para una Estación de Monitoreo Geo Ambiental.

### PLATAFORMA DE GESTIÓN, ALMACENAMIENTO, VISUALIZACIÓN Y DESCARGA DE DATOS

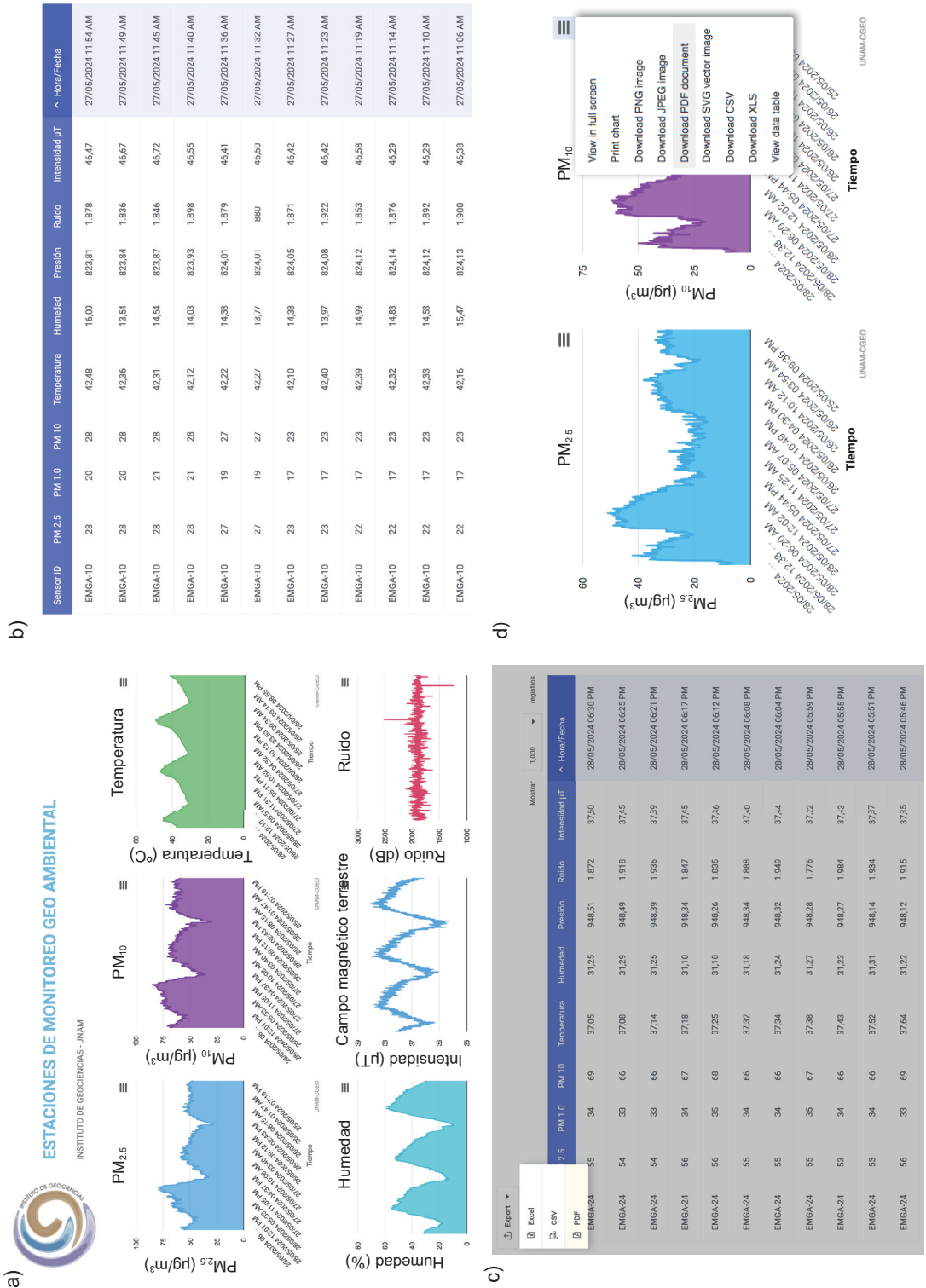
Para gestionar los datos recopilados de los sensores EMGA se desarrolló una plataforma integral para el almacenamiento, procesamiento y visualización de datos (**Fig. 7**). Esta plataforma incluye un sistema de base de datos relacional MySQL que compila todos los datos ambientales de cada dispositivo EMGA, permitiendo un acceso confiable y estructurado a los datos a través de varios parámetros, como fechas, horas, ubicaciones y grupos de sensores. Esto facilita la creación de consultas personalizadas. La base de datos está alojada en un servidor tipo Apache y administrada mediante phpMyAdmin, proporcionando un entorno intuitivo para gestionar bases de datos, programar, hacer consultas, respaldos y realizar mantenimiento preventivo.

La plataforma puede ser visualizada desde cualquier computadora personal en cualquier navegador de internet, así como en cualquier dispositivo móvil con sistema operativo iOS y Android. Ofrece una interfaz fácil de usar basada en WordPress, asegurando la compatibilidad con la mayoría de los dispositivos comerciales (**Fig. 7a**). Los usuarios pueden visualizar (**Fig. 7b**) y descargar datos y gráficos (**Fig. 7d**) de hasta tres días de antigüedad para uso público. Las

solicitudes para acceder a datos históricos pueden hacerse directamente a los administradores de la plataforma, requiriendo una justificación. Los datos se pueden descargar y exportar en formatos como PDF, TXT y XLS (**Fig. 7c**), de acuerdo con las preferencias del usuario. La interfaz de usuario es intuitiva y fácil de usar. Se pueden visualizar los datos tanto en forma gráfica como en modo tabla. Para navegar entre sensores diferentes se puede elegir el deseado en el selector de la casilla de verificación (*checkbox*) de acuerdo con su sensor ID. Además de los datos en tiempo real, la plataforma también permite realizar una búsqueda por fechas específicas de datos en el registro histórico. El acceso es libre desde cualquier navegador web para cualquier usuario y se permite descargar un máximo de 1000 datos por consulta, lo que es equivalente a tres días. Si algún usuario desea descargar el histórico a una escala de tiempo mayor, puede hacerlo poniéndose en contacto vía correo electrónico con los administradores de la red. El acceso a la plataforma de visualización de datos es a través de la plataforma de visualización de datos (Rodríguez-Trejo 2024).

### Adquisición y calibración de datos

La calibración de datos es uno de los aspectos clave para establecer redes de monitoreo ambiental. Los dispositivos de monitoreo ambiental de bajo



costo, como los utilizados en las EMGA y otros dispositivos comerciales similares tales como el Purple Air y Smart-Citizen Kit, emplean el mismo modelo de sensor (PMS5003), que resulta una opción de bajo costo para la instalación de redes de monitoreo densas en entornos urbanos. Desde la aparición de los sensores PMS5003 en el mercado, el uso y distribución en sistemas de monitoreo ambiental se ha popularizado debido a su accesibilidad y bajo costo. Sin embargo, la calidad y confiabilidad de los datos pueden verse afectadas sin la consideración de factores de calibración específicos adaptados a cada región y sus respectivos objetivos de monitoreo. Debido a esto en los últimos años, se han realizado diferentes pruebas de funcionamiento y calibración de este tipo de sensores, tomando en cuenta variables meteorológicas como la temperatura y la humedad y haciendo uso de herramientas estadísticas como regresiones lineales (Romero et al. 2020) o estableciendo factores de corrección específicos para cada entorno (Cowell et al. 2022). Las estaciones EMGA colectan y transmiten los datos sin corregir, de esta manera el usuario final podrá elegir la calibración adecuada para los datos. Si bien los dispositivos EMGA no sustituyen a un equipo de referencia de alto rendimiento, el usuario puede establecer una calibración propia tomando como punto de comparación algún equipo de alta gama y en función de las condiciones locales. De igual manera para el resto de los sensores, la calibración y precisión de los datos está dada por los parámetros de cada fabricante, en los rangos que se mencionan anteriormente; el usuario final podrá dar el tratamiento que considere a sus datos en función del entorno donde se instale.

### Comparación con otros equipos comerciales similares

Para evaluar el rendimiento de las estaciones EMGA, se comparó con otro equipo comercial similar, utilizado ampliamente en diferentes partes del mundo, sobre todo en los Estados Unidos de América (EUA). Se realizó una comparación entre una estación EMGA y un dispositivo Purple Air (**Fig. 8**), el cual se encuentra en varias redes de monitoreo ambiental en distintas ciudades de los EUA y cuenta con aprobación para uso por parte de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por su sigla en inglés) (Wallace et al. 2021, 2022). Ambos dispositivos fueron instalados bajo las mismas condiciones de altura, humedad y temperatura, con una distancia de menos de 20 cm entre ellos. Los datos se recopilaban de manera continua durante un período de 14 días y se analizaron a lo largo de este tiempo. No se aplicó ningún tipo de calibración o corrección. La **figura 8**

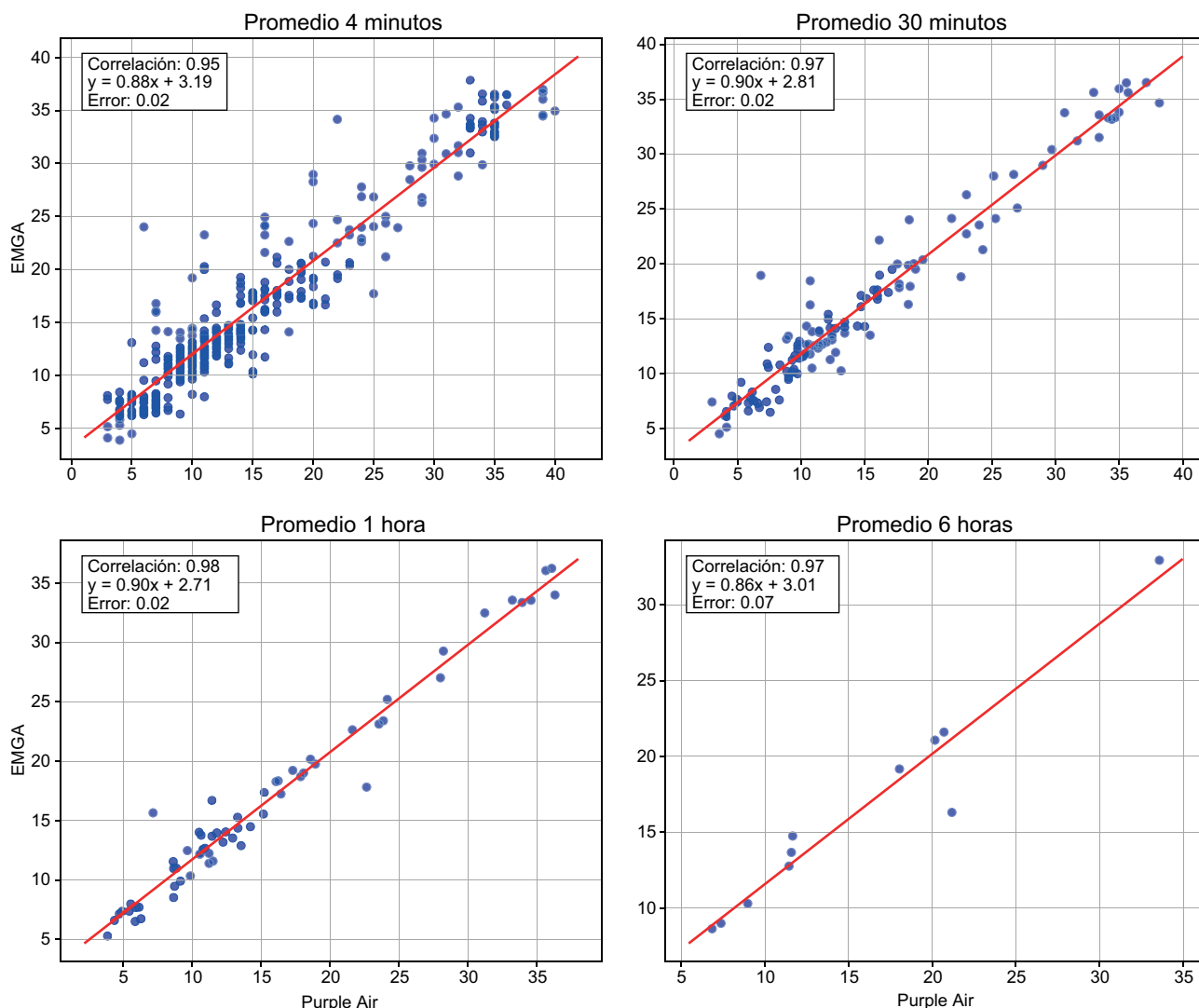
muestra gráficos de correlación para diferentes intervalos y promedios en diferentes rangos, que varían desde cada 4 minutos y hasta promedios de 2 horas. La **figura 8** muestra la correlación observada para cada rango de promedios. Se observaron coeficientes de correlación entre 0.92 y 0.99, con la correlación más alta obtenida (0.99) en promedios de 1 hora. La **figura 8** también muestra la pendiente de la recta de regresión estimada y el intercepto entre los datos de ambos equipos, así como el error estimado. La prueba demuestra que los resultados entre ambos dispositivos son indistinguibles, y dado que ambos utilizan el mismo modelo de sensor (PMS5003) los resultados son reproducibles entre un dispositivo y otro. Esto indica un rendimiento y confiabilidad equivalentes en los datos de ambos dispositivos. Esto sugiere que la confiabilidad aumenta con promedios de 1 hora, demostrando que existe congruencia entre las mediciones de ambos dispositivos.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de dispositivos de monitoreo ambiental para zonas urbanas ofrece la posibilidad de observar en tiempo real las variaciones de las condiciones ambientales tanto en el espacio como en el tiempo. Las estaciones EMGA, al ser dispositivos de bajo costo, facilitan el acceso a esta tecnología en una amplia gama de entornos, desde pequeñas localidades hasta grandes ciudades como la Ciudad de México. La transmisión de los datos, realizada vía wifi hacia una plataforma de procesamiento y visualización, permite monitorear los valores medidos en tiempo real, accesibles desde cualquier dispositivo móvil en cualquier parte del mundo. La integración de un gran número de estaciones EMGA en una ciudad posibilita la creación de redes densas de monitoreo ambiental, lo que permite analizar el impacto de actividades humanas como el tráfico vehicular, la actividad industrial, comercial y de servicios (Lu et al. 2021). Esta información puede utilizarse en conjunto con las autoridades locales para diseñar estrategias orientadas a mejorar la calidad del aire y las condiciones ambientales. Además, es una herramienta útil para evaluar variables sociodemográficas vinculadas al impacto ambiental (de Souza y Kinney 2021).

El sistema EMGA destaca por su flexibilidad y capacidad de adaptación a diferentes condiciones y necesidades. Tanto su programa *firmware* como la plataforma de procesamiento de datos están en constante mejora y actualización, lo que garantiza un rendimiento optimizado y una mayor accesibilidad





**Fig. 8.** Correlaciones entre las Estaciones de Monitoreo Geo Ambiental (EMGA) y los equipos Purple Air, obtenidas en promedios a diferentes intervalos de tiempo, desde los 30 minutos hasta 6 horas.

a la información. Además, el sistema EMGA puede personalizarse según los requerimientos específicos del entorno donde se implemente. Actualmente, se dispone de una versión de la estación EMGA que opera en modo sin conexión (*offline*), almacenando los datos en una tarjeta SD mediante un lector integrado, lo que permite su uso en zonas sin acceso a internet o en áreas remotas.

Los dispositivos EMGA permiten establecer redes de monitoreo ambiental de bajo costo, convirtiéndose en herramientas valiosas para instituciones educativas de nivel básico, medio superior y universitario. Estas redes no sólo facilitan el aprendizaje y el análisis de datos ambientales en el entorno inmediato, sino que también promueven la participación ciudadana

en la ciencia, aumentando la concientización sobre el impacto de las actividades cotidianas en el ambiente.

Los datos obtenidos por las estaciones EMGA, combinados con equipos de referencia, ofrecen una solución flexible y accesible para el monitoreo ambiental. Su principal ventaja radica en la capacidad de crear redes densas en entornos urbanos a un costo significativamente reducido, permitiendo observar variaciones ambientales tanto espaciales como temporales con una resolución de hasta un minuto por dato. Esto es crucial para el seguimiento de eventos de corta duración, como incendios, quema de pirotecnia o picos de tráfico.

Además, una red de sensores podría adaptarse a las necesidades específicas de cada ubicación,

permitiendo su expansión o densificación según los requerimientos. Los dispositivos EMGA fomentan la colaboración entre la sociedad, la industria, escuelas y universidades en la creación de redes y la recopilación de datos ambientales, fortaleciendo así la ciencia ciudadana.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al proyecto UNAM-DGAPA PAPIIT IG-101921 por los fondos aportados para el desarrollo de este proyecto. El Dr. Alejandro Rodríguez-Trejo agradece al CONAHCYT por la beca posdoctoral otorgada EPM 2022(1). A los técnicos Emilio Nava Alatorre y César Contreras Zamora, del Instituto de Geociencias por su apoyo técnico en este proyecto. Agradecimientos al Instituto de Geociencias de la UNAM por el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto. Agradecemos a todas las personas y amigos de la ciudad de Querétaro y otras partes de México, que apoyaron este proyecto instalando uno de los equipos en sus hogares.

## REFERENCIAS

- Barmpadimos I., Keller J., Oderbolz D., Hueglin C. y Prévôt A.S.H. (2012). One decade of parallel fine (PM<sub>2.5</sub>) and coarse (PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>) particulate matter measurements in Europe: Trends and variability. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12 (7), 3189-3203. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3189-2012>
- BOSCH (2020). BME280 Combined humidity and pressure sensor [en línea]. <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/> 01/05/2024
- Bulot F.M., Johnston S.J., Basford P.J., Easton N.H., Apetroaie-Cristea M., Foster G.L. y Loxham M. (2019). Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment. *Scientific Reports* 9 (1), 7497. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43716-3>
- Catalán-Vázquez M., Riojas-Rodríguez H., Jarillo-Soto E.C. y Delgadillo-Gutiérrez H.J. (2009). Percepción de riesgo a la salud por contaminación del aire en adolescentes de la Ciudad de México. *Salud Pública de México* 51 (2), 148-156.
- Chaparro M.A., Marié D.C., Chaparro M.A., Rodríguez-Trejo A., Alba B., Posada D.B., Ibarra-Ortega H.E., Gargiulo J.D. y Böhnell 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>
- Courtillot V., Gallet Y., Le Mouél J.L., Fluteau F. y Genevey A. (2007). Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?. *Earth and Planetary Science Letters* 253 (3-4), 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.032>
- Cowell N., Chapman L., Bloss W. y Pope F. (2022). Field calibration and evaluation of an Internet-of-things-based particulate matter sensor. *Frontiers in Environmental Science* 9, 798485. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.798485>
- Daude C., Fajardo G., Brassiolo P., Estrada R., Goytia C., Sanguinetti P. y Vargas J. (2017). RED 2017. Crecimiento urbano y acceso a oportunidades: un desafío para América Latina. Corporación Andina de Fomento, Buenos Aires, Argentina, 287 pp.
- de la Torre G.B.Á. (2010). El crecimiento urbano y estructura urbana en las ciudades medias mexicanas. *Quivera Revista de Estudios Territoriales* 12 (2), 94-114.
- de Paiva Vianna K.M., Cardoso M.R.A. y Rodrigues R.M.C. (2015). Noise pollution and annoyance: An urban soundscapes study. *Noise and Health* 17 (76), 125-133. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.155833>
- deSouza P. y Kinney P.L. (2021). On the distribution of low-cost PM<sub>2.5</sub> sensors in the US: Demographic and air quality associations. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 31 (3), 514-524. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.155833>
- Draper N.R. y Smith H. (1998). *Applied regression analysis*. 3a ed, John Wiley and Sons, Inc. Nueva Jersey, EUA, 706 pp. <https://doi.org/10.1002/9781118625590>
- Flurry G. y Flurry G. (2021). *An environmental sensor. En: Java on the Raspberry Pi develop Java programs to control devices for robotics, IoT, and beyond.* (W. Spahr, A. Black, J. Markham y J. Vakili, Eds.). Springer Nature, Nueva York, EUA, pp. 371-395. [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7264-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7264-0_11)
- He M., Kuerbanjiang N. y Dhaniyala S. (2020). Performance characteristics of the low-cost Plantower PMS optical sensor. *Aerosol Science and Technology* 54 (2), 232-241. <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1696015>
- Hercog D., Lerher T., Truntiĉ M. y Težak O. (2023). Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors* 23 (15), 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739>
- Ibarra Montoya J.L. y Huerta Martínez F.M. (2016). Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7 (37), 39-50.
- INEGI (2020). Censo de población y vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> 01/05/2024

- Kaur K. y Kelly K.E. (2023). Laboratory evaluation of the Alphasense OPC-N3, and the Plantower PMS5003 and PMS6003 sensors. *Journal of Aerosol Science* 171, 106181. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2023.106181>
- Kelly K.E., Whitaker J., Petty A., Widmer C., Dybwad A., Sleeth D., Martin R. y 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>
- Levy Zamora M., Xiong F., Gentner D., Kerkez B., Kohrman-Glaser J. y Koehler K. (2018). Field and laboratory evaluations of the low-cost Plantower particulate matter sensor. *Environmental Science and Technology* 53 (2), 838-849. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05174>
- Lu Y., Giuliano G. y Habre R. (2021). Estimating hourly PM<sub>2.5</sub> concentrations at the neighborhood scale using a low-cost air sensor network: A Los Angeles case study. *Environmental Research* 195, 110653. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110653>
- Lubis S., Pasaribu F. I., Damanik W.S., Siregar M. A., Siregar I. y Hasibuan E.S. (2020). The design and Qibla direction by using the HMC5883L sensor as a compass Rhi in the UMSU Science Laboratory (OIF). *Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx) Journal* 2 (3), 376-381.
- Maier A., Sharp A. y Vagapov Y. (2017). Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. *Internet Technologies and Applications* (2017), 143-148 pp. <https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>
- Montaño A.F., Davydova-Belitskaya V., Chávez G. G., Gallardo T.P. y Orozco-Medina M.G. (2016). PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub> como factores de riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y neumonía en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Ingeniería* 20 (1), 14-23.
- Moreno J.M., Urbieta I.R., Bedia J., Gutiérrez J.M. y Vallejo V.R. (2015). Los incendios forestales en España ante el cambio climático. En: *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España*. (A. Herrero y M.A. Zavala, Eds.). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España, pp. 395-405.
- Ortega Gaucín D., Cruz Bartolón J.D.L. y Castellano Bahena H. (2018). Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México. En: *Agua y cambio climático*. (G.A. Martínez, Ed.). Instituto Mexicano de Tecnología Ambiental, Jiutepec, México, pp. 78-101.
- Rodríguez-Trejo A., Böhnelt H.N., Ibarra-Ortega H.E., Salcedo D., González-Guzmán R., Castañeda-Miranda A.G., Sánchez-Ramos L.E., Chaparro M.A.E. y Chaparro M.A.E. (2024). Air quality monitoring with low-cost sensors: A record of the increase of PM<sub>2.5</sub> 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. (2024). Plataforma de visualización de datos de las estaciones de monitoreo geo ambiental [en línea]. <https://monitoreoambiental.com.mx/emga/cgeo/20/10/2024>
- Romero Placeres M., Diego Olite F. y Álvarez Toste M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología* 44 (2), 0-0.
- Romero Y., Velásquez R.M.A. y Noel J. (2020). Development of a multiple regression model to calibrate a low-cost sensor considering reference measurements and meteorological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment* 192, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08440-w>
- Shevchenko G.V., Glubokov N.A., Yupashevsky A.V. y Kazmina A.S. (2020). Air flow sensor based on environmental sensor BME280. *Memorias. 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. Chemal, Rusia, 29 de junio – 03 de julio, 2020, pp. 432-435. <https://doi.org/10.1109/EDM49804.2020.9153474>
- Wallace L., Bi J., Ott W.R., Sarnat J. y Liu Y. (2021). Calibration of low-cost PurpleAir outdoor monitors using an improved method of calculating PM<sub>2.5</sub>. *Atmospheric Environment* 256, 118432. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118432>
- 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 PM<sub>2.5</sub>. *Sensors* 22(7), 2755. <https://doi.org/10.3390/s22072755>
- Warnakulasooriya K., Jayasuriya Y.P. y Sudantha B.H. (2018). Generic IoT framework for environmental sensing researches: Portable IoT enabled weather station. *Memorias. International Conference on System Science and Engineering*. Nuevo Taipei, Taiwan. 28 - 30 junio, 2018, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2018.8520238>
- Zannin P.H.T., Ferreira A.M.C. y Szeremetta B. (2006). Evaluation of noise pollution in urban parks. *Environmental Monitoring and Assessment* 118, 423-433. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-1506-6>
- Zheng J., Wang Q., Xu B., Bi W., Tao Y., Xiao Y. y Ozdemir S. (2016). Non-intrusive traffic data collection with wireless sensor networks for intelligent transportation systems. *Adhoc and Sensor Wireless Networks* 34, 41-57.