

(02-012) - Evaluation of vertical stratification of PM1, PM2.5, and PM10 in residences using IoT sensors: Implications for BIM methodology.

Renard-Julián, Eduardo J. ¹; Olmos, José M. ²; García-Cascales, M. Socorro ²

¹ Consejería de Educación, Formación Profesional y Empleo de la R. de Murcia, ²
Universidad Politécnica de Cartagena

Indoor air quality is an increasing concern, particularly due to particulate matter with reduced aerodynamic diameter (PM1, PM2.5, and PM10) which has significant public health relevance. This study examines the vertical stratification of these particles inside a prototype home, considering variations in inhalation height typical of different residential areas such as the kitchen, living room, and bedroom. IoT monitoring units based on Arduino were used for data collection. Variance analyses (ANOVA) revealed statistically significant differences in particle concentrations at different heights, with a 95% confidence level. These results underscore the importance of considering height as a critical factor in monitoring indoor air quality and in designing real-time air quality alert systems. Additionally, the integration of these findings into the BIM methodology is discussed to enhance environmental management and design of inhabited spaces.

Keywords: PM1;PM2.5;PM10;IoT sensors;BIM methodology;Air quality stratification

Evaluación de la estratificación vertical de PM1, PM2.5, y PM10 en viviendas mediante sensores IoT: Implicaciones para la metodología BIM.

La calidad del aire interior es una preocupación creciente, especialmente debido a las partículas de diámetro aerodinámico reducido (PM1, PM2.5 y PM10) que poseen una significativa relevancia para la salud pública. Este estudio analiza la estratificación vertical de estas partículas en el interior de una vivienda prototipo, considerando las variaciones en la altura de inhalación típicas de diferentes áreas residenciales como la cocina, el salón y el dormitorio. Se utilizaron unidades de monitoreo IoT basadas en Arduino para la recolección de datos. Los análisis de varianza (ANOVA) aplicados revelaron diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de partículas entre las distintas alturas, con un nivel de confianza del 95%. Estos resultados subrayan la importancia de considerar la altura como un factor crítico en el seguimiento de la calidad del aire interior y en el diseño de sistemas de alerta en tiempo real. Además, se discute la integración de estos hallazgos en la metodología BIM para mejorar la gestión y el diseño ambiental de los espacios habitados.

Palabras clave: PM1;PM2.5;PM10;Sensores IoT;Metodología BIM;Estratificación de partículas

Correspondencia: erj@topoedu.es



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La calidad del aire interior (IAQ en inglés) ha emergido como un tema crítico en la salud pública y el bienestar humano, especialmente considerando que las personas pasan aproximadamente el 90 % de su tiempo en espacios interiores (Farmer et al., 2019). La exposición a partículas con un diámetro aerodinámico fino, como 1 y 2.5 μm (PM1 y PM2.5), e inferiores a 10 μm (PM10), se asocia con una variedad de problemas de salud, que van desde efectos respiratorios y cardiovasculares hasta impactos a largo plazo como el desarrollo de enfermedades crónicas (Teumzghi et al., 2023). Sin embargo, la concentración y distribución de estas partículas no son uniformes dentro de los espacios habitados (Yuting & Yiqiang, 2015) pudiendo estar expuestos a concentraciones superiores sin saberlo. Si bien existen múltiples contaminantes de interés en el estudio de la IAQ, como los compuestos orgánicos volátiles (COVs), este trabajo se centra en el estudio de la estratificación vertical de partículas PM1, PM2.5 y PM10. Entender esta estratificación es fundamental para desarrollar estrategias de mitigación efectivas y para mejorar la calidad del aire en ambientes cerrados.

Paralelamente, la metodología Building Information Modeling (BIM) ha transformado la industria de la arquitectura, la ingeniería, y la construcción (AEC en inglés), permitiendo una gestión más detallada de las distintas fases de un proyecto (Renard & Olmos, 2022). La aplicación de BIM no se limita a la fase de construcción; también ofrece un potencial significativo para la gestión de la calidad del aire interior mediante la integración y análisis de datos ambientales en tiempo real.

Aunque la concentración de partículas finas PM ha sido extensamente estudiada, revelando patrones complejos de distribución en ambientes cerrados, un área menos explorada es la aplicación de estos hallazgos en el contexto de la metodología BIM (Cui et al., 2024). Específicamente, la integración de la monitorización en tiempo real de partículas, facilitada por el uso de sensores avanzados conectados a través del Internet de las Cosas (IoT), junto con la precisión geométrica que ofrece el formato IFC (Industry Foundation Classes) en BIM, representa un campo emergente con potencial significativo para avanzar en la gestión de la IAQ. Este estudio demuestra cómo la detección de estratificación vertical de partículas PM1, PM2.5 y PM10 puede ser optimizada mediante la implementación de tecnología de sensores IoT y propone su integración dentro de la metodología BIM, fomentando con ello el desarrollo del concepto de "hogar inteligente" aplicado a la IAQ (Derbez et al., 2014).

2. Objetivos

La finalidad de este estudio se centra en abordar desafíos críticos relacionados con la calidad del aire interior (IAQ), específicamente en lo que respecta a la presencia y distribución de partículas finas (PM1, PM2.5 y PM10) en entornos habitados y en cómo los hallazgos pueden mejorar la aplicación de la metodología BIM para el desarrollo de sistemas de alerta ambiental.

2.1 Objetivo general

El objetivo general del trabajo se centra en la evaluación de la estratificación vertical de partículas PM1, PM2.5 y PM10 en espacios interiores de una vivienda prototipo y en explorar cómo estos hallazgos podrían aplicarse para implementar la metodología BIM en el diseño de entornos interiores más seguros y saludables.

2.2 Objetivos específicos

Respecto a los objetivos específicos, el trabajo se centra en los siguientes:

1. Detallar la estratificación vertical de partículas PM1, PM2.5 y PM10: Utilizando un conjunto de sensores colocados a diferentes alturas, en una misma vertical, dentro de espacios interiores clave (cocina, salón y dormitorio), este objetivo se propone documentar y analizar la presencia de estratificación vertical de partículas PM1, PM2.5 y PM10. El enfoque se centra en observar si existen diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de estas partículas con respecto a la altura. Este estudio se centra exclusivamente en la observación de estratificación y no tiene como objetivo identificar los factores específicos, potencialmente antropogénicos, que contribuyan a estas variaciones.
2. Proponer implicaciones para la metodología BIM: Basándose en los hallazgos sobre la estratificación vertical, se discutirá cómo estos podrían integrarse en la metodología BIM para la mejora de sistemas de alerta de IAQ.

La consecución de estos objetivos no solo permitirá cubrir la brecha identificada en la investigación actual sobre la aplicación de la tecnología BIM en la calidad del aire interior, sino que también establecerá las bases para futuras iniciativas de diseño y gestión de espacios interiores desde una perspectiva de salud y seguridad ambiental.

3. Métodos de investigación

3.1 Descripción de la vivienda prototipo

La vivienda prototipo para este estudio se encuentra en la ciudad de Murcia, España, en el barrio del Infante Juan Manuel. La ubicación se caracteriza por un clima mediterráneo, que presenta veranos calurosos e inviernos suaves, condiciones que se sabe impactan significativamente en los patrones de calidad del aire interior, tal como se discute en Schieweck et al. (2018). El barrio donde se sitúa la vivienda es predominantemente residencial, caracterizado por edificios plurifamiliares de 8 plantas, y está enriquecido con zonas verdes circundantes y acceso a servicios urbanos esenciales.

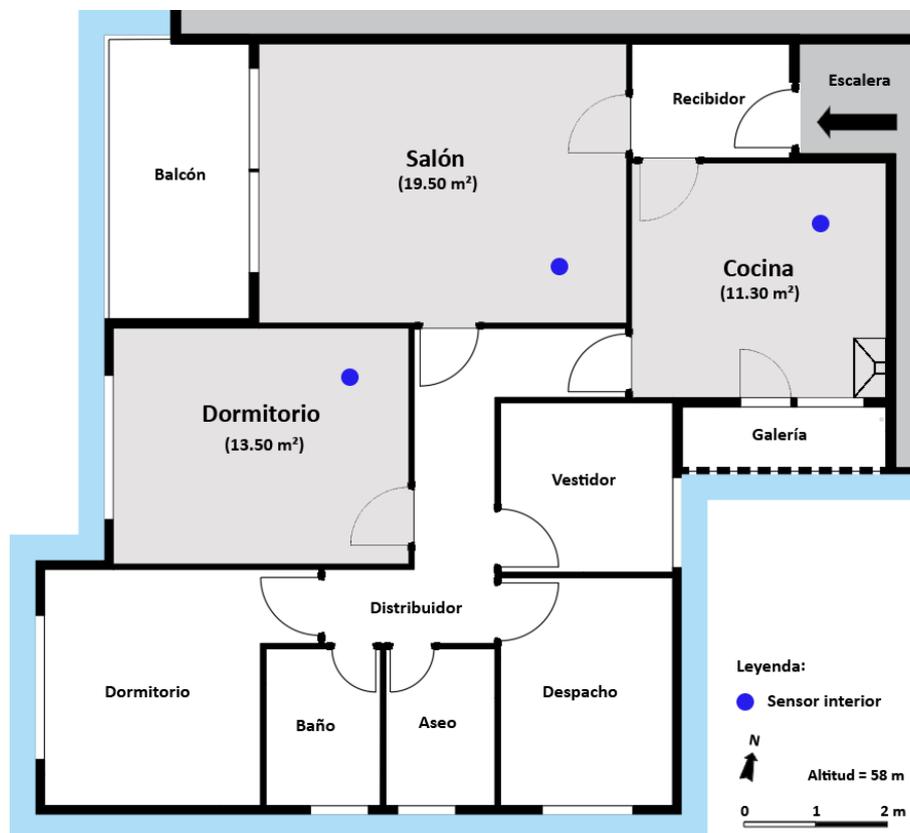
El edificio donde se ubica la vivienda prototipo data de la década de los 70. Se encuentra en una zona residencial privada, circundado por un entorno arbolado, cuyas copas se encuentran al mismo nivel que la vivienda, y está flanqueado por tres avenidas de un único carril. Los recientes Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) de la ciudad de Murcia han transformado estas avenidas, disminuyendo notablemente el tránsito de vehículos, al limitarlas a un solo carril por sentido, e incluyendo carril bici y carril bus. Por este motivo, es de esperar que la fuente principal de contaminación esté influenciada en menor medida por la combustión de vehículos (Derbez et al., 2014) y más por la actividad antropogénica (Colbeck & Nasir, 2010). La vivienda prototipo se encuentra en una cuarta planta, con una superficie de 110 m². Su distribución (Figura 1) se adapta a la tipología tradicional, con espacios bien definidos y separados.

Todas las estancias disponen de ventana al exterior y el sistema de ventilación general de la vivienda es natural. La cocina incorpora su correspondiente extractor mecánico. La climatización de toda la vivienda se realiza a través de sistema Aire-Aire, con el Split ubicado en el salón, y el equipo compresor en el balcón.

Durante el período de monitorización no se activó el sistema de climatización y se mantuvieron cerradas las ventanas del recinto analizado, para evitar la dispersión en la acumulación de partículas (Ma, Jiang, & Li, 2015). La ocupación de la vivienda fue vespertina y nocturna, de lunes a viernes, no habiendo actividad antropogénica en las horas diurnas. Los fines de semana, la ocupación fue plena, con las clásicas actividades antropogénicas de un hogar (cocina, aseo personal, limpieza, y lúdicas). La ocupación fue llevada a cabo por una familia integrada por dos personas adultas, de 42 años, y una menor, de 10 años. Los espacios seleccionados para el estudio fueron la cocina, el salón y el dormitorio principal. La cocina tiene una superficie de 11.30 m², con acceso a una galería, donde se ubica la caldera de gas

natural. El salón ocupa una superficie de 19.50 m² y da a un balcón de 8 m², abierto en dos de sus aristas. El dormitorio principal tiene 13.50 m² con una ventana de doble hoja.

Figura 1: Distribución vivienda prototipo y ubicación de sensores



3.2 Configuración de los sistemas de monitorización

Para investigar la estratificación vertical de partículas PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀ en la vivienda, se diseñó un sistema de monitoreo a través del ensamblaje de 3 kits de monitorización de partículas. Cada kit estaba compuesto por una placa de desarrollo NodeMCU ESP8266, un sensor de partículas PMS5003, con su respectivo cableado y adaptador de conexión, un sensor de temperatura y humedad DHT22, una placa de protección y expansión de batería, una batería de litio 18650, y un cable USB-microUSB de alimentación. Cada kit incluyó 7 cables DuPont, tipo hembra-hembra, y dos pines header tipo macho. Todas las soldaduras de los pines se realizaron con hilo de estaño de 0.6 mm y pasta de soldadura.

La placa de desarrollo NodeMCU fue elegida por su microcontrolador ESP8266, ampliamente utilizado en aplicaciones de IoT (Hasan, 2023), su módulo WI-FI integrado, sus conexiones GPIO, su bajo consumo de energía (entre 70 y 170 mA), su procesador compatible para esta investigación, su reducido tamaño (58 x 31 x 13 mm), su bajo coste (aproximadamente 2 €), y su compatibilidad con entornos de desarrollo de Arduino.

Como sensor de partículas se empleó el Plantower PMS5003, ampliamente utilizado en proyectos de monitoreo de la IAQ debido a su precisión, fiabilidad y bajo coste, tal como se describe en Patel et al. (2024). Este sensor incluye un ventilador que aspira el aire hacia la cámara de medición donde se produce la dispersión de un láser. El sensor procesa las señales del fotodetector obteniéndose una lectura digital, en microgramos por metro cúbico, para un amplio rango de tamaño de partículas; PM₁ (0.3~1.0 µm), PM_{2.5} (1.0~2.5 µm) y PM₁₀ (2.5~10 µm). El error máximo es del ±10 % para concentraciones entre 100 y 500 µg/m³, y de ±10

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones de 0 a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Plantower, n.d.). La resolución de medición es de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un voltaje de alimentación de 4.5 V a 5.5 V, un consumo moderado (~100 mA) y un rango de operación de $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$, y 0 % a 99 % de humedad. Sus reducidas dimensiones (50 x 38 x 21 mm), peso (41 g), y bajo coste (aproximadamente 12 €) cumplen las expectativas de un sensor relativamente pequeño y ligero. Además, no emite sonido apreciable durante su funcionamiento lo que resulta adecuado para ubicaciones como el dormitorio. Este sensor requiere de un adaptador (con un coste de 0,10 €) para facilitar la conexión al NodeMCU a través de cable DuPont.

Para el monitoreo de temperatura y humedad se utilizó el sensor DHT22, elegido por su uso común en estudios de calidad del aire, su bajo coste (aproximadamente 1.5 €) y compatibilidad con Arduino. Este sensor mide la humedad relativa en un rango de 0 % a 99.9 %, con una precisión de $\pm 2 \%$ HR, y la temperatura en un rango de $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$, con una precisión de $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. La resolución de medición es de $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ en ambos casos. El sensor DHT22 funciona tanto a 3.3 V como a 5.5 V y presenta un peso de tan solo 3 gr, y un consumo energético de 1.5 mA (Aosong Electronics Co., Ltd., n.d.).

También se optó por emplear un módulo de protección y gestión de energía para baterías de litio 18650 con salida USB, y micro USB de entrada. Este módulo proporciona hasta tres salidas de voltaje de 5 V/2.2 A, y otras tres de 3 V/1 A, aunque se empleó únicamente una salida de 5 V/2.2 A, utilizada específicamente para alimentar el sensor Plantower PMS5003. El sensor DHT22 fue alimentado directamente a través del NodeMCU. El módulo de control de alimentación incluye protección contra sobrecarga, protección contra descarga profunda, protección contra corrientes excesivas, y protección en caso de cortocircuito, lo que añade un nivel esencial de seguridad. Su reducido coste (aproximadamente 2 €), y sus ventajas desde el punto de vista de la seguridad, fueron determinantes para su integración como parte fundamental de un kit de monitorización de largos períodos ininterrumpidos.

Como fuente de alimentación se empleó una batería recargable de litio, tipo 18650, con una capacidad de 2600 mAh, con un rango de voltaje de operación de 3.6 V a 4.2 V, y un coste de 2.42 €. Esta batería fue elegida por su equilibrio óptimo entre capacidad, tamaño y durabilidad. En un análisis del consumo energético del kit formado por el sensor PMS5003, DHT22 y NodeMCU (considerando que estaría constantemente conectado a Wi-Fi, transmitiendo datos cada minuto, sin periodos de descanso), se estimó un consumo de corriente combinado de aproximadamente 170 mA. Bajo estas condiciones, la duración estimada de la batería se calculó en alrededor de 15.3 horas. Dado que los kits estarían bajo supervisión, al menos, a las 7 am, a las 2 pm, y a las 9 pm, el rango de duración se consideró apropiado. El reemplazo de la batería se realizó en periodos de menos de 10 segundos, limitando así la interrupción del monitoreo.

El kit resultante es de reducido tamaño, autónomo, silencioso, y con capacidad de medición de intervalos cortos, cumpliendo así con las recomendaciones propuestas en Schieweck et al. (2018). Además, el kit resultante es económico, con un coste total de aproximadamente 20 €, lo que se alinea con las recomendaciones de creación de dispositivos de monitoreo de la IAQ propuestas en Kumar et al. (2016).

3.3 Software de control del sensor y gestión de datos

En la parte de programación, se empleó el software Arduino IDE, versión 2.3.2, con las librerías JSON y drives necesarios para realizar la conexión con el NodeMCU y con los sensores PMS5003 y DHT22. Finalmente, se desarrolló en Arduino el software necesario para controlar la placa NodeMCU y, a su vez, los sensores PMS5003 y DHT22, así como el intervalo y forma de registro de datos. Este software abarcó todo el flujo de trabajo requerido consistente en los siguientes pasos:

1. Establecer la conexión del NodeMCU con el router de la vivienda prototipo.

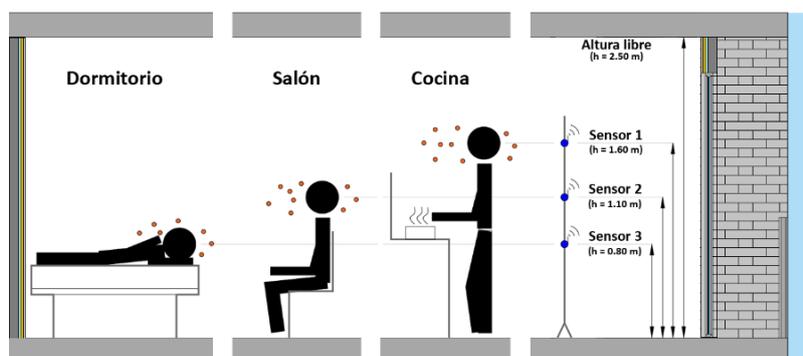
2. Identificar cada kit a través de un Id específico, y asignarle la ubicación para cada etapa de medición; “Cocina”, “Salón”, y “Dormitorio”.
3. Establecer la conexión con los sensores acoplados al NodeMCU y recopilar datos a intervalos de 60 segundos. Los datos recopilados por medición fueron el Id del kit, la ubicación, la fecha y hora de medición, la temperatura (°C) y la humedad relativa (%) del sensor DHT22, así como la concentración ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) de partículas PM1, PM2.5 y PM10 del sensor PMS5003.
4. Transmitir los datos para su registro en una base de datos (BBDD) MySQL 5.7, previamente creada y alojada en un servidor propio.

Finalmente, se desarrolló una aplicación denominada BIM-AQM, en Visual Studio Community 2022, bajo lenguaje Visual Basic. Esta aplicación fue diseñada específicamente para descargar, gestionar y generar ficheros (formato CSV) de los datos alojados en la BBDD para favorecer el posterior análisis estadístico a través de Microsoft Excel.

3.4 Ubicación de los sensores

Para el estudio de la existencia de estratificación de partículas PM1, PM2.5 y PM10 en el interior de la vivienda, se optó por elegir la cocina, el salón y el dormitorio principal como estancias más representativas de la actividad desarrollada en ella. Para esto, los tres sensores interiores fueron dispuestos sobre un jalón metálico, a diferentes alturas, simulando así la cota inhalación estando de pie (1.60 m), sentada (1.10 m), y acostada (0.80 m), tal y como se ilustra en la Figura 2. Estos valores se consideraron representativos para la altura media de hombres y mujeres en España (NCD Risk Factor Collaboration, 2020). La disposición de los sensores se mantuvo constante en las tres ubicaciones del interior de la vivienda, dedicando una semana de monitorización por estancia. La posición del jalón en cada habitación fue en una esquina, fuera de los posibles flujos de corriente cruzada, pero separada de las paredes para evitar la acumulación de partículas que se produce según Ma, Jiang, y Li (2015).

Figura 2: Ubicación vertical de sensores



3.5 Calibración de sensores

Como paso previo a la recolección y análisis de datos, se realizó una calibración relativa de las lecturas de los sensores DHT22 y PMS5003, siendo esta una técnica común para sensores similares (deSouza et al., 2022). Este método de calibración de bajo coste resulta adecuado para sensores nuevos e idénticos de fábrica, los cuales se espera que generen diferencias menores en las curvas de calibración (González Rivero et al., 2023).

El proceso de calibración consistió ubicar los tres sensores DHT22 y PMS5003 de forma consecutiva, orientados de igual forma sobre una superficie horizontal, a misma altura del suelo (1,5 m), en una zona central de una habitación de la vivienda prototipo, con ventanas y puertas cerradas. La monitorización se realizó durante 8 horas, capturando datos cada minuto, de 11.00 pm a 7.00 am, aprovechando la escasa actividad antropogénica en la vivienda.

Los valores promedio de las lecturas obtenidas durante el proceso de calibración, para cada uno de los tres sensores y variables observadas, se recoge en la Tabla 1. Mientras que el promedio general, para cada variable observada, se detalla en la Tabla 2.

Tabla 1: Promedio de lecturas para cada sensor

Id del sensor	Sensor DHT22		Sensor PMS5003		
	T (°C)	HR (%)	PM1 (µm/m3)	PM2.5 (µm/m3)	PM10 (µm/m3)
1	22,1	53,9	10	13	13
2	22,3	54,0	9	12	12
3	22,4	54,3	9	12	12

Tabla 2: Valor medio general de todos los sensores, para cada variable

T (°C)	HR (%)	PM1 (µm/m3)	PM2.5 (µm/m3)	PM10 (µm/m3)
22,3	53,9	9	12	12

A continuación, se estimaron los factores de calibración (F_c) correspondientes a los sensores 1, 2 y 3, para cada variable, obtenidos como el cociente entre el promedio general para una variable y el promedio específico del sensor para dicha variable (Ecuación 1).

$$F_c = \frac{\text{Media general}}{\text{Media sensor}} \quad (1)$$

Los resultados obtenidos para cada F_c se muestran en la Tabla 3. Valores por encima de 1 indican que el sensor está sistemáticamente por debajo del valor medio para la lectura de esa variable, mientras que valores por debajo de 1 indican lo contrario.

Tabla 3: Factores de calibración para cada variable y sensor

Id del sensor	F_{c_t}	F_{c_h}	F_{c_1}	$F_{c_2.5}$	F_{c_10}
1	1,01	1,00	0,90	0,92	0,94
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02
3	1,00	0,99	1,00	1,00	1,02

F_{c_t} : factor de corrección para la temperatura.

F_{c_h} : factor de corrección para la humedad relativa.

F_{c_1} : factor de corrección para la concentración de partículas PM1.

$F_{c_2.5}$: factor de corrección para la concentración de partículas PM2.5.

F_{c_10} : factor de corrección para la concentración de partículas PM10.

3.6 Recolección y análisis de datos

Tras la obtención de los factores de calibración de los sensores, se procedió a la recolección de datos de cada una de las estancias seleccionadas para este estudio; cocina, salón y dormitorio principal.

La recolección de datos se planificó en tres etapas de monitorización (una por ubicación), de 7 días de duración cada una. Para cada etapa, las observaciones se iniciaron a las 21.10 h de un domingo, y finalizaron a las 20.50 h del domingo siguiente. La planificación de la toma de datos se refleja en la Tabla 4. El lapso de 20 minutos entre la finalización de la observación

de una etapa, y el comienzo de la siguiente, se reservó como el tiempo necesario para reconfigurar por software la nueva ubicación en las placas NodeMCU, así como para el traslado del jalón portador de los tres sensores a la nueva ubicación.

Tabla 4: Planificación de la medición de cada etapa

Etapa medición	Ubicación	Fechas de medición (a intervalos de 1')
1	Cocina	10/03/2024 a 17/03/2024
2	Salón	17/03/2024 a 24/03/2024
3	Dormitorio	24/03/2024 a 31/03/2024

El software implementado en las placas NodeMCU ejecutaba una instrucción cada 60 segundos, encargada de capturar los datos de los sensores DHT22 y PMS5003 y remitirlos a una BBDD. En total se registraron 90.549 observaciones; 10.061 registros por etapa y sensor.

Una vez finalizadas las 3 etapas de medición, se empleó la aplicación BIM-AQM para descargar los registros de la BBDD y aplicar los factores de calibración correspondientes a cada variable observada por cada sensor. La corrección de estas variables se realizó según la Ecuación 2, donde R_c representa el dato corregido, D_s el dato sin corregir, y F_c es el factor de calibración correspondiente a esa variable. Finalmente, los datos corregidos fueron exportados a ficheros independientes (por sensor y etapa de medición), en formato CSV, para su integración en los análisis estadísticos.

$$R_c = D_s \cdot F_c \quad (2)$$

El análisis de datos se realizó con Microsoft Excel 365, versión 2404, efectuando un estudio estadístico de la media, la mediana y la desviación estándar, para todas las observaciones corregidas para cada sensor, y en cada ubicación. Para un análisis más detallado sobre la estratificación de la concentración partículas, se realizó un análisis de varianza ANOVA (Analysis of Variance), con un nivel de confianza del 95%. En este análisis se comparó las concentraciones de partículas PM1, PM2,5 y PM10 de los tres sensores en cada una de las ubicaciones. La probabilidad resultante (p-value) del análisis ANOVA sirvió para identificar diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones de los sensores a diferentes alturas. La presencia de diferentes valores medios ofreció indicios adicionales sobre la estratificación de las concentraciones de dichas partículas. En el análisis ANOVA, la comparación del valor F obtenido, frente al valor crítico para F, proporcionó la base para rechazar la hipótesis nula de igualdad entre grupos, confirmando que las diferencias en las concentraciones a diferentes alturas son estadísticamente significativas.

3.7 Implicaciones para la Metodología BIM

Si bien este estudio no implementa directamente los hallazgos en un proceso BIM, la recopilación y análisis detallado de los datos sobre estratificación de partículas ofrece valiosas implicaciones sobre cómo la metodología BIM podría incorporar información sobre la IAQ a través de la tecnología IoT. Una primera mejora podría resultar de ubicar sensores de monitorización de la IAQ en ubicaciones más representativas para la cota de inhalación en función del uso de la habitación. Además, se podrían desarrollar estrategias de ventilación adaptativas que respondan a los cambios en tiempo real de la concentración de partículas, mejorando así la salud y el bienestar de los ocupantes. Por otro lado, la integración de la calidad del aire, como una variable dinámica en los modelos BIM, abre nuevas vías para la investigación y el desarrollo de edificios inteligentes y sostenibles, donde la salud ambiental

interior es una prioridad. Finalmente, se podría incluir una nueva dimensión BIM, dedicada a la salud y a la calidad ambiental del proyecto, así como definir parámetros IFC.

4. Resultados

La Tabla 5 y la Figura 3 muestran la media, la mediana y la desviación estándar de los registros de temperatura, humedad relativa, y la concentración de partículas PM1, PM2.5 y PM10 para las observaciones realizadas en la cocina. La Tabla 6 y la Figura 4 muestran los datos correspondientes a las observaciones realizadas en el salón, mientras que la Tabla 7 y la Figura 5 muestran los datos para el dormitorio.

Tabla 5: Media/Mediana/Desviación estándar de las observaciones en cocina

Altura (m)	T (°C)	HR (%)	PM1 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM2.5 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)
1,60	21,6/21,6/0,6	61,7/63,1/6,7	10,9/8,0/16,6	16,6/12,0/28,9	17,6/12,0/30,8
1,10	21,2/21,3/0,6	62,5/64,0/6,9	10,7/8,0/14,8	15,6/11,0/24,7	16,4/12,0/26,1
0,80	21,1/21,2/0,7	63,5/64,5/7,2	10,2/8,0/14,3	15,2/11,0/24,2	16,0/11,0/25,6

Figura 3: Variación de la concentración de partículas PM1, PM2.5 y PM10, temperatura y humedad (HR), para diferentes alturas en la cocina

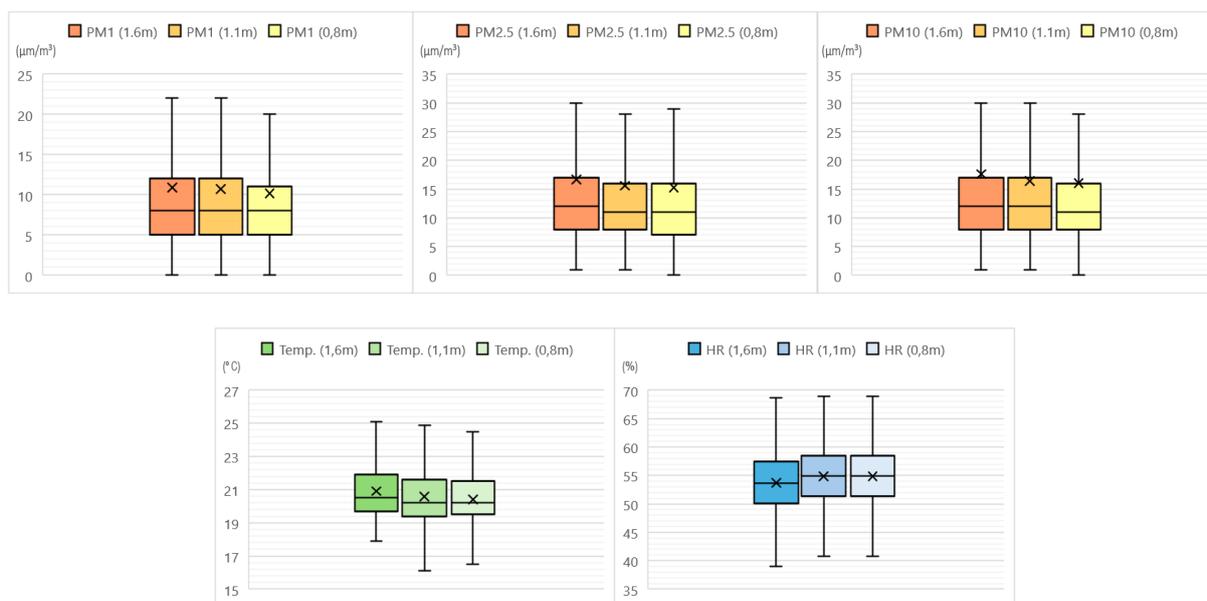


Tabla 6: Media/Mediana/Desviación estándar de las observaciones en salón

Altura (m)	T (°C)	HR (%)	PM1 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM2.5 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)
1,60	23,1/23,1/0,6	54,9/54,5/7,7	12,3/11,0/8,2	18,3/15,0/13,0	19,4/16,0/14,5
1,10	22,9/22,9/0,7	55,0/54,7/7,6	11,9/10,0/6,7	17,1/14,0/10,4	18,1/15,0/11,9
0,80	22,9/22,9/0,7	55,3/54,9/7,5	11,4/10,0/6,5	16,8/14,0/9,9	17,7/15,0/11,5

Figura 4: Variación de la concentración de partículas PM1, PM2.5 y PM10, temperatura y humedad (HR), para diferentes alturas en el salón

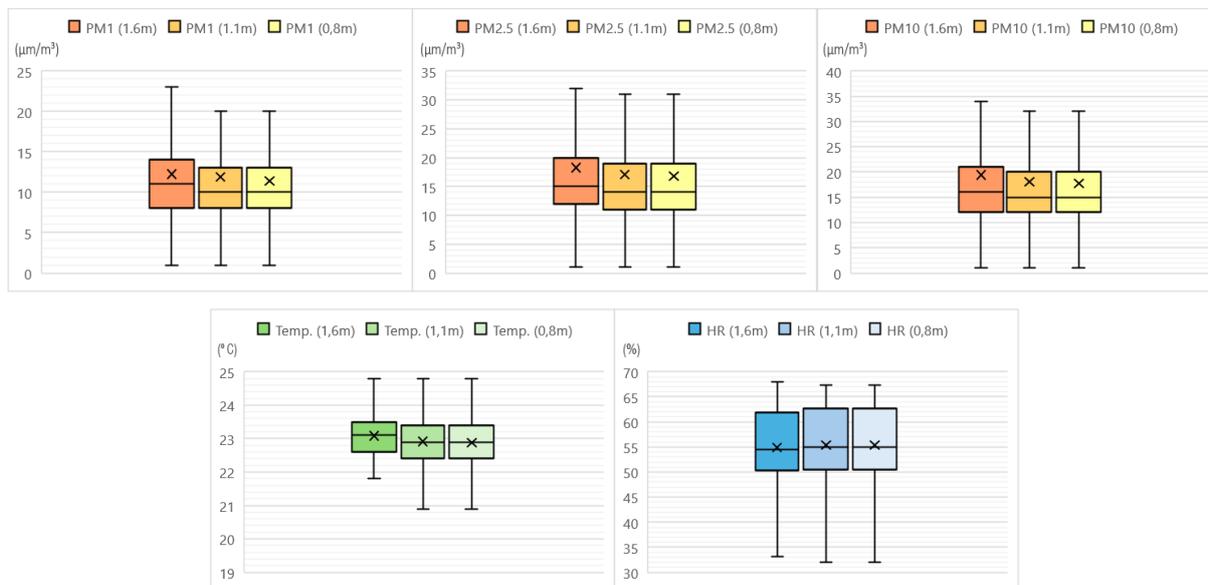
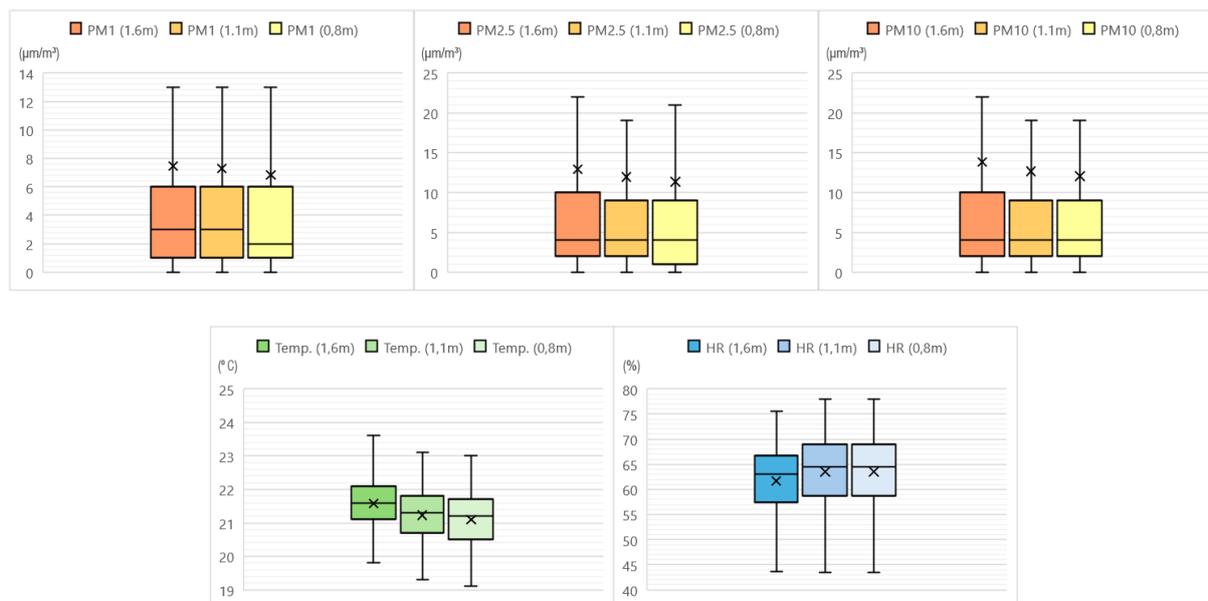


Tabla 7: Media/Mediana/Desviación estándar de las observaciones en dormitorio

Altura (m)	T (°C)	HR (%)	PM1 (μm^3)	PM2.5 (μm^3)	PM10 (μm^3)
1,60	21,6/21,6/0,6	61,7/63,1/6,7	7,5/3,0/21,5	12,9/4,0/43,8	13,8/4,0/47,1
1,10	21,2/21,3/0,6	62,5/64,0/6,9	7,3/3,0/20,5	11,9/4,0/38,1	12,7/4,0/40,3
0,80	21,1/21,2/0,7	63,5/64,5/7,2	6,8/2,0/18,9	11,3/4,0/33,3	12,1/4,0/35,1

Figura 5: Variación de la concentración de partículas PM1, PM2.5 y PM10, temperatura y humedad (HR), para diferentes alturas en el dormitorio



Respecto al análisis ANOVA, la Tabla 8 muestra los resultados del análisis de varianza aplicado a las concentraciones de PM1, PM2.5 y PM10 para la cocina.

Tabla 8: Análisis ANOVA de la concentración PM1, PM2.5 y PM10 en cocina

Concentración ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	F	p-valor	Valor crítico para F (*)	¿Diferencias? (**)	¿Hipótesis? (***)
PM1	6,50	0,00150	2,99	Sí	Sí
PM2.5	7,82	0,00040	2,99	Sí	Sí
PM10	9,52	0,00007	2,99	Sí	Sí

Grados de libertad = 2.

(*) Nivel de significancia = 0,05.

(**) Existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias cuando $p\text{-valor} < 0.05$.

(***) Rechazamos hipótesis nula de que todas las medias del grupo son iguales cuando $F > \text{Valor crítico para F}$.

La Tabla 9 muestra en análisis de varianza efectuado a las concentraciones de PM1, PM2.5 y PM10 para el salón.

Tabla 9: Análisis ANOVA de la concentración PM1, PM2.5 y PM10 en salón

Concentración ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	F	p-valor	Valor crítico para F (*)	¿Diferencias? (**)	¿Hipótesis? (***)
PM1	36,86	0,00000	2,99	Sí	Sí
PM2.5	51,25	0,00000	2,99	Sí	Sí
PM10	50,58	0,00000	2,99	Sí	Sí

Grados de libertad = 2.

(*) Nivel de significancia = 0,05.

(**) Existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias cuando $p\text{-valor} < 0.05$.

(***) Rechazamos hipótesis nula de que todas las medias del grupo son iguales cuando $F > \text{Valor crítico para F}$.

La Tabla 10 muestra en análisis de varianza efectuado a las concentraciones de PM1, PM2.5 y PM10 para el dormitorio.

Tabla 10: Análisis ANOVA de la concentración PM1, PM2.5 y PM10 en dormitorio

Concentración ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	F	p-valor	Valor crítico para F (*)	¿Diferencias? (**)	¿Hipótesis? (***)
PM1	2,49	0,08274	2,99	No	No
PM2.5	4,22	0,01461	2,99	Sí	Sí
PM10	4,91	0,00738	2,99	Sí	Sí

Grados de libertad = 2.

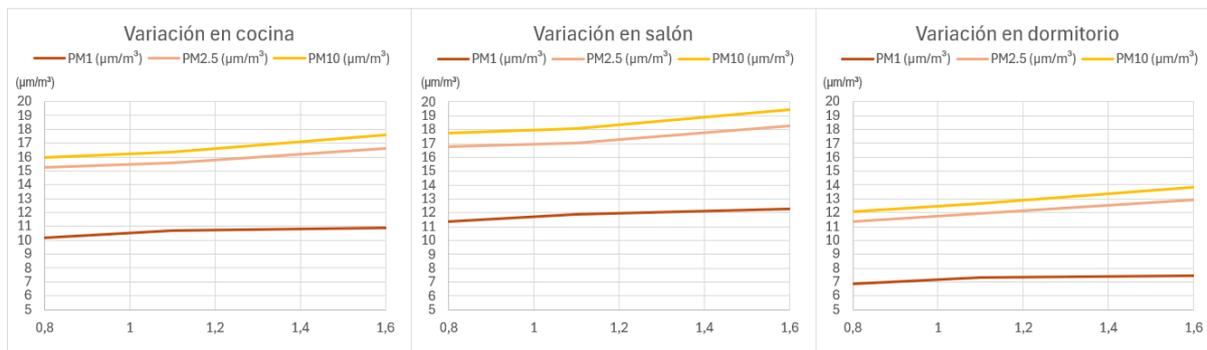
(*) Nivel de significancia = 0,05.

(**) Existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias cuando $p\text{-valor} < 0.05$.

(***) Rechazamos hipótesis nula de que todas las medias del grupo son iguales cuando $F > \text{Valor crítico para F}$.

Respecto a la variación en la concentración de partículas con la altura, la Figura 6 ilustra la tendencia creciente en las concentraciones medias de partículas PM1, PM2.5, y PM10 con el aumento de la altura en las ubicaciones (cocina, salón y dormitorio). Este patrón sugiere una estratificación vertical general de estas partículas, aumentando su concentración con la altura.

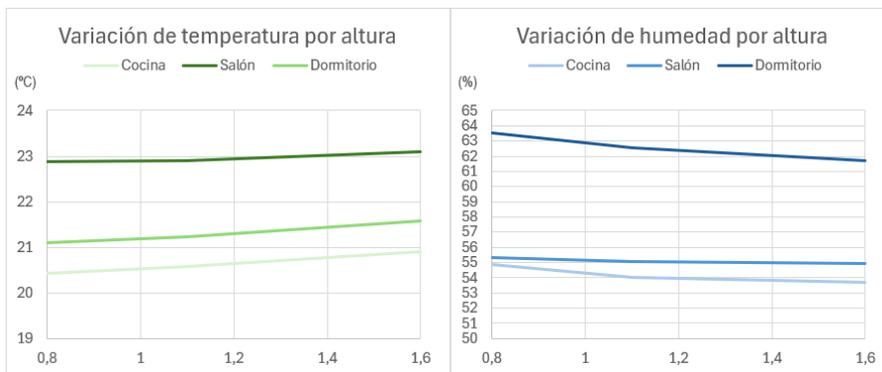
Figura 6: Variación de la media de concentración de PM1, PM2.5 y PM10 por altura y ubicación



Respecto a los resultados del análisis ANOVA, indican diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de partículas para las diferentes alturas analizadas, y para las tres ubicaciones estudiadas. En los resultados, p-value se mantiene por debajo de 0,05 en 8 de los 9 análisis realizados (solo el caso de PM1, en el dormitorio, se obtuvo un p-value de 0,08). Esto sugiere nuevamente que existe una estratificación vertical generalizada de partículas en el aire interior de la vivienda en función de la altura.

Respecto a la temperatura y humedad relativa, los análisis de sus valores medios (Tablas 5, 6 y 7) mostraron también una variación respecto a la altura. La Figura 7 muestra una representación de los valores medios. En el caso de la temperatura, la media aumentó ligeramente con la altura en las tres ubicaciones. Mientras que, en el caso de humedad relativa, se produjo un descenso respecto a la altura. Ante la falta de una monitorización de datos en unas condiciones homogéneas de temperatura y humedad relativa, no se puede demostrar la posible influencia recíproca entre la estratificación vertical de concentraciones de partículas PM1, PM2.5 y PM10 y la variación de temperatura y humedad relativa.

Figura 7: Variación de la media de temperatura y humedad relativa respecto a la altura



5. Conclusiones

La evidencia de estratificación vertical de partículas subraya la importancia que puede tener el factor altura para la integración de sensores y tecnologías de monitoreo en tiempo real. Esto incluye a la metodología BIM, donde existe una descripción geométrica detallada de la vivienda, siendo un beneficio añadido para la optimización de la ubicación de sistemas de filtración de aire. Esto podría permitir el desarrollo de modelos más precisos de la IAQ, que a su vez podrían usarse para diseñar mejores sistemas de ventilación, filtración y gestión del aire interior en proyectos de construcción y remodelación.

Para avanzar hacia la integración de la IAQ y la salud ambiental en los proyectos BIM, se propone el desarrollo de nuevos conjuntos de propiedades Psets (Property Sets) de IFC, tales como 'Pset_AirQualityParameters' y 'Pset_EnvironmentalHealth'.

- Pset_AirQualityParameters: Podría contener propiedades personalizadas para las concentraciones de PM1, PM2.5, y PM10, así como otros indicadores de calidad del aire, como niveles de CO₂, VOC (Compuestos Orgánicos Volátiles), humedad, y temperatura.
- Pset_EnvironmentalHealth: Este conjunto de propiedades podría incluir información sobre estrategias de ventilación, materiales de baja emisión de VOC, y otras medidas implementadas para garantizar un ambiente interior saludable.

Estos Psets permitirían a los profesionales incorporar directamente en los modelos BIM datos relevantes sobre la calidad del aire interior y estrategias de salud ambiental, aplicables a espacios o zonas específicas dentro del edificio. De este modo, cada espacio, dentro del modelo BIM, podría estar enriquecido con información detallada sobre la calidad del aire, contribuyendo a un diseño más consciente y focalizado en el bienestar de los ocupantes.

Dadas las limitaciones del presente estudio, como la desviación estándar de $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la medición de concentraciones de 0 a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (que resultaron ser las más presentes a lo largo de los intervalos de observación), se sugiere también la realización de más estudios que exploren el uso de sensores de partículas más precisos. También se propone aumentar los estudios sobre el impacto que las diferentes actividades humanas (como cocinar, limpiar, etc.), así como los sistemas de ventilación, y las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa), pueden afectar a la estratificación de partículas. Estos estudios podrían arrojar más luz sobre cómo gestionar mejor la IAQ a través de la metodología BIM.

6. Bibliografía

- Aosong Electronics Co., Ltd. (n.d.). *DHT22 Digital Temperature and Humidity Sensor*. Recuperado el 01/03/2024, de <https://www.aosong.com/en/products-22.html>
- Colbeck, I., & Nasir, Z. A. (2010). Indoor air pollution. In M. Lazaridis & I. Colbeck (Eds.), *Human exposure to pollutants via dermal absorption and inhalation* (Environmental Pollution, Vol. 17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8663-1_2
- Cui, W., Chen, Y., & Xu, B. (2024). Application research of intelligent system based on BIM and sensors monitoring technology in construction management. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103546. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103546>
- Derbez, M., Berthineau, B., Cochet, V., Pignon, C., Ribéron, J., Wyart, G., Mandin, C., & Kirchner, S. (2014). A 3-year follow-up of indoor air quality and comfort in two energy-efficient houses. *Building and Environment*, 82, 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.028>
- deSouza, P., Kahn, R., Stockman, T., Obermann, W., Crawford, B., Wang, A., Crooks, J., Li, J., & Kinney, P. (2022). Calibrating networks of low-cost air quality sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(6309-6328). <https://doi.org/10.5194/amt-15-6309-2022>
- Farmer, D. K., Vance, M. E., Abbatt, J. P. D., Abeleira, A., Alves, M. R., Arata, C., Boedicker, E., Bourne, S., Cardoso-Saldana, F., Corsi, R., DeCarlo, P. F., Goldstein, A. H., Grassian, V. H., Hildebrandt, L., Jimenez, J. L., Kahan, T. F., Katz, E. F., Mattila, J. M., Nazaroff, W. W., Novoselac, A., O'Brien, R. E., Or, V. W., Patel, S., Sankhyan, S., Stevens, P. S., Tian, Y., Wade, M., Wang, C., Zhou, S., & Zhou, Y. (2019). Overview of HOMEChem: House observations of microbial and environmental chemistry.

Environmental Science: Processes & Impacts, 21(8), 1280–1300.
<https://doi.org/10.1039/c9em00228f>

- González Rivero, R. A., Morera Hernández, L. E., Schalm, O., Hernández Rodríguez, E., Alejo Sánchez, D., Morales Pérez, M. C., Nuñez Caraballo, V., Jacobs, W., & Martínez Laguardia, A. (2023). A low-cost calibration method for temperature, relative humidity, and carbon dioxide sensors used in air quality monitoring systems. *Atmosphere*, 14(2), 191. <https://doi.org/10.3390/atmos14020191>
- Hasan, M. W. (2023). Building an IoT temperature and humidity forecasting model based on long short-term memory (LSTM) with improved whale optimization algorithm. *Memories - Materials, Devices, Circuits and Systems*, 6, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.memori.2023.100086>
- Kumar, P., Skouloudis, A. N., Bell, M., Viana, M., Carotta, M. C., Biskos, G., & Morawska, L. (2016). Real-time sensors for indoor air monitoring and challenges ahead in deploying them to urban buildings. *Science of The Total Environment*, 560–561, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.032>
- Ma, Y., Jiang, Y., & Li, L. (2015). Numerical simulation of PM2.5 distribution in indoor air. *Procedia Engineering*, 121, 1939-1947. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.183>
- NCD Risk Factor Collaboration. (2020). Height and body-mass index trajectories of school-aged children and adolescents from 1985 to 2019 in 200 countries and territories: A pooled analysis of 2181 population-based studies with 65 million participants. *The Lancet*, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31859-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31859-6)
- Patel, M. Y., Vannucci, P. F., Kim, J., Berelson, W. M., & Cohen, R. C. (2024). Towards a hygroscopic growth calibration for low-cost PM2.5 sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(3), 1051-1060. <https://doi.org/10.5194/amt-17-1051-2024>
- Plantower. (n.d.). *PMS5003 Particulate Matter Sensor*. Recuperado el 01/03/2024, de https://www.plantower.com/products_16/10.html
- Renard, E.J., & Olmos, J.M., (2022). Training and teaching available for BIM modeling software: Archicad, Revit and Allplan. En AEIPRO (Ed.). *26th International Congress on Project Management and Engineering 2022*. Terrassa (09-034). Cataluña. URI: <http://dspace.aeipro.com/xmlui/handle/123456789/3322>
- Schieweck, A., Uhde, E., Salthammer, T., Salthammer, L. C., Morawska, L., Mazaheri, M., & Kumar, P. (2018). Smart homes and the control of indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 705-718. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.057>
- Teumzghi, F. M., Gillian, T. C. Y., John, J. T., & Rosemary, McE. (2023). The effects of exposure to NO2, PM2.5 and PM10 on health service attendances with respiratory illnesses: A time-series analysis. *Environmental Pollution*, 333, 122123. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122123>
- Yuting, M., & Yiqiang, L. L. (2015). Numerical simulation of PM2.5 distribution in indoor air. *Procedia Engineering*, 121, 1939-1947. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.183>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

