

**Monitoreo de material
particulado en suspensión
mediante métodos
alternativos:
desorientados y
expectantes**



Darío R. Gómez

Contenido

01 Introducción

Es necesario entender un poco

02 Partículas en suspensión

Enfoques para la determinación de su tamaño

03 Medición de PM

Métodos de referencia y equivalentes

04 Sensores de PM de bajo costo (SPBC)

Principio de funcionamiento

05 Performance de los SPBC

Ensayos de laboratorio.
Caracterización en campo.
Calibración

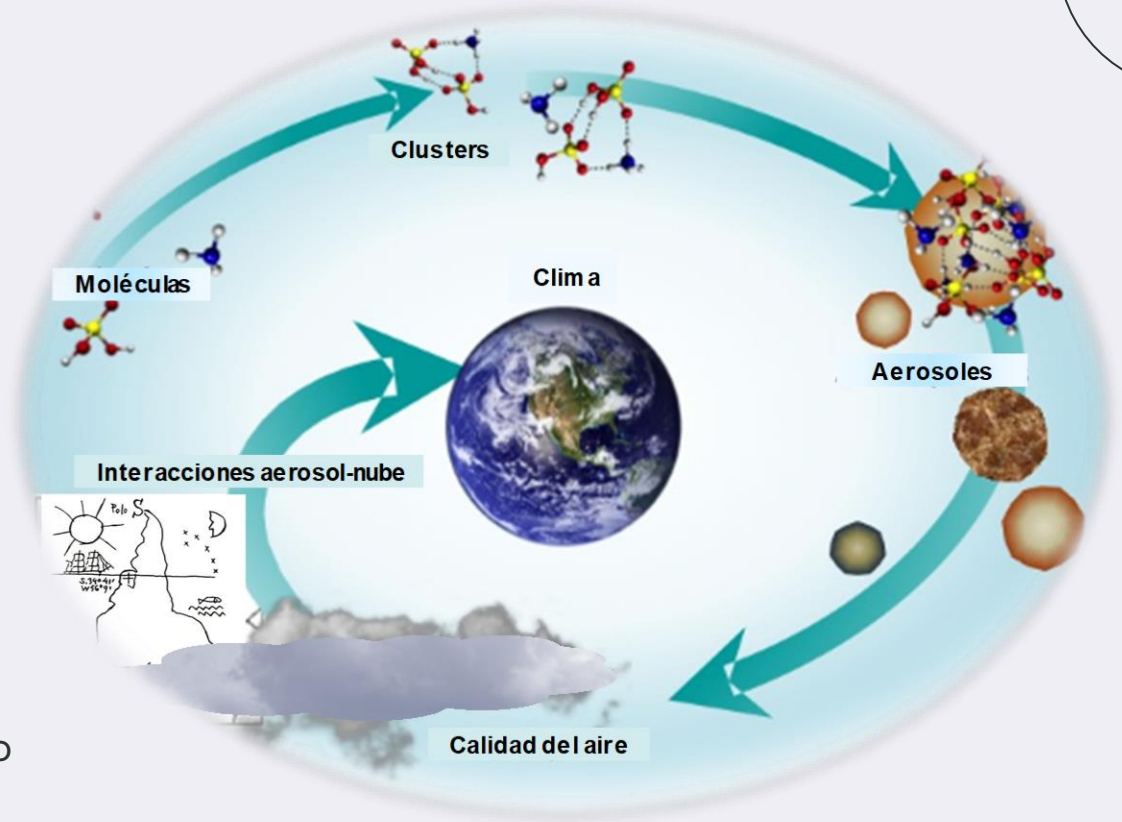
06 ¿Hoja de ruta?

Integración de la tecnología SPBC en la vigilancia de la calidad del aire

01

Introducción

Es necesario entender un poco



Aerosoles atmosféricos

Material Particulado en suspensión (PM)



Doble rol

Por sus múltiples efectos sobre la salud y su influencia sobre el balance energético de la Tierra



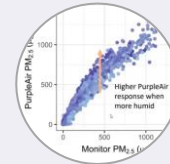
Monitoreo de PM en el aire exterior

Concentraciones gravimétricas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para periodos de tiempo según el equipo utilizado



SPBC

Contribuir a la escasa granularidad de la red de estaciones de referencia



Cautela: selección, instalación y calibración de SPBC

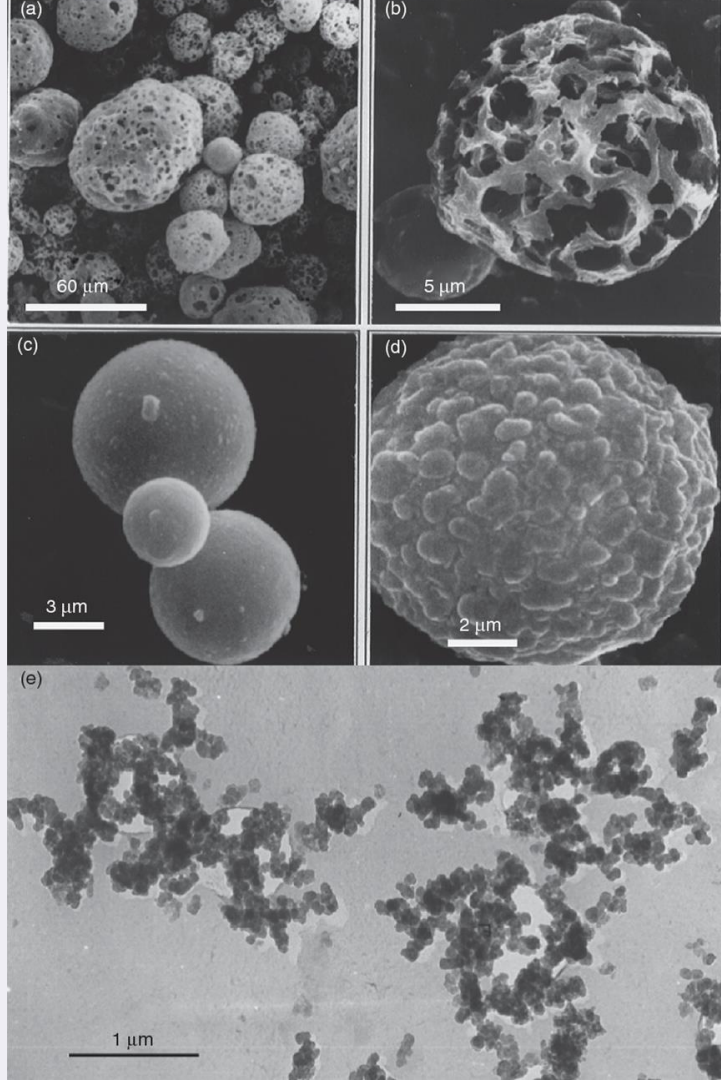
Existe una diversidad de SPBC. La performance puede ser afectada por las condiciones meteorológicas. Está documentado que sufren deriva y envejecimiento



02

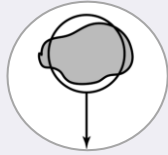
Partículas en suspensión

Enfoques para la determinación de su tamaño



Partículas en suspensión

Determinación de tamaño(s)



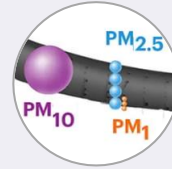
Diámetro aerodinámico

Esfera, densidad=1 g/cm³, que sedimenta en el aire en reposo a la misma velocidad que la partícula



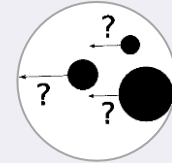
Punto de corte del 50%

Colectar 50% de las partículas < x μm
Excluir 50% de las partículas > x μm



PM_x

Partículas en suspensión, diámetro aerodinámico ≤ x μm



Otros tamaños

Determinados empleando otros métodos de medición
Tamaño óptico
Tamaño de movilidad eléctrica



03

Medición de PM

Métodos de referencia y equivalentes

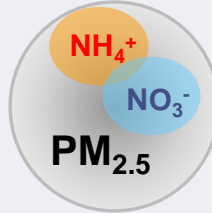


Método de referencia para $PM_{2.5}$ y PM_{10}



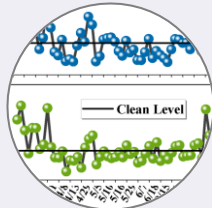
Concentración gravimétrica de 24 horas

Método de medición: componente clave de una norma de calidad del aire ambiente para evaluar su cumplimiento. Los países que indican metodologías de medición, especifican el mismo método de referencia



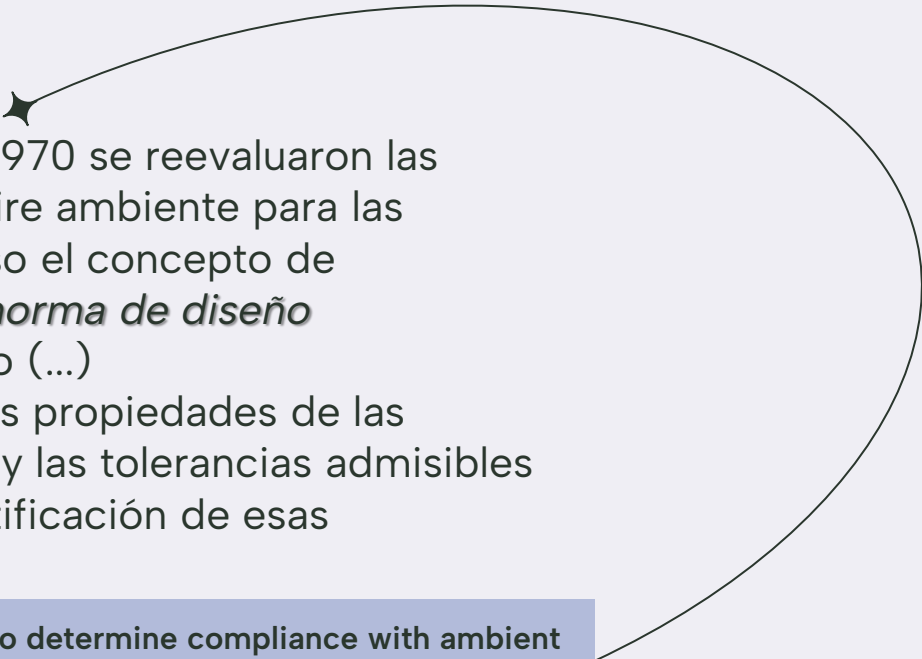
Inconvenientes en la determinación gravimétrica

Componentes semivolátiles que al volatizarse conllevan una subestimación de la concentración gravimétrica que podrían ser más pronunciada para la fracción $PM_{2.5}$



Limitación de la metodología gravimétrica

Información demasiado integrada en el tiempo como para un diagnóstico efectivo de la dinámica de las partículas en la atmósfera. Alcance limitado para identificar y controlar las fuentes de emisión



“Cuando a finales de la década de 1970 se reevaluaron las normas nacionales de calidad del aire ambiente para las partículas en suspensión, se propuso el concepto de *norma de desempeño* en lugar de *norma de diseño* para los monitores de cumplimiento (...)

Norma de desempeño: establece las propiedades de las partículas que deben determinarse y las tolerancias admisibles de exactitud y precisión en la cuantificación de esas propiedades.”

— Chow, J. C. (1995). Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45(5), 320–382.



Métodos equivalentes

(Código de regulación federal de los EE.UU.)

Clases I, II y III

A medida que se pasa de la clase I, a la clase II y a la clase III, existe una mayor desviación del método candidato a ser considerado como método equivalente y se requieren pruebas más exhaustivas para la verificación de la equivalencia

Clases I y II

Técnicas de colección de partículas en filtro durante 24 horas y determinación gravimétrica

Clase III

Analizadores continuos o semicontinuos que no colectan partículas para análisis gravimétrico

- ❖ Atenuación Beta
- ❖ Microbalanza oscilante de elemento cónico (TEOM®)
- ❖ Espectrometría láser de aerosols
 - Grimm Technologies, Inc. Modelo EDM 180 PM2.5

04

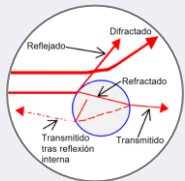
Sensores de PM de bajo costo (SPBC)

Principio de funcionamiento



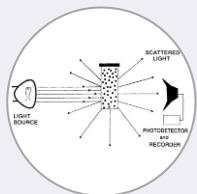
Artículos

SPBC



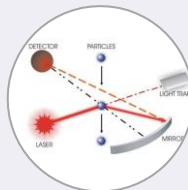
Principio de funcionamiento

Las partículas muestreadas interceptan un haz luminoso. Parte de la luz se desvía de la trayectoria original. Un fotodetector mide la intensidad de la luz dispersada por las partículas que y esta intensidad se correlaciona con una concentración gravimétrica de PM



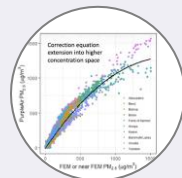
Nefelómetros

Miden la luz dispersada por las partículas en su conjunto. La amplitud de dispersión total se correlaciona con una medición de masa realizada por un instrumento de referencia



Contadores ópticos de partículas

Detectan partículas individuales. El pulso medido a partir de la luz dispersada por cada partícula se correlaciona con su tamaño en función de su intensidad luminosa. Se genera un histograma que se convierte a unidades de masa.



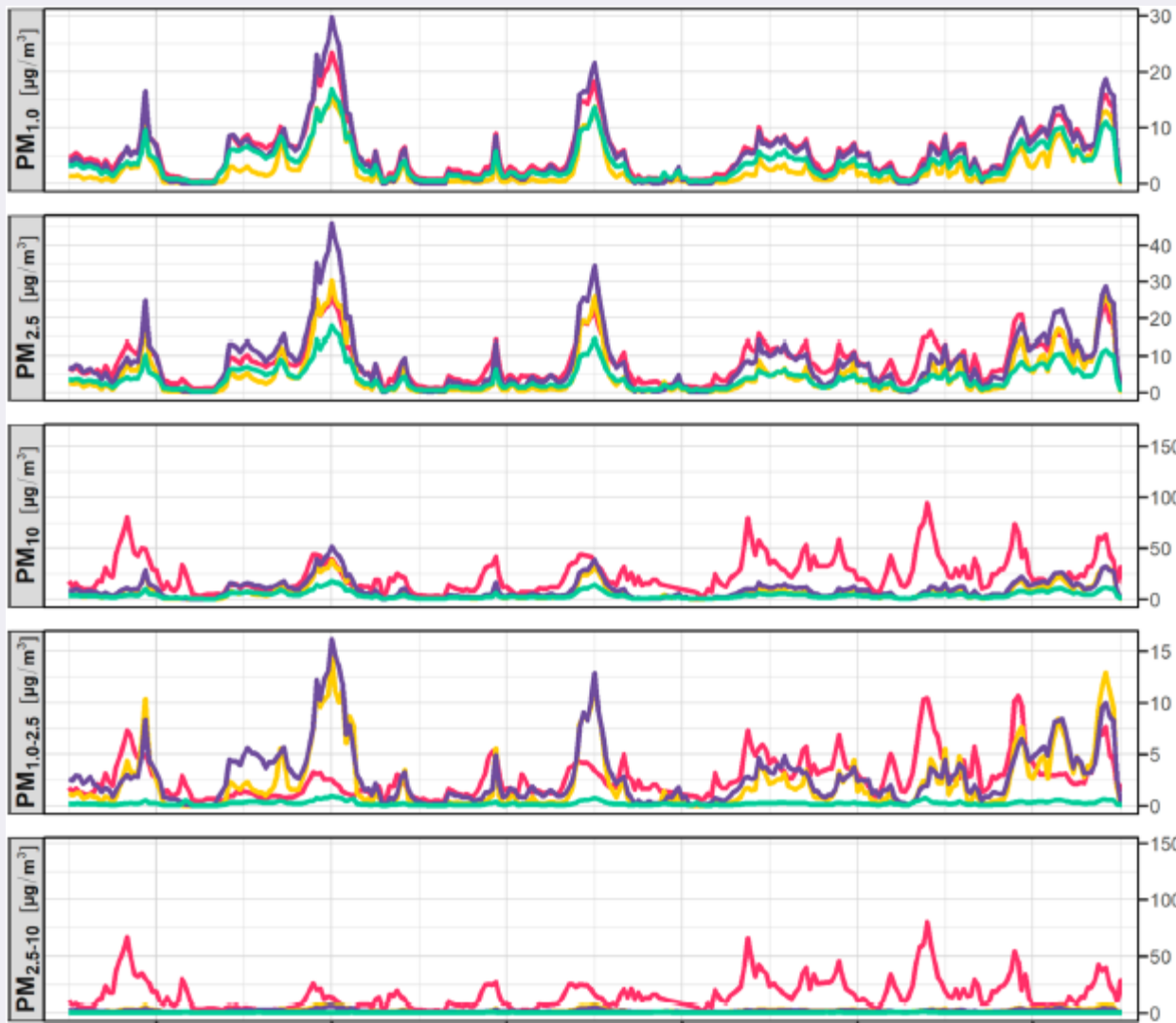
Limitaciones

En gran parte asociadas con las condiciones meteorológicas y/o las propiedades del aerosol. La documentación del fabricante suele omitir el principio de funcionamiento y el sesgo/precisión de las salidas

05

Performance de los SPBC

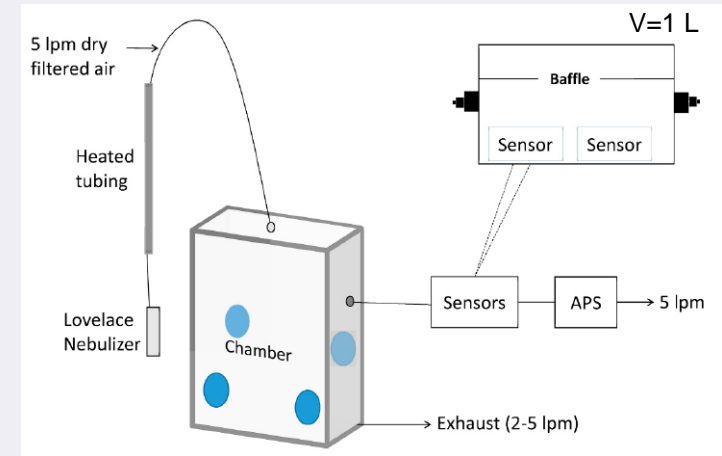
Ensayos de laboratorio
Caracterización en campo
Calibración



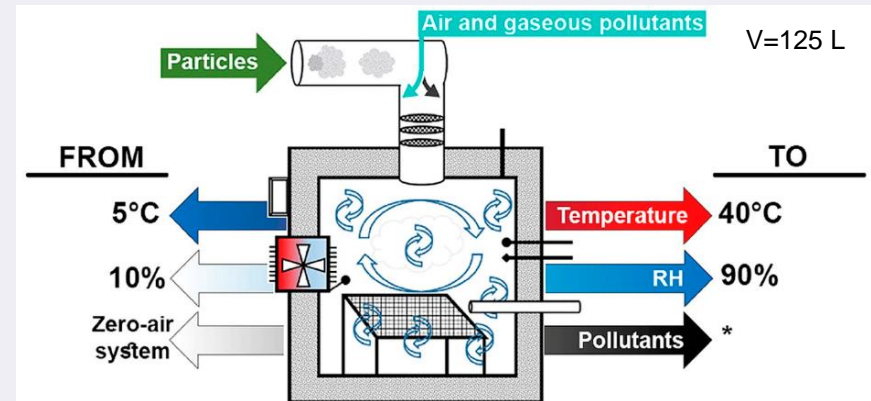
Ensayos de laboratorio

Cámara de caracterización de SPBC

- ❖ Desempeño de SPBC antes de su implementación en campo
- ❖ Ocurrencia de posibles diferencias en sus respuestas dentro de la misma familia de sensores
- ❖ **Cámara:** aislada del entorno exterior y equipada con un instrumento de referencia y controles de humedad y temperatura
- ❖ **Sistema de aire purificado:** proporciona aire de referencia limpio en la cámara
- ❖ **Generador de aerosoles:** garantiza una concentración de PM controlable en el interior de la cámara



Austin, E., Novosselov, I., Seto, E., & Yost, M. G. (2015)
PloS one, 10(9), e0137789



Omidvarborna, H., Kumar, P., & Tiwari, A. (2020)
Atmospheric Environment, 223, 117264

Caracterización en campo

Evaluación de la performance en campo

Fundamental incluso para las mejores tecnologías disponibles (aun cuando los SPBCs hayan sido caracterizados en laboratorio). Debido a la diversidad de las propiedades físicas y químicas del PM y de la influencia de las condiciones meteorológicas la evaluación conclusiva debe hacerse sobre el terreno

Omisión de la evaluación en campo

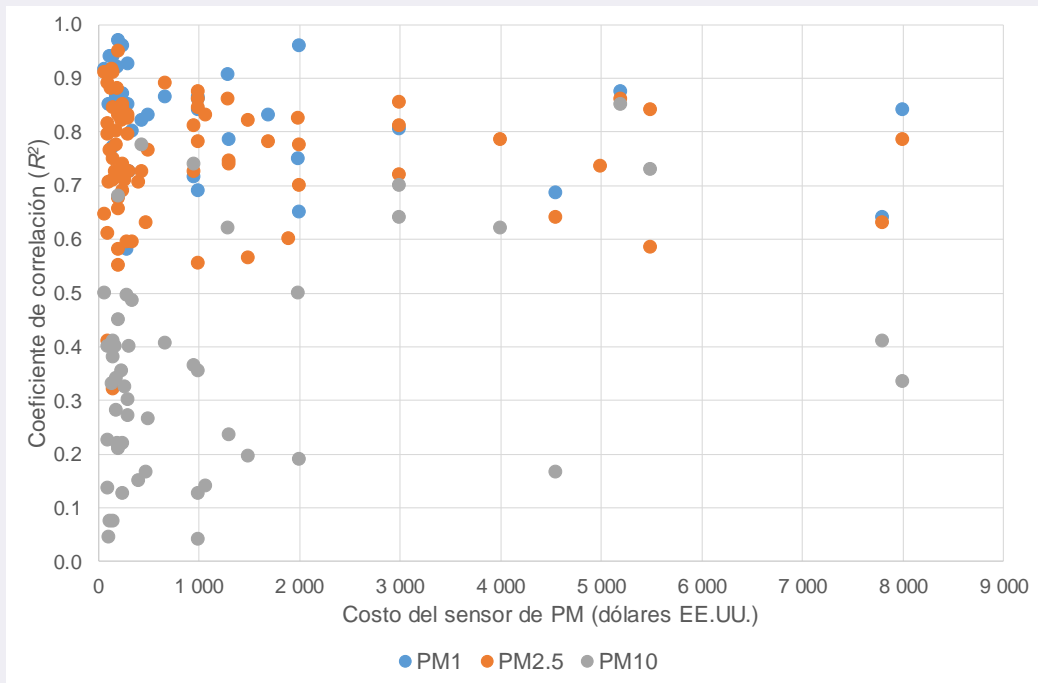
Muchos estudios que han empleado SBC se han basado únicamente en la información del fabricante para la selección de la tecnología y las expectativas sobre su rendimiento

Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., ... & Williams, R. (2018). *Environ. Int.*, 116, 286-299.

Numerosos estudios han evaluado la performance en campo

- ❖ Alfano, B., Barretta, L., Del Giudice, A., De Vito, S., Di Francia, G., Esposito, E., ... & Polichetti, T. (2020). *Sensors*, 20(23), 6819 y sus referencias
- ❖ Bulot, F. M. J., Russell, H. S., Rezaei, M., Johnson, M. S., Ossont, S. J. J., Morris, A. K. R., ... & Cox, S. J. (2020). *Sensors*, 20(8), 2219.
- ❖ Narayana, M. V., Jalihal, D., & Nagendra, S. S. (2022). *Sensors*, 22(1), 394 y sus referencias
- ❖ Molina Rueda, E., Carter, E., L'Orange, C., Quinn, C., & Volckens, J. (2023). *Environ. Sci. Technol. Letters*, 10(3), 247-253.

AQ-SPEC (Air Quality Performance Evaluation Center)



- ❖ Prueba sobre el terreno frente a una o más estaciones equipadas con FRM o FEM

Parámetros considerados

- ❖ Variabilidad intramodelo (tres unidades del mismo tipo de sensor)
- ❖ Recuperación de datos (datos válidos/ total datos colectados)
- ❖ Coeficiente de correlación entre las mediciones de los tres sensores probados y los valores del instrumento de referencia (R^2)
- ❖ 81 sensores evaluados: 31 PM₁; 73 PM_{2.5} y 50 PM₁₀.
- ❖ R^2 : PM₁ (0.42–0.98) > PM_{2.5} (0.32–0.97) > PM₁₀ (0.03–0.92)
- ❖ Resultados en línea con la caracterización en laboratorio, indicativa de la relativa peor performance de los SPBCs para PM₁₀.
- ❖ No se observa una mejor performance, en términos de R^2 , a mayor costo del sensor.

Calibración

Complejidad

- ❖ Rango de medición
- ❖ Instrumento de referencia
- ❖ Intervalo de concentración adecuado
- ❖ Tipo de aerosoles a utilizar
- ❖ Condiciones atmosféricas
- ❖ Sitio
- ❖ Determinación de los factores de calibración adecuados
- ❖ Frecuencia de realización

Exhaustividad

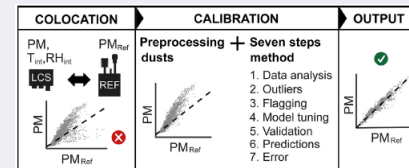
- ❖ Batería completa de pruebas
 - entorno similar
 - condiciones previstas para la duración del monitoreo
- ❖ Caracterización de la linealidad y respuesta
 - humedad relativa
 - temperatura
 - diferentes fuentes de aerosol.
- ❖ Crucial: comprobar la presencia de eventos de polvo en un conjunto de datos

Colocalización

- ❖ Monitor de referencia y todos los SPBCs de interés desplegados en el mismo lugar durante algún período de tiempo
- ❖ Cubrir una gama amplia de concentraciones, composiciones y condiciones atmosféricas

Métodos

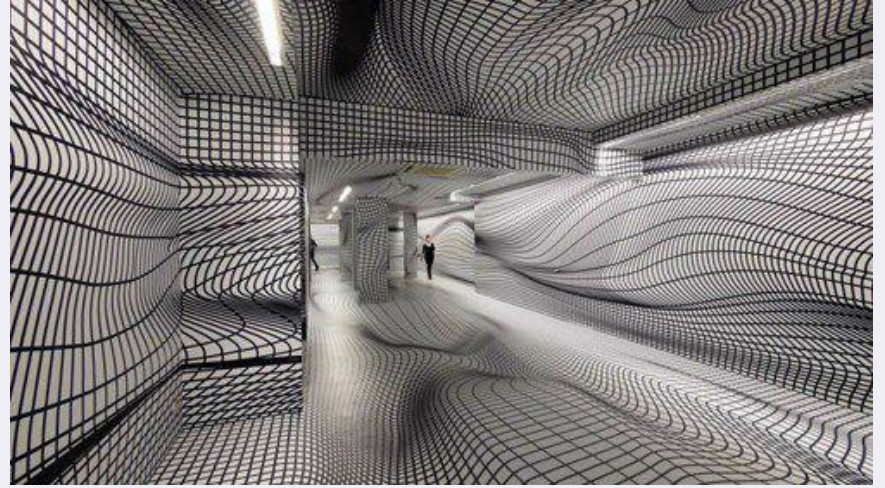
- ❖ Regresión lineal
- ❖ Regresión lineal múltiple
- ❖ Modelos mecanicistas
- ❖ Aprendizaje automático
- ❖ Calibración espacial mediante datos reglamentarios y de satélite
- ❖ No existe aun una metodología estandarizada y bien establecida

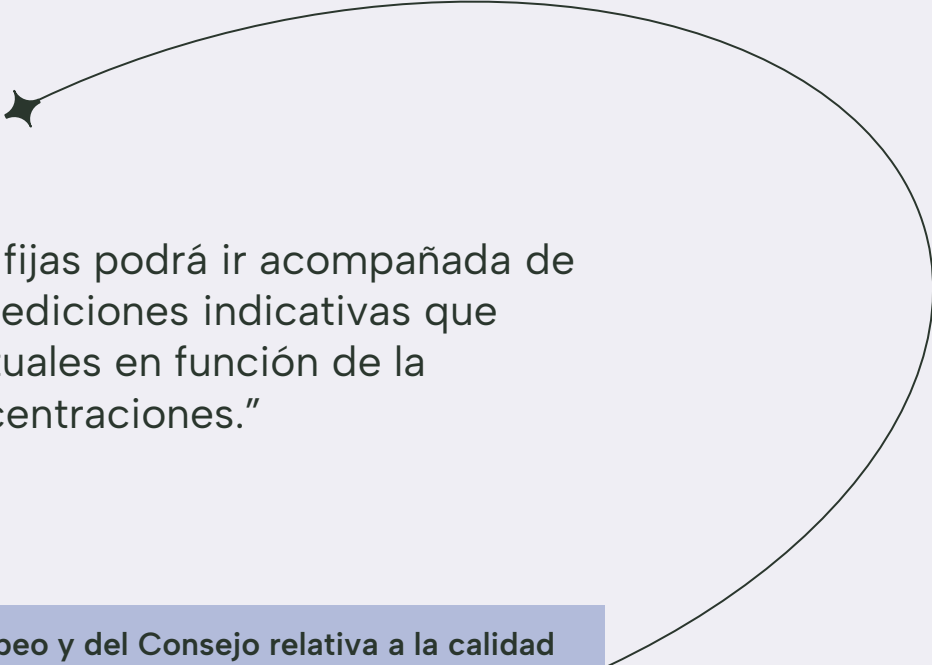


06

¿Hoja de ruta

Integración de la tecnología SPBC en la vigilancia de la calidad del aire

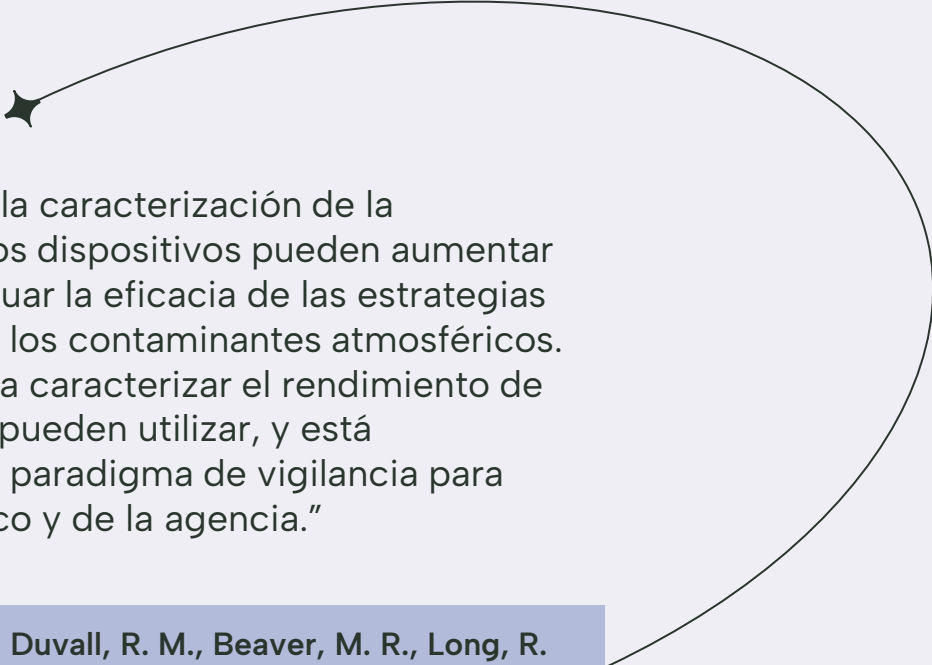




“La información de las mediciones fijas podrá ir acompañada de técnicas de modelización y/o de mediciones indicativas que permitan interpretar los datos puntuales en función de la distribución geográfica de las concentraciones.”

— Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa



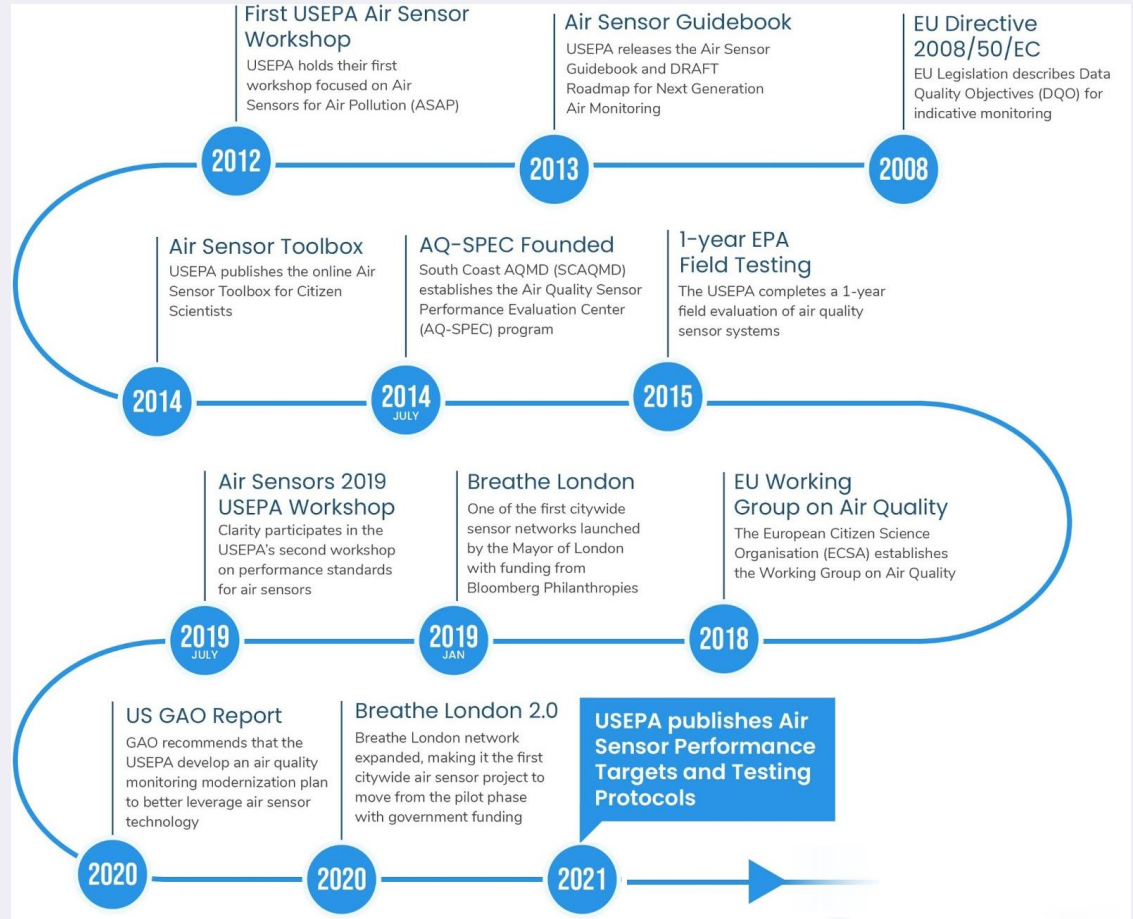


“Los sensores podrían ayudar a mejorar la caracterización de la contaminación atmosférica. Estos nuevos dispositivos pueden aumentar la cantidad de datos utilizados para evaluar la eficacia de las estrategias de mitigación de riesgos de la EPA para los contaminantes atmosféricos. La EPA está trabajando activamente para caracterizar el rendimiento de estos dispositivos, determinar cómo se pueden utilizar, y está considerando cómo adoptar este nuevo paradigma de vigilancia para servir mejor a las necesidades del público y de la agencia.”

—Hall, E. S., Kaushik, S. M., Vanderpool, R. W., Duvall, R. M., Beaver, M. R., Long, R. W., & Solomon, P. A. (2014). Integrating sensor monitoring technology into the current air pollution regulatory support paradigm: Practical considerations. *Am. J. Environ. Eng*, 4(6), 147-154



Hacia la adopción de protocolos de desempeño para SBC

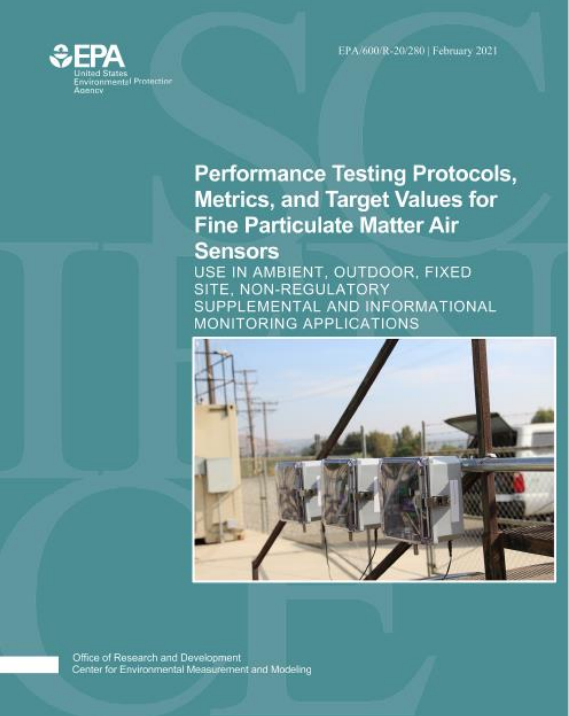


Del “antiguo” proyecto de hoja de ruta para la próxima generación de vigilancia atmosférica (2013) a los protocolos de desempeño en los EE.UU. (2021)

Nivel	Costo (Dólares EE.UU.)	Usuario previsto
Nivel V (más sofisticados)	10.000 – 50.000 USD	Organismos reguladores (complemento de la vigilancia existente -medio ambiente y fuente)
Nivel IV	5.000 – 10.000 USD	Organismos reguladores (complementar el control existente -medio ambiente y fuente)
Nivel III	2.000 – 5.000 USD	Grupos comunitarios y reguladores (complementar el seguimiento existente -ambiente y fuente)
Nivel II	100 – 2.000 USD	Grupos comunitarios
Nivel I (más limitados)	< 100 USD	Ciudadanos (fines educativos y de salud personal)

U. S. Environmental Protection Agency. Draft roadmap for next generation air monitoring. March 2013

<https://sites.google.com/site/airsensors2013/final-materials>



The image shows the cover of an EPA report. At the top left is the EPA logo with the text 'United States Environmental Protection Agency'. At the top right is the report number 'EPA/600/R-20/280 | February 2021'. The main title is 'Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors'. Below the title is a subtitle: 'USE IN AMBIENT, OUTDOOR, FIXED SITE, NON-REGULATORY SUPPLEMENTAL AND INFORMATIONAL MONITORING APPLICATIONS'. There is a photograph of air sensors mounted on a metal frame outdoors. At the bottom, it says 'Office of Research and Development Center for Environmental Measurement and Modeling'.

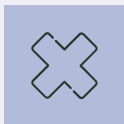
<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols>

A falta de conclusiones y recomendaciones, interrogantes



¿Qué puede hacer DICAIRE?

- ◆ ¿"Parafrasear/adaptar" los lineamientos ya desarrollados en el Norte para las buenas prácticas en el uso de los SPBCs en el Sur?
- ◆ ¿Gestionar fondos para el desarrollo e implementación de centros de ensayos de laboratorio y caracterización en campo de SPBCs (~AQ-SPEC)?
- ◆ ¿Alentar a los grupos de C&T que están trabajando en el tema en América Latina y el Caribe?



¿Puede guardar silencio sobre...

- ◆ ¿El uso de SPBCs con instrumentos sin caracterizar ni calibrar?
- ◆ ¿El concepto del "aumento de la granularidad" de las redes de vigilancia de la calidad del aire facilitado por el uso de los SPBCs cuando no existen tales redes?
- ◆ ¿La idea de que el empleo de una decena de sensores de bajo costo montados en bicicletas pueda dar información precisa sobre la calidad del aire?

¡Muchas gracias!

dario_r_gomez@yahoo.com.ar

CREDITS: This presentation template was created by [Slidesgo](#), including icons by [Flaticon](#) and infographics & images by [Freepik](#)

