

Uso Integrado de Sensores de Bajo Costo para Fortalecer la Gestión de la Calidad del Aire







Agradecimientos

Coautores y principales colaboradores

Meenakshi Kushwaha, ILK Labs, India
Sumi Mehta, Vital Strategies, Estados Unidos
Pooja Arora, Instituto de Energía y Recursos, India
Timothy Dye, Servicios Medioambientales de TD
Thomas Matte, Vital Strategies, Estados Unidos

Revisores externos

Joshua Apte, Universidad de Texas, Estados Unidos
Salomón Teffera, SolTeff Environmental Consulting,
Estados Unidos
Sachchida Tripathi, IIT Kanpur, India

Los autores y colaboradores de esta guía agradecen a las partes interesadas y a los socios del gobierno y de la sociedad civil que proporcionaron valiosos aportes y conocimiento durante un intercambio técnico virtual de dos días celebrado en diciembre de 2020. La lista completa de participantes figura en los Apéndices. Las mencionadas interacciones se utilizaron como marco para el contenido del presente compendio.

La presente publicación fue posible gracias al apoyo financiero de Bloomberg Philanthropies..

Vital Strategies. Uso Integrado de Sensores de Bajo Costo para Reforzar la Gestión de la Calidad del Aire. Meenakshi Kushwaha, Sumi Mehta, Pooja Arora, Timothy Dye, Thomas Matte. New York, NY, 2022. Available from: <https://www.vitalstrategies.org/resources/integrated-use-of-low-cost-sensors-to-strengthen-air-quality-management-in-indian-cities/>

Esta obra está disponible bajo los términos de la licencia Creative Commons AttributionNonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> o envíe una carta a Creative Commons, P.O. Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA. El contenido de este documento puede utilizarse libremente de acuerdo con dicha licencia siempre que el material vaya acompañado de la siguiente atribución: "Uso Integrado de Sensores de Bajo Costo para Reforzar la Gestión de la Calidad del Aire". Nueva York, NY; 2022. Copyright ©Vital Strategies



Contenido

Antecedentes y Visión General	2	Diseño de la red LCS y ubicación de los sensores	16
Aplicación de los Sensores de Bajo Costo (LCS) en los Programas de Gestión Integral de Calidad del Aire y los Sistemas Integrados Robustos de Monitoreo	3	Ubicación	16
Posibles aplicaciones de LCS	7	Mapeo de la calidad del aire	16
Objetivos y diseño del proyecto	8	Identificación de puntos calientes	16
		Evaluación	16
		Otras consideraciones	16
		Garantía de calidad/control de calidad	17
Selección/Especificaciones de un Sensor de Aire	9	Preinstalación	18
Métricas de desempeño	9	Calibración/Ubicación	18
Precisión y exactitud	9	Ubicación para evaluar la comparabilidad de los sensores	18
Correlación	10	Ubicación con monitor de referencia	18
Comparaciones entre modelos	11	Mantenimiento posterior a la instalación	18
Degradación del desempeño	11		
Respuesta del sensor a altas concentraciones	11		
Integridad de los datos	11	Referencias	21
Efecto de los parámetros ambientales	11		
Evaluación de desempeño:		Apéndice:	
Evaluaciones de laboratorio y de campo	10	A. Apéndice: Enfoques a la medición de sesgo, exactitud y precisión	22
Otros factores a tener en cuenta durante		B. Orientación resumida para informar el desarrollo y evaluación de licitaciones	23
Proceso de selección del sensor de aire	13		
Potencia	13		
Transmisión de datos	13		
Calibración	13		
Consideraciones sobre la duración del proyecto	13		
Selección de servicios de datos	14		
Gestión y acceso a los datos	14		
Revisión de datos	14		
Atención al cliente	14		
Modelos de precios	14		
Logística	14		
Consideraciones generales sobre los costos	14		





Siglas

API	Interfaz de programación de aplicaciones
AQ	Calidad del aire
AQM	Gestión de la calidad del aire
AQSPEC	Centro de Evaluación del Desempeño de los Sensores de Calidad del Aire
ASTM	Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales
BAM	Monitor beta atenuado
CAAQMS	Estaciones de control continuo de la calidad del aire ambiente
CSV	Valores separados por comas
EPA	Agencia de Protección del Medio Ambiente
GBD	Estudio sobre la carga mundial de la enfermedad
CPCB	Junta Central de Control de la Contaminación
LCS	Sensor de bajo costo
MLR	Regresión lineal múltiple
MOEFCC	Ministerio de Medio Ambiente, Bosques y Cambio Climático
NO _x	Óxidos de nitrógeno
QA/QC	Garantía y control de calidad
PM	Partículas en suspensión
RFP	Solicitud de Propuestas
RMSE	Error cuadrático medio
RH	Humedad relativa
SLR	Regresión lineal simple
SOW	Declaración de trabajo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
OMS	Organización Mundial de la Salud



Antecedentes y Visión General

La contaminación atmosférica sigue siendo el riesgo medioambiental más mortífero a nivel mundial, causando casi 5 millones de muertes al año, principalmente por la exposición a partículas finas ($PM_{2.5}$). La carga de la contaminación atmosférica es mayor y va en aumento en países con un rápido desarrollo económico y urbanización, junto con la proliferación de emisiones de la industria, la generación de energía eléctrica y el transporte motorizado. En países donde la regulación de la calidad del aire es limitada o inexistente, hay un fuerte aumento de la contaminación nociva. Para agravar el problema de la contaminación atmosférica en muchos de estos países, persisten las fuentes de contaminación preindustriales, como la quema de combustibles sólidos domésticos, los residuos de las cosechas y los bosques para el despeje de tierras, así como la quema de basura al aire libre.

Para muchos gobiernos municipales de países de ingresos bajos y medios, la complejidad y el costo de la comprensión y el monitoreo de la contaminación atmosférica han sido obstáculos para iniciar o mantener una acción eficaz en materia de aire limpio. Un nuevo enfoque en la gestión de la calidad del aire que combine soluciones convencionales con innovaciones en el monitoreo, la evaluación, el uso de datos y la organización puede acelerar la acción en favor del aire limpio, especialmente en ciudades con una capacidad técnica actualmente limitada.

Recientemente, los sensores de bajo costo están ganando popularidad como herramienta para cerrar las lagunas de datos en el control de la calidad del aire en tiempo real. Al mismo tiempo, dada la novedad de los LCS, su aplicación más amplia para informar sobre la gestión de la calidad del aire y las políticas de aire limpio requiere cuidadosas consideraciones. En diciembre de 2020, más de 50 expertos internacionales y nacionales se reunieron en un intercambio técnico virtual para compartir conocimientos internacionales, mejores prácticas y ejemplos de uso de sensores para explorar más a fondo sus capacidades, limitaciones, especificaciones técnicas y cómo se deberían seleccionar y desplegar. Aquí, integramos dichos aprendizajes en el marco de monitoreo más amplio que se presenta en *Accelerating City Progress on Clean Air: Innovation and Action Guide*¹, un libro sobre acciones para acelerar los enfoques probados y las innovaciones para mejorar la calidad del aire.

En resumen, el presente compendio proporciona una guía pragmática para el uso de sensores de bajo costo (LCS) basada en investigación aplicada y experiencia de campo, incluyendo la identificación de los objetivos de monitoreo y las preguntas para las que los LCS pueden ser adecuados para el propósito, las especificaciones técnicas, los temas clave de garantía de calidad / control de calidad (es decir, la validación y la confiabilidad de los resultados precisos, reproducibles y consistentes). Un objetivo clave es apoyar a los gobiernos locales y regionales en sus esfuerzos por desarrollar documentos de licitación para adquirir el conjunto completo de los servicios necesarios para la planeación, el desarrollo, despliegue, análisis, la integración con datos complementarios sobre la calidad del aire y la comunicación y la gestión de los resultados.

El presente compendio se centra en el uso de LCS para la medición de la concentración de masa de $PM_{2.5}$, el contaminante para el que la tecnología LCS actual es más adecuada y el indicador más importante de la calidad del aire para la salud pública.

El Presente Compendio Aborda los Sigüientes Temas:

- Uso de LCS para recoger datos procesables adecuados para solventar las brechas de las redes de monitores oficiales de referencia;
- Medición y producción de datos útiles para la ubicación de monitores de referencia permanentes;
- Evaluar las medidas de reducción de la contaminación orientadas geográficamente (por ejemplo, zonas libres de vehículos, adopción a escala de barrio de energías limpias en los hogares);

P: ¿Por qué es prioritario medir y controlar las partículas finas ($PM_{2.5}$)?

R: Es el contaminante más perjudicial para la salud. $PM_{2.5}$ es un indicador de una mezcla de contaminación que causa las enfermedades más graves y la muerte en el mundo. Además de ser una causa probada de enfermedades graves y muertes por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, cáncer y diabetes, que se incluyen en las estimaciones de la carga mundial de enfermedades, $PM_{2.5}$ también afecta a los resultados de los nacimientos y la salud de los niños, lo que puede perjudicar el bienestar y la productividad a lo largo de la vida.

- Identificar los puntos calientes y vigilar la cerca de las instalaciones para identificar las posibles infracciones y los impactos locales de las fuentes episódicas de contaminación (por ejemplo, vertederos de residuos sólidos, locaciones industriales), y hacer frente a las situaciones de emergencia (por ejemplo, grandes incendios estructurales y/o incendios forestales);
- Entender las limitaciones importantes de los LCS actuales, incluyendo: distinguir las fuentes locales de PM de la alta contaminación de contexto regional, la incapacidad de medir la composición de PM para la asignación de fuentes y la incapacidad de medir de forma confiable los contaminantes gaseosos importantes para la gestión de la calidad del aire (AQM);
- Orientación para informar sobre la solicitud de propuestas (RFP, por sus siglas en inglés) para los servicios de LCS, incluidos los objetivos, la planeación, la asignación espacial y la selección del sitio, la selección del dispositivo, la calibración, el despliegue, el mantenimiento, la adquisición de datos, la transferencia, la garantía de calidad y el control de calidad, y el análisis;
- Mejores prácticas para hacer que los datos sean accesibles y significativos para una serie de partes interesadas técnicas y no técnicas, necesarias para aumentar la responsabilidad y el apoyo a las acciones de aire limpio.

Se proporcionan herramientas de decisión y plantillas sencillas para ayudar a dar forma al desarrollo de las RFPs y guiar la evaluación de las postulaciones recibidas. .

Aplicación de Sensores de Bajo Costo (LCS) en el Marco de Programas Integrales de Gestión de la Calidad del Aire y de Sistemas de Monitoreo Integrados y Robustos

El monitoreo de la contaminación atmosférica, incluidos los sensores de bajo costo y otros métodos innovadores, es sólo un aspecto de la gestión de la calidad del aire. Además de los datos de monitoreo, las estimaciones sobre las emisiones contaminantes de las principales fuentes se pueden y se deben utilizar para informar los planes de acción de aire limpio para reducir las emisiones nocivas, incluso mientras se establecen y mejoran las redes de monitoreo robustas.

Una combinación de enfoques de monitoreo puede servir de base para un programa sólido de gestión de la calidad del aire, apoyar las necesidades de la gestión de la calidad del aire a nivel local, regional y nacional, y proporcionar datos para la investigación y la información pública². Hay una serie de tecnologías para controlar la calidad del aire desde tierra y desde los satélites

en el espacio. En tierra, los más precisos son los instrumentos de referencia que producen datos de alta calidad. Sin embargo, su adquisición y funcionamiento son costosos. Mientras que la teledetección ofrece la promesa de un monitoreo menos costoso, la precisión varía mucho según la tecnología de detección y el contaminante. La teledetección por satélite ha sido una fuente fundamental de información sobre la calidad del aire a nivel mundial³, especialmente en lugares que carecen de monitoreo en tierra. Este enfoque también puede resolver las brechas de datos en zonas con un amplio monitoreo en tierra⁴⁻⁷. Cuando se combina con los modelos de transporte químico y las mediciones de superficie disponibles para relacionar las mediciones de la columna atmosférica con las concentraciones de superficie, se dispone de estimaciones basadas en satélites para las PM_{2,5} y algunos contaminantes gaseosos con una resolución espacial variable (~1-10 km), pero no proporcionan mediciones locales a escala de barrio con alta resolución temporal.

En el caso de países en los que muchas ciudades de gran tamaño carecen de monitores de superficie de referencia, ninguna tecnología por sí sola puede proporcionar un monitoreo exhaustivo. En cambio, una combinación de tecnologías, incluidos los LCS, puede proporcionar soluciones rentables para establecer el monitoreo de la calidad del aire y mejorarla de forma gradual y sostenible, lo que conduce a un sistema integrado (Figura 2). Las campañas y redes de LCS pueden encajar en un sistema más amplio de monitoreo de la calidad del aire que utilice datos integrados de métodos de teledetección por satélite, monitores de superficie tradicionales y avanzados, y monitoreo periódico con uno o más enfoques con alta resolución espacial: regresión del uso del suelo, monitoreo móvil o campañas y redes LCS. Un sistema de este tipo puede evaluar la variación de la contaminación atmosférica a diferentes resoluciones espaciales y temporales, informar sobre la ubicación de monitores de referencia adicionales e incorporar nuevas innovaciones a lo largo del tiempo. El costo del despliegue y funcionamiento de un sistema de este tipo variará mucho según las circunstancias locales, pero un sistema híbrido de este tipo sería probablemente mucho menos costoso que una red reguladora convencional con muchos monitores de referencia⁸. Cabe señalar que un sistema híbrido de este tipo, además de combinar diferentes tecnologías de monitoreo como se ha mostrado, puede integrar datos creíbles procedentes del monitoreo realizado por diferentes entidades gubernamentales y no gubernamentales.



NIVEL ACTUAL DE DATOS Y CAPACIDAD	Niveles	Datos Disponibles
	<p>1</p> <p><u>Limitado o ninguno</u></p> <p>No existe un monitoreo oficial sostenido de PM 2.5</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">DENSIDAD DE LA RED</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estimaciones basadas en satélites • Monitoreo PM2.5 de referencia no oficial • Estudios de regresión del uso del suelo, de sensores de bajo costo o de monitoreo móvil
	<p>2</p> <p><u>Monitoreo básico para apoyar acciones iniciales</u></p> <p>Al menos un monitor oficial de referencia de PM2.5 con recopilación y uso continuos de datos (como mínimo para información pública)</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">MONITOREO Y DE LA DENSIDAD DE LA RED</p> <p><u>Fase 1+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Uno o varios monitores PM2.5 de referencia fija
	<p>3</p> <p><u>Monitoreo exhaustivo de acciones sostenidas</u></p> <p>Una red de varios monitores de referencia de PM2.5 con al menos una estación de monitoreo avanzado que recoge muestras de PM2.5 para la composición química y para medir los contaminantes gaseosos. Los datos se han utilizado en la elaboración de políticas.</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">AUMENTO DE LOS DISPOSITIVOS DE MONITOREO Y DE LA DENSIDAD DE LA RED</p> <p><u>Fase 2+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Estación avanzada de monitoreo de partículas en superficie • Una o varias estaciones de monitoreo de referencia para contaminantes gaseosos
<p>4</p> <p><u>Sistema integrado avanzado</u></p> <p>Monitoreo de la fase 3 más monitoreo periódico de alta resolución espacial</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">AUMENTO DE LOS DISPOSITIVOS DE MONITOREO Y DE LA DENSIDAD DE LA RED</p> <p><u>Fase 3+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelos periódicos de regresión del uso del suelo o campañas de monitoreo móvil • Red de sensores de bajo costo 	

Figura 1. Aplicación de Redes de Sensores de Bajo Costo (LCS) por Nivel Actual de Datos y Capacidad

Preguntas Prioritarias

- **LCS** ¿La calidad del aire es peligrosa para la salud en la zona urbana/metropolitana?
- ¿Por qué es importante el monitoreo oficial confiable?
- **LCS** ¿Dónde se deberían ubicar los monitores de referencia iniciales?

- ¿Cuál es el nivel de referencia de PM_{2,5} y la tendencia a medida que se ponen en marcha las acciones de limpieza del aire?
- **LCS** ¿Dónde se deben ubicar los monitores de grado de referencia?
- ¿La calidad del aire cumple con las normas locales?
- ¿Cuándo se producen los episodios de contaminación atmosférica de corta duración?
- **LCS** ¿Qué sabemos sobre los patrones locales de calidad del aire y/o exposición a la contaminación atmosférica?

- ¿Cuáles son las fuentes importantes de contaminación atmosférica en el área urbana/metropolitana?
- ¿Las medidas de control mejoran la calidad del aire en la zona urbana/metropolitana?
- **LCS** ¿Dónde se deberían ubicar los monitores de grado de referencia adicionales?
- **LCS** ¿Hay fuentes locales (por ejemplo, la quema de basura, el uso de energía de biomasa) que afectan a los niveles cercanos de PM_{2,5}?
- **LCS** ¿Existen puntos calientes de exposición?

- **LCS** ¿Cuáles son las fuentes y los puntos calientes del barrio?
- ¿Las medidas de control mejoran la calidad del aire en los barrios?
- **LCS** ¿Las medidas de monitoreo de la contaminación atmosférica focalizadas geográficamente mejoran la calidad del aire en los barrios?

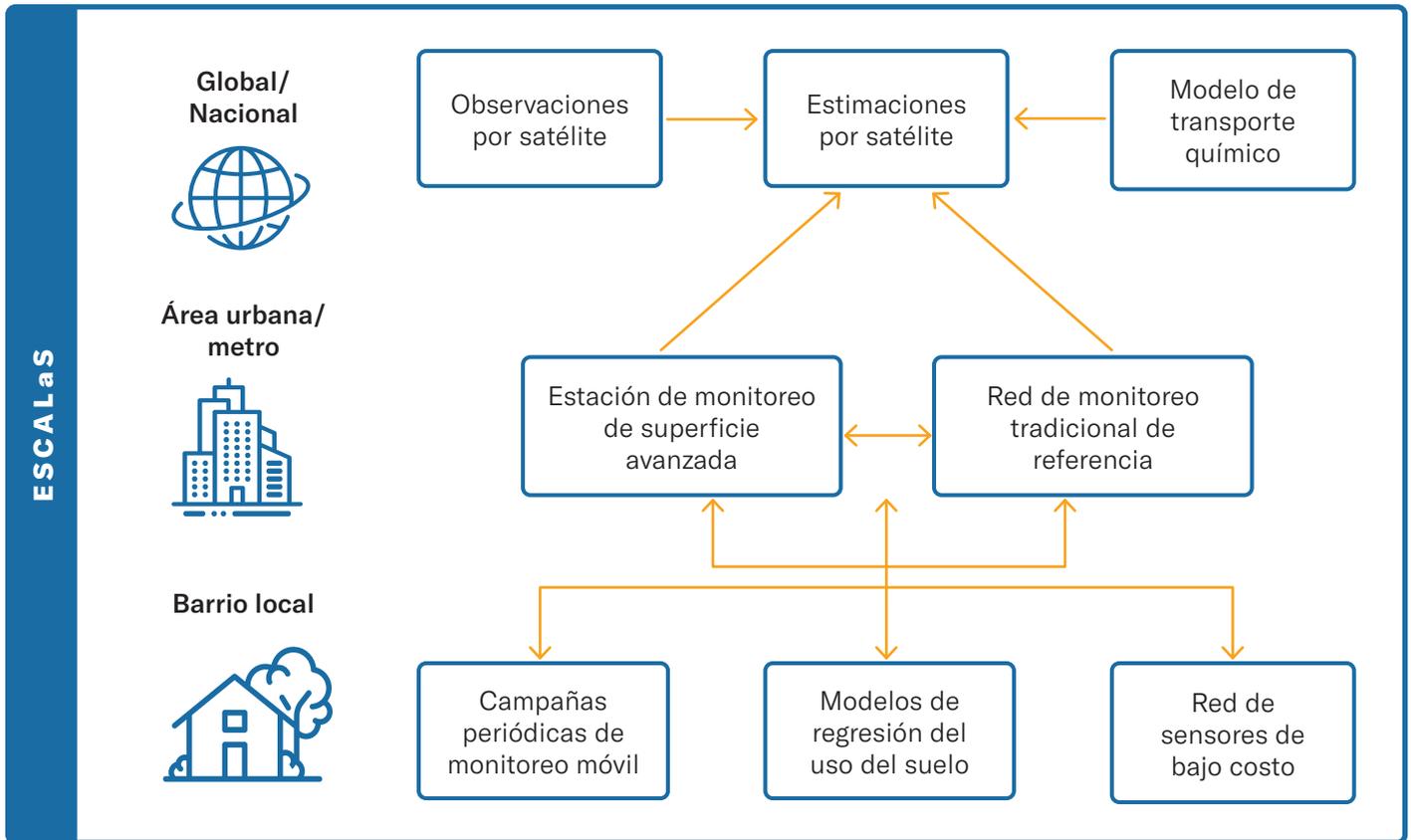


Figura 2. Sistema Integrado de Monitoreo de la Calidad del Aire

Posibles Aplicaciones de los LCS

La sección anterior ofrece una visión general de cómo los LCS pueden complementar otros métodos de monitoreo convencionales e innovadores como parte de un sistema de monitoreo integral. A continuación, consideramos diferentes aplicaciones de los LCS según el nivel actual de capacidad de monitoreo y de los temas clave que se deben abordar (Figura 1). La aplicación pragmática de los LCS debe comenzar con una evaluación de los datos y la capacidad de monitoreo de la calidad del aire actuales en una ciudad u otra jurisdicción en la que se estén considerando los LCS, determinando las preguntas clave sobre la calidad del aire relevantes para informar o evaluar las decisiones. Además, se debe hacer un inventario de todos los datos de monitoreo y de los niveles de contaminación disponibles y creíbles para ayudar a evaluar cómo los datos de los LCS podrían resolver las brechas e integrarse con otros datos de monitoreo del aire.

Por ejemplo, en ciudades con una capacidad de monitoreo limitada o inexistente, las redes de LCS se pueden utilizar para comprobar o verificar que los niveles de $PM_{2.5}$ estimados a partir de métodos de

teledetección por satélite muestren una superación sustancial de las normas basadas en la salud en toda una ciudad y la región circundante.

Las redes también pueden proporcionar datos iniciales que sirvan de base para la creación de un sistema de monitoreo integrado de enfoques complementarios, como, por ejemplo, la determinación de los lugares para los monitores de referencia permanentes iniciales o adicionales. En las ciudades que cuentan con al menos algunos monitores de referencia establecidos, los LCS ofrecen una forma de complementar el monitoreo existente, cerrar las brechas espaciales de la red de monitoreo, identificar los puntos conflictivos y medir la eficacia de las acciones de aire limpio dirigidas geográficamente. Las posibles aplicaciones de los LCS dependen del nivel actual de datos y de la capacidad de la ciudad y de las principales brechas de datos y preguntas sobre la calidad del aire. Véase la figura 1.

Objetivos y Diseño del Proyecto

El presente compendio se centra en cuatro aplicaciones prácticas de los LCS para informar sobre la gestión de la calidad del aire. Dichas aplicaciones incluyen:

1. **LOCACIÓN** Caracterizar los patrones espaciales de los niveles de $PM_{2,5}$ en ausencia de monitores de grado de referencia para informar sobre la ubicación de un monitor de grado de referencia inicial o de monitor(es) adicional(es) para cerrar las brechas de una red escasa.

Preguntas prácticas que hay que tener en cuenta antes de planear un proyecto de monitoreo de LCS

- ¿Cuál es el estado actual y la capacidad de monitoreo de contaminación atmosférica de referencia oficial (figura 1)?
- Teniendo en cuenta los datos oficiales y extraoficiales disponibles sobre los niveles de contaminación atmosférica, ¿cuáles son las principales brechas de datos y preguntas sobre los niveles de contaminación atmosférica que los LCS podría ayudar a responder?
- ¿Cuáles son las limitaciones de los dispositivos LCS disponibles actualmente y las ventajas y desventajas en comparación con otros enfoques de monitoreo? ¿Los LCS son adecuados para responder a las preguntas clave?
- ¿Qué datos de apoyo (por ejemplo, sobre las fuentes de $PM_{2,5}$, las emisiones y su distribución espacial) están disponibles o se deben reunir para ayudar a planear un proyecto de LCS y añadir valor a los datos de los LCS para informar o evaluar el monitoreo de la contaminación atmosférica?

2. **MAPEO DE LA CALIDAD DEL AIRE** Caracterizar los gradientes de exposición espacial y temporal en toda la ciudad para evaluar los datos y las previsiones de las emisiones, proporcionar estimaciones de exposición para los estudios de salud e informar sobre la ampliación de la red existente de monitores de grado de referencia.

3. IDENTIFICAR LOS PUNTOS CALIENTES

Identificar las zonas con mayores concentraciones de contaminación atmosférica debido a la proximidad de las fuentes para dar prioridad a la acción local o para sensibilizar al público sobre determinadas fuentes.

4. **EVALUACIÓN** Evaluar el impacto de las acciones dirigidas geográficamente a controlar fuentes específicas y/o reducir la exposición a la contaminación en las poblaciones que viven cerca de fuentes específicas.

La aplicación de las redes de LCS y las preguntas prioritarias que se deben abordar dependen del nivel actual de datos y de la capacidad de gestión de la calidad del aire (figura 1).

Las cuatro aplicaciones suponen que los datos de los CS se utilizarían junto con los enfoques convencionales de gestión de la calidad del aire, junto con otras metodologías y enfoques de medición innovadores, incluida la regresión del uso del suelo y la teledetección.

- No se debe confiar en los LCS para hacerle seguimiento a las tendencias a largo plazo de los niveles de $PM_{2,5}$ a escala urbana. Lo anterior debería hacerse estableciendo al menos uno o más sitios de monitoreo de grado de referencia que puedan proporcionar datos consistentes a lo largo del tiempo.
- Los LCS pueden ayudar a seleccionar la(s) ubicación(es) pero no sustituyen a los monitores de referencia. En ausencia de monitores de referencia, las estimaciones por satélite son una alternativa para seguir las tendencias a largo plazo.

La decisión sobre las métricas adecuadas para el desempeño de los sensores depende de la aplicación prevista. Las mediciones cualitativas o indicativas pueden ser útiles en lugares concretos o con fines educativos. Por ejemplo, buscar entender los cambios generales en la contaminación del aire en una escuela o centro comunitario puede no requerir el más alto grado de calidad de los datos. Sin embargo, se necesitará una mayor calidad de datos cuando se comparen los datos de los sensores con otros sensores o con normas.

Limitaciones de los Sensores de Bajo Costo

Conocer las limitaciones de los LCS puede ayudar a garantizar que se utilicen sólo cuando sean adecuados para su propósito y a evitar problemas de calidad de los datos y otros inconvenientes, siguiendo las orientaciones de las siguientes secciones del presente compendio.

- La exactitud y la precisión del sensor han sido las principales limitaciones. Un paso importante para reducir el problema de la calidad de los datos es elegir un dispositivo que haya tenido un buen desempeño cuando se ha sometido a los programas de prueba y evaluación establecidos, como se describe en el presente compendio.
- Aparte de los LCS para medir PM_{2.5}, los LCS actuales no han demostrado un buen desempeño en la medición de varios contaminantes clave para la gestión de la calidad del aire, incluyendo la composición de las partículas y los óxidos de nitrógeno, los dióxidos de azufre, y el ozono. Existen otros métodos, como los muestreadores de PM basados en filtros de menor costo, y los muestreadores de contaminantes pasivos.
- Aunque el bajo costo unitario de los LCS es atractivo, hay que tener en cuenta los costos de personal y de otros recursos para el despliegue, la calibración y la sustitución de los dispositivos, así como la gestión y el mantenimiento de la red de datos.
- Por último, las redes de LCS pueden generar datos que parezcan preocupantes, pero que no sean procesables; por ejemplo, un breve pico de segundos a minutos en los niveles medidos por un solo sensor puede indicar un sensor en mal funcionamiento, o un aumento transitorio de la contaminación atmosférica muy localizado. Este último tiene poca relevancia para la gestión de la calidad del aire o la salud pública, a menos que afecte a una gran población o se produzca con regularidad. Cualquiera de los dos tipos de picos puede distraer al personal y los recursos limitados del gobierno en materia de calidad del aire de los esfuerzos por controlar las fuentes de contaminación importantes ya identificadas.

Selección/Especificaciones de un Sensor de Aire

El desempeño del sensor de aire es una medida de la exactitud, precisión y confiabilidad del dispositivo. El desempeño puede variar significativamente de un fabricante a otro debido a varios factores (por ejemplo, las condiciones meteorológicas o los niveles de contaminación). Para ayudar a los usuarios y compradores a seleccionar los sensores de aire, las organizaciones han desarrollado centros de evaluación y protocolos de prueba para determinar qué sensores de aire tienen el mejor desempeño. Dichas organizaciones incluyen agencias gubernamentales, instituciones académicas y asociaciones que han desarrollado formas de probar los sensores de aire con métodos creíbles e independientes. Esta sección proporciona una visión general de los métodos de evaluación, recursos y otros criterios para identificar qué sensores de aire son los mejores para su aplicación. Los grupos de normas y pruebas han desarrollado métodos de prueba recientemente. Los métodos de los sensores de aire suelen incluir la evaluación de los sensores tanto en el laboratorio como en el campo. Las evaluaciones de laboratorio prueban los sensores de aire junto con los instrumentos de referencia en una cámara de monitoreo que controla todos los parámetros de la prueba: temperatura, humedad y concentraciones de

contaminantes. Las evaluaciones de laboratorio no pueden simular completamente las condiciones reales como las evaluaciones de campo.

Aunque las evaluaciones en laboratorio nos permiten investigar el desempeño del dispositivo de forma sistemática, es difícil simular toda la gama de condiciones del mundo real en un entorno controlado. Las pruebas de campo ofrecen al usuario la oportunidad de poner a prueba el sensor y determinar el desempeño general del dispositivo. Las pruebas de campo se realizan colocando varios (al menos tres) sensores de aire con un instrumento de referencia.

Métricas de Desempeño

Las métricas de desempeño son parámetros utilizados para describir el desempeño de un sensor de aire en relación con un estándar (normalmente un instrumento de referencia). Muchas métricas pueden ayudar a entender el desempeño de un sensor de aire y a determinar qué sensor es el mejor para una aplicación. Las métricas se resumen brevemente a continuación y en la Figura 4, y son generalmente aplicables tanto a las partículas como a los contaminantes gaseosos.

Precisión y Exactitud

La exactitud y la precisión se refieren conjuntamente a la capacidad de los sensores para medir el valor correcto

de forma confiable cada vez (Figura 3). La precisión se refiere a la medición de la misma cosa cada vez y de forma consistente. La exactitud se refiere a si el sensor está midiendo el valor correcto o verdadero. Por ejemplo, si un instrumento de grado de referencia mide $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y tres sensores de aire colocados miden $40, 40,5, 42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los dispositivos de prueba son precisos (los valores son cercanos) pero no exactos (los valores no son exactos o son diferentes del instrumento de grado de referencia). Véase el apéndice sobre las métricas específicas para determinar la precisión y el sesgo.

Correlación

La correlación mide la relación de los datos de los sensores del aire con los datos de un instrumento de referencia, que puede evaluarse para las mediciones en el tiempo o en el espacio. La correlación temporal mide hasta qué punto las mediciones de diferentes monitores varían juntas a lo largo del tiempo. La correlación espacial mide hasta qué punto varían juntos los pares de mediciones, como las medias semanales, en varios lugares. Una correlación alta ($>0,80$) indica que el sensor detecta tendencias similares a los datos de referencia. Sin embargo, las mediciones de

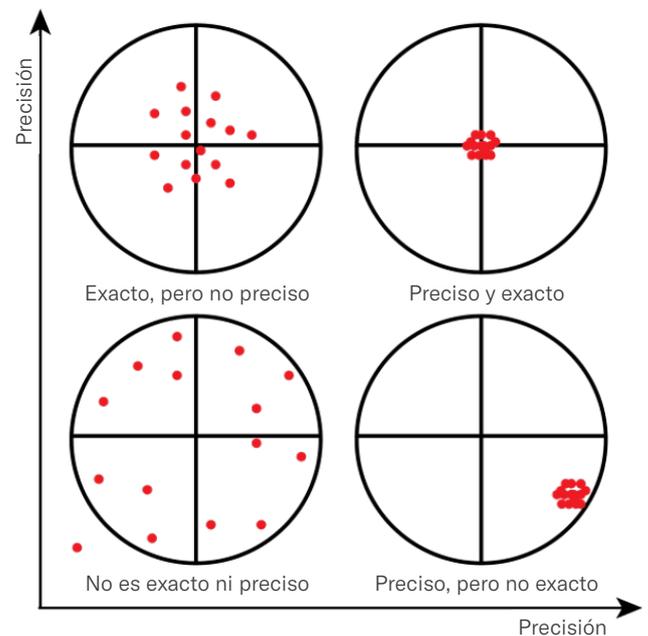


Figure 3: Datos de muestra que ilustran diferentes niveles de exactitud frente a la precisión. Fuente de la imagen: <https://wp.stolaf.edu/it/gis-precision-accuracy/>

Evaluación de desempeño: Evaluaciones de Laboratorio y de Campo

Evaluación Basada en el Laboratorio

La validación en laboratorio ayuda a evaluar sistemáticamente el desempeño de los sensores de aire en una serie de condiciones de temperatura y humedad. Las evaluaciones se suelen realizar en una cámara de monitoreo que puede controlar, mantener y supervisar todos los parámetros de la prueba: temperatura, humedad relativa y concentración de aerosoles. Aunque las evaluaciones de laboratorio son útiles para determinar el desempeño del sensor en condiciones específicas y reguladas, no pueden simular completamente las condiciones reales como en la evaluación de campo. La diferencia entre las condiciones de campo y las de laboratorio puede deberse a factores como el cambio en las condiciones meteorológicas y la diferencia en las propiedades de los contaminantes.

Evaluación en el Terreno

Mientras que las evaluaciones en laboratorio nos permiten investigar el desempeño de los dispositivos de forma sistemática, las condiciones del mundo real son difíciles de simular en un entorno controlado. Las pruebas de campo demuestran cómo funcionaría un dispositivo en condiciones reales. Los resultados de las pruebas de campo, incluyendo la ubicación con un monitor de grado de referencia, es un factor por revisar al planear un proyecto LCS. La evaluación de campo se debe realizar en condiciones similares a las esperadas, comparando el desempeño con los dispositivos de grado de referencia. Las estaciones de monitoreo regulatorias establecidas con dispositivos de grado de referencia PM_{2.5} se pueden utilizar como sitios de ubicación para la evaluación de campo.

Recursos clave sobre evaluaciones de sensores de aire

- U.S. EPA - Objetivos de desempeño: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols>
- Centro de Evaluación de Desempeño de los Sensores de Calidad del Aire (AQSPEC <http://www.aqmd.gov/aq-spec>)
- Air Parif: <http://www.airlab.solutions/en>

los sensores pueden tener una R² alta, pero difieren significativamente de las mediciones de referencia debido a un sesgo (por ejemplo, un R² de 0,99 y una sobrestimación o subestimación significativa de la concentración real).

Otra métrica útil para esta comparación es el error medio cuadrático normalizado o RMSE normalizado. Los valores más bajos de esta métrica indican una mejor concordancia con el instrumento de grado de referencia. Véase el apéndice sobre cómo calcular los valores de R² y RMSE.

Comparaciones entre modelos

Cuando se utilizan varios dispositivos de sensores de aire para un proyecto, es importante garantizar que las lecturas de los distintos dispositivos coincidan entre sí. Para garantizarlo, se recomiendan las comparaciones entre modelos, utilizando al menos tres dispositivos de la misma marca, modelo y versión de firmware para la prueba.

Degradación del desempeño

El desempeño del sensor de aire (o desviación) puede disminuir con el tiempo debido a diversas razones como mal funcionamiento de las piezas mecánicas, deposición de partículas en las unidades de detección internas u otros factores ambientales. La desviación del instrumento puede ser positiva o negativa y llevarnos a concluir erróneamente que las concentraciones están disminuyendo o aumentando con proyectos a largo plazo, de más de seis meses. El fabricante debe proporcionar la vida útil prevista del sensor y los métodos para detectar y solucionar la desviación de los sensores de aire.

Respuesta del sensor a altas concentraciones

Dado que las condiciones ambientales en áreas altamente contaminadas pueden superar en un orden de magnitud o más los niveles típicos bajo los que se han evaluado los LCS, es importante determinar la respuesta del sensor bajo concentraciones extremas de contaminantes. Hay que tener en cuenta que un desempeño muy bueno en una región con concentraciones más bajas puede no trasladarse a otras zonas.

Integridad de los datos

La integridad de los datos indica la confiabilidad del sensor de aire, es decir, si la red de sensores funciona de forma constante y produce un conjunto de datos completo necesario para sacar conclusiones sobre el estado de la calidad del aire. Las variaciones estacionales previstas de la concentración de contaminantes no serían fiables si los sensores no duran por lo menos un año. Se deben poner a parte los

Enfoques Innovadores para Contextos de Bajos Recursos

Los sensores de aire con batería incorporada y módulos celulares son más adecuados para los lugares de despliegue que no tienen un acceso confiable a la electricidad y a la conexión Wi-Fi. Como alternativa, algunos grupos de investigación utilizan una combinación de paquetes de baterías portátiles junto con un módulo Wi-Fi y junto con el sensor de aire. Aunque esta configuración permite la flexibilidad de despliegue en entornos de bajos recursos, no es una configuración “plug-and-play” debido a las piezas adicionales, y requerirá tiempo adicional del personal para la supervisión y la resolución de problemas. También hay que tener en cuenta los costos adicionales de la compra y el mantenimiento de la batería y el módulo Wi-Fi.

sensores de repuesto que hayan sido probados para compararlos bien en pruebas colocadas.

Efecto de los parámetros ambientales

Es importante comprobar si los dispositivos registran los datos de temperatura y humedad. Si no es así, es necesario hacer planes para registrar los datos de humedad y temperatura por separado, o acceder a dichos datos desde una estación meteorológica cercana. (Entre muchos modelos de LCS, la humedad y la temperatura son parámetros que influyen en el desempeño y de ahí la importancia de registrar dichos valores).

Los factores de calibración pueden cambiar con el tiempo y el espacio

La calibración puede ser realmente un objetivo móvil para la mayoría de los LCS que miden PM_{2,5}. Dado que los LCS funcionan según el principio de dispersión óptica, los cambios en las propiedades ópticas de las partículas afectan a la respuesta de los LCS. Estas propiedades (como la distribución de tamaños, la respuesta a la humedad, etc.) cambian con frecuencia en las zonas urbanas y con las diferentes estaciones. Por lo tanto, el factor de calibración puede diferir no sólo con la ubicación sino también con el tiempo. Por ejemplo, las calibraciones realizadas en una región pueden no aplicarse en otra, y las realizadas en verano pueden no serlo en el monzón o en el invierno. Para resolver este problema, es aconsejable mantener un LCS ubicado con el monitor de referencia (por ejemplo, un monitor de atenuación beta (BAM)) dentro de la zona general de estudio.

Preguntas clave para la selección de LCS

Aplicación



¿Responde el LCS a las necesidades iniciales de su aplicación prevista (por ejemplo, medir los contaminantes de interés)?

SI



Rendimiento



¿El LCS ha sido certificado, probado o evaluado por una organización creíble?

NO

Seleccione otro LCS.

SI



Evaluación sobre el terreno



¿Se ha probado el LCS en su zona en condiciones de contaminación y meteorológicas similares?

NO

¿Se puede realizar una prueba de campo en su región?

NO

Seleccione otro LCS.

SI



Soporte



¿El LCS cumple los demás requisitos para su aplicación? (energía, comunicaciones, soporte, etc.)

NO

Seleccione otro LCS.

SI



CONSIDERE USAR EL LCS

Figura 4. Preguntas clave para la selección de LCS

Otros factores a tener en cuenta durante el proceso de selección del sensor de aire

Hay muchos otros factores que son esenciales para seleccionar un sensor de aire que cumpla con las metas y objetivos establecidos. Algunos de estos factores pueden afectar significativamente el desempeño del sensor de aire, mientras que otros pueden afectar los costos iniciales y continuos de los sensores de aire. Por ejemplo, una fuente de alimentación inestable puede producir un conjunto de datos incompleto y limitar el análisis.

Potencia

Esta es una consideración importante a la hora de diseñar redes para ciudades con frecuentes cortes de energía o con dificultades para obtenerla. La interrupción del suministro eléctrico se traduce en una mala calidad de los datos. Existen varias opciones para

Duración prevista del proyecto	Consideraciones Clave
A Corto Plazo	Desempeño, facilidad de instalación, mantenimiento
A mediano plazo (hasta un año)	Calibración repetida, desviación del sensor, partes de repuesto y sustitución
A largo plazo (> 1 año)	Vida útil, garantía extendida

Table 1: Consideraciones clave para la selección de un LCS según la duración del proyecto.

Preguntas clave para informar la selección de dispositivos, la ubicación del sitio y la implementación del estudio

- ¿Cuáles son las principales metas y objetivos del proyecto?
- ¿Cuál es el nivel actual de capacidad de gestión de la calidad del aire?
- ¿Qué datos están disponibles actualmente para informar el diseño del estudio y abordar las preguntas clave?
- ¿Cuál es el horizonte temporal propuesto para conseguir resultados?
- ¿Cómo se analizarán y visualizarán los datos?

la alimentación de corriente de un LCS, incluyendo la red eléctrica, la energía solar y la batería, y una fuente de alimentación de reserva puede mejorar la confiabilidad. En el caso de la energía solar, asegúrese de tener suficiente luz solar. Planear con antelación para asegurarse de que la ubicación tiene energía o luz solar suficiente para la energía solar.

Transmisión de Datos

Normalmente los datos de los sensores de aire se transmiten a la nube en tiempo real. La transmisión se realiza a través de una red Wi-Fi o de un módulo celular (tarjeta sim) en el sensor. Como respaldo, los datos se pueden almacenar en una memoria interna (por ejemplo, una tarjeta SD) a la que se puede acceder físicamente. El wifi puede ser inestable o requerir protocolos de seguridad adicionales, lo que reduce la confiabilidad de los sensores de aire. Un módulo celular puede requerir costos mensuales que hay que tener en cuenta.

Calibración

Los sensores de aire, como todos los instrumentos, requieren calibración y corrección periódica de los datos. La respuesta del sensor puede cambiar con las estaciones, las propiedades de los contaminantes y la edad del sensor. Se recomienda que los sensores de aire se calibren in situ antes de su despliegue y periódicamente después del mismo. Consulte la sección de calibración para obtener más detalles. Pregunte al fabricante de los LCS sobre los protocolos, la frecuencia y el costo adicional para mantener el sensor calibrado.

Consideraciones sobre la Duración del Proyecto

El tiempo que planea monitorear con LCS puede afectar algunas de las características y funciones que seleccione para sus sensores. Los proyectos a corto plazo de unos pocos meses y los que no abarcan más de una temporada pueden no requerir una logística de ubicación extensa o esfuerzos de recalibración. Para los proyectos a largo plazo, especialmente más allá de un año, la vida útil del sensor de aire y las garantías asociadas se vuelven importantes. Dado que, por lo general, los sensores de aire duran aproximadamente uno o dos años, será necesario planear las sustituciones y el mantenimiento adicional. Otros costos que hay que tener en cuenta que se acumulan con el tiempo son repetidas calibraciones para captar la estacionalidad, desviación de los sensores, gastos de gestión de la red y de los datos, etc. (Tabla 1).

Selección de Servicios de Datos

Los sensores de aire producen muchos datos que deben ser gestionados, controlados en cuanto a su calidad y accesibles para el éxito de su proyecto. Es fundamental entender qué servicios de datos proporciona (o no proporciona) una empresa de sensores de aire. También es posible que la autoridad regulatoria local o regional considere la posibilidad de realizar algunos de estos servicios en el interior si cuenta con la experiencia y las herramientas necesarias.

Gestión y Acceso a los Datos

Los fabricantes deben proporcionar detalles sobre dónde se almacenan los datos y cómo se puede acceder a ellos. Los sistemas basados en la nube son ideales y facilitan el almacenamiento, el monitoreo y la garantía de calidad de los datos.

Algunas preguntas a tener en cuenta son:

- ¿Los datos están disponibles públicamente o están protegidos por una contraseña?
- ¿Los usuarios tienen acceso a los datos brutos?
- ¿Quién es el dueño de los datos?
- ¿Cuánto tiempo se conservarán los datos después del estudio?
- ¿Hay costos adicionales por la aplicación móvil o el sitio web?
- ¿Hay un límite en el número de personas que pueden acceder a los sitios web/app?

Revisión de Datos

Es importante decidir desde el principio quién se encargará de revisar los datos y de solucionar los problemas que se detecten. Si se presta este servicio, los proveedores deben describir el proceso y la frecuencia de revisión de los datos a diario para identificar los problemas a tiempo, corregir el rumbo y ayudar a crear un conjunto de datos completo y de alta calidad.

Asistencia al Cliente

Es posible que se necesite ayuda adicional del proveedor para la instalación, funcionamiento y uso de los sensores de aire, así que tenga en cuenta estas preguntas: ¿Cuánto dura la asistencia al cliente? ¿Qué asistencia se incluye en la garantía? ¿Qué asistencia no se incluye? ¿El proveedor tiene asistencia en su ciudad o en regiones cercanas?

Modelos de Precios

Existen dos tipos de modelos de precios en el mercado: 1) compra de sensores de aire; y 2) planes de suscripción o alquiler de sensores. Cuando se compra el hardware, hay que tener en cuenta los costos adicionales, por ejemplo: accesorios relacionados, piezas de repuesto, servicio y envío para reparaciones y mantenimiento, costos de funcionamiento continuo, costos de acceso a los datos, etc. Se puede solicitar al proveedor el costo de los elementos necesarios y su costo para el primer año de servicio. El modelo de suscripción suele incluir el hardware más los servicios. El costo de la suscripción anual puede consistir en el mantenimiento, la reparación o la sustitución, el acceso a los datos, el control de calidad de los datos, etc. La serie específica de servicios dependerá del fabricante

Logística

Los proyectos de LCS con múltiples sensores puestos en diferentes lugares suelen exigir flexibilidad y capacidad de triaje para aprovechar al máximo los recursos disponibles. Más allá de la fase de configuración, hay tareas pequeñas que pueden agotar el tiempo y los recursos. Los tiempos de desplazamiento de un lugar a otro para solucionar problemas de configuración/resolución de problemas/reparación/sustitución pueden ser largos, y ayuda contar con un gestor de proyectos sobre el terreno capacitado que pueda priorizar y planear el mantenimiento de la red eficientemente.

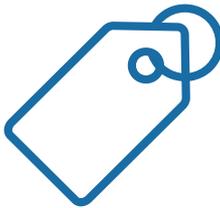
Consideraciones Generales sobre los Costos

Aunque el bajo costo unitario de los dispositivos sensores puede resultar atractivo, los costos de personal y otros recursos para la instalación, el mantenimiento, la calibración y la sustitución de los dispositivos, junto con la gestión de la red de datos y el mantenimiento 11, podrían contrarrestar gran parte o la totalidad del ahorro previsto en la compra de instrumentos. Entre las consideraciones de costos más importantes (Figura 5) se incluyen:

- Precio de compra del equipo de monitoreo;
- Suministros, repuestos, servicio y envío para reparaciones y mantenimiento;
- Consumibles, envío, análisis de laboratorio para muestras basadas en filtros;
- Estructuras, infraestructura de soporte, seguridad;
- Alquiler de inmuebles, si procede;
- Servicios públicos, incluyendo energía eléctrica confiable y comunicaciones inalámbricas;
- Costos de personal para el despliegue, la calibración y el mantenimiento, y
- Equipos, tasas y personal de gestión de datos.
- Diseño de la red de LCS e instalación de los sensores

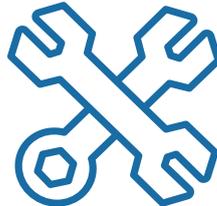
Costos clave a tener en cuenta para la selección de LCS

Precio de Compra



Costo inicial del equipo de monitoreo

Mantenimiento



Suministros, repuestos, servicio y envío para reparaciones

Infraestructura



Estructuras e infraestructuras de soporte para la instalación, seguridad

Alquiler de Inmuebles



Si es el caso, contratos de alquiler de la propiedad del lugar de instalación

Servicios Públicos



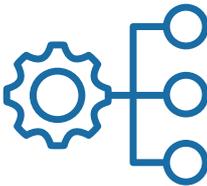
Energía eléctrica y comunicaciones inalámbricas confiables

Personal



Costos del personal para el despliegue, calibración y mantenimiento

Manejo de Datos



Equipo, tasas y personal de gestión de datos

Figura 5 Costos clave que hay que tener en cuenta para la selección de LCS

Diseño de la Red LCS e Instalación de los Sensores

El despliegue de redes de sensores de bajo costo implica, en primer lugar, el diseño de una red y, a continuación, la selección de los lugares donde instalar los sensores de aire. La creación de una red implica una importante planeación para determinar la ubicación general, determinar el número de sensores que se necesitarán y seleccionar y trabajar en la logística para instalar los sensores. Todas estas tareas pueden ser realizadas por las autoridades regulatorias, por consultores o, en algunos casos, por el proveedor que pueda prestar este servicio. Las Solicitudes de propuestas deben especificar los servicios que se necesitan y las respuestas deben indicar claramente quién prestará dichos servicios.

El diseño de una red de sensores puede ser un reto porque la elección de las ubicaciones y el número de sensores desplegados dependen de la aplicación, la cobertura geográfica, el presupuesto, etc. A la hora de diseñar una red, son fundamentales varias consideraciones que se describen a continuación, según la aplicación prevista:

Ubicación

Para determinar nuevos lugares para el monitoreo de referencia, se pueden instalar sensores de aire en muchos lugares para vigilar los gradientes de calidad del aire (es decir, las diferencias de calidad del aire en una región). La duración del control dependerá del objetivo del monitoreo de referencia, pero puede ser a corto o a largo plazo (durante diferentes estaciones).

Mapeo de la Calidad del Aire

Los lugares de instalación de los sensores para mapear la calidad del aire de una ciudad pueden estar en diferentes lugares de la ciudad para captar el gradiente de las concentraciones de contaminantes, lo que conduce a la correspondiente exposición de la población. Los lugares apropiados serían los situados cerca de fuentes como industrias, carreteras/cruces de tráfico pesado y fuentes de fondo como zonas prístinas o lugares rurales. También pueden seleccionarse en la aplicación determinados lugares que puedan verse afectados durante eventos episódicos como la quema de residuos de cultivos.

Identificación de Puntos Calientes

Para la identificación de puntos calientes, los dispositivos sensores de aire se deben instalar en lugares cercanos a la fuente, como por ejemplo, cerca de una intersección con mucho tráfico, un centro industrial, una quema de biomasa al aire libre o una central eléctrica donde las concentraciones sean potencialmente altas.

Evaluación

Para evaluar el impacto de las intervenciones políticas destinadas a frenar la contaminación atmosférica en una ubicación geográfica específica, los lugares de instalación deben estar cerca de las fuentes identificadas en las que se prevé un impacto sobre la población humana.

Consideraciones Adicionales

La ubicación y el número de sensores desplegados también deben tener en cuenta las siguientes consideraciones¹³:

- **Necesidad de sensores de reserva:** Presupuestar varios sensores de repuesto para sustituir los sensores de aire que fallen durante el estudio.
- **Condiciones meteorológicas:** Las condiciones meteorológicas y el viento afectan la concentración y la distribución de la contaminación, por lo que es posible que se quieran ubicar en lugares a favor y en contra del viento para controlar la contaminación que entra y sale de una zona.
- **Ubicación de sensores:** Prever el funcionamiento permanente de un sensor de aire junto a las estaciones de referencia para controlar continuamente el desempeño de los sensores.
- **Acceso:** Es importante tener acceso a la locación para realizar tareas de mantenimiento, sustitución y otras actividades a lo largo del estudio. Puede ser necesario un acuerdo de acceso formal que enumere los términos y procedimientos para acceder al lugar.
- **Alimentación eléctrica:** Los sensores de aire pueden requerir conexión a corriente, pueden tener paneles solares u ofrecer ambas opciones. Si se requiere energía, asegúrese de que habrá acceso confiable a energía. Si se utiliza energía solar, asegúrese de que hay suficiente exposición a la luz solar (es decir, que los paneles solares no estén bloqueados por edificios u otras estructuras).

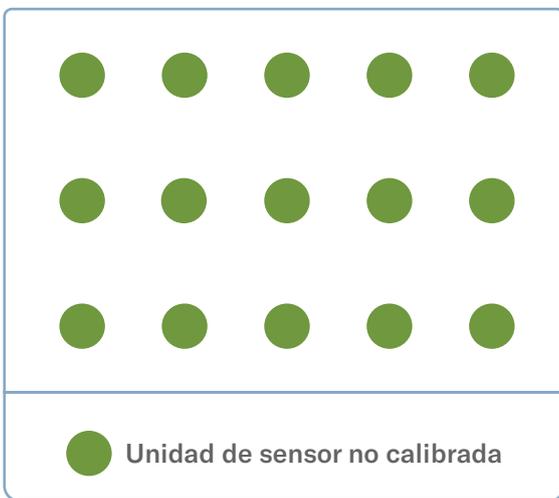
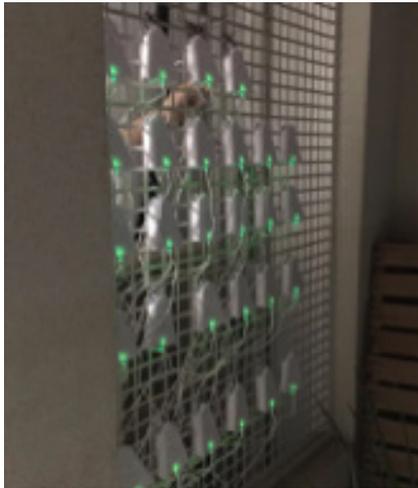


Figura 6. Ejemplo de ubicación de sensores para pruebas de comparabilidad

- **Seguridad:** Los sensores de aire y los equipos son susceptibles de ser manipulados y robados. Busque una ubicación segura y elevada, fuera del alcance del brazo, en un lugar poco visible o detrás de una puerta o cerca
- **Altura del sensor:** Intente situar los sensores de aire a unos 1-2 metros por encima del suelo o del tejado. Evite las zonas cercanas a las fuentes de contaminación locales (por ejemplo, chimeneas, ductos de cocinas) o sumideros de contaminación (por ejemplo, árboles). Coloque los sensores de forma que permitan un flujo de aire sin restricciones hacia el sensor para proporcionar mediciones representativas.

Garantía de Calidad/Control de Calidad

Esta sección describe algunos enfoques clave de garantía y control de calidad para mantener la calidad a lo largo del proyecto.

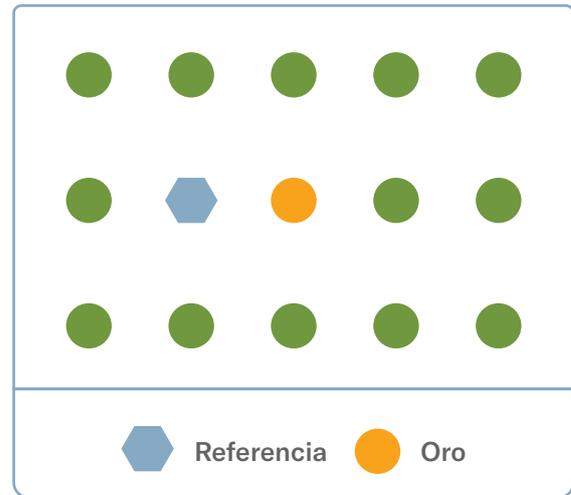


Figura 7. Calibración de dispositivos sensores de aire mediante la ubicación de un monitor de referencia

Ubicación	Proceso de comparación lado a lado con un instrumento de grado de referencia. Los sensores de aire y los monitores de referencia están situados uno al lado del otro.
Calibration	Proceso de ajuste de los datos del sensor de aire con respecto a un patrón de referencia. Los sensores de aire son calibrados por el fabricante (calibración de fábrica) y también sobre el terreno (colocando monitores de referencia) antes de una campaña de medición. Dado que la respuesta del sensor puede cambiar con las estaciones, es necesario repetir las calibraciones para los proyectos a mediano y largo plazo. Los métodos utilizados para llevar a cabo la calibración “remota” o “en la nube” deben evaluarse cuidadosamente. Consulte la Figura A1 del Apéndice para obtener más información.
Corrección de datos	Proceso de ajuste de los datos para otros factores que pueden influir en la respuesta del sensor de aire, por ejemplo, temperatura, humedad, etc.

Tabla 2. Definiciones de términos comúnmente utilizados en el contexto de la garantía de calidad/control de calidad de los sensores de bajo costo: ubicación, calibración y corrección de datos.

Preinstalación

Calibración/Colocación

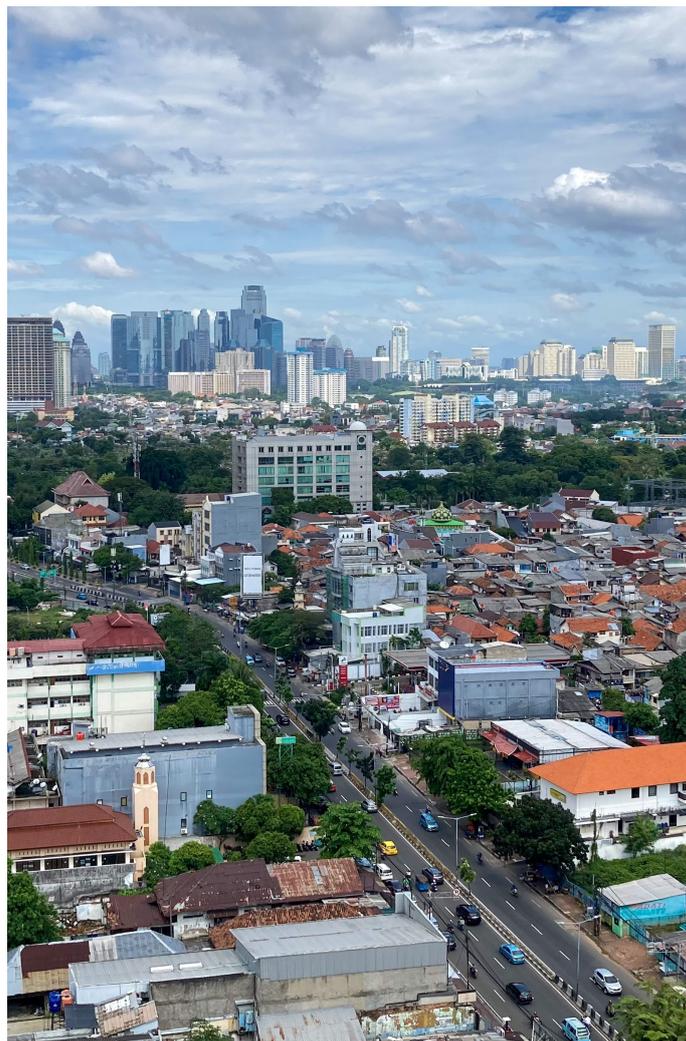
Los sensores de aire se deben calibrar para proporcionar datos de alta calidad. Algunos fabricantes pueden proporcionar un factor de calibración o pueden proporcionar servicios de calibración una vez que los sensores estén desplegados. Aunque los sensores de aire pueden estar calibrados cuando se instalan, se deben recalibrar periódicamente antes, durante y después del estudio. Las calibraciones se determinan utilizando los datos recogidos durante una colocación. Una colocación es una comparación lado a lado de los sensores de aire con una norma o referencia conocida. La determinación de las calibraciones es un área de investigación activa para las instituciones académicas y los fabricantes que están desarrollando nuevos métodos. Existen varias recomendaciones importantes en relación con las calibraciones: 1) Comprender el método utilizado para calibrar los datos del sensor, 2) Determinar la frecuencia con la que será necesario calibrar un sensor de aire y quién lo calibrará, y 3) Asegurarse de que los datos brutos y calibrados se archiven. Es importante crear una guía formal de calibración de LCS o de comparación colocada para que todo el personal siga el mismo procedimiento. El Apéndice ofrece más detalles sobre las fórmulas utilizadas para estimar el factor de calibración.

Colocación para evaluar la comparabilidad de los sensores

Todas las unidades de sensores que se instalen se deben colocar y probar para determinar cualquier variación en las mediciones entre las distintas unidades (también denominada variabilidad intra-modelo). Dichas colocaciones se deben hacer preferiblemente en el terreno donde los sensores pueden estar muy cerca unos de otros, de modo que el aire muestreado tenga concentraciones de contaminantes similares, como se muestra en la figura 7. Este método es de vital importancia cuando se consideran aplicaciones que implican mediciones para determinar gradientes espaciales (por ejemplo, identificación de puntos calientes y mapeo de la calidad del aire). Las colocaciones se realizan normalmente durante varios días o varias semanas. También es importante evaluar el desempeño bajo el rango esperado de contaminación y condiciones meteorológicas mientras se realizan las colocaciones.

Colocación con monitor de referencia

Una vez se haya evaluado la variabilidad intra-modelo de los sensores, se deberá calibrar al menos uno de ellos en el terreno mediante la colocación de los sensores



junto a un monitor de referencia para confirmar que el aire muestreado tiene concentraciones de contaminantes similares, como se ilustra en la figura 6. Estas calibraciones ayudan a determinar la exactitud en relación con la exactitud de la referencia conocida y una prueba de que funcionan como se afirma. La colocación con el monitor de referencia se debe hacer para todos los sensores durante varias semanas al principio del estudio (si es posible). Al final del estudio, todos los sensores se deben colocar de nuevo en la locación de referencia. Como alternativa, existen otros métodos de calibración utilizados por los investigadores, como el método del sensor “oro”, en el que el sensor calibrado, u “oro” se utiliza para calibrar otros sensores en el terreno.

Mantenimiento Posterior a la Instalación

Calibración: Una vez establecidos los criterios de comparabilidad y precisión durante la fase previa al despliegue, los sensores desplegados se pueden calibrar periódicamente (semanal o mensualmente) colocando el “sensor de oro” con el resto de los sensores en el campo. A esto se le denomina “calibración de transferencia”.

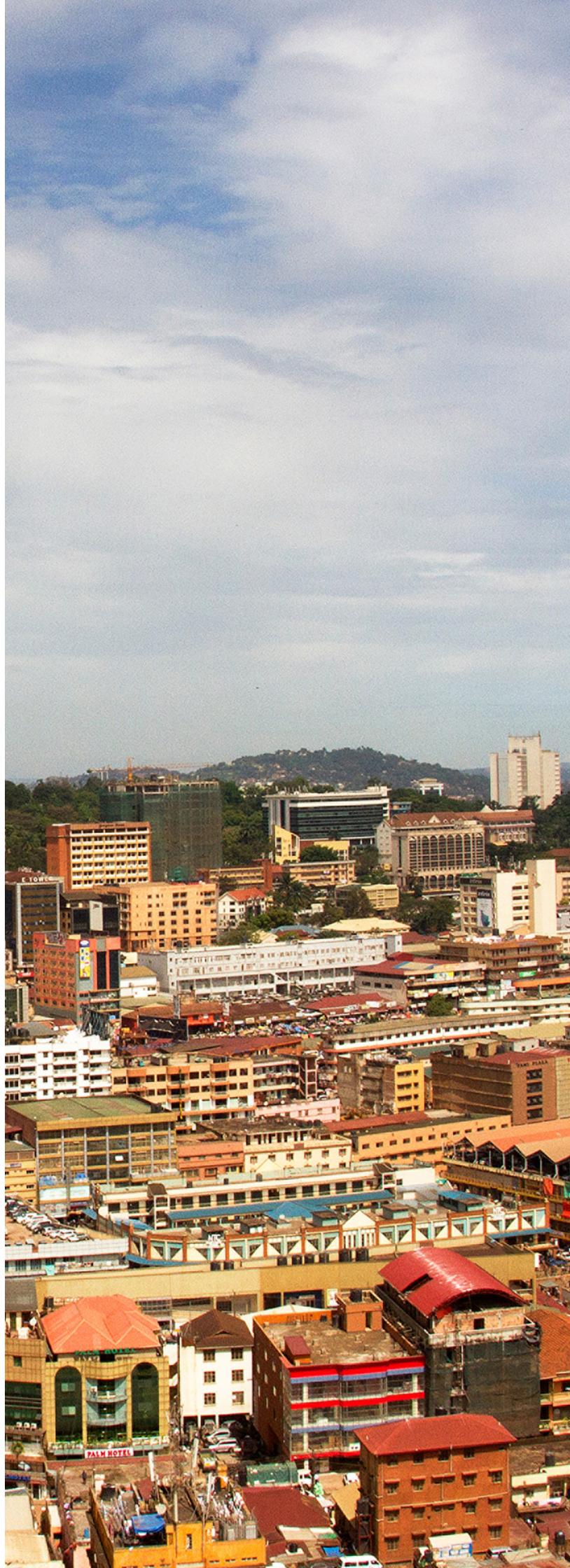
Alternativamente, cada uno de los sensores desplegados se puede llevar de vuelta a la locación de referencia y se puede calibrar en rotación.

Precisión: Los datos generados por los sensores también se deben revisar periódicamente. Se debe documentar cualquier anomalía y corregirla de vez en cuando para evitar las molestias creadas al manejar datos voluminosos. Para conocer los métodos de estimación de la precisión, el sesgo y la exactitud, consulte el Apéndice.

Validación de datos: La validación de datos es un paso importante antes de analizar los datos para obtener inferencias definitivas. Requiere la interpretación visual de los datos brutos para identificar patrones inusuales, valores atípicos, desviaciones y retrasos en la respuesta del sensor. La validación de los datos se debe realizar lo más rápidamente posible, a diario o semanalmente. Se debe determinar un esquema de validación para evaluar rápidamente la calidad de los datos. Lo anterior es especialmente importante para las ciudades sin datos históricos para comparar.

Algunas de las otras tareas específicas de mantenimiento son

- Asegurar la correcta ubicación de los dispositivos sensores de aire;
- Limpieza del aparato;
- Sustitución de consumibles como baterías y otros accesorios (si aplica);
- Sustituir los sensores que generen datos defectuosos o los que han estado desplegados más allá de su vida útil;
- Seguir la pista de cualquier obstáculo físico, como árboles y edificios, que pueda surgir a medida que avanza el monitoreo;
- Crear (durante la instalación), mantener y validar un protocolo para que se mantenga un registro de las acciones y se siga una metodología sistemática.





Referencias

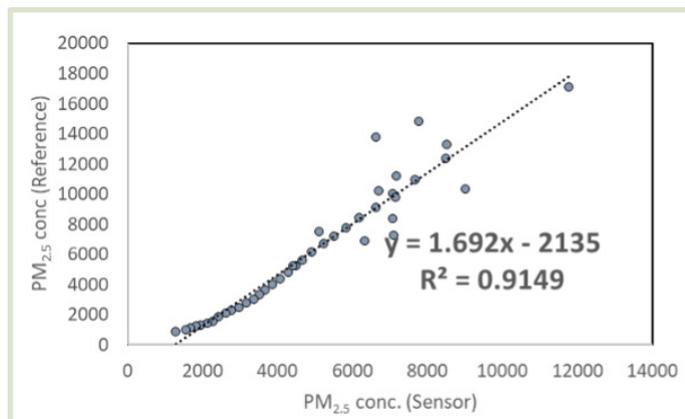
1. Vital Strategies 2020, Acelerar el progreso de las ciudades en materia de aire limpio, Guía técnica. Visto el 19 de agosto de 2021 <https://www.vitalstrategies.org/resources/accelerating-city-progress-on-clean-air-innovation-and-action-guide/>
2. Martin RV, Brauer M, van Donkelaar A, Shaddick G, Narain U, Dey S. Nadie sabe qué ciudad tiene la mayor concentración de partículas finas. *Atmospheric Environ*. 2019 Jun 24;100040.
3. GBD Compare | IHME Viz Hub [Internet]. [citado 2018 Jun 27]. Disponible en: <http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare>
4. Organización Mundial de la Salud. Base de datos mundial sobre la contaminación atmosférica urbana (actualización 2016) [Internet]. OMS. 2016 [citado 2016 Oct 21]. Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/
5. OMS | Directrices sobre la calidad del aire - actualización mundial 2005 [Internet]. WHO. [citado 2016 Sep 14]. Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/
6. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Acciones sobre la calidad del aire: Políticas y programas para mejorar la calidad del aire en todo el mundo [Internet]. 2015 [citado 2019 Sep 10]. Disponible en: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17203/AQ_GlobalReport_Summary.pdf?sequence=1&isAllowed=y
7. Chow JC, Watson JG, Feldman HJ, Nolen JE, Wallerstein B, Hidy GM, et al. Will the Circle Be Unbroken: A History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards. *J Air Waste Manag Assoc*. 2007 Oct;57(10):1151-63.
8. Brauer, M., Guttikunda, S.K., Nishad, K.A., Dey, S., Tripathi, S.N., Weagle, C. y Martin, R.V., 2019. Examen de los enfoques de monitoreo para la contaminación del aire ambiente: Un estudio de caso para la India. *Atmospheric Environment*, 216, p.116940.
9. Duvall, R., A. Clements, G. Hagler, A. Kamal, Vasu Kilaru, L. Goodman, S. Frederick, K. Johnson Barkjohn, I. VonWald, D. Greene, AND T. Dye. Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors: Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-20/280, 2021.
10. ASTM WK64899, Nueva práctica para la evaluación del desempeño de los sensores de calidad del aire ambiente y otros instrumentos basados en sensores, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, <https://www.astm.org>
11. Bachmann J. Managing Air Quality: Lessons from the American Experience. Centro colaborativo de políticas de aire limpio. 2019 Disponible en: <https://ccapc.org.in/policy-briefs/2019/us-experience-bachmann>: 14.
12. EPA (2021). Guía para la ubicación e instalación de sensores de aire. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/guide-siting-and-installing-air-sensors> (Accessed: 7th September, 2021)

Apéndice:

A. Métodos para Medir el Sesgo, la Exactitud y la Precisión

Curvas de calibración

Las curvas de calibración se pueden generar utilizando datos de la colocación de los sensores con los monitores de referencia. Para desarrollar los factores de calibración se puede utilizar un análisis de regresión lineal simple (SLR), como el que se presenta en la figura A1, utilizando las lecturas de los datos brutos para exactamente la misma duración de monitoreo. Los factores de calibración derivados de las ecuaciones matemáticas se pueden utilizar también para corregir los datos del sensor. Para una calibración más sólida, la regresión lineal múltiple (MLR) permite incluir otros factores que pueden influir en las mediciones de la concentración de contaminantes, como la humedad y la temperatura. Hay que tener en cuenta que el factor de calibración puede cambiar con las condiciones ambientales y hacer necesario repetir las calibraciones.



Ecuación de calibración

$$y = 1.692x - 2135$$

Donde "y" es la concentración de referencia, "x" la concentración del sensor y "1,692" de desviación en los datos **R²** es el coeficiente de determinación que denota la proximidad a la pendiente de intercepción.

Figura A1. Ilustración de una curva de calibración para los datos recolectados mediante la colocación del sensor y el monitor de referencia.

Error cuadrático medio (RMSE)

El RMSE es una medida de la exactitud del modelo de calibración que puede calcularse utilizando las concentraciones predichas y de referencia.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (p_i - y_i)^2}{n}}$$

Donde p_i es el valor individual predicho, y_i es el valor individual de referencia y n es el número de puntos de datos en el modelo.

Sesgo

El sesgo en los datos del sensor da lugar a concentraciones que no representan las concentraciones reales. Es un error sistemático en la medición que da lugar a concentraciones más altas o más bajas en todos los puntos de datos por algún valor de desviación fijo. El sesgo debe calcularse periódicamente, preferiblemente siempre que se realice la calibración. La figura A1 muestra un gráfico de líneas que representa el sesgo en los datos del sensor.

El sesgo se puede estimar mediante la siguiente fórmula:

$$B = \left(\frac{C}{C_R} \right) - 1$$

donde B es el sesgo, C es la concentración media de contaminante medida por el sensor y C_R es la concentración media del mismo contaminante medida por el monitor de referencia.

Precisión

La precisión de los datos medidos muestra la repetibilidad de las concentraciones cuando el sensor se utiliza para recolectar datos en las mismas condiciones varias veces. Las mediciones de corta duración, como un intervalo de 1 segundo, pueden dar lugar a una menor precisión, que puede corregirse en cierta medida agrupando los datos en promedios de 5 minutos.

Donde P es la precisión, C_s es la desviación estándar de mediciones y C_m es la media de la medición a una concentración fija.

$$P = \left(\frac{C_s}{C_m} \right)$$

B. Orientación resumida para informar sobre la Solicitud de Propuestas

Esta sección busca informar sobre el desarrollo de la evaluación y las áreas técnicas de una RFP para una red de sensores de aire. Proporciona un marco de referencia y criterios de muestra necesarios para solicitar y evaluar las cualificaciones de los proveedores, la experiencia y las respuestas recibidas. Se incluyen listas de comprobación de tareas, servicios y características que una autoridad regulatoria puede considerar incluir en la solicitud. La plantilla modelo se puede utilizar como punto de partida para adaptarla a los objetivos y el contexto del proyecto.

Criterios de evaluación de las propuestas

Los siguientes criterios pueden ser utilizados para evaluar las propuestas recibidas

1. Alcance de los servicios y soporte cubiertos;
2. Desempeño y experiencia demostrados en el contexto pertinente;
3. Historial de servicio en el país/región;
4. Periodo de garantía y tiempo de entrega de las reparaciones/sustituciones;
5. Calidad de los datos y facilidad de acceso; y
6. Costos totales.

Cualificaciones y experiencia del proveedor

Experiencia previa

1. List past projects done in similar capacity
2. For each project include in the proposal:
3. Short description
 - a. Nombre e información de contacto de la organización cliente
 - b. Fechas del servicio
 - c. Resumen de informes o publicaciones
 - d. ¿Permiso para contactar al cliente? Si No

Demostración de desempeño

Los proponentes pueden incluir la siguiente información como demostración de su desempeño anterior:

- Publicaciones revisadas por pares
- Informes o libros blancos de organizaciones independientes
- Certificación de la tecnología de sensores basada en las normas de desempeño emitidas por los organismos gubernamentales y las asociaciones
- Pruebas del funcionamiento de los sensores en la contaminación y las condiciones meteorológicas (como se describe en el SOW)
- Prueba de la evaluación del desempeño del sensor por parte de una organización creíble
 - ¿La evaluación incluye la evaluación en el terreno?
Si No
 - Indicar el nombre de la organización de evaluación.
 - Especificar la fecha y el período de tiempo de cada evaluación?

Experiencia del personal

Describir en la propuesta la experiencia del personal para cada nivel de servicio de soporte ofrecido.

Lugares de atención al cliente

Indicar la ubicación y la información de contacto de las oficinas locales y regionales, junto con el tiempo de respuesta previsto para las reclamaciones y las sustituciones.

Posibles aportes a la declaración de trabajo

(Para uso de la organización que emite la RFP)

Antecedentes y Objetivos

- Ubicación general del estudio _____
- Propósito de la red _____
- Duración del estudio _____
- Nota: Normalmente entre 12 y 24 meses es la duración mínima necesaria para medir una serie de condiciones a lo largo de diferentes estaciones. Es posible que se quiera considerar opciones para extender el estudio.
- Contaminantes a medir _____
- Número de sensores de aire _____
- Ubicación de las locaciones de los sensores de aire (si están disponibles) _____
- Datos auxiliares necesarios (meteorología, emisiones, etc.) _____

Especificaciones del sensor

Marcar la(s) casilla(s) para la(s) cual(es) se proporciona información de soporte y brindar detalles adicionales en la propuesta

- Desempeño de los sensores
 - Especificar sesgo, precisión, correlación y el error cuadrático medio (RMSE) y presentar datos de soporte como parte de la propuesta
 - Sesgo _____
 - Precisión _____
 - Coefficiente de correlación mínimo (con grado de referencia) _____
 - RMSE _____
 - Nota: Los requisitos para los parámetros anteriores son los siguientes (para uso según las necesidades del proyecto):
 - Exactitud mínima _____
 - Coefficiente de correlación mínimo (con grado de referencia) _____
 - RMSE máximo _____
- Tiempo de funcionamiento del sensor
 - Especificar la integridad promedio de datos de los sensores _____
 - Proporcionar datos de soporte en la propuesta
 - Nota: El requisito mínimo de integridad de los datos es el 75%, es decir, que el sensor de aire funcione y produzca datos válidos al menos el 75% del tiempo
- Calibración de datos
 - Describir en la propuesta cómo se calibran los datos _____
 - Especificar la frecuencia y el proceso de calibración de datos _____
- Energía y telecomunicaciones
- ¿Cómo se alimenta la energía del sensor de aire? (Marcar todas las que correspondan)
 - Solar _____
 - Red eléctrica _____
 - Batería _____
 - Para batería interna, incluir el tiempo necesario para una carga completa _____

Cómo se transmiten los datos (marcar todas las que correspondan)

- Wi-Fi _____
 - Costo cubierto por el proveedor ○Si ○No
- Celular _____
 - Costo cubierto por el proveedor ○Si ○No
- Otras especificaciones
 - Especificar la resolución de tiempo de los datos _____
 - Nota: El requisito mínimo es frecuencia de 1 minuto
 - Especificar el formato de los datos almacenados _____
 - Nota: Los datos deben estar en un formato legible por máquina (por ejemplo, csv)
 - Toda la infraestructura de soporte, es decir, instalación, montaje y hardware de soporte se

debe incluir en la cotización.

- El sensor de aire debe ser resistente a la intemperie y capaz de funcionar en condiciones de calor, frío y lluvia.
- El proveedor debe incluir una guía de usuario y un manual actualizados que cubran la instalación, funcionamiento, acceso a los datos y reparación.

Servicios de instalación

Marcar la(s) casilla(s) correspondiente(s) a los servicios prestados

- Locación: El proveedor seleccionará las locaciones según las especificaciones del proyecto y se encargará de la instalación de la energía, infraestructura de soporte, elaboración de acuerdos de acceso y garantía de la seguridad y acceso seguro. La locación seleccionada deberá ser representativa de la calidad del aire de la zona, con una interferencia mínima de los alrededores.
- Ubicación en la locación de referencia: El proveedor instalará y hará funcionar los sensores de aire junto a una locación de referencia antes de que comience el proyecto. Los sensores que no cumplan las especificaciones serán sustituidos por el proveedor.
- Instalación in situ: El vendedor configurará e instalará los sensores en la locación seleccionada. El proveedor será responsable de la infraestructura necesaria para la instalación in situ. El proveedor confirmará que cada sensor funciona correctamente después de la instalación in situ y también documentará las condiciones del sitio, la ubicación y la elevación.

Consideraciones Clave para el Desarrollo y Evaluación de Propuestas

- Asegúrese de que la propuesta del proveedor indique qué servicios de soporte están incluidos (o no) en su precio.
- Los proveedores también deben proporcionar el costo de la sustitución y los servicios si el proyecto supera el periodo de garantía.
- Preferir proveedores que tengan un servicio de atención al cliente a nivel local y que garanticen un tiempo de respuesta más rápido para las sustituciones y reparaciones (para garantizar la calidad de los datos).
- Pregunte por los servicios adicionales que puedan ofrecer los proveedores (por ejemplo, ubicación, colocación con el sitio de referencia e instalación de los sensores en el sitio).
- Los proveedores deben aportar pruebas de la verificación/evaluación de su producto LCS por parte de organizaciones independientes y creíbles.
- Los proveedores deben proporcionar datos de evaluaciones realizadas en entornos comparables para respaldar las afirmaciones sobre el desempeño en el terreno. Lo anterior busca asegurar que hay pruebas del desempeño de los LCS en condiciones similares de contaminación y clima.
- Los proveedores no deben presentar modelos únicos o experimentales.

Servicios de datos

Marcar la(s) casilla(s) correspondiente(s) a los servicios incluidos

Nota: Los datos deben estar en un formato legible por máquina (por ejemplo, CSV)

- Sistema de gestión de datos
Describir el sistema de gestión de datos en la propuesta _____
- Portal de datos en Internet
 - Especificar el número máximo (si lo hay) de usuarios _____
 - El portal es: público privado ambas opciones incluidas
- Servicios de calibración de datos
 - Especificar la frecuencia de calibración _____
 - Describir cómo se almacenarán/accederán los datos brutos y calibrados (en la propuesta) _____
- La aplicación es
 - El portal es: público privado ambas opciones incluidas
 - La aplicación móvil funciona en: Android iOS ambos
- Retención de datos
 - Especificar durante cuánto tiempo se almacenarán los datos _____
 - Describir cómo se almacenarán/accederán los datos (en la propuesta)
- Comprobaciones de control de calidad (requerido)
 - Describir el protocolo de control de calidad (en la propuesta)
- Alarmas y alertas
 - Describir los tipos de alertas disponibles (por ejemplo, correos electrónicos/mensajes de texto cuando el sensor se cae o hay concentraciones muy altas).
- Interfaz de programa de aplicación

Maintenance and Warranty Services

- Especificar el periodo de garantía (se requiere un mínimo de 12 meses)
- Especificar el costo de la garantía adicional _____

Marcar las casillas de los servicios incluidos en el periodo de garantía

- Mantenimiento periódico in situ.
Especificar la frecuencia con la que se realizará el mantenimiento _____
- Costos de sustitución del sensor (envío, instalación, etc.)
Especificar el plazo de entrega de las reparaciones y sustituciones _____
¿Los gastos de envío están incluidos en la garantía? _____

Servicios de capacitación

- Especificar si la capacitación es remota o presencial
Cuánto tiempo se necesita para la formación _____
- ¿Hay que viajar?

Marcar la(s) casilla(s) correspondiente(s) a las capacitaciones impartidas:

- Instalación, funcionamiento y mantenimiento de los sensores de aire
- Acceso a los datos
- Características y funciones del portal web
- Procedimientos y métodos de calibración
- Protocolos de colocación
- Otros. Especificar _____

Soporte al cliente

Marcar la(s) casilla(s) correspondiente(s) al soporte al cliente proporcionado:

- Soporte disponible por demanda
Proporcionar información de contacto _____
- Soporte fuera de horario de oficina
Proporcionar información de contacto _____
- Revisión y análisis de datos





Uso Integrado de Sensores de Bajo Costo para
Reforzar la Gestión de la Calidad del Aire

