



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO



GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

SECRETARÍA DEL
MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN,
CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

0 EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN MICROSENSORES PARA EL MONITOREO CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AIRE

Informe Final
Ciudad de México, 2023



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

*31 de Marzo del 2023
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático,
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México.*

Informe Final

Proyecto: EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN MICROSENSORES PARA EL
MONITOREO CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AIRE
SECTEI 190/2021

Michel Grutter^{1*}, Olivia Rivera², Armando Retama¹, Jaime Contreras¹, Eugenia González^{1,4},
Sandra Porras^{1,3}, Omar López^{1,4}, Thania Arredondo^{1,3}, Abner Díaz¹, Miguel A. Robles¹, Basilio
Sánchez^{1,2}, Enrique Azpra^{1,2}, Luis A. Ladino^{1,4}

¹ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

² Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire. Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México

³ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

⁴ Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, UNAM

* Responsable técnico del proyecto

Índice

RESUMEN	3
1 Problemática	4
2 Justificación	5
3 Objetivo y alcances	5
4 Impacto	6
5 Formación de recursos humanos	7
6 Difusión	8
7 Conclusiones	9
8 Hallazgos y recomendaciones	11
8.1 generales	11
8.2 del ejercicio de evaluación	12
8.3 de la implementación de dos redes piloto	13

RESUMEN

En este proyecto de investigación se desarrollaron varias actividades enfocadas en evaluar el uso y aplicación de dispositivos basados en microsensores para la medición de la calidad del aire en exteriores. Entre éstas se incluyó un riguroso y objetivo ejercicio de evaluación de sistemas de microsensores, tanto de equipos comerciales como desarrollos independientes tipo DIY (*Do-It-Yourself*), que se pusieron a prueba en dos sitios de la Ciudad de México y se evaluaron contra los datos que se obtuvieron con equipos grado regulatorio. Durante la evaluación se buscó someter los instrumentos a condiciones ambientales variables, incluyendo periodos de lluvia, calor extremo, alta humedad y de elevados niveles de contaminación. Lo anterior se realizó para discernir entre las posibles causas y efectos que pudieran relacionarse con las desviaciones y errores que se presentaron en cada uno de los dispositivos. Los resultados arrojaron indicaciones interesantes en cuanto a los parámetros que correlacionan con las variaciones más comunes que se observaron y también diferencias que se presentaron en los dos sitios escogidos, uno al norte y otro en la parte sur de la ciudad. Los hallazgos confirmaron la importancia de realizar este tipo de ejercicios de evaluación en las condiciones en las que van a operar ya que, por ejemplo, existe evidencia que la composición de las partículas finas y la naturaleza de la mezcla de contaminantes pueden afectar de manera distinta el desempeño de los sensores.

Como parte de este proyecto también se pusieron en marcha, para la medición de compuestos contaminantes dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México, dos redes piloto basadas en microsensores. Para la primera se emplearon sensores comerciales ampliamente disponibles, de marca PurpleAir, que reportan las concentraciones del material particulado fino tanto en su fracción $PM_{2.5}$ como PM_{10} . Para conseguir este objetivo se aprovechó la infraestructura de la red PEMBU de la UNAM (Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario), que consiste en 14 planteles distribuidos a lo largo y ancho de la zona metropolitana con mediciones de parámetros meteorológicos. Para la otra red piloto, enfocada en medir concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) con una exactitud mejor al 1%, se utilizaron cavidades ópticas del fabricante Sensair para lo que se construyeron prototipos activos con capacidad de control de flujo y válvula para la calibración periódica con un tanque de concentración conocida. En ambos despliegues de las redes piloto se obtuvieron beneficios y resultados prometedores, sin embargo, también se reconocieron retos y consideraciones importantes que se tienen que tomar en cuenta para asegurar la calidad de los datos que se van generando.

De las experiencias recogidas de estas actividades, resultaron varias conclusiones y recomendaciones que resumimos en este documento y que nos dieron pauta para elaborar un manual de procedimientos para futuros ejercicios de evaluación. Queda por entendido que esta guía de buenas prácticas es únicamente una recomendación y que pudiera expandirse según los requerimientos del proyecto, y que dependiendo del tipo de aplicación en la que se utilizarán estos

dispositivos, se puede ajustar el nivel de exigencia en las pruebas de control y aseguramiento de la calidad de los datos. Los detalles del desarrollo de las actividades realizadas durante este proyecto se encuentran disponibles en reportes separados que, junto con este documento, integran el informe final. A continuación, se enumeran los entregables que conforman el informe final de este proyecto de investigación:

- 0. Informe final**
- 1. Estado del arte en la tecnología basada en microsensores**
- 2. Evaluación de sistemas de microsensores (S μ S)**
 - a. Protocolo para la evaluación de dispositivos basados en microsensores**
 - b. Resultados del 1^{er} ejercicio de evaluación para la Ciudad de México (2022)**
- 3. Diseño y despliegue de una red piloto para el monitoreo de PM_{2.5} empleando dispositivos de bajo costo**
- 4. Diseño y despliegue de una red piloto para la medición de CO₂ con un sistema de microsensores**
- 5. Bases de datos**

1. Problemática

Con el surgimiento y avance de las tecnologías basadas en microsensores con aplicaciones para el monitoreo de la calidad del aire, se abren nuevas posibilidades para ampliar el conocimiento de la distribución de los contaminantes del aire, toda vez que estos dispositivos permiten realizar mediciones en lugares en los que no se cuenta con mediciones con equipos convencionales o donde la infraestructura necesaria no es suficiente para la instalación de equipos de mayor sofisticación. Entendiendo que el despliegue de estos sistemas de microsensores (S μ S) ofrecen varias ventajas incluyendo la posibilidad de medir con resoluciones espaciales a nivel vecindario y con suficiente densidad para detectar fuentes o *hot spots* de emisión, lo que difícilmente se podría conseguir a partir de equipos tradicionales de medición por su alto costo y requerimientos de infraestructura, existen no obstante varias limitaciones que estos S μ S aún presentan.

El tamaño, peso y facilidad de despliegue que ofrecen una gran variedad de S μ S que hoy en día están disponibles comercialmente, permiten instalarlos prácticamente en cualquier tipo de entorno o ubicación urbana. Estos dispositivos, también referidos como “sensores de bajo costo”, si bien se pueden a menudo comprar a precios accesibles, el costo únicamente se refiere al precio que se paga por su adquisición inicial. Cada vez un mayor número de ciudades alrededor del mundo están haciendo uso de estos equipos para ampliar y/o complementar la red de monitoreo atmosférico

regulada que operan, aunque a menudo también inician una red con sensores de bajo costo sin contar previamente con estaciones de grado regulatorio y sin realizar algún tipo de evaluación del desempeño de los dispositivos adquiridos. Esto genera preocupación entre la comunidad científica y regulatoria de la gestión de la calidad del aire en cuanto a la confiabilidad de datos que se reportan a la población.

2. Justificación

En este proyecto se plantearon varias actividades para realizar una evaluación minuciosa del desempeño de un conjunto de S μ S en las condiciones ambientales de la Ciudad de México tomando en cuenta, entre otros aspectos, las mezclas de contaminantes en el aire ambiente que caracterizan esta ciudad, su altitud y la variabilidad temporal de los parámetros meteorológicos y ambientales. Este esfuerzo es el primero en su tipo que se realiza de manera institucionalizada en México y propone la implementación de lineamientos mínimos para el uso de estas tecnologías a fin de poder conocer su confiabilidad en cada una de las aplicaciones.

A pesar de que este estudio pudiera estar limitado, por el número de S μ S evaluados comparado con la gran variedad de sistemas de medición en el mercado, se obtuvieron resultados que pudieran ser representativos de varios de ellos y las recomendaciones puntuales de los pasos y lineamientos a seguir para llevar a cabo una evaluación objetiva y clara es aplicable a cualquier sensor. Considera también la identificación de posibles deficiencias advirtiendo a los usuarios que usan y publican la información generada por este tipo de dispositivos, de los riesgos de usar estos datos sin contar con una evaluación previa de los mismos. Propone también en su caso evaluar la viabilidad de aprovechar los datos adquiridos por estos dispositivos para el reforzamiento o complemento de las capacidades del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México y así apoyar en la gestión de una red de esta naturaleza.

La Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) de la Ciudad de México, se beneficia de los resultados de este proyecto ya que incluye una primera valoración de algunos parámetros que reportan estos S μ S, entre los que se encuentran el O₃, NO_x, SO₂, CO, CO₂ y partículas finas. Se propone un formato para reportar de manera clara y objetiva el desempeño operativo de los equipos, el mantenimiento requerido para una operación óptima, las condiciones que afectan su operación (meteorológicas, ambientales, eléctricas, etc.), la transmisión y el tratamiento de datos y el control de calidad que el sistema requiere. La implementación de dos redes piloto y las experiencias adquiridas permitieron identificar consideraciones a tomar en cuenta y realizar una serie de recomendaciones que serán de utilidad para futuros despliegues de estas tecnologías.

3. Objetivo y alcances

El objetivo principal de este proyecto fue evaluar el desempeño de tecnologías basadas en microsensores para el monitoreo de la calidad del aire en las condiciones ambientales de la Ciudad de México, analizando sus fortalezas y debilidades para conocer su capacidad de generar datos confiables y de utilidad para la gestión ambiental. Para conseguir esto se realizaron las siguientes actividades:

- Se realizó un estudio sobre el estado del arte en la tecnología de microsensores y los dispositivos disponibles en el mercado para aplicaciones relacionadas con la medición de la calidad del aire. El análisis incluye la revisión de la literatura científica y reportes oficiales publicados en los últimos 5 años relacionada con el uso de microsensores o sensores de bajo costo con énfasis en aplicaciones relacionadas con la gestión de la calidad del aire, resumiendo los resultados reportados para los equipos disponibles en el mercado.
- Se lanzó una invitación a fabricantes, consorcios e investigadores que hayan desarrollado un equipo de medición con microsensores para realizar una evaluación técnica de su desempeño. La evaluación se realizó en dos ambientes diferentes de la Ciudad con contrastes importantes en los niveles y características de la contaminación junto a estaciones de monitoreo del SIMAT con equipos de grado regulatorio.
- Se elaboraron los lineamientos para la evaluación de los sensores, siguiendo una metodología para cuantificar las métricas mínimas necesarias para determinar la precisión, exactitud, errores y su correlación con parámetros ambientales.
- Se realizaron las adquisiciones de los sensores a ser operados en las dos redes pilotos para medir PM_{2.5} y CO₂, se llevaron a cabo las adecuaciones e instalaciones necesarias en el laboratorio para conocer su desempeño y se desplegaron en campo.
- Se analizaron los datos de las dos redes piloto y se presentan los resultados y conclusiones más relevantes recolectadas durante la vigencia del proyecto.
- Se conformó de una plataforma web con la información generada en este proyecto, la cual incluye tanto los reportes detallados de cada actividad como las bases de datos generadas para cada dispositivo utilizado.

4. Impacto

A través del uso de microsensores operados bajo criterios que puedan asegurar la calidad de los datos, se prevé que la cobertura en la medición de la calidad del aire se puede ampliar considerablemente en los próximos años, beneficiando a la ciudadanía. Consideramos también que al ser estos dispositivos usados cada vez con mayor frecuencia por ciertos sectores de la población, se pueda generar una mayor conciencia por parte de la gente acerca de los altos niveles de contaminación propiciando un cambio en los hábitos en cuanto a las actividades que más generen emisiones a la atmósfera. Presentamos algunas oportunidades de investigaciones que pueden realizarse con estas tecnologías para su uso en

aplicaciones de monitoreo informativo y suplementario no-regulatorios en entornos ambientales exteriores y de sitios fijos:

- **El estudio de la variabilidad espaciotemporal:** caracterización de concentración de algún contaminante en un área geográfica y/o tiempo (por ejemplo: tendencias diarias, estudios de gradientes, pronóstico de la calidad del aire, ciencia ciudadana, educación, sensibilización, etc.)
- **Comparaciones:** análisis de diferencias y/o similitudes en las características de la contaminación del aire con respecto a un valor umbral o entre diferentes redes, estaciones, localidades, regiones, períodos de tiempo, etc. (por ejemplo: detección de *hot-spots*, fusión de datos, respuestas a emergencias, monitoreo complementario)
- **Tendencias de largo plazo:** cambio en la concentración de un contaminante durante un período generalmente de varios años (por ejemplo: cambios de largo plazo, estudios epidemiológicos, verificación de modelos de simulación numérica). Para este objetivo una vigilancia periódica y evaluación rigurosa del desempeño de los sensores es imprescindible.

5. Formación de Recursos humanos

Durante la realización de este proyecto se involucraron especialistas en diferentes áreas de conocimiento, lo cual propició el fortalecimiento de las capacidades del grupo de trabajo. Este ambiente benefició a los alumnos participantes, que pudieron desarrollar sus proyectos específicos en un entorno estimulante y con temas de actualidad.

El estudiante Abner Díaz García obtuvo su grado de Ingeniero Electrónico con el “Proyecto de Actualización del sistema de recolección de datos Aire para el PEMBU”. Abner recibió una beca con recursos de este proyecto y fue asesorado por el M. en Ing. Miguel Ángel Robles Roldán, académico del ICAYCC-UNAM y participante del proyecto. Él tuvo a su cargo el desarrollo de los prototipos del ICAYCC para la medición de partículas finas que participaron en el ejercicio de evaluación (documento 2b). Una versión mejorada de este prototipo ya está siendo implementado en la red de PM2.5 que el Instituto opera en la red PEMBU. Su título lo obtuvo del Instituto Tecnológico de Cuautla y actualmente el Ing. Díaz García está tramitando su ingreso a la Maestría en Ciencias de la Tierra de la UNAM para continuar con estudios relacionados con la medición de la calidad del aire.

La estudiante Sandra Porras Reza está realizando sus estudios de Maestría en Ciencias de la Tierra de la UNAM y se encuentra en la etapa final y redacción de su trabajo de tesis con el tema “Evaluación de inventarios de CO₂ en la Ciudad de México”. Sandra se tituló a finales del 2021 de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra con el proyecto “Manejo de datos para el estudio del dióxido de carbono en la Ciudad de México” estando a cargo de la implementación de la red piloto

de este compuesto atmosférico usando un sistema de microsensores diseñado y construido en la UNAM, en colaboración con colegas del LSCE (*Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement*) de Francia.

La estudiante Thania Arredondo Palacios se tituló de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra de la UNAM en 2021 y ha estado involucrada en el proyecto de microsensores primero como servidora de Servicio Social y posteriormente con una ayudantía de Investigador Nacional (nivel 3) a cargo del Dr. Michel Grutter de la Mora. Su participación en el proyecto la han impulsado a crecer profesionalmente en estas líneas de investigación y actualmente está cursando estudios de maestría en el Posgrado en Ciencias de la Tierra bajo la tutoría del Dr. Grutter.

Además, la implementación de sensores de bajo costo para la medición continua de partículas finas en todos los planteles del sistema de bachillerato de la UNAM, como parte del PEMBU, ha tenido un impulso importante en la formación de recursos humanos. En Noviembre del 2022 como parte de este proyecto se organizó un curso de un día a profesores de las Prepas y CCHs de la UNAM que están involucrados con la red PEMBU, con la intención de capacitarlos en el uso de microsensores y manejo de datos de las partículas atmosféricas medidas en dicha red de observación. Se abordaron temas generales sobre las diferentes tecnologías de los sensores y sus beneficios y limitaciones, pero también específicamente de los dispositivos instalados en sus planteles, requerimientos de mantenimiento, uso y manejo de los datos, posibles aplicaciones, etc.

El objetivo de este esfuerzo fue que los profesores acercaran a sus estudiantes de bachillerato a temas relacionados con la contaminación del aire, y que empiecen a usar los datos de la red de PM_{2.5} del PEMBU en sus proyectos de investigación. Como resultado de esta iniciativa, en el evento que organizó el ICAYCC en marzo del 2022 con motivo al Día Metroerológico Mundial, algunos de los grupos de estudiantes presentaron sus proyectos relacionados con la contaminación por partículas atmosféricas. Esperamos que este interés continúe en los eventos que se realicen en años próximos aprovechando que la información disponible de estos parámetros va a ser cada vez más abundante.

6. Difusión

Como parte de las actividades para la difusión de los resultados de este proyecto, el Dr. Michel Grutter de la Mora ha tenido participación en los siguientes eventos:

- Conferencia dictada el 23 de septiembre del 2022 en el Auditorio del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM titulada “Tecnologías basadas en microsensores para estudios de calidad del aire” la cual tuvo afluencia presencial de más de 60 personas y transmisión en vivo a través de los canales de Youtube y Facebook del ICAYCC_UNAM. Ver video: <https://www.youtube.com/watch?v=RBtnvpTjwr8>

- Ponente en el taller internacional "Sensor Materials and Concepts for Environmental Applications" como parte de la red de colaboración BREMEX (Bremen-Mexican Network), impartiendo la conferencia "Combining remote sensing with microsensor technology to assess air quality in Mexico City" de manera virtual. 14-16 de junio, 2022. Bremen, Alemania.
- Presentación oral del trabajo "Caracterización de microsensores de infrarrojo no dispersivo para el monitoreo de CO₂ atmosférico en la Ciudad de México" por parte de la alumna de maestría Sandra Porras Reza, en el [1er Congreso Estudiantil del ICAYCC](#) celebrado del 12 al 14 de octubre del 2022.
- Presentación del trabajo "CO₂ gradients and variability in Mexico City from in situ measurements and simulations" en forma de cartel por la estudiante Sandra Porras Reza en la [Reunión Anual de la EGU](#) (European Geosciences Union) en Viena del 23-28 de abril del 2023.
- Finalmente, participación con la plática "Tecnologías basadas en microsensores para estudios de calidad del aire" en el Congreso Colombiano y Conferencia Internacional Calidad del Aire, Cambio Climático y Salud Pública ([CASAP IX](#)), celebrado en Santa Marta del 22 al 24 de marzo del 2023. En este foro se presentaron los resultados finales del proyecto haciendo énfasis en los procedimientos para llevar a cabo buenas prácticas en el uso de estas tecnologías, lo cual se recibió con gran interés por el fuerte uso que se le están dando actualmente ya en varias ciudades latinoamericanas.

Toda la información del proyecto está siendo difundida a través de la página que se comparte abajo. En este sitio, se encuentran disponibles los informes y entregables del proyecto incluyendo las bases de datos e información auxiliar:

<http://www.epr.atmosfera.unam.mx/Microsensores-2022/>

7. Conclusiones

La amplia disponibilidad y accesibilidad a los dispositivos de bajo costo han acercado a diversas comunidades en el mundo y al ciudadano común la posibilidad de aprender acerca del estado de la calidad del aire local sin la sofisticación y costo que implica el monitoreo de tipo regulatorio. La proliferación de estos equipos de bajo costo está creando expectativas entre autoridades ambientales, organizaciones preocupadas por la calidad del aire, tomadores de decisiones e investigadores. Las limitaciones económicas que tienen las instituciones y las ventajas que presentan estas nuevas tecnologías, abren la posibilidad de complementar las redes de monitoreo regulatorio existentes como parte de los objetivos de profundizar el conocimiento del origen e

impactos de la contaminación atmosférica. De igual manera, se abren posibilidades de investigar la contaminación personal e intramuros, generar datos en lugares fuera de la cobertura de las redes de monitoreo y realizar monitoreos de alta densidad, aplicaciones que son de gran interés para las autoridades regulatorias y la comunidad científica. Sin embargo, el conjunto de ventajas que ofrecen estos dispositivos podría inducir a que se pasen por alto algunas de sus desventajas, principalmente las que tienen que ver con la calidad y confiabilidad de los datos y por consecuencia la carencia de solidez científica ante el escrutinio legal. Desde el punto de vista de la gestión y la investigación, cuando no se hace una selección adecuada del equipo en función de las necesidades de la aplicación, no se toman en cuenta sus incertidumbres o cuando los equipos se utilizan sin los protocolos necesarios de aseguramiento y control de calidad, el uso de los dispositivos de bajo costo podría tener impactos indeseables en la toma de decisiones, en el ejercicio de los recursos, y en la calidad de la investigación.

La proliferación de estos equipos de bajo costo está creando expectativas entre autoridades ambientales, organizaciones preocupadas por la calidad del aire, tomadores de decisiones e investigadores. Las limitaciones económicas que tienen las instituciones y las ventajas que presentan estas nuevas tecnologías, abren la posibilidad de complementar las redes de monitoreo regulatorio existentes dentro de sus objetivos de profundizar el conocimiento del origen e impactos de la contaminación atmosférica. No obstante, esta actividad deberá realizarse tomando en cuenta el impacto de las desventajas de estas tecnologías en el alcance y objetivos del monitoreo.

Los desarrollos basados en microsensores aún están lejos de reemplazar las mediciones obtenidas con equipos de grado regulatorio o de investigación, sin embargo, se encuentran en un proceso continuo de mejora. Existen diferentes grados de madurez entre las distintas marcas, algunas de ellas han priorizado la calidad de los sensores y los datos con resultados prometedores. Las evaluaciones objetivas de estos dispositivos, además de aportar información sobre su desempeño, proporcionan argumentos técnicos para que los usuarios potenciales realicen una selección inteligente en función de las necesidades de cada aplicación. Los resultados también proporcionan una retroalimentación útil para que los desarrolladores continúen avanzando en su mejora.

En este proyecto se abordó esta problemática diseñando una serie de actividades que pudieran 1) ofrecer lineamientos y protocolos para la evaluación de sistemas de microsensores siguiendo procedimientos claros y objetivos, 2) realizar un primer ejercicio evaluando desarrollos ampliamente disponibles en el mercado actual en condiciones de la Ciudad de México y 3) recolectando experiencias en la operación de dispositivos desplegando dos redes piloto para reconocer sus ventajas y al mismo tiempo advertir de los retos y limitaciones que los usuarios pueden enfrentar con los resultados esperados.

A continuación, se listan los hallazgos más importantes de este estudio, así como un conjunto de recomendaciones para estudios futuros

8. Hallazgos y recomendaciones

8.1. generales

- Para la selección de sistemas de microsensores que se van a adquirir por primera vez, es importante tener definido el objetivo del estudio para monitorear el aire, la precisión y exactitud requeridas para la aplicación, las condiciones específicas en las que van a operar y el tipo de estudio que se va a llevar a cabo. Otras consideraciones a tomar en cuenta es la estabilidad de los equipos, su consumo de energía, que la sensibilidad y rango de detección sean adecuadas a los objetivos y la visibilidad de los datos en tiempo real. Las mediciones pueden ser, por ejemplo, para determinar los niveles de contaminación en aire ambiente (exteriores), intramuros o para evaluar la exposición personal. La ubicación del sensor puede planearse para medir cerca de fuentes contaminantes, o en sitios receptores de contaminación que es transportada de lugares lejanos. Estos criterios necesitan ser tomados en cuenta para escoger los dispositivos que mejor reúnen los requisitos del proyecto.
- Independientemente de la aplicación, se recomienda hacer evaluaciones periódicas de los sensores para conocer sus incertidumbres y dar seguimiento al desempeño y al deterioro de los mismos. Se recomienda seguir los procedimientos propuestos en el **documento 2a** de este proyecto titulado “Protocolo para la evaluación de dispositivos basados en microsensores: Manual de procedimientos” o adaptar uno según las necesidades del proyecto.
- Al presentar un proyecto para la utilización de equipos basados en sistemas de microsensores, es necesario presupuestar tiempo, recursos humanos y materiales adicionales al costo inicial de los S μ S. El ahorro conseguido en una primera etapa requiere de inversión posterior para sufragar costos de mantenimiento, reparación y soporte técnico, que pueden superar fácilmente la inversión inicial. Es importante considerar suficientes recursos humanos:
 - en áreas técnicas de instrumentación para la operación y mantenimiento de los equipos,
 - en áreas de informática y programación para la adecuada captura, almacenamiento y procesamiento de datos, buscando desarrollar protocolos de control de calidad y análisis de datos, y considerar
 - recursos para gastos en materiales para la instalación y herramientas de campo y software, costos de capacitación y soporte técnico, etc.
- Algunos fabricantes proporcionan los medios que facilitan la revisión y seguimiento de los datos, además de herramientas para el aseguramiento de la calidad y validación de los datos. Sin embargo, existe disparidad entre los servicios que se ofrecen y en ocasiones el acceso a estos tiene un costo adicional. Por lo tanto, es responsabilidad del usuario desarrollar los procedimientos adecuados para garantizar la calidad de los datos.
- Es altamente recomendable realizar una investigación y lectura de proyectos de evaluaciones de los sensores previamente hechos. Esto ayudará a resolver dudas preliminares y aclarar las preguntas pertinentes acerca del equipo en mente antes de realizar el gasto de inversión. Considerar las recomendaciones y metodologías realizadas en proyectos de

evaluación desarrolladas por grupos sin fines de lucro, como lo son algunos grupos comunitarios científicos, entidades educativas o gubernamentales, etc, puede ser de gran utilidad.

- Los microsensores empleados en la medición de gases suelen tener una vida útil menor (≤ 1 año) que los empleados para partículas suspendidas (≤ 3 años). En ambos casos, su desempeño se deteriora con la edad del dispositivo. Se deben implementar controles para identificar la deriva provocada por el envejecimiento del microsensor y mantener un suministro de ellos para el recambio y calibración en proyectos de largo plazo.

8.2. del ejercicio de evaluación

Queda en evidencia, después de analizar los resultados de la evaluación realizada a una gama diversa de sistemas de microsensores, que:

- El precio no necesariamente se equipara con la calidad de los resultados en términos de exactitud, precisión y estabilidad de los dispositivos.
- En general, los equipos multicontaminantes (medidores de diferentes compuestos) pueden sufrir de una mayor pérdida de datos debido a la interacción y dependencia interna de funciones de los sensores.
- Los sensores son dependientes de las condiciones ambientales y del clima del sitio de medición, por lo que cambios atmosféricos en humedad relativa y temperatura tienen un efecto sobre la medición de varios de estos contaminantes.
- El desempeño de un dispositivo a otro de la misma marca y modelo pueden variar significativamente, lo que puede identificarse fácilmente con una evaluación previa.
- Varios microsensores se deterioran con el tiempo y su duración no es necesariamente la misma para dispositivos de la misma marca y modelo, por lo que una revisión periódica es recomendable.
- El post-procesamiento, tomando en cuenta las variables ambientales, puede mejorar significativamente los resultados, por lo que ya varios desarrolladores están incluyendo en su tratamiento de datos correcciones de tipo multi-variable.
- La composición química y forma aerodinámica de las partículas suspendidas en el aire tiene un efecto sobre la medición y cálculo de las concentraciones de partículas suspendidas en el aire que reportan los sensores de bajo costo. Se esperan cambios en el desempeño cuando la mezcla de aire cambia significativamente.
- Es recomendable que un sistema integral de medición incorpore mediciones meteorológicas, lo que no todos los desarrolladores hacen. En algunos casos resulta crítica la información meteorológica para el análisis e interpretación de las mediciones.

8.3. de la implementación de redes basadas en microsensores

- Antes de adquirir varios equipos para el despliegue de una red, es recomendable considerar contar con dispositivos para realizar pruebas operativas como mínimo durante 90 días, pero 6 meses sería deseable. Éstos pueden colocarse en dos sitios con climas y mezclas de contaminantes distintos y en laboratorio. Eso es, las campañas de prueba idealmente incluyen tres sitios distintos: 30 días a campo en sitio de interés #1, 30 días en laboratorio, y 30 días en sitio de interés #2.
- Es imperante realizar una caracterización individual de cada dispositivo en laboratorio, ya que es común tener diferencias significativas de sensor a sensor.
- Para proyectos específicos de investigación o pruebas de equipos para redes de monitoreo, se recomienda:
 - Considerar dispositivos que ofrezcan acceso a los datos (y metadatos) abiertos para facilitar ingestión a sistemas de adquisición de datos y facilitar así ejercicios comparativos con equipos de referencia.
 - Evaluar dispositivos que cuenten con opción de sistema integrado y que incluyan telemetría, almacenamiento interno de datos, fuente fotovoltaica de poder y buena robustez para uso en exteriores. Esto facilitará el despliegue de los sensores en cualquier lugar.
 - Considerar acoplar al dispositivo un micro GPS integrado para facilitar la configuración de la ubicación y sincronización del tiempo.
 - Previo al inicio de campaña, desarrollar por escrito un plan de monitoreo y control de calidad para la documentación de los protocolos de operación y evaluación sistemática y periódica de los dispositivos a evaluar o usar.
 - Desarrollar conclusiones basadas en los protocolos prescritos y sustentadas en la documentación realizada a lo largo del proyecto.
- En caso de desarrollos DIY que requieran una mejor exactitud o equipos comerciales con la opción de incorporar la medición de un tanque de seguimiento, se recomienda instalar un sistema neumático confiable que incluya la medición del flujo y una válvula automatizable para ingresar el gas de concentración conocida al $\text{S}\mu\text{S}$, tal y como se hizo en el caso de los sensores de CO_2 (documento 4) para calibrar diariamente la línea base.
- Es importante poner atención en el diseño inicial y una adecuada selección de componentes para el desarrollo de un $\text{S}\mu\text{S}$ de tipo DIY, ya que la robustez en las mediciones auxiliares como la temperatura interna, humedad y la presión van a ser cruciales en la estabilidad del equipo.
- Finalmente, consideramos que es altamente beneficioso publicar y compartir la información completa del proyecto al implementar una red de $\text{S}\mu\text{S}$, incluyendo las características técnicas del desarrollo con la documentación completa de los microsensores, los resultados de las evaluaciones realizadas a cada uno de los dispositivos, los metadatos y datos crudos, los algoritmos de transformación que se aplican a los resultados, etc. ya que esto enriquece el acervo de información y el conocimiento común de los interesados en estas nuevas tecnologías y de los usuarios. También se deben de tomar en cuenta aspectos relacionados con la propiedad de los datos, si el fabricante los hace públicos o si mantiene el derecho sobre los mismos.