



Ministerio  
de Ambiente

**Guía:**

**Lineamientos para evaluar el  
desempeño en campo de sensores  
para el monitoreo de calidad de aire**

**DCA 07**

**V.1**

**Página 1 de 12**

# Lineamientos para evaluar el desempeño en campo de sensores para el monitoreo de calidad de aire



## **INDICE**

|  |    |
|--|----|
| 1. Objetivo .....  | 3  |
| 2. Alcance .....   | 3  |
| 3. Responsables .....  | 3  |
| 4. Marco Normativo .....   | 3  |
| 5. Términos y Definiciones .....   | 3  |
| 6. Disposiciones de carácter general.....  | 4  |
| 6.1 Metodología a aplicar para evaluar el desempeño en campo de los sensores .....   | 4  |
| 6.1.1 Validez espacial y temporal del desempeño del sensor candidato .....           | 5  |
| 6.1.2 Lugar de instalación del sensor candidato .....                                | 6  |
| 6.1.3 Factores que pueden afectar el funcionamiento de los sensores candidatos ..... | 7  |
| 6.2 Evaluación del sensor candidato .....  | 7  |
| 6.3 Análisis de Datos .....  | 8  |
| 7. Disposiciones complementarias.....  | 8  |
| 7.1 Reporte de los resultados obtenidos .....  | 8  |
| 7.2 Accesibilidad de la Información.....   | 9  |
| 8. Disposiciones finales .....   | 9  |
| 8.1 Evaluación de Desempeño de los sensores candidatos .....                         | 9  |
| 8.2 Aspectos no contemplados .....   | 9  |
| 9. Acrónimos.....  | 9  |
| 10. Referencias Bibliográficas.....  | 10 |
| 11. Participación .....  | 10 |



## 1. Objetivo

La presente guía tiene por objetivo establecer los lineamientos para evaluar el desempeño en campo de los sensores para el monitoreo de la calidad del aire que no son de referencia o equivalentes, realizados por el Ministerio de Ambiente o presentados ante el mismo.

La finalidad de este documento es contar con un instructivo que permita realizar la comparación de estos sensores con equipos de referencia y/o equivalentes (FRM y/o FEM).

## 2. Alcance

Las disposiciones establecidas en el presente documento son de aplicación y cumplimiento obligatorio para todos aquellos operadores de este tipo de sensores que estén obligados a presentar sus resultados de calidad de aire ante la Dinacea. También es aplicable a aquellos monitoreos realizados por operadores que, aunque no tengan la obligación de reportar a Dinacea, entiendan oportuna su aplicación.

## 3. Responsables

La responsabilidad del ensayo será del titular del equipo que luego se usará para el monitoreo de calidad de aire.

## 4. Marco Normativo

- Reglamento de calidad de aire (Decreto 135/021)
- Tabla sobre los métodos de referencia y equivalentes establecidos para la gestión de la calidad del aire (Anexo N°1).

## 5. Términos y Definiciones

A efectos del presente instructivo, se deberán tomar en cuenta las siguientes definiciones:

- Calibración:** Es el proceso de comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición, con la medida correspondiente de un patrón de referencia (o estándar).
- Estación de monitoreo de calidad de aire tipo control (Estación Control):** Es una estación de monitoreo equipada con instrumentos que emplea FRM/FEM para el monitoreo de la calidad del aire, que sean utilizados para medir las concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos.
- Ensayo de co-localización:** Se define como la prueba realizada a los sensores, ubicados in situ, en una estación de monitoreo de calidad de aire tipo control con equipos FRM/FEM, los cuales son operados al mismo tiempo durante un período determinado, con la finalidad de poder evaluar la confiabilidad de los sensores que no son de referencia.
- Método de referencia (FRM):** Los métodos de referencia (FRM, por sus siglas en inglés *Federal Reference Method*), son los métodos estándar para el monitoreo de la calidad de aire ya que



aseguran que los datos recolectados en diferentes sitios sean exactos y puedan ser comparables con los resultados obtenidos por diversas redes de monitoreo.

- e. **Método equivalente (FEM):** Los métodos equivalentes (FEM, por sus siglas en inglés *Federal Equivalent Method*), presentan una exactitud similar a los métodos de referencia (FRM) pero se basan en tecnologías de muestreo y/o análisis diferentes.
- f. **Sensor candidato:** Dispositivo electrónico con un costo inicial de compra más reducido en comparación con el de un solo instrumento que emplee FRM o FEM, que mide el mismo parámetro de calidad de aire.

## 6. Disposiciones de carácter general


A través de la medición de la calidad del aire, estos sensores pueden usarse para identificar fuentes de contaminación, ampliar las redes de monitoreo actuales así como para educar y mejorar la concientización sobre la importancia de la calidad del aire. Para el caso de material particulado, podrán ser utilizados para la recolección de muestra y analizar otros contaminantes ligados a las partículas, en la medida de que el equipo lo permita.

Al momento de establecer cuáles son los sensores candidatos para llevar a cabo la evaluación de calidad de aire y los ensayos en campo, se deberán tener en cuenta los siguientes criterios:

- El sensor candidato medirá uno o más de los parámetros vigentes establecidos en el Decreto 135/021 y que cuenten con FRM o FEM disponible para pruebas en el ámbito nacional, sin perjuicio de otros parámetros que se quieran medir.
- Antes de comenzar a operar los equipos, se deberá leer la guía del usuario o las instrucciones provistas por el proveedor de los sensores.
- El sensor candidato deberá contar con un límite de detección y/o de cuantificación acorde al objetivo de monitoreo para el parámetro de evaluación que corresponda.
- El sensor candidato deberá tener la capacidad de almacenar datos. Se podrán transmitir los datos a un servidor virtual (ubicado en la “nube”) que registre los datos en una plataforma web, al cual se podrá acceder mediante un usuario y contraseña generado por el proveedor del sensor candidato para su descarga. Este proceso de transmisión de datos no será estrictamente necesario y quedará a juicio de la Dinacea su implementación.
- En caso de que se requiera a futuro que se transmitan los datos de los sensores a la Dinacea, se deberá realizar este proceso de acuerdo a lo que establezca la División de Información Ambiental (DIA) de dicha institución.
- El ensayo de co-localización se deberá repetir cada dos años para mantener la vigencia de los monitoreos en campo que se realicen con el equipo. Este plazo podrá ser modificado por la Dinacea una vez se tenga un mejor conocimiento del funcionamiento de los sensores y la evaluación de desempeño de los mismos.

### 6.1 Metodología a aplicar para evaluar el desempeño en campo de los sensores

Los sensores candidatos se deberán colocar y probar su funcionamiento apareados con los equipos que empleen FRM o FEM, en lo que se considerará como el ensayo de co-localización.

|   |   |   |
|---|---|---|
|  <p data-bbox="411 174 592 232">Ministerio<br/>de Ambiente</p> | <p data-bbox="879 103 963 136"><b>Guía:</b></p> <p data-bbox="671 163 1173 309"><b>Lineamientos para evaluar el<br/>desempeño en campo de sensores de<br/>bajo costo para el monitoreo de<br/>calidad de aire</b></p> | <p data-bbox="1294 141 1385 165"><b>DCA 07</b></p> <p data-bbox="1318 192 1361 217"><b>V.1</b></p> <p data-bbox="1251 244 1431 268"><b>Página 5 de 12</b></p> |
|---|---|---|

La Dinacea deberá tener en cuenta las siguientes consideraciones generales para la evaluación del desempeño en campo de los sensores:

- El emprendimiento y/o institución deberá evaluar bajo su propio costo el sensor candidato en determinadas condiciones ambientales, a través de un despliegue sobre el terreno en una estación de monitoreo de calidad de aire tipo control (en adelante estación control).
- Durante el desarrollo de los ensayos de co-localización no se realizarán modificaciones al sensor candidato ni ajustes a los algoritmos de cálculo o calibración (cero, *span* y exactitud), excepto en los casos donde se especifique en la guía de usuario o manual del sensor que podrá ser sometido a un mantenimiento de rutina durante el estudio en campo.
- Para asegurar un conjunto de datos estadísticamente relevantes, los sensores deberán, en la medida de lo posible, ser desplegados por triplicado, es decir, tres sensores que midan el mismo contaminante. Esta implementación permitirá detectar fallos potenciales o un mal funcionamiento de los mismos. Esto será aplicable en el caso que se adquieran varios sensores del mismo tipo a menos que el fabricante indique la necesidad de verificación para cada uno.
- Los sensores candidatos deberán contar con carcazas/cubiertas robustas diseñadas para afrontar diversas condiciones ambientales en exteriores (lluvia, granizo, viento, etc).
- Los ensayos de co-localización serán evaluados por el Departamento de Seguimiento de Componentes del Ambiente de la Dinacea.

#### 6.1.1 Validez espacial y temporal del desempeño del sensor candidato

- Dado que el rendimiento global del sensor candidato puede ser afectado por las condiciones ambientales del sitio de monitoreo y en el caso del material particulado por sus características, el uso de los sensores será válido (siempre que sea posible) solo en las zonas que tengan similitud en las fuentes de contaminación y en las características del material particulado respecto al lugar donde se realizó el ensayo de co-localización.

Esto implica que se deberá realizar nuevamente el estudio en campo en caso de que se considere que las características del material particulado que se va a medir difiere de aquellas del material particulado que se midió en oportunidad del ensayo de co-localización y a la vez se sepa que el analizador es sensible a tal factor (por ejemplo distintos tipos de material particulado encontrados en zonas urbanas, rurales y agroindustriales).

- Los ensayos de co-localización deberán realizarse durante dos períodos en el año, un período que comprenda los meses de verano y otro los meses de invierno, para incrementar la representatividad de estas pruebas.

Este estudio en campo deberá realizarse por un período mínimo de 15 días en verano y 15 días en invierno. Este período podrá ser modificado en función del comportamiento y la fiabilidad de los sensores.



### 6.1.2 Lugar de instalación del sensor candidato

#### Estación de monitoreo de Calidad de aire tipo Control (Estación Control)

La estación control que permitirá realizar las pruebas de desempeño de los sensores deberá cumplir con los puntos 4.1, 4.1.1 y la Tabla 1 del documento DCA02 Guía de Ubicación e instalación de equipos de monitoreo de calidad de aire en su versión vigente.

Los criterios técnicos mencionados en dicha tabla deben ser cumplidos para asegurar la confiabilidad de los resultados. Excepcionalmente, de presentarse dificultades por razones de accesibilidad, seguridad, disponibilidad de energía eléctrica u otros factores, los equipos de monitoreo pueden ser instalados aunque no se cumpla con alguno de los criterios indicados, siempre que se asegure que la ubicación de la estación no afecte el cumplimiento del objetivo de monitoreo.

A su vez, la estación control deberá contar con medidores de los parámetros que se quieren ensayar, así como variables meteorológicas.

En caso de que se coloque más de un sensor candidato, los mismos deben ser colocados a una distancia mínima de 30 cm y máxima de 2 m (distancia horizontal) respecto a la toma de muestra de la estación control y a la misma altura entre sí lo más cerca de la toma de muestra del equipo FRM/FEM.

Se indican a continuación algunos datos relevantes a considerar para la estación control:

#### Información geográfica

- Coordenadas
- Dirección
- Ciudad/Departamento
- Entorno (ejemplo: urbano, suburbano, rural)

#### Identificación de la estación

- Nombre
- Código estación
- Fecha de comienzo y/o cierre
- Parámetros monitoreados
- Tipo de equipos: calidad de aire y/o meteorológicos; manuales o automáticos
- Institución gestora de la estación de monitoreo de calidad de aire tipo control
- Información de contacto de la estación

#### Ambiente local y exposición de instrumentos

- Mapas de información topográfica, curvas de nivel
- Fotos desde la estación hacia todos los puntos cardinales
- Obstáculos
- Cobertura de suelo.

#### Datos de los Equipos

- Fabricante
- Modelo
- Metodología de monitoreo
- Proveedor local
- Asistencia técnica local



- Histórico de equipos de la estación
- Altura de la toma de muestra
- Otros parámetros que influyan en la interpretación de los resultados generados.

### 6.1.3 Factores que pueden afectar el funcionamiento de los sensores candidatos

A continuación, se detallan algunos factores que pueden afectar el funcionamiento de los sensores candidatos.

- La geografía de la zona y las condiciones meteorológicas. Por ejemplo, la temperatura y la humedad relativa extrema pueden afectar las lecturas de los sensores.
- El período de exposición del sensor candidato.
- El agotamiento de la batería de los sensores y pérdida de energía.
- Influencia causada por un contaminante diferente al que se está midiendo.
- El tipo de fuentes de emisión en el área de estudio.
- Efecto memoria del sensor.
- Interferencias causadas por campos electromagnéticos.

### 6.2 Evaluación del sensor candidato

Antes del inicio de la evaluación del desempeño del sensor candidato, se deberán realizar los siguientes chequeos:

- La evaluación de las opciones de energía: cables, baterías, energía solar, etc.
- La evaluación de las opciones de adquisición de datos: almacenamiento local, registro de datos portátiles, transmisión a la nube, etc.
- Evaluar la funcionalidad de encendido/apagado de los sensores candidatos, para asegurar si funcionan apropiadamente.
- La evaluación del formato de salida de datos.

Se deberán registrar observaciones ante cualquier eventualidad de cualquier tipo.

Cuando se realice el ensayo de co-localización entre el sensor candidato y un equipo FRM/FEM, tendrá que surgir un método de cálculo para ajustar los resultados del sensor candidato al equipo FRM/FEM para informar la concentración del parámetro involucrado.

A su vez, serán evaluados una serie de parámetros relacionados con el desempeño de los sensores, los cuales se detallan a continuación:

- a) Porcentaje de recuperación de datos
- b) Ecuación de ajuste (regresión lineal) entre el sensor candidato y el equipo FRM/FEM
- c) Coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de la regresión lineal
- d) Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ )

A continuación, se presenta en la Tabla 1 los valores de  $R^2$  sugeridos para cada contaminante a evaluar.



**Tabla 1:** Criterio de aceptabilidad ( $R^2$ )<sup>1</sup>

| Contaminante     | Período | $R^2$  |
|------------------|---------|--------|
| SO <sub>2</sub>  | 24 h    | ≥ 0,50 |
| NO <sub>2</sub>  | 1 h     | ≥ 0,75 |
| PM2.5            | 24 h    | ≥ 0,75 |
| PM10             | 24 h    | ≥ 0,75 |
| CO               | 1 h     | ≥ 0,50 |
|                  | 8 h     |        |
| O <sub>3</sub>   | 8 h     | ≥ 0,50 |
| H <sub>2</sub> S | 24 h    | ≥ 0,50 |

### 6.3 Análisis de Datos

- Los datos a comparar deberán ser procesados partiendo de una misma base temporal.
- Con el fin de simplificar el procesamiento, se podrá trabajar con datos promediados de hasta cinco minutos.
- Los datos deberán ser expresados en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Se deberá revisar la completitud de la serie de datos según la Guía DCA04 “Tratamiento estadístico de datos para monitoreos continuos”.

## 7. Disposiciones complementarias

Además de lo evaluado a partir de los procesamientos planteados anteriormente, se deberán tener en cuenta los siguientes elementos para evaluar el desempeño de los sensores candidatos:

- Valores anormalmente altos o bajos (valores atípicos).
- Presencia de patrones esperados que podrían ser estacionales, diurnos/nocturnos, lunes a viernes/fines de semana, entre otros. La ausencia de estos patrones puede indicar un problema con los sensores.
- Interferencias que causen una respuesta de medición positiva o negativa ante un contaminante diferente al que se está midiendo, así como agua, suciedad, polvo e insectos en zonas sensibles del equipo.
- Influencia de la temperatura y la humedad relativa. Respuesta de medición positiva o negativa causada por variaciones de estos parámetros.

### 7.1 Reporte de los resultados obtenidos

Para aquellos casos donde ya se estén presentando datos, la comparación con FRM/FEM deberá ser realizada dentro del primer año de aprobado este instructivo. Para casos nuevos, la comparación deberá ser realizada previo a la medición en campo.

<sup>1</sup> FUENTE: USEPA (2018) - citado por Municipalidad de Lima (2020)





Los resultados obtenidos de los ensayos de co-localización deberán ser recopilados en un informe técnico según se detalla en el Anexo N°2 del presente informe.

La entrega a Dinacea de los resultados de los ensayos de co-localización deberá incluir la información asociada al ajuste obtenido respecto al FRM/FEM. En los informes no será necesario presentar la serie de datos ajustados pero ésta sí deberá presentarse en formato digital junto con los datos crudos, de manera que sea posible verificar los resultados y replicar los procedimientos en caso que fuera necesario.

## **7.2 Accesibilidad de la Información**

Dinacea podrá participar en calidad de observador de todas las fases de los ensayos de co-localización. Para tal efecto, se deberán facilitar todas las condiciones de accesibilidad y seguridad necesarias al sitio de prueba así como la disponibilidad de los datos del ensayo.

## **8. Disposiciones finales**

### **8.1 Evaluación de Desempeño de los sensores candidatos**

La Dinacea, a través del Departamento de Seguimiento de Componentes del Ambiente, queda encargada de supervisar el cumplimiento de las disposiciones establecidas en el presente instructivo.

Los plazos establecidos en este documento se podrán modificar de acuerdo a los resultados obtenidos de la evaluación de desempeño de estos sensores.

### **8.2 Aspectos no contemplados**

Los aspectos no contemplados en el presente instructivo serán resueltos por la Dinacea teniendo en cuenta los documentos técnicos disponibles que sean de aplicación a este proceso.

## **9. Acrónimos**

|         |   |   |
|---------|---|---|
| DCA     | - | División Calidad Ambiental  |
| Dinacea | - | Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental  |
| FEM     | - | Método equivalente. ( <i>Federal Equivalent Method</i> por su sigla en inglés)  |
| FRM     | - | Método de referencia. ( <i>Federal Reference Method</i> por su sigla en inglés)   |
| PM10    | - | Material particulado menor a 10 $\mu\text{m}$   |
| PM2.5   | - | Material particulado menor a 2,5 $\mu\text{m}$  |
| USEPA   | - | Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ( <i>U.S. Environmental Protection Agency</i> por su sigla en inglés) |



## 10. Referencias Bibliográficas

- [1]. Decreto 135/21: *Reglamento sobre la calidad de Aire.*
- [2]. Dinacea (2018). *Guía tratamiento Estadístico de Datos para monitoreos continuos (DCA04, V2).*
- [3]. Dinacea (2017). *Guía ubicación e instalación de equipos de monitoreo de calidad de aire (DCA02, V3).*
- [4]. DIRECTIVA 2008/50/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO (2008).
- [5]. EPA (2019). *List of Designated Reference and Equivalent Methods.*
- [6]. Laboratorio Nacional de Investigación de la Exposición. Oficina de Investigación y Desarrollo (2017). *Cómo evaluar sensores de bajo costo mediante la co-localización con monitores del método de referencia federal.*
- [7]. Municipalidad de Lima (2020). *Instructivo: lineamientos para evaluar el desempeño de sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad ambiental del aire.*
- [8]. Norma ISO/IEC 17050-1:2004 *Evaluación de la conformidad. Declaración de conformidad del proveedor.*
- [9]. USEPA (2014). *Air sensor Guidebook – EPA 600/R-14/159 (Guía del sensor de de aire –EPA 600/R -14/159).*
- [10]. Williams, R., A. Kaufman, T. Hanley, J. Rice, AND S. Garvey. (2014). *Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-14/464 (NTIS PB 2015-102104).*

## 11. Participación

Realizado por:

Quím. Sofía Santiago – División Calidad Ambiental

Bach. Vivian Muñoz – División Laboratorio Ambiental

Revisado por:

Ing. Quím. Magdalena Hill – División Calidad Ambiental

MSc. Pablo Fernández – División Calidad Ambiental

Q.F. Natalia Barboza – División Laboratorio Ambiental

Aprobado por:

Ing. Quím. Magdalena Hill – División Calidad Ambiental



### Anexo N°1

| Tabla sobre los métodos de referencia y equivalentes establecidos para la gestión de la calidad del aire |   | Fecha de actualización                                  |   |
|--|---|---|---|
|  |   | 31/03/2023  |   |
| Parámetro  | Método de referencia EPA  | Método equivalente manual EPA                           | Método equivalente automático EPA   |
| CO   | CFR 40 Appendix C to Part 50 - Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Carbon Monoxide in the Atmosphere (Non-Dispersive Infrared Photometry)  | N/A   | Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)  |
| NO <sub>2</sub>  | Quimioluminiscencia (Método automático) CFR 40 Appendix F to Part 50 - Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Nitrogen Dioxide in the Atmosphere (Gas Phase Chemiluminescence)  | Sodium Arsenite Method for NO <sub>2</sub>              | Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)  |
| O <sub>3</sub>   | CFR 40 Appendix D to Part 50 - Reference Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Ozone in the Atmosphere (Chemiluminescence Method)  | N/A   | Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)  |
| SO <sub>2</sub>  | CFR 40 Appendix A-1 to Part 50 - Reference Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Ultraviolet Fluorescence Method).<br>CFR 40 Appendix A-2 to Part 50 - Reference Method for the Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Pararosaniline Method)  | N/A   | -   |
| PM 2.5   | CFR 40 Appendix L to Part 50 - Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as PM <sub>2.5</sub> in the Atmosphere. Método Filtración/ gravimétrico.   | Muestreador dicotómico PM10, PM2.5.                     | Muestreadores automáticos cumpliendo con especificaciones de método equivalente de EPA.<br>Beta atenuación<br>Espectrometría de luz dispersa<br>TEOM (microbalanza oscilante) |
| PM 10  | CFR 40 Appendix J to Part 50 - Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM <sub>10</sub> in the Atmosphere. Método Filtración/ gravimétrico. Versión incluida en el Manual procedimientos analíticos para muestras ambientales R.M. 1648/2017, procedimiento 1073UY (DINACEA).   | Muestreador dicotómico PM10, PM2.5. Método gravimétrico | Muestreadores automáticos cumpliendo con especificaciones de método equivalente de EPA.<br>Beta atenuación<br>Espectrometría de luz dispersa<br>TEOM (microbalanza oscilante) |
| Pb   | CFR 40 Appendix Q to Part 50 - Reference Method for the Determination of Lead in Particulate Matter as PM <sub>10</sub> Collected From Ambient Air XRF<br>Digestión de filtros: Method IO-3.1 Selection, Preparation and Extraction of Filter Material EPA/625/R-96/010a,<br>Determinación Pb: Method IO-3.2 Method IO-3.4 Method IO-3.5.<br>Versión incluida en el Manual procedimientos analíticos para muestras ambientales R.M. 1648/2017, procedimiento 3260UY/3146UY (DINACEA). | -   | -   |
| TRS  | -   | -   | Analizadores de gases por espectrofotometría  |



## **Anexo N°2**

### **Informe de resultados de la evaluación de desempeño en campo de los sensores candidatos (contenido tentativo)**

1. CONTEXTO NORMATIVO
2. ANTECEDENTES
3. OBJETIVOS
4. INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE TIPO CONTROL
5. INFORMACIÓN TÉCNICA DEL SENSOR CANDIDATO
6. METODOLOGÍA
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
8. CONCLUSIONES
9. BIBLIOGRAFÍA
10. ANEXOS (CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS, PRUEBAS ESTADÍSTICAS, REGISTROS FOTOGRÁFICOS, ETC).