

# **Diseño y operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire en Colombia**

Presentado por:  
Paula Camila Sandoval Moreno

Directores  
Carlos Alfonso Zafra Mejía, PhD. Ingeniería Ambiental  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Ing. Leonardo Alfredo Pineda Pardo  
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Ingeniería Ambiental  
Bogotá  
2021

## Dedicatoria

*A Dios,*  
por permitirme llegar a este punto, por cada una de las oportunidades y personas valiosas  
que pone en mi vida.

*A mi familia,*  
por su paciencia, apoyo incondicional, confianza y amor. Gracias a ustedes he forjado  
carácter y encuentro motivación para perseverar en cualquier situación.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por formarme íntegramente como profesional, a los profesores que a diario me retaron desde cada una de las áreas y a mis compañeros que me llenaron de buena energía en cada una de las clases cursadas.

Mi más cordial agradecimiento y reconocimiento al profesor Carlos Alfonso Zafra, por la paciencia, orientación en este proceso y darme las herramientas necesarias para desarrollar un excelente trabajo. Al ingeniero, Leonardo Alfredo Pineda por compartir lo que ha aprendido a lo largo de su experiencia en temas relacionados con Calidad del Aire. Ambos con su excelente profesionalismo contribuyeron a que este sea un trabajo construido con bases teóricas y técnicas sólidas, desde un repertorio amplio de conocimiento y procurando abarcar aspectos relevantes para el monitoreo de la calidad del aire en nuestro país.

## RESUMEN

Los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) en Colombia han evolucionado en los últimos años como una de las principales estrategias implementadas para mejorar la calidad del aire urbano. Estos sistemas han evolucionado de acuerdo con las necesidades del contexto nacional y con base en los elementos normativos que brindan lineamientos necesarios para su adecuado funcionamiento. Por medio del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) dictan las directrices de diseño, operación y gestión de los SVCA implementados en el país.

El siguiente documento tiene como objetivo principal desarrollar criterios técnicos y metodológicos que permitan actualizar y modificar dicho protocolo. Para ello, se tuvo en cuenta la situación actual de los SVCA instalados en el país, las condiciones específicas del territorio y los avances normativos a nivel internacional. Inicialmente, se hizo una revisión detallada del contenido actual del protocolo en comparación con documentos normativos y guías internacionales referentes en monitoreo de calidad del aire. En segundo lugar, se identificaron las principales dificultades presentadas en la aplicación de su contenido según lo expuesto por expertos nacionales en el tema. Por último, se establecieron los criterios que deben priorizarse en el momento de hacer la modificación y actualización de dicho protocolo.

Los resultados mostraron que existe una correlación positiva muy baja ( $\rho = 0,192$ ) entre los criterios priorizados por los países referentes en el monitoreo de la calidad del aire y criterios priorizados a nivel nacional para el diseño y operación de redes de monitoreo de calidad del aire. A nivel nacional los principales criterios priorizados están relacionados con la fase de diseño de SVCA, la fase de diagnóstico y las técnicas y los métodos de medición. A pesar que existen criterios aplicables en países de diferentes regiones del mundo, existen criterios cuya implementación requiere un análisis nacional, regional y local según las condiciones específicas del lugar donde se quiere implementar el SVCA.

**Palabras Clave:** Calidad del aire, Redes de monitoreo, Gestión del aire, Normativa internacional.

## ABSTRACT

The Air Quality Surveillance Systems (SVCA) in Colombia have evolved in recent years as one of the main strategies implemented to improve urban air quality. These systems have evolved in accordance with the needs of the national context and based on the normative elements that provide the necessary guidelines for their correct operation. Through the air quality monitoring and tracking protocol, the Ministry of the Environment and Sustainable Development (MADS) and the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) dictate the design, operation and management guidelines of the SVCA implemented in the country.

The main objective of the following document is to develop technical and methodological criteria to update and modify that protocol. For this, the current SVCA installed in the country, the specific conditions of the territory and the regulatory advances at the international level were considered. First, a detailed review of the current content of the protocol was made in comparison with normative documents and international reference guides in air quality monitoring. Secondly, the main difficulties presented in the application of protocol content were identified based on national expert comments on the subject. Finally, the criteria that should be prioritized when modifying and updating the protocol were established.

The results show that there is an average positive correlation ( $\rho = 0.192$ ) between the criteria prioritized by the reference countries in the monitoring of air quality and the criteria prioritized at the national level for the design and operation of air quality monitoring networks. At the national level, the main prioritized criteria are related to the SVCA design phase, the diagnosis phase, and measurement techniques and methods. Although there are applicable criteria in countries in different regions of the world, there are criteria whose implementation requires analysis national, regional and local according to the specific conditions of the place where you want to implement the SVCA.

**Keywords:** Air quality, Monitoring network, Air management, International regulations.

## Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN .....	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
2. JUSTIFICACIÓN .....	18
3. OBJETIVOS .....	20
4. MARCO TEÓRICO.....	21
4.1 Redes de monitoreo de calidad del aire .....	21
4.2 Sistemas de vigilancia de calidad del aire (SVCA) .....	21
4.2.1 Diagnóstico preliminar para el diseño de SVCA.....	21
4.2.2 Diseño de SVCA.....	22
4.2.2.1 Parámetros de medición.....	23
4.2.2.2 Ubicación de estaciones de monitoreo.....	25
4.2.2.3 Tipos de estaciones de medición de calidad del aire .....	26
4.2.2.4 Instrumentos y métodos de medición de calidad del aire .....	27
4.2.3 Operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire.....	28
4.3 Aseguramiento y control de la calidad del monitoreo .....	29
4.4 Experiencias de protocolos a nivel nacional e internacional .....	30
4.4.1 A nivel internacional.....	30
4.4.3 A nivel nacional .....	33
4.5. Normatividad nacional e internacional asociada .....	34
4.5.1 Internacional .....	34
4.5.2 Nacional .....	35
5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
5.1 Descripción del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire .....	37
5.2 Recolección de la información.....	39
5.3 Metodología .....	40
5.3.1 Fase 1: Revisión bibliográfica .....	40
5.3.2 Fase 2: Desarrollo de la matriz .....	42

5.3.3 Fase 3: Metodología de taller con expertos .....	43
5.3.3.2 Identificación de criterios nacionales priorizados.....	44
5.3.4 Fase 4: Análisis estadístico de la información.....	45
5.3.4 Fase 5: Documentación de criterios.....	46
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	47
6.1. Identificación de criterios técnicos para la implementación de SVCA .....	47
6.1.2 Fase de diseño de SVCA.....	49
6.1.3. Parámetros de medición.....	51
6.1.4. Parámetros de diseño .....	54
6.1.4.3. Técnicas y métodos de medición .....	58
6.1.6. Operación de redes de monitoreo de calidad del aire .....	63
6.1.8 Análisis de datos .....	64
6.1.9. Presentación de información obtenida del monitoreo.....	65
6.1.10 Fase de evaluación y seguimiento de los SVCA .....	66
6.2. Evaluación de criterios técnicos para el diseño y operación de los SVCA .....	68
6.2.2 Grupos focales: Fase de diseño de SVCA. ....	71
6.2.3 Grupos focales: Parámetros de medición.....	74
6.2.4 Grupos focales: Parámetros de diseño .....	76
6.2.5 Grupos focales: Técnicas y métodos de medición.....	78
6.2.5.1 Métodos de referencia nacionales.....	79
6.2.6 Grupos focales: Tecnologías meteorológicas .....	82
6.2.7 Grupos focales: Análisis de datos .....	84
6.2.8 Grupos focales: Presentación de la información obtenida del monitoreo.....	85
6.2.9. Análisis comparativo: criterios priorizados a nivel nacional e internacional .....	88
6.3. Requisitos para el diseño y operación de los sistemas de vigilancia y calidad del aire urbano en Colombia.....	91
6.3.1. Fortalecimiento y estandarización de modelización preliminar .....	91
6.3.2. Integración del número de habitantes y macro localización para determinar el diseño del SVCA.....	93

6.3.3. Actualización de condiciones de monitoreo para contaminantes atmosféricos .....	95
6.3.4. Determinar tipo y modo de operación de estaciones meteorológicas.....	97
6.3.5. Fortalecimiento en el análisis de datos .....	97
6.3.6. Actualización de plataforma para el reporte y seguimiento de la información .....	98
CONCLUSIONES .....	99
RECOMENDACIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA .....	124

## Lista de tablas

Tabla 1. Contaminantes atmosféricos: Fuentes principales y afectaciones en la salud y el ambiente. .....	24
Tabla 2. Tipos de estaciones de calidad del aire. ....	26
Tabla 3. Ventajas y desventajas de técnicas de medida de contaminantes atmosféricos. ....	27
Tabla 4. Protocolos internacionales relacionados con calidad del aire. ....	30
Tabla 5. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire adoptados por Colombia y valores guía de la OMS. ....	34
Tabla 6. Documentos normativos de EPA y UE relacionados con sistemas de monitoreo de calidad del aire. ....	35
Tabla 7. Normatividad asociada a Monitoreo de Calidad del Aire en Colombia. ....	35
Tabla 8. Identificación de documentos en la primera fase de búsqueda bibliográfica. ....	41
Tabla 9. Índice de frecuencia de citación. ....	41
Tabla 10. Grado de relación según coeficiente de correlación ....	46
Tabla 11. Criterios priorizados para el diseño y operación de SVCA a nivel internacional. ....	47
Tabla 12. Modelos de calidad del aire implementados a nivel internacional. ....	49
Tabla 13. Tipo de SVCA de acuerdo al número de habitantes. ....	50
Tabla 14. Relación del número de habitantes, parámetros de monitoreo y número de estaciones. .....	50
Tabla 15. Monitoreo de Ozono en redes de monitoreo a nivel internacional. ....	53
Tabla 16. Enfoques implementados para la determinar la ubicación de estaciones. ....	55
Tabla 17. Escalas de macro localización según objetivos. ....	56
Tabla 18. Escala de macro localización a nivel internacional. ....	57
Tabla 19. Métodos de referencia aprobados por la EPA para el monitoreo de la calidad del aire. ....	59
Tabla 20. Métodos de referencia aprobados por la unión europea para el monitoreo de la calidad del aire. ....	60
Tabla 21. Identificación de criterios clave relacionado con la presentación de información obtenida de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial. ....	65

Tabla 22. Reporte de información a través de páginas web. ....	66
Tabla 23. Contenido plan de calidad establecido a nivel internacional. ....	67
Tabla 24. Características de las campañas de monitoreo preliminar en SVCA. ....	70
Tabla 25. Frecuencia de monitoreo en campañas de monitoreo preliminares en SVCA. ....	71
Tabla 26. Monitoreo de calidad del aire en proyectos, obras y actividades. ....	72
Tabla 27. Métodos de referencia para contaminantes tóxicos del aire. ....	76
Tabla 28. Criterios de macro localización considerados según estudios realizados a nivel nacional. .....	77
Tabla 29. Métodos de medición contaminantes criterio. ....	79
Tabla 30. Criterios para la selección de técnicas de monitoreo de los SVCA. ....	81
Tabla 31. Técnicas de muestreo para cumplir con los objetivos de medición de la calidad del aire. .....	82
Tabla 32. Parámetros y equipos meteorológicos requeridos en el monitoreo de la calidad del aire. .....	83
Tabla 33. Análisis comparativo: Criterios priorizados para el diseño y operación de SVCA. ....	89
Tabla 34. Prueba de correlación índices evaluadas muestras no paramétricas de Spearman. ....	90

## Lista de figuras

Figura 1. Diagnóstico preliminar al diseño de Sistemas de Vigilancia. ....	22
Figura 2. Fases de diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire. ....	23
Figura 3. Clasificación general de SVCA. ....	23
Figura 4. Aspectos de micro localización y macro localización de estaciones monitoreo de calidad del aire. ....	25
Figura 5. Etapas de Operación de SVCA. ....	29
Figura 6. Desarrollo de un plan de aseguramiento y control de la calidad. ....	30
Figura 7. Número de estaciones por año en Colombia 2011-2017. ....	33
Figura 8. Ubicación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire en Colombia. ....	37
Figura 9. Municipios que no cuentan con SVCA según los criterios del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. ....	38
Figura 10. Proceso de implementación de un SVCA en Colombia. ....	39
Figura 11. Fases de metodología de trabajo. ....	40
Figura 12. Etapa de preparación de talleres con expertos. ....	44
Figura 13. Etapa de ejecución de taller con expertos. . ....	44
Figura 14. Ítems priorizados a nivel internacional para el diseño y operación de redes de monitoreo. ....	47
Figura 15. Ítems priorizados en los talleres focales para el monitoreo y seguimiento de SVCA. .	68
Figura 16. Criterios priorizados en talleres focales para la fase de diagnóstico. ....	69
Figura 17. Criterios priorizados en talleres focales para la fase de diseño de SVCA. ....	72
Figura 18. Casos de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire por parte de proyectos, obras o actividades. ....	72
Figura 19. Criterios priorizados en talleres focales para los parámetros de medición. ....	75
Figura 20. Criterios priorizados en talleres focales para los parámetros de diseño. ....	77
Figura 21. Criterios priorizados por talleres focales para las técnicas y métodos de medición. ...	78
Figura 22. Criterios priorizados por talleres focales para la selección de tecnologías meteorológicas. ....	83
Figura 23. Criterios priorizados por los talleres focales para el análisis de datos en los SVCA. .	84

Figura 24. Aspectos considerados en la validación de datos.....	85
Figura 25. Criterios priorizados por grupos focales para el reporte y divulgación de información. .....	86
Figura 26. Criterios priorizados por grupos focales para la fase de evaluación y seguimiento....	87
Figura 27. Procedimientos programa de aseguramiento de calidad SVCA.....	88
Figura 28. Procedimiento de acreditación de laboratorios. ....	88
Figura 29. Hoja de ruta: fortalecimiento y estandarización de modelización preliminar. ....	92
Figura 30. Integración del número de habitantes y macro localización para determinar el diseño del SVCA.....	94
Figura 31. Hoja de ruta: Actualización de monitoreo de parámetros de medición. ....	96

## Lista de anexos

Anexo 1. Identificación de criterios clave relacionados con la fase diagnóstico de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	103
Anexo 2. Identificación de criterios clave para la fase de diagnóstico y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	103
Anexo 3. Identificación de criterios clave relacionados con la fase diseño de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial. ....	104
Anexo 4. Identificación de criterios clave para la fase de diseño de redes y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	104
Anexo 5. Identificación de criterios clave relacionados con los parámetros de medición de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	105
Anexo 6. Identificación de criterios clave relacionados con los parámetros de medición publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	106
Anexo 7. Identificación de criterios clave relacionados con los parámetros de diseño de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	107
Anexo 8. Identificación de criterios clave relacionados con los parámetros de diseño y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	107
Anexo 9. Identificación de criterios clave relacionados con las técnicas y métodos de medición de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	108
Anexo 10. Identificación criterios clave relacionados con técnicas y métodos de medición y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	109
Anexo 11. Identificación de criterios clave relacionados con tecnologías meteorológicas de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	110
Anexo 12. Identificación de criterios clave relacionados con tecnología meteorológicas y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	111
Anexo 13. Identificación de criterios clave relacionados con la fase de operación de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	112
Anexo 14. Identificación de criterios clave relacionados con la fase de operación y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	112

Anexo 15. Identificación de criterios clave relacionados con análisis de datos de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	114
Anexo 16. Identificación de criterios clave relacionados con el análisis de datos por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	114
Anexo 17. Identificación de criterios clave relacionado con la presentación de información obtenida de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	116
Anexo 18. Identificación de criterios clave relacionados con la presentación de información obtenida del monitoreo publicado por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	116
Anexo 19. Identificación de criterios clave relacionados con la fase de evaluación y seguimiento de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial.....	117
Anexo 20. Identificación de criterios clave relacionados con la fase de evaluación y seguimiento publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire. ....	118
Anexo 21. Fase diagnostico SVCA. ....	120
Anexo 23. Macro localización SVCA. ....	122
Anexo 24. Métodos y técnicas de monitoreo.....	123

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, la mala calidad del aire se ha constituido como la segunda causa de enfermedad asociada a factores de riesgo ambiental después de la contaminación del agua, según lo expuesto en el informe de carga de la enfermedad ambiental publicado por el Instituto Nacional de Salud (2018). Esto favorece el incremento de desórdenes respiratorios y trastornos cardiovasculares e incrementa los costos sociales y ambientales por la degradación ambiental en los últimos años (DNP, 2017). De esta manera, en el país se ha generado una evolución en materia de gestión de calidad del aire a través de diversos instrumentos normativos y medidas que permiten ejercer mayor control sobre las actividades que alteran la calidad de este recurso.

Parte de los esfuerzos se han concentrado en la implementación de los Sistemas de Vigilancia y Calidad del Aire (SVCA), los cuales empiezan a instalarse en el país en 1967 (IDEAM, 2012) y se han venido constituyendo como instrumentos fundamentales para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire regional. Estos sistemas se han transformado de acuerdo con las necesidades provistas del contexto nacional y también se han sustentado en los instrumentos normativos que han resultado de ello; por esto, en el año 2007 se definió un plan de trabajo orientado a fortalecer la medición de contaminantes atmosféricos realizado por estos sistemas, ajustando y validando lo que sería el primer Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010).

Con el fin de robustecer los SVCA operados actualmente y gestionar el diseño y puesta en marcha de nuevos Sistemas de Vigilancia, el IDEAM actualizará en el año 2020 dicho protocolo, de modo que se incorporen nuevas directrices que mejoren las condiciones de operación e integración entre los SVCA operados por los proyectos, obras y actividades y los operados por las autoridades ambientales (IDEAM, 2019a). Basado en lo anterior, en el siguiente trabajo se realiza inicialmente una valoración del protocolo actual frente a otros instrumentos normativos (nacionales e internacionales) a partir de la revisión bibliográfica y respuestas de expertos nacionales. A partir de eso, se sugieren los criterios técnicos y metodológicos que conlleven a la modificación y versión definitiva de dicho documento.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación del aire es considerada hoy por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como el riesgo de salud ambiental más grave del mundo, que soportado en numerosos estudios han demostrado consistentemente su efecto nocivo sobre la salud humana (WHO, 2017). Se estima según la OMS (2018), que la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4,2 millones de defunciones. En Colombia, la mala calidad del aire representa una disminución en la calidad de vida de sus habitantes y un gran costo social, cuyo valor fue de \$15,4 billones de pesos para el año 2017 (1,93% del PIB nacional), por causa de la contaminación del aire urbano (DNP, 2017).

Aunque en el país se ha propuesto estrategias enfocadas a la prevención, reducción y control de la contaminación del aire, se siguen presentando eventos alarmantes con respecto a eventos de contaminación atmosférica. De acuerdo con el último Informe sobre el Estado de la Calidad del Aire (Minambiente & IDEAM, 2018), en varias estaciones de monitoreo se excedieron los límites máximos permisibles de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> establecidos en la norma ambiental ;y los resultados del cálculo del Índice de Calidad del Aire evidenciaron que representan los mayores riesgos de afectación a la salud de la población. Estas observaciones se destacan especialmente en los grandes centros urbanos tales como Bogotá, Cali, Medellín y Santa Marta, así como en los municipios de Ráquira (Boyacá) y Yumbo (Valle del Cauca) (Minambiente & IDEAM, 2018).

En el 2017 la cobertura espacial de las estaciones de monitoreo en el país abarcó 91 municipios y 22 departamentos (MADS, 2019). Sin embargo, según lo reportado, existen 46 áreas a nivel nacional que aún no cuentan con un SVCA, o en las cuales, la capacidad instalada no brinda ni la cobertura espacial ni la complejidad adecuada. De igual manera, siete de las veintiséis jurisdicciones que monitorearon durante el año 2017, no contaron con el número suficiente de estaciones en su SVCA (MADS,2019). Lo anterior, supone un reto para los tomadores de decisiones, los cuales se enfrentan a escenarios más complejos donde se combinan aspectos como el crecimiento de la población, el incremento del parque automotor y el acelerado desarrollo de actividades de industria y minería. Para el año 2020, según proyecciones del DANE (2005-2020), el 76% de la población estará

asentada en zona urbana; favoreciendo el incremento de fuentes móviles y ubicación de fuentes fijas necesarias para atender la demanda de bienes y servicios. Esto contribuye a aumentar las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en cascos urbanos y favorece el incremento de enfermedades asociadas con el riesgo ambiental por la baja calidad del aire.

Desde los elementos normativos se ha promovido medidas tales como el aumento de los SVCA en las regiones donde hay presencia de grandes centros urbanos, la reducción de emisiones con estándares más estrictos, y la implementación de equipos acreditados (DNP, 2018). Sin embargo, en la política para el mejoramiento de calidad del aire, el DNP (2018) señala que gran parte de las fallas que presentan estos sistemas se debe a la dificultad que se ha tenido en el país para declarar áreas con altos niveles de contaminación debido a que los SVCA no obtienen datos válidos. Ello se asocia a que este protocolo posiblemente buscaba homogenizar e incrementar la calidad de los datos obtenidos en los SVCA y su implementación no ha sido efectiva debido a la complejidad de su contenido (DNP, 2018). Se evidencia que para las autoridades ambientales y entidades privadas que hacen uso del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire como guía para el diseño y operación de los SVCA, no disponen de una herramienta actualizada y ajustada a las realidades y necesidades presentes en el territorio. Ello dificulta el proceso de seguimiento de la calidad del aire del país, y la toma de decisiones no es acertada basado en la insuficiencia de la información obtenida. Si bien, la construcción de este instrumento normativo ha tenido en cuenta la información brindada por referentes internacionales con larga experiencia en la calidad del aire, es necesario que su contenido se adapte también a las condiciones actuales del país.

De esta manera, el siguiente documento busca responder la siguiente pregunta problema: *¿Qué criterios técnicos y metodológicos responden a las necesidades de ajuste y actualización del actual Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire para el diseño y operación de los sistemas de vigilancia de calidad del Aire en Colombia?*

## 2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, por medio del protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, se han brindado las directrices y procedimientos para la implementación de los SVCA. La estandarización de los procedimientos de diseño y operación permite asegurar la calidad de la información y datos obtenidos que sustenten la adopción de planes y proyectos que atenúen, mitiguen o reduzcan las afectaciones ocasionadas por la contaminación atmosférica sobre la calidad del aire exterior (IDEAM, 2017). Esto permite entre tanto, dar cumplimiento a los niveles objetivo en las concentraciones de contaminantes criterio en la atmosfera recomendados por la OMS (2005), y reducir también los costos sociales asociados a enfermedades y muertes ocasionadas por contaminación atmosférica.

Algunos autores reconocen que una forma de lograr la disminución de la carga de enfermedad es a través de la evaluación de medidas de control de aire limpio y normatividad ajustada a estándares internacionales (e.g., INS, 2018; Kuklinska, et al., 2015). Otros autores, como Macías & Gallini, (2019) y Riojas et al. (2016) sugirieron que se requiere coordinación interinstitucional y aterrizar las políticas nacionales a la esfera local. Por su parte, la (EPA, 2008) resalta que la reducción en las emisiones contaminantes del aire en los países debe acompañarse de actividades que permitan medir la concentración de estos en el aire a través de SVCA, y la Unión Europea (UE) promueve el desarrollo de la investigación como herramienta para la comprensión del problema de contaminación del aire (Agencia Europea de Medio Ambiente-AEMA, 2013).

En Colombia, por medio de la estrategia “mejor calidad del aire para proteger la salud”, definida en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 señala que el MADS junto con el IDEAM pondrán en marcha un programa para mejorar la cobertura y disponibilidad de información de emisiones y calidad del aire. Para ello, deberán apoyar a las autoridades ambientales en el fortalecimiento al control y vigilancia de las emisiones con acciones estratégicas focalizadas en cinco ciudades críticas. La estrategia también debe extenderse a sitios donde el monitoreo es deficiente, o peor aún, no se realiza ningún tipo de medición, y, por lo tanto, se desconoce el nivel real de la problemática.

Dando cumplimiento a esta estrategia y atendiendo lo expuesto en la política para el mejoramiento de la calidad del aire (CONPES 3943), el desarrollo de esta pasantía pretendió establecer criterios técnicos y metodológicos para actualizar y ajustar el

Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire vigente. Esto con el fin de brindar directrices que permitan mejorar el monitoreo actual, asegurar una mayor cobertura de los SVCA y especificar los términos de operación basada en la actualización normativa.

Este documento permitió fortalecer las líneas de investigación de impactos ambientales y tecnologías apropiadas, así como del grupo de investigación GIIAUD; ya que para el cumplimiento de objetivos fue necesario identificar el conjunto de técnicas y metodologías existentes que permiten realizar el correcto monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en el país. Fue necesario abordar aspectos relacionados con el diseño y operación de sistemas de monitoreo de calidad del aire, reconocer la manera adecuada de validar, analizar, transmitir y divulgar los datos tomados por estos sistemas y a partir de un concepto técnico, determinar los criterios que más se ajustan a los actores involucrados (autoridades ambientales, proyectos, obras y actividades), a las condiciones actuales y a los escenarios futuros del país con respecto a la calidad del aire.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Proponer criterios técnicos y metodológicos para el diseño y operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire en Colombia, en el marco del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire publicado por el IDEAM y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Identificar criterios técnicos para la implementación de redes de monitoreo de calidad del aire urbano a nivel nacional e internacional.
- Evaluar los criterios técnicos para el diseño y operación de los sistemas de vigilancia y calidad del aire en Colombia de acuerdo con la información publicada y entregada por expertos nacionales.
- Documentar los requerimientos para el diseño y operación de los sistemas de vigilancia y calidad del aire urbano en Colombia.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1 Redes de monitoreo de calidad del aire**

A nivel internacional, las redes de monitoreo de calidad del aire se han constituido como el primer paso para mejorar la calidad del aire en grandes áreas urbanas (Munir et al., 2019). El propósito principal de estas redes según Liang(2013), es distinguir las áreas donde los niveles de contaminantes exceden los estándares de calidad del aire y las áreas donde no lo hacen. En segundo lugar, tienen como propósito documentar los resultados obtenidos de las estrategias implementadas hacia el logro del estándar de calidad del aire ambiente. Una red de calidad del aire difiere en un Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire, en que este último contempla el conjunto organizado de recursos humanos, técnicos, administrativos para operar una o un conjunto de estaciones de monitoreo que miden la calidad del aire en una zona o región (Manual 3: Redes, Estaciones y Equipos de Medición de La Calidad Del Aire., 2008a).

### **4.2 Sistemas de vigilancia de calidad del aire (SVCA)**

En Colombia, los SVCA responden a los propósitos de un Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire. Según el IDEAM (2017) estos surgen como estrategia para determinar el cumplimiento de las normas de calidad del aire y evaluar los riesgos para la salud humana y el ambiente. De acuerdo con los objetivos establecidos por los SVCA, estos tienen como fin común brindar información que permita adoptar planes y proyectos que atenúen, mitiguen o reduzcan las afectaciones ocasionadas por la contaminación atmosférica sobre la calidad del aire exterior. (IDEAM, 2017). Para dar cumplimiento a estos fines, el MADS, estableció los lineamientos para el diseño, operación y gestión de SVCA a través del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (IDEAM, 2017).

#### **4.2.1 Diagnóstico preliminar para el diseño de SVCA**

La base para el diseño de las redes de monitoreo es una evaluación detallada de la calidad del aire actual y el impacto del desarrollo futuro esperado. La información suministrada en el diagnóstico preliminar es obtenida según TNO (2016): “A partir de los inventarios de emisión, la campaña preliminar y los cálculos de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos donde se relaciona información sobre emisiones locales,

topografía y climatología”. El (MADVT, 2010b) sugiere que este tipo de estudios constituyen la línea base y diagnóstico preliminar al diseño del SVCA (*Figura 1*); permitiendo la identificar los puntos críticos de contaminación, tipificar los contaminantes predominantes, las zonas de concentración y distribución espacial de los mismos (IDEAM, 2017).

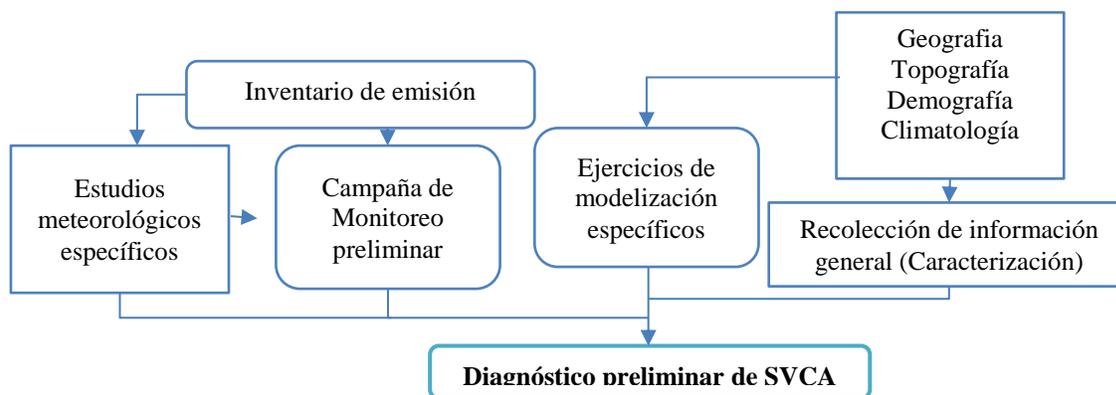


Figura 1. Diagnóstico preliminar al diseño de Sistemas de Vigilancia. Fuente: Adaptado de (MAVDT, 2010b)

#### 4.2.2 Diseño de SVCA

El diseño de la red de monitoreo de calidad del aire está orientado a determinar el número y la ubicación de las estaciones (Zoroufchi et al., 2016) con el fin de alcanzar los objetivos deseados a un costo mínimo. Por ello, el primer paso para diseñar o implementar cualquier sistema de monitoreo según Bower et al. (1999) es definir sus objetivos generales con el fin de permitir un uso óptimo del personal y los recursos disponibles; establecer objetivos de monitoreo difusos, demasiado restrictivos o ambiciosos dará como resultado programas ineficaces en cuanto a costos. La *Figura 2* presenta los aspectos adoptados en la etapa de diseño de SVCA en Colombia a través del Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.

En Colombia se distingue tres tipos de SVCA según quién se encargue de la operación de estos (*Figura 3*). Para determinar el tipo de sistema a implementar debe tenerse en cuenta las condiciones específicas de la región basado en el estudio de diseño preliminar y la

información referente principalmente a número de población, fuentes de emisión y objetivos de monitoreo (MAVDT, 2010b).

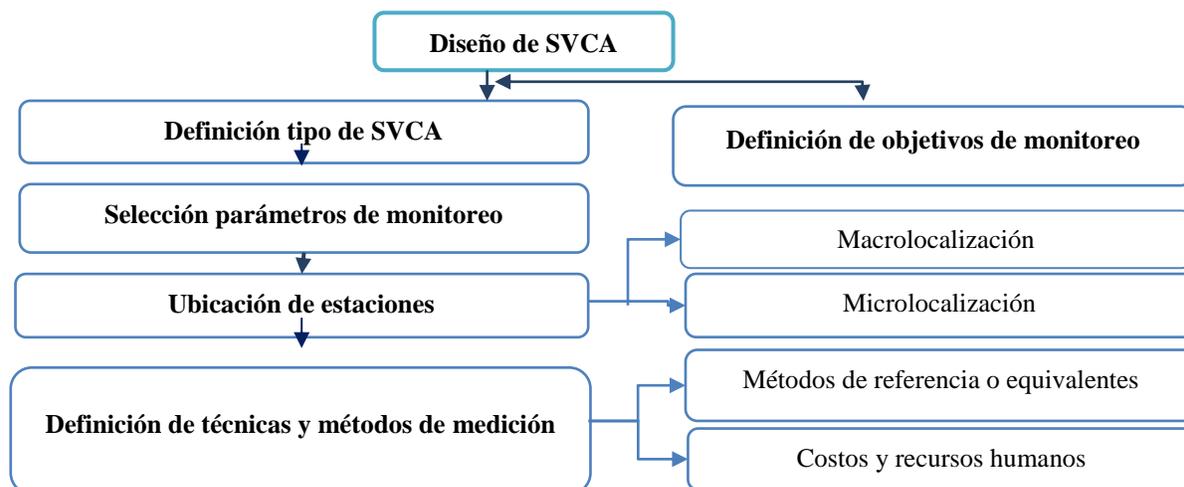


Figura 2. Fases de diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire. Fuente: Adaptado de MADVT (2010a).

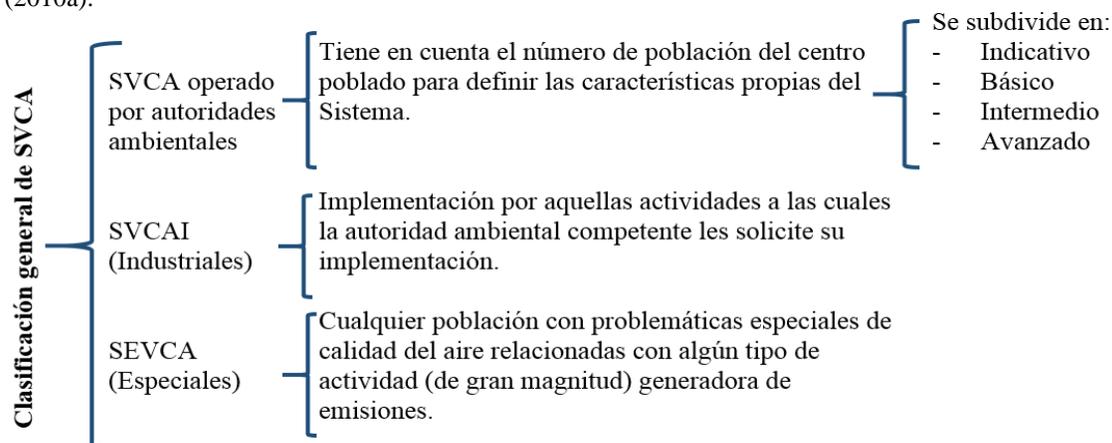


Figura 3. Clasificación general de SVCA. Fuente: Adaptado de MADVT (2010b).

#### 4.2.2.1 Parámetros de medición

- **Contaminantes criterio** : La medición de contaminantes criterio en Colombia se basa en los estudios epidemiológicos realizados por la OMS (2005), tomando como base los efectos conocidos en la salud y considerando los objetivos de reducción así como las medidas que permitan reducir la exposición de la población con el paso del tiempo. En la

Tabla 1 se relacionan el contaminante criterio objeto de medición, reglamentados por la actual norma de calidad del aire<sup>1</sup>.

- **Hollín o carbono negro:** El Hollín es un componente del material particulado que al encontrarse suspendido en el aire, absorbe más luz solar en comparación a las demás partículas y generan calor en la atmosfera; puesto que es un contaminante de corta vida, sus efectos en el clima son de carácter primordialmente regional (Green & Sánchez, 2013). Su formación se da debido la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa (Green & Sánchez, 2013).

Tabla 1. Contaminantes atmosféricos: Fuentes principales y afectaciones en la salud y el ambiente.

Contaminante	Efectos en la salud	Fuentes de emision
Material particulado (PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> )	Puede penetrar profundamente en los pulmones generando inflamación y empeoramiento de condiciones cardíacas o pulmonares; lo que puede ocasionar una muerte prematura. **	Procesos mecánicos como las obras de construcción, la re-suspensión del polvo de los caminos, la quema de leña y otros combustibles de biomasa*
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	Asociado a problemas de asma y bronquitis crónica, aumentando la morbilidad y mortalidad en personas mayores y niños. Puede exacerbar los síntomas enfermedades respiratorias o cardíacas. *	Principalmente en la combustión de combustibles fósiles en las plantas generadoras de energía y en otras instalaciones industriales, así como en fuentes móviles en un menor grado. **
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	En altas concentraciones, puede irritar las vías aéreas de los pulmones, empeorando los síntomas de aquellas personas que sufren enfermedades pulmonares. *	Quema de combustibles fósiles a temperaturas altas., fuentes móviles, calderas de las plantas de generación de energía, calderas industriales, la manufactura de vidrio y manufactura de ácido nítrico. **
Ozono (O <sub>3</sub> )	Reducción considerable de la función pulmonar, así como inflamación de las vías respiratorias, que provocaría síntomas y alteraría el rendimiento. *	Formado en la atmósfera por medio de reacciones fotoquímicas, en presencia de luz solar y contaminantes precursores como los óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COVs). **
Monóxido de Carbono (CO)	Altas concentraciones reducen la cantidad de oxígeno que puede transportarse en el torrente sanguíneo a órganos críticos como el corazón y el cerebro. Es especial preocupación para las personas con algunos tipos de enfermedades cardíacas***	Combustión incompleta de combustibles fósiles***

Fuente: Adaptado de (\*OMS, 2005 ;\*\*Green et al., 2013 ;\*\*\* EPA, 2017)

<sup>1</sup> Resolución 2254 de 2017 expedido por el MADS

- **Sustancias tóxicas:**

La norma de calidad del aire vigente obliga al monitoreo de contaminantes tóxicos del aire (Mercurio, Tolueno, Benceno, Cadmio, Níquel y HAP's) cuando se demuestra con evidencia la generación de alguna de esas sustancias en el territorio. Según Brook et al. (2020), en materia normativa, a nivel internacional, queda mucho por hacer respecto a monitoreo de tóxicos en el aire debido a la complejidad de dichas sustancias por sus propiedades físicas y químicas específicas. Hasta ahora, la ley de aire limpio de Estados Unidos designa 188 sustancias conocidas por tener efectos nocivos en la salud, como contaminantes peligrosos del aire. Según EPA (2008), los estudios piloto iniciales de monitoreo de tóxicos mostraron variaciones significativas en concentraciones de tóxicos en una ciudad, de manera que se recomienda que el estudio y monitoreo de estas sustancias se haga a escala local y comunitaria.

**4.2.2.2 Ubicación de estaciones de monitoreo**

La ubicación de las estaciones deberá ser acorde con las condiciones establecidas en el sitio de diseño donde se realizó la etapa preliminar. Para la selección de la ubicación de estaciones de monitoreo es importante hacer corresponder cada objetivo de monitoreo específico con un lugar en una escala apropiada de representación espacial y luego escoger una ubicación de monitoreo que sea característica de esa escala espacial<sup>2</sup>. En el protocolo lo relacionado a ubicación de estaciones de monitoreo se aborda desde los aspectos de macro localización y aspectos de micro localización (*Figura 4*).

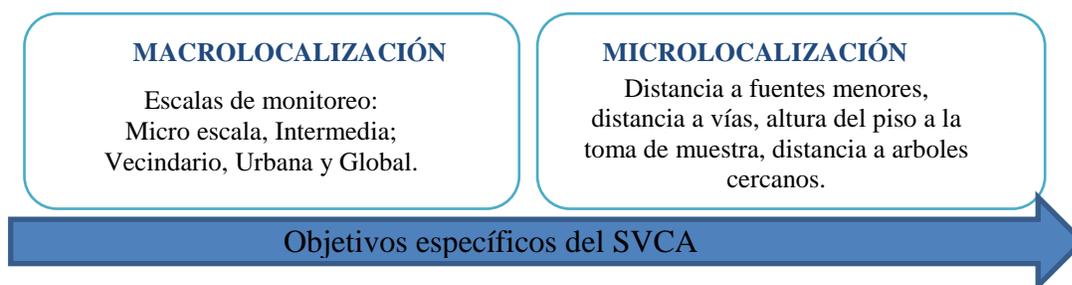


Figura 4. Aspectos de micro localización y macro localización de estaciones de monitoreo de calidad del aire. Fuente: Adaptado de (MADVT, 2010b).

<sup>2</sup> U. S. Code Federal Register 40 CFR 58 Appendix E. 1985

Zoroufchi Benis et al. (2016) y Bower et al. (1999) mencionan que el uso de modelos de dispersión apropiados y validados, con datos sobre emisiones suficientes de emisiones y meteorología brindan información valiosa para la ubicación de estaciones de calidad del aire. Así es posible obtener mayor información acerca del contaminante con respecto a: área de cobertura máxima, detección máxima de violaciones sobre los estándares de aire y sensibilidad de las estaciones de monitoreo a las fuentes de emisión (Bower et al., 1999).

#### 4.2.2.3 Tipos de estaciones de medición de calidad del aire

De acuerdo a la ubicación de las estaciones de medición incorporadas dentro de una red de monitoreo, estas se pueden clasificar según la ubicación y la influencia del entorno inmediato<sup>3</sup> (Barrero et al., 2015). El INE (2008a) señala por su parte, que las estaciones de medición se clasifican según la técnica que se utilice de medición (manual, automática o mixta) y según su movilidad (Móviles, fijas). En la *tabla 2* se relacionan estos criterios de clasificación de manera específica.

Tabla 2. Tipos de estaciones de calidad del aire.

Criterio	Clasificación	Descripción
Según la ubicación	Urbana	Área continuamente construida.
	Suburbana	Asentamiento continuo de edificios mezclados con áreas no urbanizadas.
	Rurales	No cumplen con criterios de área urbana/suburbana.
Según el tiempo de muestreo	Fija	Permanece un período de tiempo superior a un año en punto fijo.
	Indicativa	Permanece en un punto en períodos inferiores a un año.
Según la influencia del entorno inmediato	De tráfico	Influenciadas principalmente por las emisiones procedentes de una calle/carretera próxima.
	Punto crítico	Estaciones que no están influenciadas ni por el tráfico ni por la industria.
	Industrial	Influenciadas por fuentes industriales aisladas o zonas industriales.
	De fondo	Influenciada por la contribución de las fuentes que debido al régimen de vientos.

<sup>3</sup> Directiva 2008/50/EC

Por su movilidad	Fijas	Estaciones ubicadas en una zona de manera permanente asegurando la estructura adecuada de montaje.
	Móviles	Estaciones motorizables o remolcables utilizadas para campañas temporales y trabajos prospectivos o de investigación.

Fuente: Adaptado de (INE, 2008a; Barrero et al., 2015; MAVDT, 2010b)

#### 4.2.2.4 Instrumentos y métodos de medición de calidad del aire

Un equipo apropiado, demasiado complejo o propenso a fallas puede dar como resultado un bajo rendimiento de la red, limitar la utilidad de datos y desperdiciar dinero. Según Bower et al. (1999) los sistemas más avanzados pueden proporcionar datos cada vez más refinados y una mayor resolución temporal de medición, pero pueden ser más intensivos en habilidades en términos de operación y soporte, más caros de operar y mantener y menos confiables en el servicio. Las técnicas de medición según MAVDT (2010c) se pueden dividir en cuatro tipos genéricos principales que pueden ser de tipo continuo o discontinuo y que cubren una amplia gama de costos y niveles de rendimiento (ver *Tabla 3*). Para monitorear los contaminantes criterios en el país se utilizan los métodos de referencia o equivalentes aprobados por las agencias ambientales US-EPA (Environmental Protection Agency) y EEPA (European Environment Agency) siempre y cuando estos sean aprobados y publicados por el IDEAM con previa aprobación del MADS (MAVDT, 2010c).

Tabla 3. Ventajas y desventajas de técnicas de medida de contaminantes atmosféricos.

Método		Ventajas	Desventajas
Métodos discontinuos	Medidores pasivo	- Muy bajo costo	- No probado para algunos contaminantes
		- Muy sencillos	- En general, solo proporcione promedios mensuales y semanales
		- Sin dependencia de la red eléctrica.	- Despliegue y análisis intensivos en mano de obra
		- Se puede implementar en grandes cantidades	- No es un método de referencia para monitorear el cumplimiento
Implican la captación del contaminante en el punto de muestreo, el transporte del contaminante captado al laboratorio y posterior análisis en el laboratorio.	Medidores activos	- Útiles para estudios de base	- Rendimiento lento de datos
		- Bajo costo	- Proporcionar promedios diarios
		- Fácil de operar	- Recolección y análisis de muestras intensivas en mano de obra.
		- Operación y rendimiento confiable	- Análisis de laboratorio requerido
		- Conjunto de datos históricos	- Rendimiento lento de datos
			- Requiere de energía eléctrica para medición

Métodos continuos Implican la captación y análisis del contaminante en el punto de muestreo, de forma continua y automática	Analizadores automáticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto rendimiento comprobado</li> <li>- Datos por hora</li> <li>- Información en línea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complejo</li> <li>- Requisitos de alta habilidad</li> <li>- Altos costos recurrentes</li> </ul>
	Sensores remotos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proporcionar datos de ruta o rango resuelto</li> <li>- Útiles cerca de las fuentes</li> <li>- Mediciones de componentes múltiples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muy complejo y caro</li> <li>- Difícil de soportar, operar, calibrar y validar</li> <li>- No es fácilmente comparable con mediciones puntuales</li> <li>- No es un método de referencia para el monitoreo del cumplimiento</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Fernandez Patier (2007) y Bower et al. (1999)

### 4.2.3 Operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire

La operación de los SVCA comprende aquellas actividades y procedimientos que permiten obtener datos de confianza, calidad y de fácil acceso en las etapas de muestreo, procesamiento y reporte de la información (IDEAM, 2019b). A partir de la validación de datos obtenido en esta etapa es posible determinar los potenciales efectos de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en la salud de la población (Minambiente & IDEAM, 2018). Toda la información suministrada por los SVCA nacionales es capturada, almacenada y procesada de manera unificada por el SISAIRE (IDEAM, 2019b). Este sistema es la fuente principal de información para el diseño, evaluación y ajuste de las políticas y estrategias nacionales y regionales en prevención y control de la contaminación del aire (Minambiente et al., 2018).

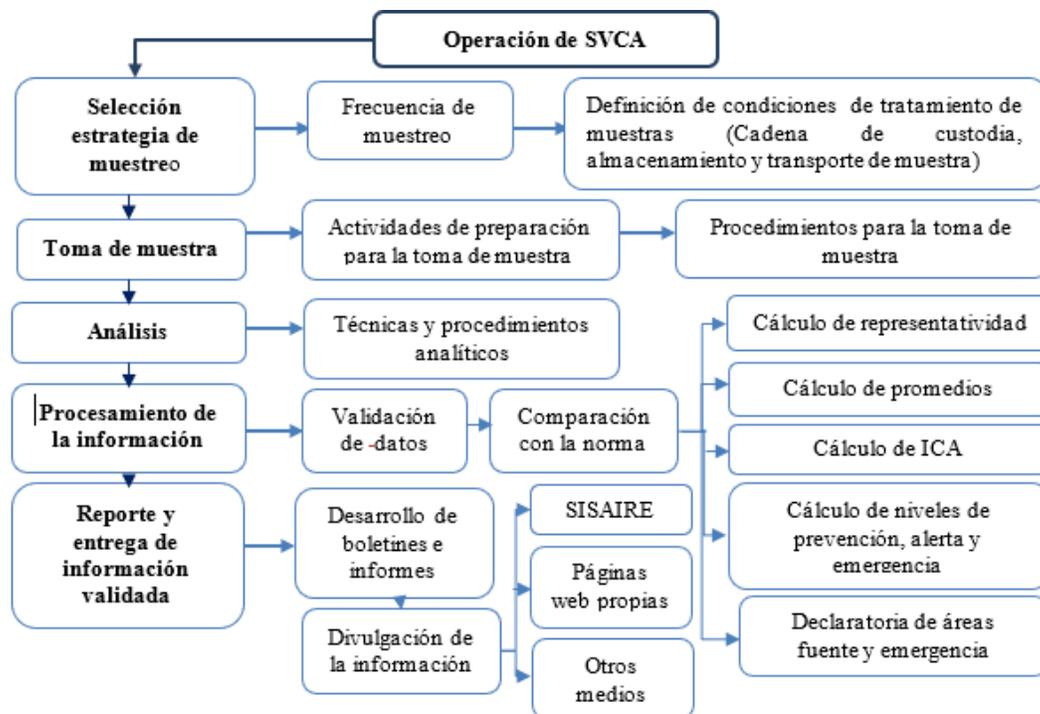


Figura 5. Etapas de Operación de SVCA. Fuente: Adaptado de IDEAM (2019b) y MAVDT (2010c).

### 4.3 Aseguramiento y control de la calidad del monitoreo

El aseguramiento de la calidad (AC) y el control de calidad (CC) constituyen una parte fundamental en todos los sistemas de medición (PNUMA & OMS, 2002). Ambos constituyen las actividades externas (AC) e internas (CC) que permiten obtener información de las redes de monitoreo que cumplan con criterios mínimos de confiabilidad, representatividad, comparación y consistencia (Parra y Patiño, 2005). El AC permite verificar que la gestión del proceso sea óptima garantizando datos de una calidad definida, mientras que el CC corresponde a la implementación de estrategias que garanticen cierta exactitud y precisión de la medición (PNUMA & OMS, 2002). En la Figura 6 se establecen algunos de los aspectos considerados en el desarrollo de un plan de calidad para redes de monitoreo de calidad del aire.

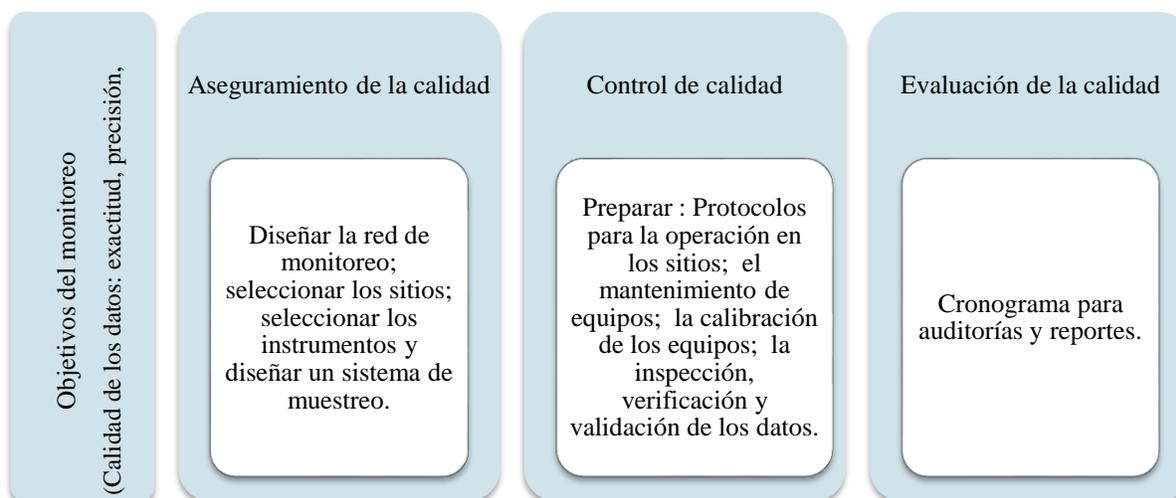


Figura 6. Desarrollo de un plan de aseguramiento y control de la calidad. Adaptado de PNUMA & OMS (2002).

#### 4.4 Experiencias de protocolos a nivel nacional e internacional

El protocolo es el instrumento que permite que el orden y la eficacia comunicativa organizacional se hagan presentes en el correcto desarrollo de determinados actos públicos y privados y que se sirva de las leyes como fuente (Sierra & Sotelo, 2012). Carbajo (2006) citado en Sierra & Sotelo (2012), menciona que las fuentes del protocolo actual son: las costumbres locales, las leyes, los reglamentos, los acuerdos internacionales, las tradiciones y los manuales.

##### 4.4.1 A nivel internacional

Los primeros protocolos relacionados con la calidad del aire fueron suscritos como resultado de los problemas comunes de contaminación ambiental presentes a nivel mundial. Entre los protocolos más importantes se encuentran: el Protocolo de Montreal, el Protocolo de Kioto, el protocolo de Kiev y el Protocolo de Gotemburgo (*Tabla 4*). Estos protocolos han promovido a los gobiernos establecer leyes y políticas para cumplir sus compromisos.

Tabla 4. Protocolos internacionales relacionados con calidad del aire.

Documento	Año	Descripción
Protocolo de Montreal	1987	Ratificación universal para proteger la capa de ozono de la tierra.
Protocolo de Kioto	1997	Compromete a los países industrializados a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero.
Protocolo de Kiev	2003	Primer instrumento internacional jurídicamente vinculante sobre registro de emisiones y transferencia de contaminantes.
Protocolo de Gotemburgo (Modificación)	2020	Establece compromisos de reducción de emisiones legalmente vinculantes para 2020 de contaminantes criterio, COV y NH <sub>3</sub> .

Fuente: Autores, 2021.

#### ***4.4.1.1 África***

La república de Sudáfrica, es el único país en África subsahariana con un programa de monitoreo de calidad del aire (Wetsman, 2018) . Dicho programa se encuentra regulado por la Ley Nacional de Gestión Ambiental de Calidad del Aire en el año 2004 donde según Goitom (2018) se establece una política nacional y un marco regulatorio para la prevención de la contaminación y la mejora de la calidad del aire. Entre los objetivos estipulados en dicha ley incluye la implementación de normas y estándares nacionales para el monitoreo de la calidad del aire (Goitom, 2018).

#### ***4.4.1.2 Asia***

Japón y Alemania fueron los dos primeros países en adoptar normas de calidad del aire en el continente asiático desde los años 1932 y 1964, respectivamente (Clean Air Asia, 2016). En la actualidad, la mayoría de las grandes ciudades de Japón, República de Corea, Singapur y Tailandia exigen estrictos procedimientos de monitoreo de calidad del aire (UNEP, 2019).

Los países asiáticos aplican protocolos técnicos con el fin de contribuir a la reducción y el control de la contaminación del aire, así como minimizar sus efectos transfronterizos en la región. Dichos protocolos abarcan: la implementación y asuntos legales con los estándares de emisión y los impactos socioeconómicos de la contaminación el aire (Khwaja et al., 2012). Por su parte, a nivel país o ciudad, han adoptado estándares de calidad del aire basados, en su mayoría, en directrices internacionales vigentes de la OMS, la EPA y la UE (CAI Asia, 2010).

#### ***4.4.1.3 Europa***

La Unión Europea (UE) ha sido uno de los pioneros en el desarrollo de convenios, protocolos y normativas asociadas en materia de calidad del aire. La política actual “Aire limpio para Europa” se basa en tres pilares: estándares de calidad del aire ambiente, objetivos nacionales de reducción y normas de emisión para fuentes de contaminación (Comisión Europea, 2018). De acuerdo con la legislación europea vigente, los países miembros de la UE dividen sus territorios en diversas zonas de gestión en la que evalúan la calidad del aire utilizando sistemas de medición o de modelización. Para lo cual, deben

elaborar planes locales o regionales de monitoreo de la calidad del aire, de acuerdo a las directivas normativas de la UE (Poirault, 2020).

#### ***4.4.1.4 Estados Unidos***

Durante el mandato de Richard Nixon en 1970 se da inicio a la EPA como respuesta a la necesidad de una política ambiental nacional entre los años 60 y los 70 (Lewis, 1985). En 1972, aparecen las Clean Air Act estadounidenses, que sustituyeron a escala global a la legislación británica como guía en el control y la vigilancia de la calidad del aire y se le otorga a la EPA, desde ese momento, la responsabilidad de establecer límites permitidos para la contaminación del aire y de hacerlos cumplir a escala local e internacional (Ángel Macías & Gallini, 2019).

#### ***4.4.1.5 Latinoamérica y el Caribe***

- **México:** México cuenta con una serie de seis manuales donde se establecen los procedimientos y consideraciones para llevar a cabo las mediciones de calidad del aire realizado por el Sistema Nacional de Información sobre Calidad del Aire (SINAICA) (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2016). Estos manuales se desarrollaron por parte del Instituto Nacional de Ecología (INE) con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón y la EPA (INECC, 2016).
- **Perú:** En Perú se encuentra vigente el primer protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos publicado en el año 2005. Este país designa el monitoreo de la calidad del aire y su evaluación permanente a cargo del Ministerio de Salud a través de la Dirección general de Salud Ambiental-DIGESA (DIGESA, 2005).
- **Chile:** En Chile según Ministerio del medio ambiente (2016) desde el 2005 se inició la implementación del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). Por medio del SINCA se ha publicado un estudio de elaboración de reglamentos y protocolos de procedimientos para el aseguramiento de la calidad de contaminantes atmosféricos (Sanguinet, 2007).
- **Brasil:** En Brasil, el Ministerio del Medio Ambiente designo la gestión de la calidad del aire (GQA) al departamento de Calidad del Aire de la Industria (Ministério de Meio Ambiente, 2018). La GQA tiene la tarea de formular políticas de apoyo y

fortalecimiento institucional para los organismos del Sistema Nacional de Medio Ambiente-SISNAMA; quien a través del Instituto Brasileño del Medio Ambiente y Recursos Renovables-IBAMA se encarga de realizar el monitoreo de calidad del aire. Actualmente, los procedimientos de monitoreo están determinados por medio de diversos actos de legislación estatal; los estándares de calidad del aire están establecidos por la Resolución CONAMA No. 491/2018.

#### 4.4.3 A nivel nacional

En Colombia, en el año 2005, a través del documento CONPES 3344 se aprobó los lineamientos para la formulación de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. En el plan de acción de dicha política se propuso: “El fortalecimiento del programa de monitoreo y seguimiento del aire a nivel nacional, regional y local a través del desarrollo de un protocolo de monitoreo y seguimiento” (DNP, 2005). Por tal razón, el ahora MADS adoptó, el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, mediante la Resolución 650 de 2010 (Ajustado mediante la Resolución 2154 en el año 2010), para que las autoridades ambientales y los particulares que miden calidad del aire cuenten con una herramienta para diseñar SVCA o campañas de monitoreo, cumpliendo con los más altos estándares de calidad.

Desde la adopción del protocolo se ha evidenciado un crecimiento en el número de estaciones y en el número de SVCA (Minambiente & IDEAM, 2018), como se observa en la *Figura 7*. Según el CONPES 3942 donde se define la política para el mejoramiento de la calidad del aire, dichos SVCA deben mejorar el proceso de captura y procesamiento de la información para asegurar la calidad de la información obtenida de los mismos.

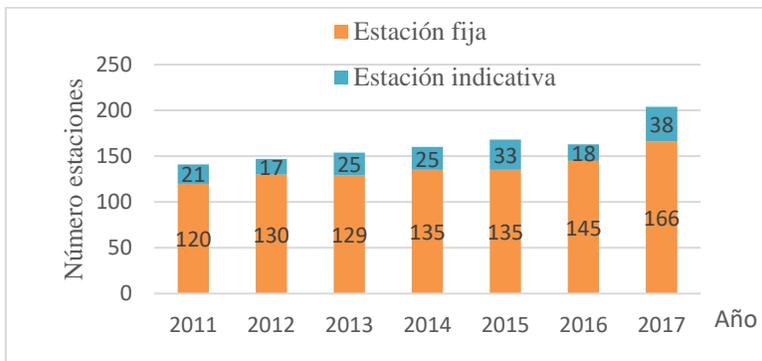


Figura 7. Número de estaciones por año en Colombia 2011-2017. Fuente: Minambiente & IDEAM(2018).

## 4.5. Normatividad nacional e internacional asociada

### 4.5.1 Internacional

La Organización Mundial de la Salud (OMS) definió en el año 2005 guías de calidad del aire en las que recomienda valores para la concentración de contaminantes criterio (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>) como orientación para que los gobiernos fijen metas basadas en sus condiciones locales con el fin de asegurar la protección de la salud (OMS, 2005). A partir de ello, Colombia adoptó los niveles fijados según las metas definidas por el gobierno nacional establecidos en la norma actual de calidad del aire (*Tabla 5*).

Tabla 5. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire adoptados por Colombia y valores guía de la OMS

Contaminante	Valores adoptados por Colombia*		Valores guía de la OMS**	
	Nivel máximo permisible	Tiempo de exposición	Nivel máximo permisible	Tiempo de exposición
PM <sub>10</sub>	50	Anual	20	Anual
	100	24 horas	50	24 horas
PM <sub>2.5</sub>	25	Anual	10	Anual
	50	24 horas	25	24 horas
SO <sub>2</sub>	50	24 horas	20	24 horas
	100	1 hora	500	10 minutos
NO <sub>2</sub>	60	Anual	40	Anual
	200	1 hora	200	1 hora
O <sub>3</sub>	100	8 horas	100	8 horas
CO	5000	8 horas	-	-
	35000	1 hora	-	-

Fuente: \* Norma de calidad del aire de Colombia (Resolución 2254 de 2017) y \*\*OMS (2015).

A nivel internacional se ha tenido como referente las directrices establecidas por la Agencia de protección ambiental (EPA) y la Unión Europea frente a la normatividad relacionada con el monitoreo de la calidad del aire (DNP, 2018). Según (Ángel Macías & Gallini, 2019) desde los años 70, las guías de la EPA se han convertido en protocolos globales estandarizados sobre la calidad del aire en lo que respecta, particularmente, a Sistemas de Monitoreo de calidad del aire. Por su parte, la Unión europea se ha destacado por fundamentar el desarrollo de su política en estudios científicos enfocados a los efectos y consecuencias de los contaminantes atmosféricos y en respuesta a la adopción de

políticas internacionales sobre cambio climático (Agencia Europea de Medio Ambiente-AEMA, 2013). En la *Tabla 6* se relaciona los documentos normativos destacados de la EPA y la UE en lo referente a sistemas de monitoreo de calidad del aire.

Tabla 6. Documentos normativos de EPA y UE relacionados con sistemas de monitoreo de calidad del aire.

Referente	Legislación Clave	Descripción
EPA	CFR 40 Parte 50	Regulaciones de control y reducción de emisiones atmosféricas de fuentes estacionarias y móviles.
	CFR 40 Parte 53	Establece requerimientos generales para de la determinar métodos de referencia y métodos equivalentes
	CFR 40 Parte 58	Apéndice A: relativo a la garantía de calidad, salud y seguridad, captura de datos, incertidumbre de medición, y otras consideraciones "operativas" Apéndice C: relacionado con las metodologías de monitoreo de calidad del aire aprobadas y designadas Apéndice D: Criterios de diseño de la red de monitoreo. Apéndice E: Relacionado con la ubicación del sitio
UE	“Directiva Marco de calidad del aire” (96/62/EC)	Abarca lo relacionado con la evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente.
	Directiva de calidad del aire ambiente y aire más limpio para Europa (2008/50/EC)	Fusiona y sustituye las directivas 96/62/EC, 99/30/EC, 2000/69/EC, 2002/3/EC y las decisiones del consejo 97/101/EC, 97/101/EC, 1997.

Fuente: Autores (2021).

#### 4.5.2 Nacional

A partir de la expedición del Decreto 948 de 1995, por medio del cual estableció el reglamento para la prevención y control de la contaminación del aire, y hasta la fecha, el MADS ha realizado la expedición y adopción de diversas normas que incluyen, entre otros, estándares para calidad del aire, mecanismos de seguimiento y control y protocolos de medición (IDEAM, 2017), tal como se observa en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Normatividad asociada a Monitoreo de Calidad del Aire en Colombia.

Norma	Descripción
Decreto 948 de 1995 (Ministerio de medio ambiente)	Reglamenta medidas para la prevención y control de la contaminación atmosférica y protección de la calidad del aire.
CONPES 3344 (Departamento de Planeación)	Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire Nacional

Decreto 979 de 2006 (Presidencia de la república)	Modifica el Decreto 948 de 1995 en lo referente Niveles de prevención, alerta y emergencia, medidas para la atención de episodios de contaminación, planes de contingencia y la clasificación de áreas fuente de contaminación.
Resolución 601 de 2006 (MAVDT <sup>4</sup> )	Establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.
Resolución 909 de 2008 (MAVDT <sup>4</sup> )	Establece las normas y los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas.
Resolución 910 de 2008 (MAVDT <sup>4</sup> )	Reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres.
Resolución 650 de 2010 (MAVDT <sup>4</sup> )	Adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (modificado por la Resolución 2154 en el año 2010).
Resolución 651 de 2010 (MAVDT <sup>4</sup> )	Crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRES y asigna responsabilidades al IDEAM de su administración y a las autoridades ambientales para la alimentación de la información previamente depurada
Resolución 760 de 2010 (MADVT <sup>4</sup> )	Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.
Decreto 1076 de 2015 (MADS <sup>5</sup> )	Compiló el Decreto 948 de 1995 (Reglamento para la prevención y el control de la contaminación del aire) y sus modificaciones.
Resolución 2254 de 2017 (MADS <sup>5</sup> )	Actualiza la Norma Nacional de Calidad del Aire y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire para garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana.
CONPES 3943 DE 2018 (Departamento Nacional de Planeación)	Política para el mejoramiento de la calidad del aire

Fuente: Autores (2021).

<sup>4</sup> MAVDT: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

<sup>5</sup> MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Descripción del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire

El protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire es un elemento normativo adoptado a nivel nacional por medio de la resolución 650 de 2010 y modificado por medio de la resolución 2154 de 2010. Este documento ha sido objeto de divulgación y aplicación por parte de las autoridades ambientales y entidades privadas a cargo de la operación de los SVCA en el país. Este protocolo presenta los requerimientos técnicos para la adecuada implementación de SVCA en el país. Actualmente son 26 SVCA operados por autoridades ambientales (Minambiente & IDEAM, 2018) ubicados en 91 municipios (Minambiente et al., 2018) . Así mismo, según IDEAM (2019a) existen 54 áreas a nivel nacional que cumplen con los criterios fijados por el protocolo que establecen la necesidad de realizar mediciones de calidad del aire en su jurisdicción. Basado en esto, el siguiente trabajo tiene un impacto nacional en las diferentes regiones que se encuentran operando SVCA (*Figura 8*) y aquellas que requieren implementarlo (*Figura 9*).

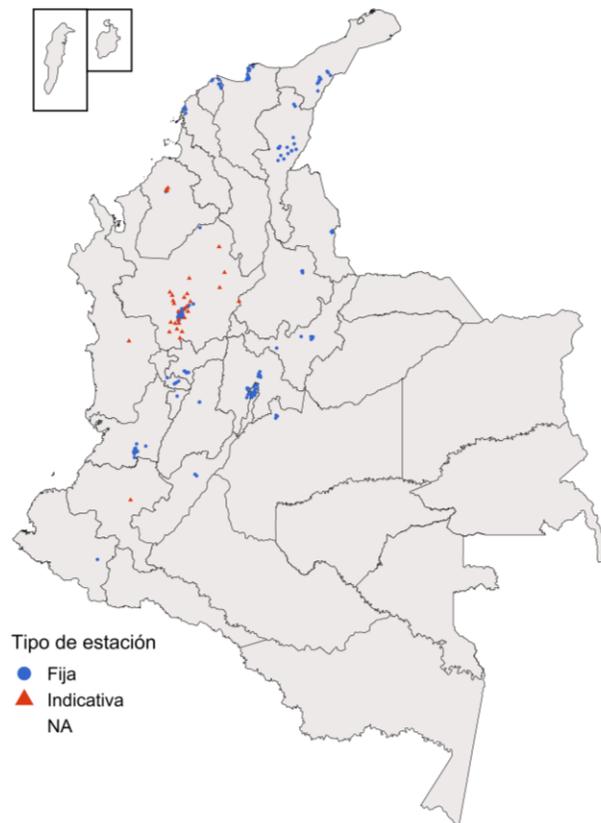
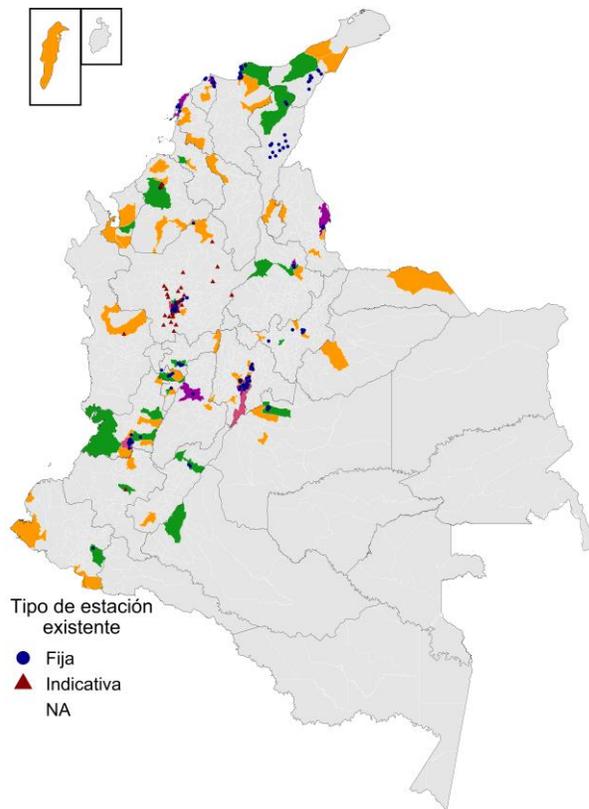


Figura 8. Ubicación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire en Colombia. Fuente: IDEAM (2018).



<i>Departamento</i>	* <i>Tipo SVCA</i>
<b>Antioquia</b>	4 <i>Indicativo</i>
<b>Arauca</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Atlántico</b>	2 <i>Indicativo</i>
<b>Bolívar</b>	4 <i>Indicativo</i>
<b>Boyacá</b>	3 <i>Indicativo</i>
<b>Caldas</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Caquetá</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Casanare</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Cauca</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Cesar</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Córdoba</b>	3 <i>Indicativo</i>
<b>Cundinamarca</b>	5 <i>Indicativo</i>
<b>Huila</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>La Guajira</b>	3 <i>Indicativo</i>
<b>Magdalena</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Meta</b>	2 <i>Indicativo</i>
<b>Nariño</b>	2 <i>Indicativo</i>
<b>Norte de Santander</b>	4 <i>Indicativo</i>
<b>Quindío</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Santander</b>	3 <i>Indicativo</i>
<b>Sucre</b>	2 <i>Indicativo</i>
<b>Tolima</b>	1 <i>Indicativo</i>
<b>Valle del Cauca</b>	6 <i>Indicativo</i>
*Número de municipios que requieren implementar SVCA	

CRITERIOS DEL PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE			
Tamaño Poblacional	Tipo de SVCA a implementar	No. Mínimo de estaciones	Contaminantes por evaluar
Menor o igual a 50.000	Especial	Dependerá de la existencia de problemas específicos	Mínimo PM10
Entre 50.001 y 150.000	Indicativo	2 (en campaña)	Mínimo PM10
Entre 150.001 y 500.00	Básico	2 (fijas)	Mínimo PM10
Entre 500.001 y 1.500.000	Intermedio	3 (fijas)	Mínimo PM10, PM2.5, Ozono
Mayor a 1.500.000	Avanzado	4 (fijas)	Mínimo PM10, PM2.5, Ozono

Figura 9. Municipios que no cuentan con SVCA según los criterios del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Fuente: IDEAM (2018).

El actual protocolo está integrado por dos manuales: manual de diseño de SVCA y manual de operación de SVCA. El primero se compone de ocho capítulos y el segundo de siete capítulos, respectivamente. Entre los temas relacionados se encuentra: la definición de tipo de SVCA, parámetros de diseño de un SVCA, modificación de estaciones de SVCA, recursos necesarios para el montaje, operación y seguimiento de SVCA, entre otros. En la *Figura 10*, se relacionan las etapas contenidas en dichos manuales.

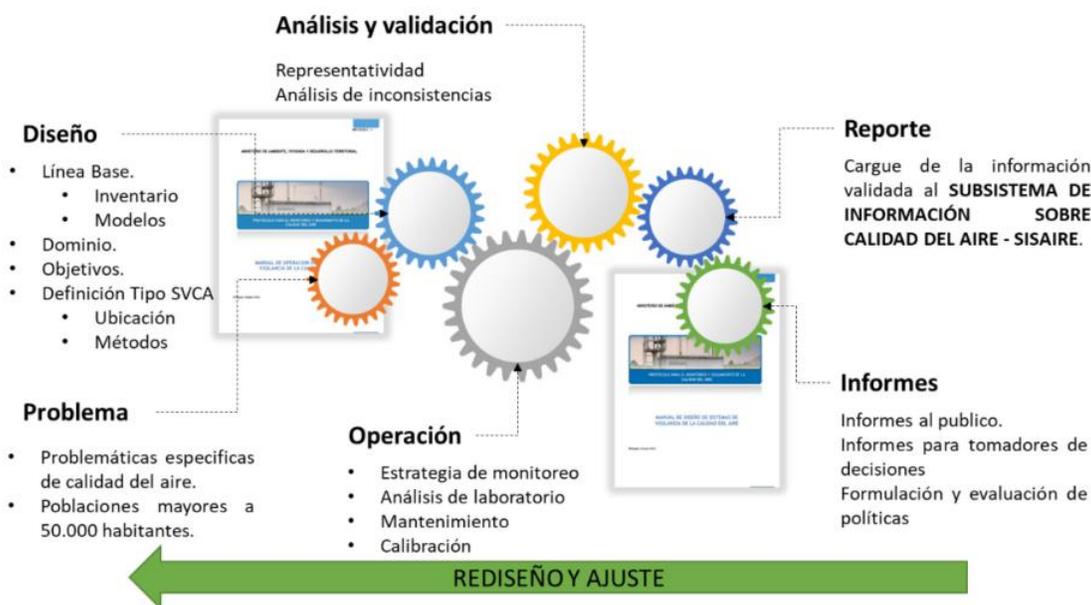


Figura 10. Proceso de implementación de un SVCA en Colombia. Fuente: IDEAM (2017).

## 5.2 Recolección de la información

Las fuentes de información en el siguiente trabajo constan de fuentes primarias y secundarias de carácter cualitativo. A continuación, se especifican cada una de ellas:

- 1- Fuentes primarias de información: A través del desarrollo de grupos de discusión aplicando la técnica de grupos focales y reuniones con expertos en el tema.
- 2- Fuentes secundarias documentales: Publicaciones de investigación, normas estatales, legales y elementos normativos relacionados con monitoreo y vigilancia de calidad del aire por parte de SVCA a nivel nacional e internacional.

La recolección de la información se realizó por medio del método de recolección de datos relacionado según Escobar & Bonilla (2009) como grupos de discusión a través de grupos focales, y se utilizó un método de revisión sistemática de literatura basada en la metodología sugerida por Ome & Zafra (2018). La revisión de la información se realizó de

manera manual y se consolidó a través de la matriz comparativa, la cual relaciona los criterios para la operación y diseño de SVCA con respecto al contenido presentado en revisión nacional e internacional. El procesamiento de información y el desarrollo de tablas y gráficos se realizó en Microsoft Excel y el análisis estadístico de la información se realizó con el software estadístico IBM SPSS (Paquete Estadístico, V. 24.0.0).

### 5.3 Metodología

El desarrollo metodológico del presente proyecto está dividido en cinco fases (*Figura 11*), las cuales están orientadas a cumplir con los objetivos planteados y resolver la pregunta problema propuesta en el capítulo 1. A continuación, se detalla cada una de las fases desarrolladas.

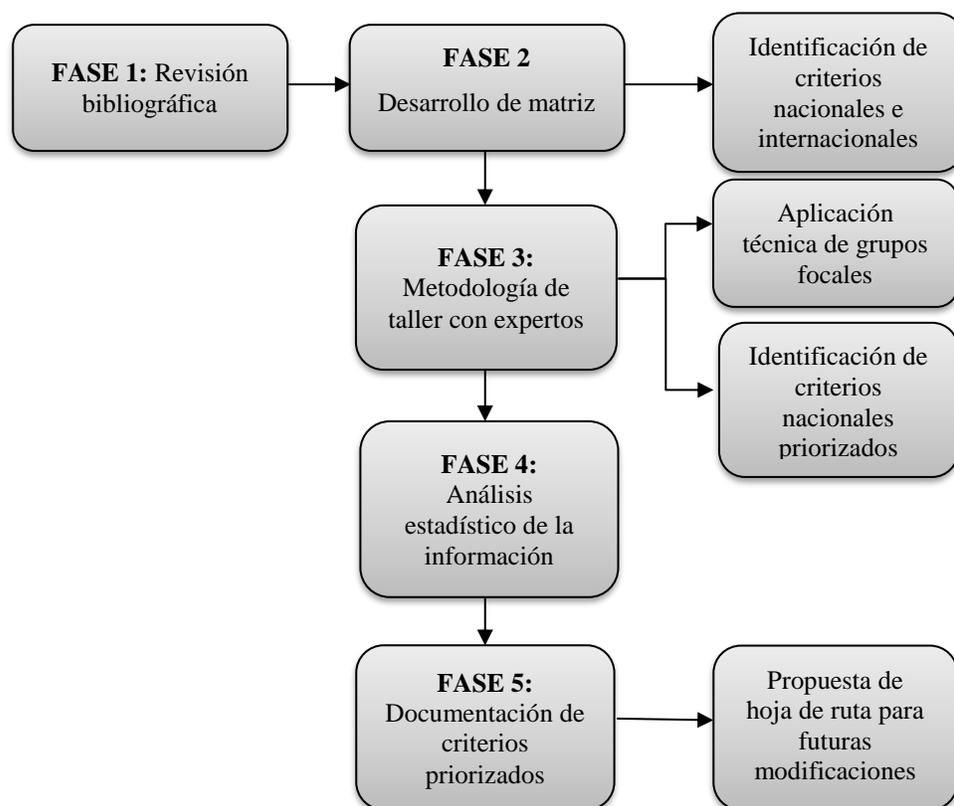


Figura 11. Fases de metodología de trabajo. Fuente: Autores (2021).

#### 5.3.1 Fase 1: Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica basado en el sistema de búsqueda bibliográfico utilizado por (Ome et al., 2018). La revisión de literatura se realizó para el periodo 2005-2019 sobre el contenido total de artículos y libros depositados en las siguientes bases de

datos: (i) Science Direct (ii) Scopus y (iii) Google Scholar. En la primera fase de búsqueda bibliográfica se utilizaron las siguientes palabras clave: (i) air urban quality (calidad del aire urbano) y (ii) monitoring network (red de monitoreo). En esta primera fase, se detectaron 220000, 26248 y 24406 documentos en las bases de datos Google Scholar, Scopus y Science Direct, respectivamente.

Tabla 8. Identificación de documentos en la primera fase de búsqueda bibliográfica.

Fase	Palabras clave	Key Word	Science Direct		Scopus		Google Scholar	
			Documentos detectados	Índice	Documentos detectados	Índice	Documentos detectados	Índice
1	Calidad del aire urbano y red de monitoreo	Urban Air quality and monitoring network	24406	1	26248	1	220000	1

Fuente: Autores (2021)

Se realizó una segunda revisión para identificar las palabras clave adicionales que permitieron establecer los factores priorizados para el diseño y operación de redes de monitoreo de calidad de aire. Estas palabras se clasificaron por orden de relevancia y su selección fue conforme al contenido del actual protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (MADVT, 2010a; MADVT, 2010b). Las bases de datos consultadas se utilizaron con el fin de establecer un orden de importancia para los factores clave, identificados a partir de su frecuencia de citación en documentos científicos (Ome et al., 2018). Al respecto, se asumió que los factores clave más significativos para el diseño y operación de redes de monitoreo de la calidad del aire fueron frecuentemente citados o reportados por las bases de datos consultadas (Ome et al., 2018).

Se utilizó un índice de frecuencia de citación (Q), que relacionó el número de documentos detectados en la primera y segunda fase de la metodología de revisión utilizada (Ome et al., 2018). Este índice establece un rango de variación de acuerdo con el orden de importancia de los factores encontrados según la frecuencia de citación y relaciona cada factor revisado en la fase dos respecto al descriptor temático de la fase uno (Tabla 9).

Tabla 9. Índice de frecuencia de citación.

Índice de frecuencia	Rango de variación
Q1	0,0-0,25
Q2	0,25-0,5
Q3	0,5-0,75
Q4	0,75-1,0

Fuente: Adaptado de Ome et al. (2018).

## **5.3.2 Fase 2: Desarrollo de la matriz**

### **5.3.2.1 Identificación de criterios nacionales e internacionales**

La elaboración de la matriz tuvo como fin identificar los criterios de monitoreo de calidad del aire priorizados a nivel nacional e internacional. Para su desarrollo se utilizó la base de datos Scopus y se tuvo en cuenta las palabras clave seleccionadas para la primera fase de la metodología. En la matriz se visualiza el índice de frecuencia de citación (Q) de factores y criterios clave para el diseño y operación de redes de monitoreo de calidad del aire por cada uno de los países referentes en su implementación en Norte América, Europa, Asia y América latina y el Caribe. Los criterios se clasificaron inicialmente de acuerdo con el índice contenido en el actual protocolo y posteriormente se estableció su orden de relevancia a partir del índice promedio (Q) de acuerdo con la metodología propuesta por Ome et al. (2018).

Se abordó las directrices establecidas por la EPA y la Unión Europea ya que según varios autores (e.g., Kuklinska et al., 2015; DNP, 2018; Ángel Macías et al., 2019; Doyle, 2019), a nivel internacional se han tenido como referentes en la normatividad y estrategias propuestas para realizar el monitoreo y vigilancia de la calidad del aire. Basado en lo anterior, se calculó el índice de frecuencia de citación para Estados Unidos, España, Francia e Italia; estos tres últimos países corresponden a los estados con mayor cantidad de sitios de muestreo teniendo la red de monitoreo de calidad del aire más completa de la región europea (European Environment Agency, 2016). También se realizó la revisión bibliográfica de Reino Unido, considerando que con su salida de la UE su marco normativo ambiental podría registrar modificaciones (Harrabin, 2019).

Para el caso de Asia, la revisión se centró en Japón e India. Según la (UNEP, 2019) Japón presenta estrictos procedimientos de monitoreo basado en la regulación normativa, y en India según MoEF(2006) citado por (UNEP, 2019) se ha fortalecido la política integral que incluye la adopción de tecnologías de energía renovable junto con la reducción de la contaminación, la vigilancia reforzada y aplicación de las normas de emisiones para diferentes fuentes. Adicionalmente, se calculó el índice de citación para documentos depublicados por Brasil, Chile, Colombia y México, ya que Riojas et al. (2016) indicaron que en América latina y el Caribe, los mejores sistemas de monitoreo de calidad del aire para ciudades y cobertura de población se encontraron en dichos países, los cuales

presentan una red de monitoreo distribuida en sus principales ciudades. Los demás países de América latina y el Caribe tenían para el año 2016, algún tipo de datos de calidad del aire solo para la ciudad capital (Riojas et al., 2016).

Posterior a la identificación de criterios priorizados a nivel internacional, se revisó de manera detallada 80 documentos académicos y 30 documentos normativos vigentes publicados entre el 2005-2019 en los países objeto de revisión. Esto con el fin de abordar los estándares internacionales establecidos en cada uno de ellos e identificar las principales diferencias y similitudes con los estándares colombianos.

### **5.3.3 Fase 3: Metodología de taller con expertos**

#### **5.3.3.1 Aplicación técnica de grupos focales**

La metodología seleccionada para el taller con expertos se basa en la técnica de grupo focal. El grupo focal se centra en la interacción dentro de un grupo, la cual gira alrededor de un tema propuesto por el investigador (Escobar & Bonilla, 2009). Dentro de las situaciones de aplicación de esta técnica se relaciona, según Escobar et al. (2009), la identificación de necesidades y reconocer variables pertinentes a abordar dentro de una investigación. Por su parte, algunos autores consideraron que los participantes son seleccionados porque tienen alguna experiencia en común o personal que resulta de interés para el estudio (e.g., Boucher, 2003; Kinnear et al., 1998; Mayan, 2001; Prieto, 2007; Rigler, 1987 y Wolff et al., 1993) citado por Escobar et al. (2009).

Previo a la ejecución del taller y basado en la metodología de grupos focales, se tuvo en cuenta una etapa de preparación donde se consideraron los aspectos señalados en la *Figura 12*. A partir de la distinción de interesados (consultoras, laboratorios, autoridades ambientales, academia y gremios), se programó una sesión por cada uno de estos grupos con el fin de asegurar la representatividad y heterogeneidad de los diferentes actores. En cada una de las sesiones, se propusieron siete mesas de trabajo rotativas según las temáticas gruesas contenidas en el protocolo: Diseño de SVCA, Operación de SVCA, SVCA operados por autoridades ambientales, SVCA operados por Industriales, Métodos y Equipos de Medición, Operación de SVCA, y Gestión de la información. Posteriormente, se subdividió el grupo de asistentes, quienes fueron pasando por cada una de las mesas de trabajo donde se aplicaron las tres primeras fases de la técnica de grupos focales consignada en la *Figura 13*.

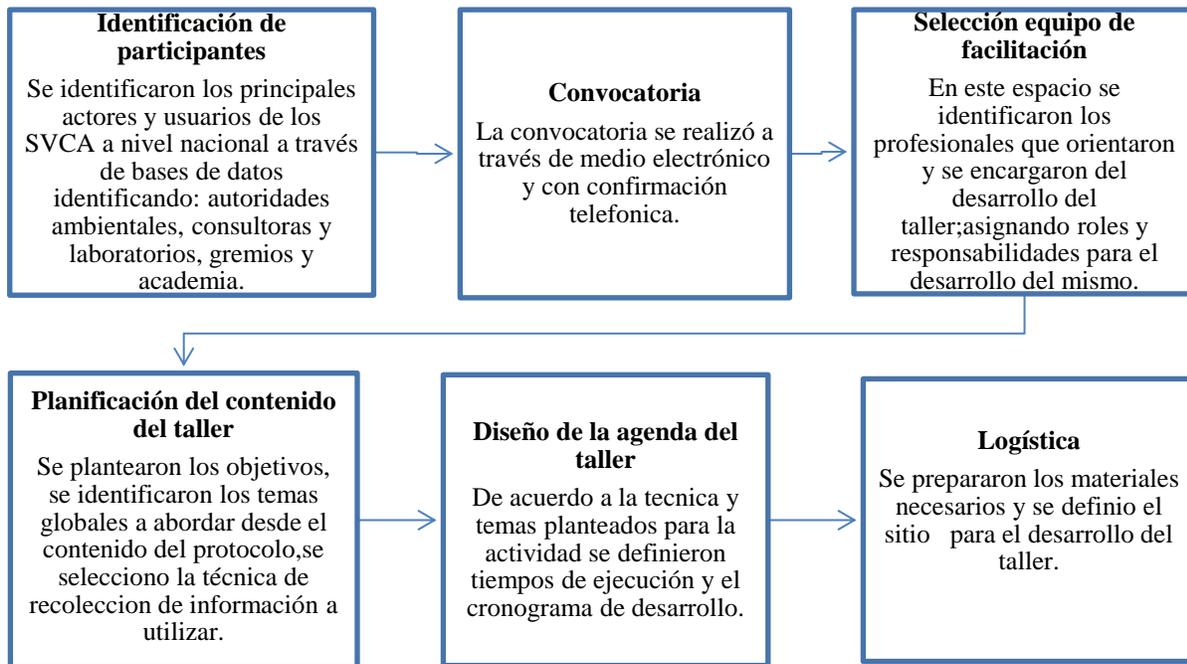


Figura 12. Etapa de preparación de talleres con expertos. Fuente: Autores (2021).

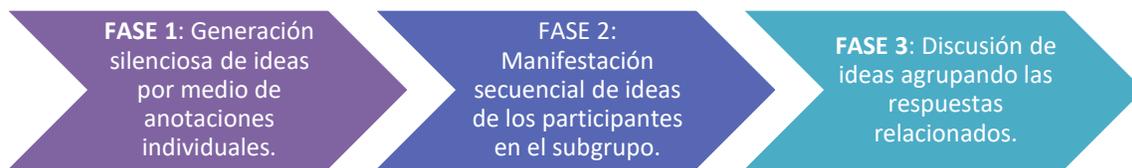


Figura 13. Etapa de ejecución de taller con expertos. Fuente: Autores (2021).

### 5.3.3.2 Identificación de criterios nacionales priorizados

La identificación de criterios nacionales obtenidos a partir de la técnica de grupos focales se realizó mediante el método mixto de análisis de datos propuesto por Onwuegbuzie & Combs (2011), el cual consiste en complementar los datos cualitativos con análisis de carácter cuantitativo utilizando conteos. Según Sandelowski (2001), cuando se contextualiza las temáticas abordadas en un estudio cualitativo, los conteos pueden brindar información más completa que la que se obtiene únicamente mediante el uso de datos cualitativos.

Basado en lo anterior, se realizó un conteo de respuestas relacionados con cada una de las temáticas relacionadas en la matriz construida en la fase dos de la metodología. Las

respuestas obtenidas de los asistentes al taller se categorizaron en una temática o palabra clave relacionada a en dicha matriz estableciendo una frecuencia de mención. Cuando se procede de esta manera, la enumeración de la frecuencia de un determinado punto de vista o experiencia permite expandir el conjunto de datos ya que ayudan a que las temáticas emergentes sean situadas en un contexto más significativo haciendo que la información obtenida sea representativa (Onwuegbuzie et al., 2011b). Una vez establecida la frecuencia de mención para cada temática o palabra clave, se estableció el índice de frecuencia según lo establecido por Ome et al. (2018) en la *Tabla 9*.

El análisis de información obtenida del taller con expertos nacionales se realizó aplicando la técnica de análisis de comparación constante considerando que se trataron múltiples grupos dentro del mismo estudio (Onwuegbuzie et al., 2011b). Según Charmaz (2000), el análisis de múltiples grupos focales sirve como sustituto del muestreo teórico; es decir, cuando se realiza un muestreo adicional para evaluar la significancia de las temáticas y poder refinarlas.

#### **5.3.4 Fase 4: Análisis estadístico de la información**

Se aplicaron las siguientes pruebas estadísticas para el análisis de datos durante la revisión bibliográfica. Inicialmente, se utilizó la prueba de Kolmonorov-Smirnov para contrastar la normalidad del conjunto de datos (variables) y determinar el coeficiente de correlación (Pearson o Spearman) que mejor se ajustara a la distribución de los datos. Según Guisande et al. (2012), esta prueba es adecuada para determinar la normalidad de una muestra si el número de datos es grande ( $n > 30$ ) y se aplica a variables continuas, como es el caso del siguiente trabajo. La prueba arrojó una muestra no paramétrica para los criterios analizados, es decir, no siguen una distribución normal y no existe una relación lineal entre las variables (Restrepo & Gonzales, 2007); razón por la cual se calculó el coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman.

El rango que toma este coeficiente va desde -1 a 1. Mientras más tienda a 0 implicará menor correlación y mientras más tienda a 1 o -1 implicará mayor correlación (Galindo, 2020). Un valor de correlación positiva supone una relación directa entre las variables (las dos aumentan gradualmente), mientras que una correlación negativa supone una relación

inversa entre las variables (A medida que aumenta una, decrece la otra) (Galindo, 2020).

Una interpretación aproximada del valor de Spearman se muestra en la *Tabla 10*.

Tabla 10. Grado de relación según coeficiente de correlación

<b>Rango</b>	<b>Relación</b>
-1,0	Correlación negativa grande y perfecta
-0,90 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
+0,01 a +0,19	Correlación positiva muy baja
+0,2 a +0,39	Correlación positiva baja
+0,4 a +0,69	Correlación positiva moderada
+0,7 a +0,89	Correlación positiva alta
+0,9 a +0,99	Correlación positiva muy alta
+1,00	Correlación positiva grande y perfecta

Fuente: Martínez y Campos, 2015.

### **5.3.4 Fase 5: Documentación de criterios**

En esta última fase, se elaboró el documento soporte con recomendaciones y aportes sugeridos para el ajuste y actualización del protocolo. Con esta información, se espera resaltar los criterios priorizados y considerar aspectos que han sido implementados en otros países como opción de implementación en Colombia. Se tuvo en cuenta los resultados de la revisión bibliográfica a nivel nacional e internacional consignados en la matriz y el desarrollo de los talleres con expertos nacionales. A partir de esta información, se planteó una hoja de ruta para la actualización y modificación del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, donde se tiene en cuenta aquellos criterios que deben priorizarse con base a las necesidades actuales de los diferentes actores y las dinámicas globales.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Identificación de criterios técnicos para la implementación de SVCA

En este capítulo se presenta el índice de citación Q a través del cual se relaciona el nivel de importancia de los criterios clave identificados en la primera parte de la revisión, después de aplicar la metodología propuesta en el capítulo 5. Se identificaron los principales criterios clave en el diseño y operación de redes de monitoreo de calidad del aire urbano a nivel mundial y en los países referentes seleccionados. Se encontró que los documentos publicados por los países referentes abordaron principalmente criterios relacionados con el análisis de datos (23,2%), la fase diagnóstica (13,8%), los parámetros de medición (13,7%) y el reporte y divulgación de información (12,5%) (Figura 14). Los resultados de la revisión en dichos países coincidieron con los resultados para la revisión bibliográfica en Colombia, según lo consultado en las bases de datos seleccionadas (22,2%, 12,19%, 10,83% y 14,14%, respectivamente). En la tabla 41 se muestran los principales criterios priorizados para cada ítem en orden de relevancia y categorizados con base en el contenido del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire publicado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MADVT) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2010).

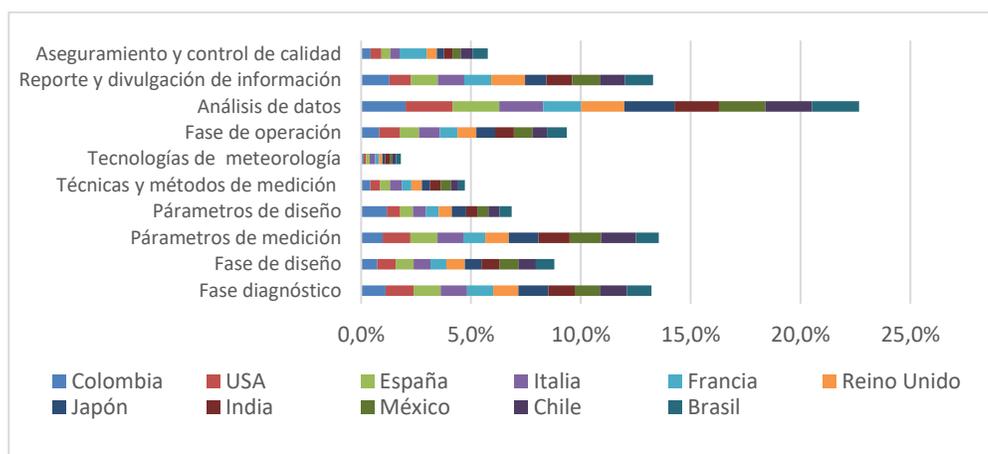


Figura 14. Ítems priorizados a nivel internacional para el diseño y operación de redes de monitoreo.

Tabla 11. Criterios priorizados para el diseño y operación de SVCA a nivel internacional.

No.	Ítem	Criterio	Numero de publicaciones	i	Q
1	Análisis de datos	Cálculo de ICA	16650	0,735	Q3
2	Fase de operación	Sistematización de datos	16654	0,703	Q3

No.	Ítem	Criterio	Numero de publicaciones	i	Q
3	Fase diagnóstico	Modelización preliminar	15904	0,672	Q3
4	Parámetros de diseño	Macro localización	13078	0,566	Q3
5	Reporte y divulgación de información	Reporte de información	9926	0,538	Q2
6	Fase de diseño	Tipo de SVCA	8675	0,483	Q2
7	Parámetros de medición	Ozono	7250	0,321	Q2
8	Control de calidad	Plan de calidad	4014	0,202	Q1
9	Técnicas y métodos de medición	Métodos de referencia	4366	0,161	Q1
10	Tecnologías de meteorología	Clases de estaciones meteorológicas	2671	0,147	Q1

Nota. I: Índice promedio de citación. Q: Cuartil promedio (Q) de citación. Fuente: Autores.

### 6.1.1. Fase de diagnóstico

Los resultados evidenciaron que, en orden de relevancia, el principal criterio tenido en cuenta a nivel mundial en la fase de diagnóstico es la modelización (Q3 = 0,55), seguido de la meteorología, inventarios de emisión y campañas de monitoreo preliminar (ver *Tabla 11*). De igual manera, para los países seleccionados la modelización es un criterio importante a nivel internacional ya que el cuartil promedio fue sobresaliente respecto a los demás (Q4 = 0,67) como se observa en el *Anexo 2*. Esto demuestra que la modelización juega un papel importante en la formulación de estrategias y gestión de la contaminación del aire proporcionando directrices para una planificación eficiente de la calidad del aire (Gulia et al., 2015).

En la *tabla 12* se mencionan los modelos utilizados por los países objeto de revisión de los cuales se obtuvo información. Otros países como México y Brasil, mencionan en su normativa la importancia de incorporar modelos de dispersión para definir el posicionamiento adecuado de las estaciones de monitoreo, sin embargo, no recomiendan modelos específicos a implementar. La normativa de los demás países revisados en el *Anexo 2* no incluye recomendaciones específicas sobre los modelos permitidos o los procedimientos relacionados con la modelización. En general, los criterios considerados al seleccionar los modelos a utilizar fueron tipo de contaminante, distancia de la estación meteorológica, inventario de emisiones y modelo de transporte químico.

Tabla 12. Modelos de calidad del aire implementados a nivel internacional.

País	Modelo	Tipo de fuente	Descripción
Colombia, EPA	CALINE 4	Móviles	Modelo gaussiano. Puede predecir concentraciones de contaminantes para receptores ubicados dentro de los 500m de la calzada.
Colombia, EPA	CAL3QHC-R	Móviles	Basado en microcomputadoras. Utilizado en cercanías de caminos
Colombia, Chile, EPA	AERMOD	Fijas	Modelo de estado estacionario para campo cercano (<50km)
Colombia, EPA	ISCST	Fijas	Modelo de pluma Gaussiana de corto plazo (periodos horarios)
Colombia, Chile, EPA	CALPUFF	Fijas	Modelo de soplo langragiano para campo lejano (>50km)
Chile	WRF-Chem	Fijas	Modelo químico para resoluciones cortas (3-6km)
Chile	CAMx	Fijas, Tráfico	Modelo fotoquímico Euleriano que se puede utilizar a escalas urbanas
Chile	CMAQ	Fijas	Utilizado en estudios epidemiológicos. Resoluciones de 8km a 36km.
Unión europea	ADMS	Fijas	Modelo Gaussiano usado a nivel local

Fuente: Autores (2021)

### 6.1.2 Fase de diseño de SVCA

Uno de los criterios tenidos en cuenta para revisar y evaluar el estado y la tendencia de la calidad del aire a nivel internacional es el número de habitantes y la población urbana (Peláez et al., 2020). Este criterio está relacionado con la representatividad espacial de la vigilancia de la calidad del aire y está vinculado a la evaluación de riesgos en la salud, exposición de la población a la contaminación del aire, modelado de calidad del aire y asimilación de datos (Munir et al., 2019; Duyzer et al., 2015). Se determinó que este es un criterio importante a nivel mundial ( $Q = 0,50$ ) y en países referentes en el monitoreo de la calidad del aire ( $Q = 0,35$ ) (*Anexo 3* y *Anexo 4*, respectivamente).

En Colombia, el protocolo actual contempla el número de habitantes como información determinante en el diseño y selección de tipo de SVCA a implementar en cada región (*Tabla 13*); una vez se selecciona el tipo de SVCA que más se ajusta a las condiciones del lugar, se indica el tipo de tecnología, tiempo de monitoreo, periodicidad, número de estaciones y parámetros a medir (MADVT, 2010a). Para el caso específico de India, la normatividad recomienda un mínimo de estaciones basados en el parámetro de monitoreo y el número de habitantes (*Tabla 14*). En Japón, México, Chile y Brasil se menciona la cantidad de habitantes como criterio para establecer estaciones de monitoreo

representativas, sin detallar información específica sobre la metodología utilizada para su incorporación. En Reino Unido el DEFRA (2019) exige a las autoridades locales determinar áreas de excedencia por medio de herramientas SIG y modelación local con el fin de estimar la cantidad de personas expuestas a concentración de contaminantes por encima de los objetivos para determinar áreas de gestión de la calidad del aire (AQMA).

En general, se plantea la necesidad de determinar la ubicación de estaciones de monitoreo incorporando información relacionada con la concentración de contaminación del aire ponderada por población y variación ponderada espacial, teniendo en cuenta la densidad poblacional, concentraciones de contaminación y variabilidad espacial de la contaminación (Munir et al., 2019). A partir de eso, se sugiere el uso de curvas de exposición de la población construidas en base a modelos de concentraciones y datos censales con el fin de comparar la exposición en diferentes sitios y seleccionar los puntos de ubicación de estaciones de monitoreo (Munir et al., 2019). Por su parte, Brauer et al. (2019) estimó una densidad mínima de monitoreo de 4 monitores por 100000 habitantes (para áreas urbanas).

Tabla 13. Tipo de SVCA de acuerdo al número de habitantes.

Tipo de SVCA	Número de habitantes
<b>Tipo I: Indicativo</b>	Población entre los 50.000 y 149.999 habitantes
<b>Tipo II: Básico</b>	Población entre los 150.000 y 499.999 habitantes
<b>Tipo III: Intermedio</b>	Población entre los 500.000 a 1.499.999 habitantes
<b>Tipo IV: Avanzado</b>	Población concentrada igual o mayor a 1.500.000 habitantes
<b>SEVCA: Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire</b>	Cualquier población con problemáticas específicas de calidad del aire
<b>SVCAI: Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire Industrial.</b>	Aplicado a actividades a las que la autoridad ambiental establezca la obligación de implementar un SVCA

Fuente: MADVT (2010b).

Tabla 14. Relación del número de habitantes, parámetros de monitoreo y número de estaciones.

Parámetro de monitoreo	de Población	Número de estaciones
<b>SPM</b>	<100000	4 estaciones
	100000-1'000000	4 estaciones + 0,6 por cada 100000 habitantes
	1000000-5000000	7,5 + 0.25 por cada 100000 habitantes
	>5'000000	12 + 0,16 por cada 100000 habitantes
<b>SO<sub>2</sub></b>	<100000	4 estaciones
	100000-1'000000	2,5 + 0,5 por cada 100000 habitantes
	1'000000-10'000000	6+0,15 por cada 100000 habitantes
	>10'000000	20 estaciones
<b>NO<sub>2</sub></b>	<100000	4
	100000-1'000000	4 + 0,6 por cada 100000 habitantes
	>1'000000	10
<b>CO</b>	<100000	1
	100000-5'000000	1 + 0,5 por cada 100000habitantes

### **6.1.3. Parámetros de medición**

Los parámetros de medición priorizados a nivel mundial fueron el Ozono (Q1 = 0,20) y los contaminantes atmosféricos tóxicos (Q1 = 0,16) (*Anexo 5*). Por su parte, se encontró que los estudios publicados en los países objeto de revisión son el Ozono (Q2 = 0,32) y el carbono negro (Q1 = 0,19) (*Anexo 6*) mostrando que las emisiones antropogénicas son los principales contribuyentes a los niveles de concentración de contaminantes del aire atmosférico (Miranda et al., 2014). Así mismo, se encontró que, el tráfico rodado parece ser el grupo de fuentes más importante que contribuye a la contaminación del aire, especialmente en los centros de ciudades de países en desarrollo (Ozden y Dogeroglu, 2008). A continuación, se aborda los parámetros de medición: Ozono y carbono negro.

#### **6.1.3.1 Ozono**

El exceso de ozono en el aire puede tener un marcado efecto en la salud humana ya que puede causar problemas respiratorios, provocar asma, reducir la función pulmonar y causar enfermedades pulmonares (WHO, 2018). Esto se evidencia en el último informe sobre la calidad del aire en Europa donde se indicó que las implicaciones de la contaminación del aire se deben principalmente a los altos niveles de material particulado (PM) y ozono (O<sub>3</sub>) en la atmósfera (AEMA, 2013). Se evidenciaron concentraciones más altas de ozono durante la temporada de verano, lo cual puede atribuirse a su formación en presencia de precursores y luz solar (Ozden et al., 2008). Algunos precursores mencionados por (Ellis et al., 1999; MCAQD, 2009) citados por (Pope et al., 2014), son los compuestos orgánicos volátiles (COV), CO y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Basado en lo anterior, la EPA<sup>6</sup> recomienda que en las estaciones de monitoreo de ozono (evaluación fotoquímica) se realicen mediciones de óxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno verdadero y nitrógeno reactivo.

Así mismo, Peláez et al. (2020) sugiere que debe realizarse un monitoreo estricto al ozono en zonas con características geográficas y climáticas con altas temperaturas y radiación

---

<sup>6</sup> 40CFR Parte 58; apéndice D ítem 5

solar en la mayor parte del año. Dichas estaciones deben hacer la medición de información meteorológica de temperatura ambiente, dirección del viento, presión atmosférica, humedad relativa, precipitación por hora, altura de mezcla, radiación solar, promedio de radiación ultravioleta<sup>6</sup>. Finalmente, se sugiere que las mediciones se hagan a sotavento de zonas urbanizadas para detectar concentraciones máximas (AEMA,2013) y en escalas espaciales de vecindario, urbano y regional (40CFR Parte 58; apéndice D ítem 5). La frecuencia de monitoreo, los métodos de medición y los estándares definidos en los países revisados se detallan en la *Tabla 15*.

#### **6.1.4.2. Carbono negro**

El carbono negro representa más de la mitad de la masa de PM<sub>2.5</sub> de los motores diésel bajo carga y es motivo de especial preocupación (Ban-Weiss et al., 2009). Una evaluación realizada por Ramanathan et al. (2008) citado por Ban-Weiss et al. (2009), indicó que el carbono negro es el segundo mayor contribuyente al calentamiento global (después del CO<sub>2</sub>) y altera las precipitaciones regionales y los albedos de nieve y nubes. A pesar de su impacto, en la normatividad revisada en este estudio no se encontraron estándares de medición con valores máximos permitidos de emisión para el monitoreo del carbono negro. El protocolo actual de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire menciona la Aetalometría, como una de las técnicas de medición del carbono negro, basada en la absorción de radiación electromagnética de algún tipo determinado de material particulado suspendido en el aire (MADVDT, 2010a).

Algunos autores (e.g., Apte et al., 2011; Ban-weiss et al., 2020; Rattigan et al., 2020) hicieron uso de esa técnica utilizando aetalometro como instrumento de detección y otros autores (e.g., Ramanathan et al., 2011; Chambliss et al., 2020) la utilizaron con el fin de evaluar la precisión de otros métodos. Por otro lado, De Miranda et al. (2019) realizó mediciones de concentración de carbono negro utilizando un fotómetro de absorción de múltiples ángulos mostrando el predominio de las emisiones de vehículos diésel de servicio pesado. Por su parte, Caubel et al. (2019) y Chambliss et al. (2020) utilizaron un fotómetro en sensores remotos de carbono negro en aerosol para realizar mediciones de las concentraciones promedio por hora.

Tabla 15. Monitoreo de Ozono en redes de monitoreo a nivel internacional.

Normativa	Colombia	EPA	UE	Japón	México	Chile	Brasil
<b>Frecuencia de monitoreo</b>	-Promedio horario y octohorario  Para mediciones indicativas pasivas: 1 semana cada mes	-Promedio horario -Promedio octohorario -Mediciones de prueba: 6 mediciones de una hora por día.	-Valores horarios -Valores octohorarios -Máxima diaria de medias móviles octohorarias -Media anual	-Promedio anual Valores horarios	-Mediciones horarias -Mediciones octohorarias  Se solicitan cuatro mediciones en el año.	-Promedio aritmético de una hora.	-Promedio horario
<b>Métodos</b>	-Técnica pasiva en monitoreo indicativo. -Fotometría ultravioleta.	-Método automático - Fotometría ultravioleta.	-Absorción ultravioleta	- Quimioluminiscencia y absorción ultravioleta con solución	-Método quimioluminiscencia	-Monitoreo continuo: Fotometría en absorción ultravioleta	-Absorción ultravioleta
<b>Valor objetivo</b>	-Media octohoraria $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Medida horaria $120\mu\text{g}/\text{m}^3$	-Media octohoraria $137,15\mu\text{g}/\text{m}^3$	-Media octohoraria máxima diaria $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Nivel de prevención $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Nivel de alerta $240\mu\text{g}/\text{m}^3$	-Media horaria $117,8\mu\text{g}/\text{m}^3$	-Media octohoraria $137\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Media horaria $180\mu\text{g}/\text{m}^3$	-Media octohoraria $120\mu\text{g}/\text{m}^3$	-Media horaria $160\mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>Observaciones</b>	-Mediciones en estaciones de fondo en la dirección del viento (Sotavento). -Ubicación de monitoreo a 16-50km del área urbana.	-Exención de medición cuando datos no superan valores $\geq 85\%$ de los NAAQS $\text{O}_3$ de 8 horas. -Ubicación de monitoreo a 16-50km del área urbana.	-No se puede superar más de 25 días por año.	Algunas prefecturas establecen el umbral de forma única por el valor medio alrededor de 0,24 ppm.	Se calcula considerando al menos 75% de los valores horarios diarios (18 horas). Si hay menos de 75% de los datos, la norma no se Cumple.	Todos los promedios anuales de contaminantes son el promedio de tres años previos consecutivos.	

#### **6.1.4. Parámetros de diseño**

Se encontró que el criterio de macro localización es el principal criterio priorizado a nivel mundial ( $Q2 = 0,48$ ), seguido por el criterio de costos y recursos humanos ( $Q2 = 0,36$ ) como se observa en la *Anexo 7*. Ese mismo orden de priorización se evidenció en la revisión realizada en los países referentes, en donde se obtuvo un índice  $Q3 = 0,54$  para el criterio de macro localización y un índice  $Q2 = 0,32$  para el criterio de costos y recursos humanos (*Anexo 8*). A continuación, se abordan los criterios mencionados.

##### **6.1.4.1. Macro localización**

Este criterio resultó ser un aspecto importante para el monitoreo de la calidad de aire, ya que brinda información sobre los aspectos tenidos en cuenta para la selección de puntos de muestreo de manera que proporcionen datos de calidad en la zona de interés estudiada (MADVT, 2010a). En la revisión se encontró que Baldauf et al. (2002) estableció la ubicación de una red de monitoreo según las concentraciones máximas previstas y densidades de población más altas. Para optimizar la ubicación de los sitios de monitoreo, es habitual dividir el área de estudio en parcelas o zonas y considerar el centroide de cada parcela como un posible sitio candidato (Nejadkoorki et al., 2011). Se recomienda realizar una estimación de los niveles en cada parcela generando mapas de contaminación utilizando datos disponibles, de modo que la densidad de la red de monitoreo pueda ponderarse en consecuencia (Nejadkoorki et al., 2011).

Las técnicas utilizadas para la elaboración de mapas de contaminación y determinación de sitios de ubicación contemplan metodologías GIS (Gulia et al., 2015; Miñarro et al., 2020), aplicación de modelos (Pope et al., 2014, Nejadkoorki et al., 2011) y técnicas de interpolación (Nejadkoorki et al., 2011; Wong et al., 2004; Miñarro et al., 2020). Basado en lo anterior, Miñarro et al. (2020) encontró en la literatura diversos enfoques implementados para determinar la ubicación de estaciones teniendo en cuenta los criterios de selección de los sitios (objetivo único o multiobjetivo y monitoreo de un único contaminante o varios contaminantes) (*Tabla 16*).

Tabla 16. Enfoques implementados para la determinar la ubicación de estaciones.

Distribución espacial de concentraciones (información espacial de contaminantes)		Técnica de diseño y optimización (selección de ubicación final de los sitios de muestreo)	Único(S) o contaminante múltiple (M)	Único(S) o multi-objetivo (M)
Modelo de dispersión ISC3	Laboratorio de análisis móvil	Selección de sitios con mayores concentraciones de contaminantes	M	S
	-	Método de arreglo de restricción / algoritmo de enumeración implícito acotado modificado	S	M
	-	Proceso de jerarquía analítica difusa con números Difusos triangulares / Esfera de influencia	M	M
Modelo DAUMOD para fuentes difusas	ISCST3 modelo para fuentes puntuales	Clasificación de los sitios preseleccionados según el número de superaciones	S	S
Modelo de dispersión de aire (Enfoque de celdas múltiples)	-	Algoritmo de optimización heurística	M	M
	-	Esfera de influencia / red neuronal	M	M
Muestreadores pasivos	modelos de regresión del uso de tierra	Modelo de ubicación-incorporación	S	M
	Interpolación espacial	Incorporados con interpolación espacial para determinar puntos de ubicación	S	M
Muestreadores difusos	método de interpolación Krigging	Implementado con método de interpolación Krigging	S	S
Modelo de dispersión (WRF/CMAQ)	método de interpolación Krigging	Algoritmo genético y recocido simulado	S	S
	-	Algoritmo genético	M	M
Información obtenida de estaciones ya existentes	-	Algoritmo bayesiano basado en entropía	S	S
	-	Modelos lineales y neuronales / selección de puntos candidatos con niveles máximos de contaminantes	S	S
	Métodos de estimación geoestadística para interpolar	Método de optimización estocástica	S	M
	-	Enfoque de indicadores múltiples acoplado al modelo basado en SIG	S	M
	Muestreadores pasivos	Herramienta de selección PROMETHEE	M	M

	-	Índice de información de Shannon / mapas de correlación / proceso de superposición difusa	M	S
	Muestreadores difusos más modelo	Modelo de transporte químico y análisis de conglomerados	S	S
Sin uso de concentraciones, pero parámetros sustitutos	-	Análisis de idoneidad de SIG	M	M

Fuente: Adaptado de Miñarro et al. (2020)

Una vez disponibles los datos de distribución espacial de contaminantes, la resolución espacial de la cuadrícula se puede aumentar mediante Kriging u otros métodos geoestadísticos que interpolan concentraciones (Miñarro et al., 2020). Posteriormente, la selección de sitios de monitoreo se puede realizar seleccionando sitios que cumplen con los requisitos de la normativa (requisitos de ubicación a macro escala) o utilizando algoritmos de optimización (Miñarro et al., 2020).

Colombia define escalas de monitoreo a nivel micro, media, vecindario, urbana, regional y nacional especificando el área de cobertura tanto del SVCA como de las estaciones de calidad del aire asociadas (MADVT, 2010a). Se identificó que la información acogida por Colombia tuvo en cuenta el estándar propuesto por la EPA en el documento 40 CFR apéndice D parte 58, en donde se establece la naturaleza del vínculo entre los objetivos de seguimiento de calidad del aire, los tipos de sitio y la ubicación física de un monitoreo en particular; definiendo el concepto de escala espacial de representatividad. De esta manera, la U.S.EPA relaciona los tipos de sitio con los objetivos de monitoreo y la escala de ubicación basado en ello (*Tabla 17*).

Tabla 17. Escalas de macro localización según objetivos.

Tipo de sitio	Escalas de ubicación adecuadas
Concentración más alta	Micro, medio, barrio (A veces urbano o regional para contaminantes formados secundariamente)
Orientado a la población	Barrio, urbano
Impacto en la fuente	Micro, medio, barrio
Transporte general/ de fondo y regional	Urbano, regional
Impactos relacionados con el bienestar	Urbano, regional

Fuente: EPA 40 CFR apéndice D parte 58

Por otro lado, la Unión europea define a través de la directiva 2008/50/CE que las mediciones fijas podrán complementarse con técnicas de modelización y/o mediciones indicativas con el fin de aportar información adecuada sobre la distribución espacial de la

calidad del aire ambiente. A pesar de que la directiva en la Unión europea especifica las obligaciones de los estados miembros con respecto a las mediciones fijas de contaminantes atmosféricos en áreas con niveles máximos de concentración, las indicaciones sobre las ubicaciones de las estaciones son confusas (Ferradás et al., 2010; Munir et al., 2019). En los documentos revisados para Japón, India, Chile y Brasil se mencionan algunos factores tenidos en cuenta para la localización de estaciones como cantidad de población urbana expuesta, valores absolutos de concentraciones, tendencias históricas y presencia de desarrollos industriales significativos. Sin embargo, no se establece un criterio claro para la definición de macro localización de estaciones como lo hace la EPA, Colombia y México (Tabla 18).

Tabla 18. Escala de macro localización a nivel internacional.

Escala/País	Colombia <sup>1</sup>	EPA <sup>2</sup>	México <sup>3</sup>	Unión europea, Japón, India, Reino Unido, Chile, Brasil
Micro escala	2-100m	1-100m	100m <sup>2</sup>	Información no especificada
Media	100-0,5km	100-0,5km	100m <sup>2</sup> -0,5km <sup>2</sup>	
Vecindario	0,5-3km	0,5-4km	0,5-4km <sup>2</sup>	
Urbana	3-20km	4-50km	Indefinida	
Regional	>20km	>50km	Cientos de km <sup>2</sup>	
Nacional	Todo el país	Todo el país	Todo el país	

Fuente: MADVT (2010a)<sup>1</sup>; CFR 40 apéndice D parte 58 ítem 1.2 <sup>2</sup>; INE, 2008a<sup>3</sup>

#### 6.1.4.2 Costos y recursos humanos

Se encontró que la estimación y evaluación de costos es un criterio importante para el funcionamiento sostenible de las redes de monitoreo en cada una de sus etapas (diseño, implementación, operación y mantenimiento). Los costos para cada red de monitoreo son estimados y pueden ser mayor o menor dependiendo de las consideraciones específicas y enfoques operativos, como la calibración y el mantenimiento del sensor, el grado de procesamiento de datos (automatizado o manual) y opciones de instrumentación específica, entre otros (Brauer et al., 2019).

El enfoque principal del criterio de costos y recursos humanos de redes de monitoreo de calidad del aire está relacionado con la evaluación de su funcionamiento en la etapa de implementación y operación (Miranda et al., 2014; Gulia et al., 2015; Miranda et al., 2015; Miñarro et al., 2020). Como indica Miñarro et al. (2020), la evaluación constante de la

eficiencia de una red de monitoreo permite reducir costos y optimizar la información disponible. Basado en esto, se recomienda evaluar el funcionamiento de las estaciones existentes para determinar algunos requerimientos asociados al incremento o reubicación de estaciones en el área de cobertura establecida (Miñarro et al., 2020).

Otro enfoque identificado son los costos asignados a las medidas adoptadas para mejorar la calidad del aire. Miranda et al. (2014) indica que este enfoque se encuentra influenciado por el horizonte espaciotemporal dado que debe garantizarse la sinergia y la coherencia entre las medidas diseñadas para diferentes niveles espaciales (nacional, regional, local o incluso distrital). Con el fin de garantizar dicha sinergia se recomienda las metodologías integradas de evaluación (IAM) (Miranda et al., 2014) así como evaluaciones socioeconómicas donde se integran análisis costo-beneficio (CBA) y análisis de costo-efectividad (CEA) (Gulia et al., 2015). Estas metodologías permiten relacionar la contribución de concentraciones atmosféricas y la exposición humana con las medidas de control de emisiones y sus costos.

En Colombia se encontró que la información descrita en el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire presenta un buen nivel de detalle. Dicho documento presenta información relacionada con los costos, recursos humanos y recursos físicos requeridos en las actividades que integran las etapas de diseño, operación y aseguramiento de la calidad de los SVCA (MADVT, 2010a.). En el caso de India, México y Chile se menciona características funcionales de las estaciones de monitoreo y se realiza una descripción general en los perfiles requeridos para su adecuada operación basado en lo establecido por la EPA (2013), en el manual de garantía de calidad para sistemas de medición de la contaminación atmosférica.

#### **6.1.4.3. Técnicas y métodos de medición**

Los resultados mostraron que los criterios priorizados a nivel mundial relacionados con las técnicas y métodos de medición fueron los métodos de referencia (Q2 = 0,32) y muestreadores pasivos y de bajo costo (Q1 = 0,12) (*Anexo 9*). Por otro lado, se encontró que las publicaciones realizadas por los países referentes para el presente estudio también priorizaron en primer lugar los métodos de referencia (Q1 = 0,16) y en segundo lugar

priorizaron los sensores remotos ( $Q1 = 0,15$ ) (*Anexo 10*). Basado en lo anterior, se analizó los primeros dos criterios:

#### 6.1.5.1. Métodos de referencia para el monitoreo de la calidad del aire

En los estudios realizados por (Miranda et al., 2014; Miskell et al., 2016; Ozden et al., 2008; Pope et al., 2014) se aseguraron que las estaciones cumplieran con los métodos de referencia federal o método de equivalencia federal de la EPA o de la unión europea. De esa manera, los equipos de muestreo fueron aprobados para tomar medidas oficiales de contaminación del aire y se requirieron y verificaron planes de garantía de calidad para el equipo y los datos (Pope et al., 2014). Así mismo, los instrumentos de referencia se utilizaron para verificar la confiabilidad de datos de una red extensa de dispositivos de bajo costo (Miskell et al., 2016). Basado en los estudios revisados, se evidencia una tendencia a aplicar los métodos de referencia como métodos estándar para asegurar la precisión de sensores remotos o muestreadores pasivos de bajo costo que actualmente se están utilizando ampliamente para el monitoreo de la calidad del aire.

Los métodos de referencia estándar de muestreo y análisis de contaminantes atmosféricos establecido por la EPA se mencionan en la *Tabla 19*. Los métodos establecidos por la EPA se encuentran adoptados en el protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire de Colombia y en los documentos normativos de India, México, Chile y Brasil. De esa manera, el protocolo presenta información relacionada con las técnicas de medición: Muestreadores pasivos, muestreadores activos manuales, equipos Hi Vol, equipos Low Vol, muestreadores semiautomáticos, analizadores automáticos y sensores remotos. Dentro de la información suministrada se explica el principio de funcionamiento, así como las ventajas y desventajas de su aplicación. Por su parte, Reino Unido adopta los métodos establecidos por la Unión europea (*Tabla 20*).

Tabla 19. Métodos de referencia aprobados por la EPA para el monitoreo de la calidad del aire.

CONTAMINANTE	MÉTODO DE REFERENCIA	PRINCIPIO DE DETECCIÓN
SO <sub>2</sub>	Pararrosanilina/Método West-Gaeke	Colorimétrico//Fotometría de luz ultravioleta
Partículas suspendidas	Muestreador de altos volúmenes, Hi Vol	Gravimétrico
CO	Automático	Fotometría infrarroja no dispersa

Oxidantes fotoquímicos (Ozono)	Automático	Reacción con etileno y quimioluminiscencia
Hidrocarburos (No metanos)	Captación de “canister” de acero inoxidable	Cromatografía de gases
NO <sub>2</sub>	Automático	Quimioluminiscencia
PM <sub>10</sub>	Dichotomous	Gravimétrico

Fuente: CFR 40 Parte 50, apéndices: A, B, C, D, E, F

Tabla 20. Métodos de referencia aprobados por la unión europea para el monitoreo de la calidad del aire.

CONTAMINANTE	MÉTODO DE REFERENCIA	PRINCIPIO DE DETECCIÓN
SO <sub>2</sub>	Analizador continuo	Fluorescencia de ultravioleta
Partículas suspendidas	Método de absorción de radiación beta	Gravimétrico
CO	Automático	Espectrometría/Fotometría infrarroja no dispersiva
Oxidantes fotoquímicos (Ozono)	Analizador automático/continuo	Espectrofotometría ultravioleta
NO <sub>2</sub>	Analizador automático/Continuo	Detección fotométrica por quimioluminiscencia
PM <sub>10</sub> y PM <sub>2,5</sub>	LVS (Sistema de bajo volumen), HVS (Sistema de alto volumen), WRAC (Sistema de volumen súper alto)	Gravimétrico
Compuestos orgánicos volátiles (el benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos)	Método de medición continua automática BTX	Cromatografía de gases, asociada con la ionización de llama (FID) o detección de fotoionización (PID).
	Método de medición pasiva utilizando tubos de difusión BTX	

Fuente: Norma EN 14625: 2005; Norma EN 14662: 2005 Norma EN 14626: 2005 Norma EN 14211: 2005; Norma EN 14212: 2005; Norma EN 12341: 1998; Norma 14907: 2005 (Directiva 2008/50 / CE del Parlamento Europeo y del Consejo)

### 6.1.4.3. Muestreadores pasivos y de bajo costo

Los muestreadores pasivos y de bajo costo se usaron en estudios de monitoreo de contaminantes para mejorar la cobertura espacial y temporal de las estaciones de monitoreo tradicionales (Brienza et al., 2015; Miskell et al., 2016; Cannistraro et al., 2018; Gulia et al., 2019; Brauer et al., 2019). La principal limitación mencionada por Gressent et al. (2020) y Miskell et al. (2016) para utilizar datos de sensores en el mapeo de la calidad del aire sigue siendo su incertidumbre de medición y la baja precisión con la cual podrían funcionar en el entorno ambiental (Gulia et al., 2019). Por lo tanto, se sugiere desarrollar protocolos de aseguramiento y calibración de campo para estos sensores comparándolos con el manual de la estación de monitoreo de referencia (Gulia et al., 2019).

Así mismo, Brauer et al. (2019) explica que las estaciones avanzadas y tradicionales podrían servir como nodos de calibración para redes de sensores de bajo costo diseñadas para complementar campañas de monitoreo móvil y/o modelos de regresión de uso de la tierra. Respecto a los beneficios, varios autores (Cannistraro et al., 2018; Brauer et al., 2019; Chiesa, 2020; Gressent et al., 2020) resaltan la importancia de integrar muestreadores pasivos de bajo costo para facilitar el desarrollo de inventarios, campañas de monitoreo, modelación de contaminación atmosférica, caracterización de fuentes y elaboración de mapas de difusión de contaminantes. Además, se puede acceder fácilmente a los datos generados por estos sensores a través de un servidor común, utilizarlos para cálculos de índices de calidad del aire y difundir la información sobre el estado de la calidad del aire al público (Gulia et al., 2019).

#### **6.1.5. Tecnologías de estaciones meteorológicas**

Los resultados demostraron que la selección o distinción entre las clases de estaciones meteorológicas utilizadas en un SVCA es un criterio poco significativo según los índices de citación obtenidos a nivel mundial (*Anexo 11*) y en los países comparados en el presente estudio (*Anexo 12*). Se encontró poca información relacionada con la distinción o clasificación de tecnologías utilizadas para el monitoreo meteorológico siendo el criterio de estaciones meteorológicas el que obtuvo un mayor índice ( $Q1 = 0,16$  y  $Q1 = 0,15$ , respectivamente). A pesar de ello, se resalta la importancia relacionada con el criterio de meteorología en la fase de diagnóstico (*Anexo 1*;  $Q1 = 0,23$  y *Anexo 2*;  $Q2=0,29$ ) ya que las condiciones meteorológicas prevalecientes influyen fuertemente en la dispersión de contaminantes del aire y juegan un papel importante en el transporte de contaminantes desde las fuentes hasta el receptor (Miranda et al., 2015; Arregoces et al., 2018; Gulia et al., 2018; De Miranda et al., 2019).

Los parámetros que tuvieron mayor incidencia en los estudios revisados fueron la velocidad del viento (m/s), la dirección del viento (grados), temperatura (° C) y humedad relativa (%) (Arregoces et al., 2018; Gulia et al., 2018; Jiang et al., 2018; Arnaudo et al., 2020). Debido a los efectos como la tierra, la brisa del océano, los efectos de valle, es importante recopilar estos datos meteorológicos a escala local y ubicar las estaciones de monitoreo en áreas que estén a favor del viento de las fuentes<sup>7</sup>. Adicionalmente, Arregoces et al. (2018) indica que cuanto menor sea la distancia entre las fuentes-receptores y las estaciones meteorológicas menor será la posibilidad de que las barreras topográficas pueden afectar los campos de vientos e inferir con los cálculos de dispersión.

En lo correspondiente al tipo de estaciones meteorológicas utilizadas en los estudios realizados se identificó el uso de estaciones portátiles o inalámbricas (Apte et al., 2011), el uso de registros de diversos sensores distribuidos alrededor de los límites del área de estudio (Arnaudo et al., 2020), la implementación de redes alternativas basadas en estaciones meteorológicas ciudadanas diseñadas con dispositivos de bajo costo y una red de alta resolución espacial (Feichtinger et al., 2020) y el uso de datos de estaciones meteorológicas de alta precisión instaladas en la zona de influencia del estudio (Arregoces et al., 2018 y Popoola et al., 2018). Es importante mencionar que el uso de dispositivos de bajo costo en redes ciudadanas de meteorología requiere un cuidadoso control de calidad a fin de abordar posibles problemas de calibración, fallas de diseño, fallas de ubicación, errores de comunicación y software, problemas de metadatos que pueden ocasionar grandes sesgos (Feichtinger et al., 2020).

En la revisión normativa se identifica que Colombia, Japón, México y la EPA especifican con buen nivel de detalle los equipos requeridos para la medición meteorológica en las redes de monitoreo de calidad del aire. Colombia presenta más información en comparación con los otros documentos normativos revisados; estableciendo criterios de micro localización, clasificación de estaciones y tipo de tecnología que puede incorporarse en estaciones meteorológicas (MADVT, 2010a).

---

<sup>7</sup>IS 5182 Parte 14; 2000

### **6.1.6. Operación de redes de monitoreo de calidad del aire**

Los resultados mostraron que la sistematización de datos es un factor importante para la operación de redes de monitoreo de calidad del aire a nivel mundial ( $Q3 = 0,58$ ; *Anexo 13*) y en los países referentes en el presente estudio ( $Q3 = 0,70$ ; *Anexo 14*). En el protocolo actual el MADVT (2010b) relaciona este criterio con la toma del dato, el pre procesamiento en promedios configurados por el usuario y la transmisión de datos realizada de manera automática a través de un software central que comunica con las estaciones. Posteriormente la información gestionada es transferida y analizada con las herramientas propias de dicha aplicación (MADVT, 2010b).

Por su parte, varios autores (e.g., Bentley, 2005; Brienza et al., 2015; Ramírez et al., 2016; Arnaudo et al., 2020; Represa, 2020) relacionan el proceso de almacenamiento y procesamiento de datos como un criterio importante en el momento de escoger las técnicas y equipos a utilizar para realizar el monitoreo de calidad del aire urbano. Se considera que un monitoreo preciso en tiempo real es esencial para permitir decisiones públicas adecuadas y oportunas con el fin de preservar la salud de los ciudadanos (Brienza et al., 2015). Sin embargo, otros aspectos como los costos de instalación y mantenimiento (Arnaudo et al., 2020), el acceso a la información por parte de los ciudadanos y la baja factibilidad de instalar equipos automáticos (Brienza et al., 2015) son algunos aspectos por los cuales se ha realizado estudios orientados al desarrollo y aplicación de prototipos de monitoreo en tiempo real con sensores remotos y de bajo costo.

Frente a la sistematización de datos, Basurto (2020) menciona la ventaja de integrar tecnologías inalámbricas y el internet favoreciendo la disponibilidad de datos generados por dispositivos (sensores) para obtener información relevante para un grupo de usuarios en particular. Frente al desarrollo de prototipos de monitoreo en tiempo real de la calidad del aire, Brienza et al. (2015) menciona entre los aspectos más importantes a tener en cuenta los siguientes: muestreo del gas de interés, transferencia de datos y visualización de datos. Por su parte, Bentley (2005) explica que un sistema de medición está compuesto de varios elementos que permiten presentar los datos obtenidos de los equipos entre los que se encuentran: elemento sensor, elemento acondicionador de señal, elemento procesador de señal y elemento presentador de datos.

### 6.1.8 Análisis de datos

Se encontró que el cálculo del ICA es un criterio importante ( $Q3 = 0,74$ ) (*Anexo 16*) ya que este tipo de índice se utiliza comúnmente para indicar al público el nivel de gravedad de la contaminación del aire (Cheng et al., 2007) y proporcionar un pronóstico en tiempo real sobre el estado de la calidad del aire urbano (Gulia et al., 2015). Se evidencia que las fórmulas para el cálculo del índice de calidad de aire se definen por agencias gubernamentales y varían de un país a otro e inclusive, también de una región a otra dentro de algunos países (Brienza et al., 2015).

En EEUU, el índice de calidad de aire es definido por la EPA y presenta cinco rangos de clasificación (0-500)<sup>8</sup>. En Europa se ha desarrollado un índice común de calidad del aire para presentar la situación de la calidad del aire en las ciudades europeas en tres escalas de tiempo diferentes (por hora, diario y anual). Dicho índice distingue los índices comunes por hora y por día (5 niveles de escala de 0 (Muy baja) a >100(muy alta)) y el índice anual, que se presenta como una distancia a un índice objetivo (normas y objetivos anuales de calidad del aire)<sup>9</sup>. Por su parte, México desarrolló un Sistema de Consulta de Indicadores de Calidad del Aire (SICA) donde se incluye la generación de indicadores de calidad del aire los contaminantes criterio  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $CO$ ,  $SO_2$  y  $NO_2$  por ciudad o zona metropolitana (por cada una de las estaciones de monitoreo; para cualquier periodo de tiempo, y por año, mes, semana o día; tanto para las mediciones automáticas como manuales y considerando el aspecto a evaluar) (INE, 2008b).

El índice de calidad del aire (ICA) adoptado por Colombia se basa en el mismo documento de referencia tomado por la EPA<sup>8</sup>. Dentro del manual de operación (MADVT, 2010b) se relaciona los contaminantes, rangos y puntos de corte del índice de calidad del aire. De esta manera, Colombia adopta la metodología de cálculo de ICA, bajo la cual, se reporta el mayor valor que se obtenga en el cálculo de cada uno de los contaminantes.

---

<sup>8</sup> 40 CFR parte 58 Apéndice G. Guideline for public reporting of daily air quality-AQI

<sup>9</sup> CITEAIR II (Common Information to European Air)

### 6.1.9. Presentación de información obtenida del monitoreo

El reporte de información es un criterio importante para el seguimiento de la calidad del aire según los índices obtenidos a nivel mundial (Q3 = 0,51; *Anexo 17*) y en los países objeto de revisión en el presente estudio (Q2 = 0,48; *Anexo 18*). Estos resultados demuestran que el reporte de información es un criterio clave que permite comunicar al público el estado de la calidad del aire, tomar decisiones y elaborar políticas públicas que permitan gestionar y prevenir episodios de contaminación del aire (Brienza et al., 2015; Gulia et al., 2015; Gulia et al., 2018).

Tabla 21. Identificación de criterios clave relacionado con la presentación de información obtenida de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>.

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Reporte de información	Data report	19301	0,791	12265	0,467	61400	0,279	0,512	Q3
Informe anual	Annual report	12468	0,511	7358	0,280	85900	0,390	0,394	Q2
Boletín diario	Daily report	11280	0,462	4607	0,176	58400	0,265	0,301	Q2
Divulgación de información	Media	5802	0,237	6702	0,255	84700	0,385	0,293	Q2
Informe mensual	Monthly report	5309	0,217	2254	0,086	19200	0,087	0,130	Q1
Informe trimestral	Quarterly report	671	0,027	2551	0,097	19200	0,087	0,071	Q1

Nota. <sup>1</sup> documentos publicados por 80 países en la base de datos SCOPUS.

(\*) Índice Q promedio (\*\*) Cuartil promedio Q.

Karatzas et al. (2003) citado por Gulia et al. (2015) ha descrito técnicas para la diseminación efectiva de información sobre la calidad del aire urbano al público utilizando aplicaciones móviles, paneles de calles y medios de comunicación. El medio más utilizado para el reporte y divulgación de información relacionada con el monitoreo de calidad del aire se relaciona con el uso de páginas web institucionales las cuales se encuentran mencionadas dentro de la normatividad revisada (*Tabla 22*). De esa manera, la mayoría de países de la Unión Europea están proporcionando información sobre la calidad del aire en sitios web como Air Quality In Europe<sup>4</sup> y en los EEUU, la información de la calidad del aire se comparte con el público a través de AIRNow donde se proporciona AQI en tiempo real y pronóstico para 300 ciudades (EPA, 2009).

Tabla 22. Reporte de información a través de páginas web.

	Colombia	EPA	UE	Japón	India	México	Chile
Página web	-Página de cada autoridad ambiental. -SISAIRE. <sup>1</sup>	AIRNow <sup>2</sup>	Air Quality In Europe <sup>3</sup>	Página de cada gobierno local.	Central Pollution Control Board (CPCB) <sup>4</sup>	SICA <sup>5</sup> SINAICA <sup>6</sup>	SINCA <sup>7</sup>
Datos requeridos	-Índice de calidad del aire. -Gráficas con los datos. -Reporte semanal (SVCA Indicativo, básico e intermedio) -Reporte diario (SVCA Avanzado).	-Índice de Calidad del Aire. - Pronósticos diarios de calidad del aire a nivel nacional.	-Umbral superado y periodo de ocurrencia. -Previsiones para el día siguiente. -Población afectada y medidas preventivas	-Emisiones atmosféricas. -Área de emisión. -Estados de alarma. -Tipos de emergencia. -Medidas implementadas.	-Índice de calidad del aire -Datos de monitoreo automático -Datos de monitoreo manual -Datos históricos	-Índices de calidad del aire -Datos validos	- Índice de calidad del aire. -Pronóstico de calidad del aire -Medidas de respuesta ante eventos críticos de contaminación.

Fuente:<sup>1</sup>SISAIRE, 2021.<sup>2</sup>AIRNow <sup>3</sup>Air Quality In Europe <sup>4</sup>CPCB<sup>5</sup>SICA<sup>6</sup>SINAICA<sup>7</sup>SINCA

### 6.1.10 Fase de evaluación y seguimiento de los SVCA

El plan de calidad resulto ser un criterio importante dentro de la fase de evaluación y seguimiento de los SVCA requeridos en redes de monitoreo de calidad del aire a nivel mundial ( $Q2 = 0,37$ ; *Anexo 19*) y en los países objeto de revisión en el presente estudio ( $Q1=0,20$ ; *Tabla 40*). Esto se debe a que el plan de calidad se constituye como un instrumento transversal al diseño y operación de redes de monitoreo de calidad del aire con el fin de asegurar la eficiencia y eficacia de su funcionamiento (Gulia et al., 2019). Gulia et al. (2019) indica que se requiere procedimientos de garantía o aseguramiento de calidad y control de calidad bien definidos para mejorar gestión de calidad del aire en la mayoría de países de ingresos bajos y medianos.

Dentro del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (MADVT, 2010b) dichas directrices están definidas basándose en lo propuesto por la EPA (EPA, 2017). Dicho documento debe actualizarse y revisarse por cada red de monitoreo cada 5 años y contemplar un enfoque gradual, bajo el cual, se establece requisitos con mayor o menor complejidad para su construcción de acuerdo al nivel de organización (pequeña, mediana o grande) (EPA, 2017). En la *Tabla 23* se presenta los aspectos requeridos en los planes de calidad establecidos por los países objeto de revisión.

Tabla 23. Contenido plan de calidad establecido a nivel internacional.

Contenido	Colombia	EPA	UE	Japón	India	México	Brasil	Chile
Estructura y organigrama	x	x					x	
Perfil de personal encargado								x
Objetivos de la calidad de datos	x	x				x	x	
Métodos de medición y procedimientos analíticos	x	x	x	x	x	x	x	x
Cadena de custodia	x		x	x				
Pruebas en blanco y muestras de control			x	x				
Análisis de datos, validación y reporte	x					x		x
Evaluación calidad de datos		x					x	
Control de calidad interno	x							
Auditoría			x	x	x			
Capacitación a personal		x					x	
Mantenimiento y calibración de equipos	x			x	x			x
Informe de garantía de calidad			x	x				

Fuente: Autores (2021)

## 6.2. Evaluación de criterios técnicos para el diseño y operación de los SVCA

Se aplicó la técnica de grupos focales con el fin de valorar los criterios de diseño y operación de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire establecidos en el protocolo vigente (MADVT, 2010a; MADVT, 2010b). Para ello, se realizaron cuatro sesiones para cada segmento de la muestra (autoridades ambientales, consultoras, laboratorios y academia) y cada grupo focal estuvo compuesto por un número de personas entre 5-8 basado en lo propuesto por Prieto y Cerda (2002). Se obtuvo una participación de 163 personas y se contabilizaron, transcribieron y sistematizaron 743 evaluaciones.

En el desarrollo de los grupos focales se realizaron las siguientes preguntas a los participantes con el fin de orientar el encuentro frente al objetivo propuesto: (i) ¿Qué dificultad ha presentado en la implementación del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire? y (ii) ¿Qué propuestas de ajuste sugiere para la modificación de dicho protocolo? Las respuestas obtenidas de los talleres se categorizaron en los ítems y criterios valorados en el primer objetivo, realizando una aproximación a la temática de estudio. Se evidencia que los ítems que tuvieron mayor frecuencia relativa porcentual en el número de respuestas asignadas fue la fase de diseño (16,2%), la fase de diagnóstico (15,7%) y las técnicas y métodos de medición (14,1%) (Figura 15).

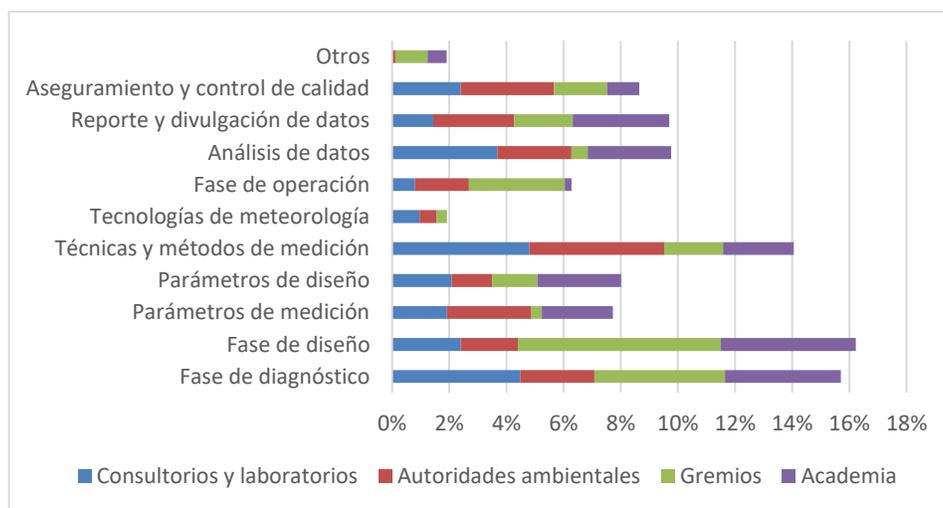


Figura 15. Ítems priorizados en los talleres focales para el monitoreo y seguimiento de SVCA.

Se identificaron los principales criterios mencionados por los participantes en los talleres de acuerdo a la validación de respuestas y la categorización realizada. Además, se tuvo en

cuenta las publicaciones realizadas a nivel nacional con el fin de analizar cada uno de los aspectos abordados. A continuación, se presentan los resultados correspondientes.

### 6.2.1 Grupos focales: fase de diagnóstico

Se encontró que los grupos focales que representaron consultoras y laboratorios, autoridades ambientales y gremios priorizaron el monitoreo preliminar (45,45%, 45,45% y 40,00% respectivamente) (Figura 16). Las respuestas de estos grupos focales estuvieron orientados a la necesidad de ajustar la frecuencia de aplicación de campañas de monitoreo preliminares basado en niveles de calidad del aire y el uso de campañas de monitoreo para estudios de línea base permitiendo que esta herramienta sirva de insumo para la definición de parámetros a monitorear. Por otro lado, la academia priorizó la modelización (61,11%) mostrando un resultado similar al obtenido en la revisión bibliográfica en países referentes en la calidad del aire (Anexo 1). Este grupo focal resaltó la necesidad de definir una metodología o protocolo de modelización que permita verificar los modelos utilizados en el monitoreo de la calidad del aire. Lo anterior se debe a que a nivel nacional no se tiene una guía de modelación de calidad del aire por medio de la cual se adopten metodologías específicas que permitan evaluar la aplicabilidad de los modelos propuestos en el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire a nivel nacional.

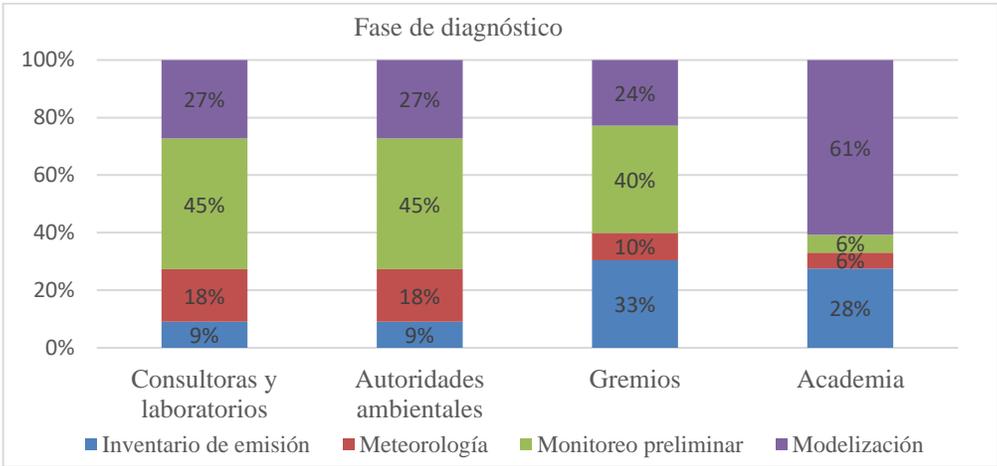


Figura 16. Criterios priorizados en talleres focales para la fase de diagnóstico.

#### 6.2.1.1 Campañas de monitoreo

Las campañas de monitoreo se desarrollan con fines de establecer niveles probables de los contaminantes criterio u otros contaminantes de interés específico en la zona evaluada y también permiten evaluar su distribución espacial y temporal (MADVT, 2010a). Así mismo, Jiménez (2009) indica que las campañas de monitoreo son el medio más eficaz y eficiente para obtener información sobre la calidad del aire, en regiones en las que se cuenta con sistemas de monitoreo pero que requieren mediciones complementarias, ya sea para determinar concentraciones de fondo, validar inventarios de emisión, determinar el impacto de nuevas fuentes, o con el fin de cuantificar procesos de transporte vertical y recirculación. En la *Tabla 24* se indican las principales características que deben tener las campañas de monitoreo según lo establecido por el MADVT (2010a).

Tabla 24. Características de las campañas de monitoreo preliminar en SVCA.

Aspecto	Definición	Descripción
Duración	Dos meses	*Un mes en época seca y un mes en época húmeda * Los dos meses en época seca
Tipo de medición	Indicativa	En la fase diagnóstico y para la evaluación de cualquier tipo de SVCA
Equipos de medición	Muestreadores activos	Para PM <sub>10</sub> día de por medio- mínimo 3 estaciones
	Analizador automático	Permanente para NO <sub>2</sub>
	Muestreadores pasivos	Para O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> con fines de densificación de la campaña
	Unida móvil automática	Cuando sea aplicable
Equipos meteorológicos	Estación portátil	En caso de no existir información simultánea disponible.
Ubicación	Según objetivos de monitoreo y representatividad espacial	
Frecuencia Según cálculo de excedencia	-Máximo cada tres años: cuando menos del 10% de los datos válidos supera la norma anual. -Anual: cuando más del 10% y menos del 25% de los datos válidos supera la norma anual. -Si al realizar el cálculo de excedencias se encuentran valores que corresponden a área fuente moderada, media o alta, se debe pasar a un SVCA Básico (permanente).	

Fuente: Adaptado de MADVT (2010a).

Con respecto al modo de aplicación se evidenció que estudios realizados por (Narváez et al., 2014; Sanz et al., 2018) proponen que las campañas de monitoreo deben realizarse en sitios que cumplan con condiciones de representatividad basado en criterios de macro localización, inventarios de emisión y modelaciones previas al estudio. Por otro lado, en la *Tabla 25* se encuentra la frecuencia sugerida por algunos autores para el desarrollo de campañas de monitoreo. La selección de estos dos aspectos (ubicación y frecuencia) son importantes para que los informes de campañas de monitoreo sean comparables entre sí, ya

sea en un mismo punto a través del tiempo, o en diferentes puntos en un mismo periodo de tiempo.

Tabla 25. Frecuencia de monitoreo en campañas de monitoreo preliminares en SVCA.

Autor	Tipo de medición	Parámetro de medición	Frecuencia
Muñoz et al., 2018	Indicativa	Ozono (O <sub>3</sub> )	3 campañas de una semana cada una, durante 2 años.
Narváez et al., 2016	Indicativa	PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO y PST	3 Campañas de monitoreo de 30 días cada una.
Gamboa et al., 2018	Indicativa	PM <sub>2.5</sub>	Un año para comprobar normatividad horaria de 24 horas
Sanz et al., 2018	Indicativa	SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	4 campañas de 30 días cada una, durante un año

Fuente: Autores (2021).

### 6.2.2 Grupos focales: Fase de diseño de SVCA.

Se evidenció que los grupos focales reconocieron el criterio de actividades industriales como el principal aspecto a tener en cuenta en la fase de diseño de SVCA (*Figura 17*). Los resultados obtenidos demostraron la necesidad de definir parámetros o lineamientos para el monitoreo de la calidad del aire basado en el tipo de actividad económica o tipo de actividad industrial desarrollada. Actualmente, la resolución 2254 de 2017 del MADS establece que los proyectos, obras o actividades deben realizar monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en los casos presentados en la *Figura 18*, conforme a los lineamientos contenidos en el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (MADVTV, 2010a; MADVTV, 2010b). Sin embargo, el protocolo actual no detalla el tipo de actividades que requieren monitoreo de calidad del aire o los criterios a partir de los cuales se establece las condiciones de diseño y operación para el tipo de proyecto en ejecución.

El monitoreo realizado por los SVCA industriales (o asociados a proyectos, obras y actividades) puede basarse en tecnologías de medición manuales o automáticas y la periodicidad del monitoreo de calidad de aire en este tipo de SVCA se determinará de acuerdo a la duración del proyecto, las etapas de la actividad en ejecución y de acuerdo al tiempo que la autoridad ambiental lo requiera necesario. En caso que los valores medidos en la campaña de medición superen los estándares establecidos en la resolución 2254 de 2017 (o en la que la modifique, adiciones o sustituya), será necesario realizar monitoreo permanente por parte del SVCA. En la tabla 26 se presenta una propuesta donde se muestra

los parámetros y algunas condiciones de monitoreo de calidad del aire en los SVCA industriales (o asociados a proyectos, obras y actividades).

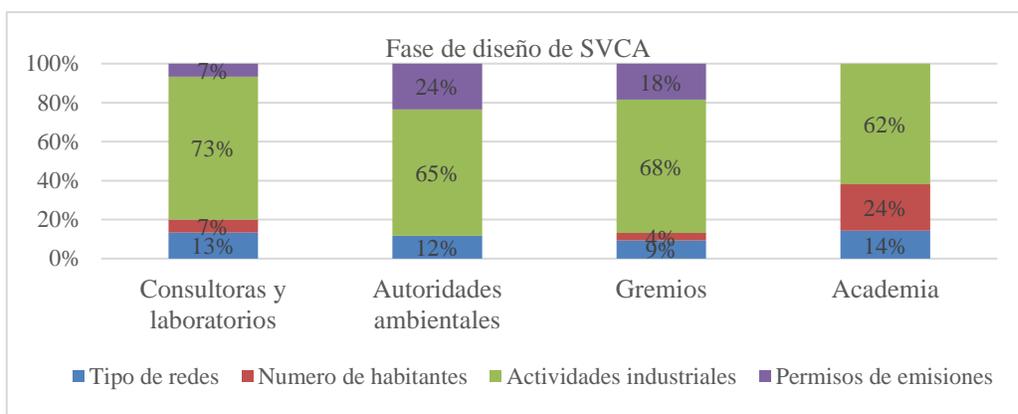


Figura 17. Criterios prioritizados en talleres focales para la fase de diseño de SVCA.

Licenciamiento ambiental	Plan de manejo ambiental	Ordenado por autoridades ambientales
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Como insumo en estudios de impacto ambiental.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Como actividad periódica o fija de monitoreo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para actividades que generan impactos negativos en la calidad del aire que no requieren licencia ambiental.</li> </ul>

Figura 18. Casos de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire por parte de proyectos, obras o actividades. Fuente: Adaptado de Res. 2254 de 2017 MADS (2017).

Tabla 26. Monitoreo de calidad del aire en proyectos, obras y actividades.

	Proyecto, obra o actividad	Parámetros de monitoreo	Condición de monitoreo	Tipos de estaciones
Hidrocarburos	Yacimientos convencionales no	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , CO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	Periodo mínimo de dos meses de medición continua.	Indicativa Fondo Punto Crítico
	Desarrollo de campos petroleros	PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, HCT (reportados como CH <sub>4</sub> ) y VOCs.	Periodo no menor de 10 días continuos en por lo menos tres estaciones.	Indicativa Fondo Punto crítico
	Perforación y proyectos exploratoria de hidrocarburos	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , CO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	Mínimo 1,5 meses en época seca.	Fondo Punto crítico Dos estaciones mínimo cuando existan

				centros poblados
	Transporte y almacenamiento de hidrocarburos y sus derivados	PST, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO y HCT (reportados como CH <sub>4</sub> )	Periodo no menor de diez días continuos (10 muestras)	Indicativa
Mínero	Exploración, explotación minera, beneficio y transformación minera.	Material particulado (PST, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> ) y Monitoreo de As, Pb, Cd, Ni, Cr y Hg, cuando se hayan identificado.	Mediciones 24 horas cada tercer día o continuos hasta completar mínimo 18 muestras en cada estación.	Fondo Estación de propósito específico
Obras civiles	Construcción, reparación o ampliación de obras civiles	PST, PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y CO.	No especifica	Fondo Punto crítico
	Construcción de líneas férreas	PM <sub>10</sub> PM <sub>2.5</sub>	24 horas, cada tercer día o continuos hasta completar 18 muestras en cada estación.	Fondo Punto crítico
	Construcción o ampliación de aeropuertos	PST, SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> y CO.	2 meses de medición continua tomando mínimo 10 muestras puntuales.	Fondo Punto crítico
	Construcción o ampliación de puertos	NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , CO y HCT.		
	Obras marítimas	PM <sub>2.5</sub> PM <sub>10</sub>	2 meses de medición continúa, durante 24 horas, cada tercer día o continuos hasta completar 18 muestras por estación.	Fondo Punto crítico
	Obras de saneamiento: PTAR domésticas y rellenos sanitarios.	PST o PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, HCT (reportados como CH <sub>4</sub> ) y VOCs.	Período no menor de diez días continuos.	Indicativa Fondo Punto crítico
	Obras hidráulicas			
Producción de energía eléctrica	Construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica	Material particulado, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , CO y CO <sub>2</sub>	Mediciones de 24 horas época seca y húmeda hasta completar 18 muestras en cada estación, o 24 muestras si se obtiene un promedio $\geq 80\%$ del valor de la norma anual.	Indicativa Fondo Punto crítico
	Uso de energía solar y energía eólica continental	Como mínimo PM <sub>10</sub>		Indicativa
	Construcción y operación de centrales térmicas generadoras de energía	PST o PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, HCT	Período mínimo de diez días continuos.	Indicativa Fondo Punto crítico

	eléctrica con capacidad instalada $\geq 100$ MW	(reportados como CH <sub>4</sub> ) y VOCs		
Transmisión de energía eléctrica	Sistemas de transmisión de energía eléctrica	Material particulado y gases	Monitoreo cuando no se cuente con inventarios de emisiones	Indicativa
Agropecuario	Actividades agrícolas y actividades pecuarias	Material particulado y gases	No especifica	Indicativa
Industrial	Construcción y operación de plantas de producción de plaguicidas	PST o PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, HCT (reportados como CH <sub>4</sub> ) y VOCs	Período mínimo de diez días continuos.	Indicativa

Fuente: Adaptado de Malaver (2018).

### 6.2.3 Grupos focales: Parámetros de medición

Los resultados mostraron que los parámetros de medición de mayor interés para las consultoras y laboratorios, autoridades ambientales y gremios fue el monitoreo del PM<sub>2.5</sub> y tóxicos (*Figura 19*). Por su parte, los participantes que representaron la academia priorizaron el monitoreo de tóxicos (36,36%) y carbono negro (36,36%). Se resaltó la necesidad de exigir por medio del protocolo, el monitoreo mínimo de PM<sub>2.5</sub> para proyectos, obras y actividades. Así mismo, las respuestas se enfocaron en la necesidad de estandarizar e incluir la medición de contaminantes no convencionales o tóxicos, teniendo en cuenta los métodos de medición y el tipo de actores responsables de su monitoreo.

#### 6.2.3.1 Material particulado PM<sub>2.5</sub>

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS) exigió por medio de la resolución 2254 de 2017 que para el 2018 el nivel máximo permisible de PM<sub>2.5</sub> para un tiempo de exposición de 24 horas debe ser de 37 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y se conservó el nivel máximo permisible para un tiempo de exposición anual en 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dicha resolución también establece que para el 2030 el nivel máximo permisible de PM<sub>2.5</sub> para un tiempo de exposición anual será de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lo anterior se debe a que, en los últimos años, se ha encontrado evidencia sobre asociaciones más fuertes entre PM<sub>2.5</sub> y los datos de morbilidad y mortalidad diaria y a largo plazo (OMS, 2018). Por ello, la OMS (2018) indica que cuando se dispone de instrumentos de medición suficientemente sensibles, se deben notificar también las concentraciones de partículas finas (PM<sub>2.5</sub> o más pequeñas).

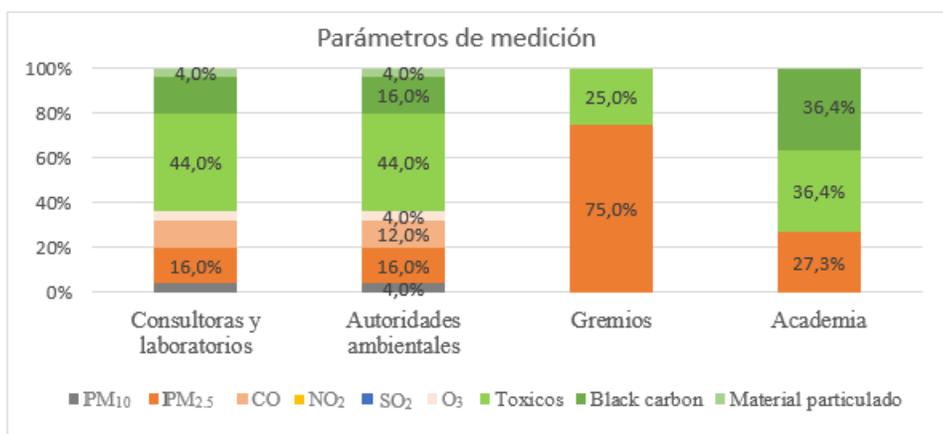


Figura 19. Criterios priorizados en talleres focales para los parámetros de medición.

Según el inventario nacional de contaminantes criterio y carbono negro 2010-2014 los procesos relacionados con los incendios de bosques y praderas, y las actividades residenciales y comerciales son los que mayor cantidad de PM<sub>2.5</sub> emiten en Colombia (IDEAM et al., 2019). Según algunos autores (e.g., Rojano et al., 2013; Gómez, 2017) la contaminación por PM<sub>2.5</sub> está asociada con fuentes móviles y por esa razón su seguimiento debe realizarse en zonas industriales, zonas de alto tráfico vehicular, parques automotores y procesos donde se realice combustión (quema de combustibles y desechos). Basado en lo anterior, Rojas et al. (2006) recomienda aplicar mediciones de PM<sub>2.5</sub> directas y determinar la contribución de diversas fuentes de material particulado por medio de caracterizaciones químicas y Ciro et al. (2018) recomienda medir temperatura y velocidad del aire simultáneamente a la medición de la concentración del material particulado en los sitios de monitoreo para mejorar las estimaciones realizadas.

### 6.2.3.2 Tóxicos

En la resolución 2254 de 2017 se establecieron los niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire y la obligación de monitorear estos contaminantes cuando la autoridad ambiental competente lo exija de acuerdo con las actividades que se desarrollen en su área de jurisdicción. En esa resolución se establece que en áreas pobladas se deberá hacer una campaña de monitoreo preliminar de conformidad con lo establecido en el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. En caso de detectar que se

superan los niveles máximos permisibles establecidos en dicha resolución, se debe implementar monitoreo permanente.

Sin embargo, en el protocolo no se definen métodos y técnicas de monitoreo para contaminantes tóxicos y tampoco contempla quiénes tienen la responsabilidad de realizar dicho seguimiento. A partir de la revisión realizada, se encontró que para el análisis de contaminantes tóxicos en el aire Malaver (2018) sintetizó los métodos de referencia establecidos por la EPA y la unión europea con el fin de analizar el comportamiento de parámetros no convencionales en Colombia (*Tabla 27*). Por otro lado, se encontró que la resolución 601 de 2006 (derogada) por medio de la cual se establecía la norma de calidad del aire del país definió en su anexo 2 las actividades y procesos industriales que pueden generar contaminantes no convencionales. Aunque esa información fue omitida en la nueva norma, es una aproximación al tipo de emisiones generados por algunas fuentes puntuales en Colombia.

Tabla 27. Métodos de referencia para contaminantes tóxicos del aire.

Parámetro	EPA	UE
Benceno	Method TO-1 Method TO-14A Method TO-15 Method TO-17	EN-14662-3:2016
Plomo y sus compuestos	40 CFR Appendix G to part 50	EN 14902:2006
Cadmio	Method IO-3.5	EN 14902:2006
Mercurio inorgánico	Method IO-5	EN 15852:2010
Tolueno	Method TO-1 Method TO-14A Method TO-15 Method TO-17	-
Níquel y sus compuestos	Method IO-3.5	EN 14902:2006
Hidrocarburos aromáticos policíclicos expresados como Benzo(a) Pireno	Method TO-13A	EN 15549:2008

Fuente: Adaptado de Malaver et al. (2018).

#### 6.2.4 Grupos focales: Parámetros de diseño

Se evidenció que los grupos focales que participaron en el siguiente estudio priorizaron el criterio de macro localización como el principal criterio considerado en los parámetros de diseño (*Figura 20*). Para la selección de sitios de monitoreo Góngora (2020) aplicó estudios de uso del suelo identificando la distribución de fuentes de emisión fijas y fuentes de emisión

móviles, Bonilla (2016) aplicó un modelo de dispersión para determinar el área de influencia de los contaminantes atmosféricos y evaluó los puntos dentro de dicha área que cumplieren los criterios de micro localización sugeridos por los estudios realizados y otros autores (e.g., Serrano, 2006; Sanabria, 2012) tomaron criterios establecidos por el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.

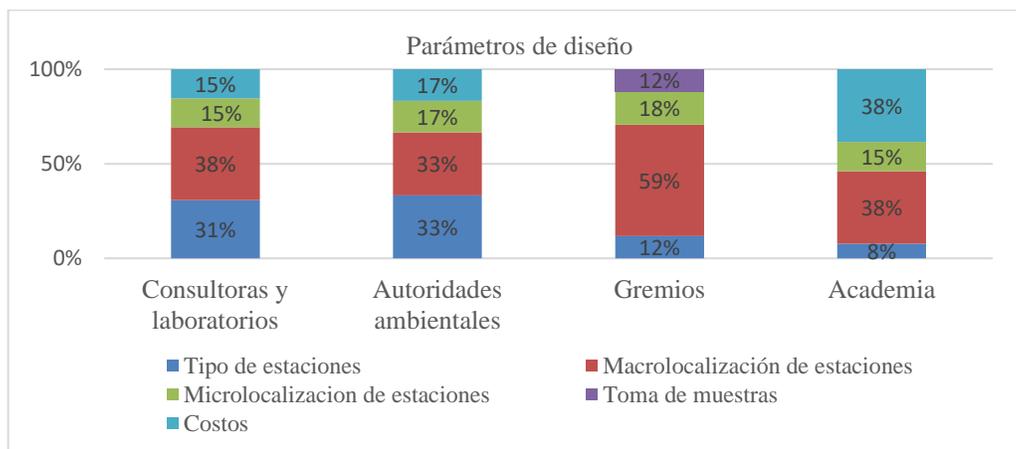


Figura 20. Criterios priorizados en talleres focales para los parámetros de diseño.

Basado en la revisión realizada se relacionaron los criterios de macro localización considerados en estudios a nivel nacional (Tabla 28) y se resaltó la importancia de incorporar metodologías en las cuales se identifiquen aspectos sugeridos por Miñarro et al. (2020): distribución espacial de concentraciones o contaminantes, técnicas de diseño u optimización de sitios de muestreo, selección de contaminantes a monitorear y objetivos de monitoreo.

Tabla 28. Criterios de macro localización considerados según estudios realizados a nivel nacional.

Autor(es)	Tipo de estación	Criterio de macro localización
Góngora (2020)	De Fondo	Criterio de homogeneidad en aspectos biofísicos y socioeconómicos
Bonilla (2016)	De Fondo	-Concentración de contaminantes criterio -Análisis topográfico -Condiciones climatológicas -Distancia fuentes de emisión -Efectos del terreno -Infraestructura disponible -Requerimientos de asentamiento -Condiciones socioeconómicas
Narváez et al. (2016)	De tráfico	-Seguridad -Influencia de otras fuentes -Requerimientos de espacio para la instalación de equipos.

		-Accesibilidad al sitio -Eliminación de obstáculos -Registro histórico de datos -Grado de concentración del contaminante -Instrumentación y equipos necesarios
Ibáñez (2018)	De tráfico	-Flujo vehicular -Intersecciones -Sentido del flujo doble -Área disponible y obstáculos.
Serrano (2006)	Fijas	-Áreas de mayores concentraciones de contaminantes o cerca de fuentes más importantes. -Áreas de mayor exposición (Mayor densidad poblacional). -Meteorología y topografía. -Distribución espacial y criterios de variabilidad de los contaminantes. -Datos existentes sobre la calidad del aire.

Fuente: Autores (2021).

### 6.2.5 Grupos focales: Técnicas y métodos de medición

Se evidenció que todos los grupos focales priorizaron en primer lugar el criterio métodos de referencia y en segundo lugar los muestreadores pasivos y de bajo costo (*Figura 21*). Los resultados relacionados con los métodos de referencia evidenciaron la limitación de las tecnologías aceptadas a nivel nacional para la medición de la calidad del aire y la necesidad de revisar otros métodos que pueden validarse, normalizarse y adaptarse a nivel nacional. Por otro lado, las respuestas relacionados con muestreadores pasivos de bajo costo demostraron el interés general por permitir el uso de sensores de bajo costo en mediciones indicativas, en campañas de monitoreo y mediciones realizadas por proyectos, obras y actividades.

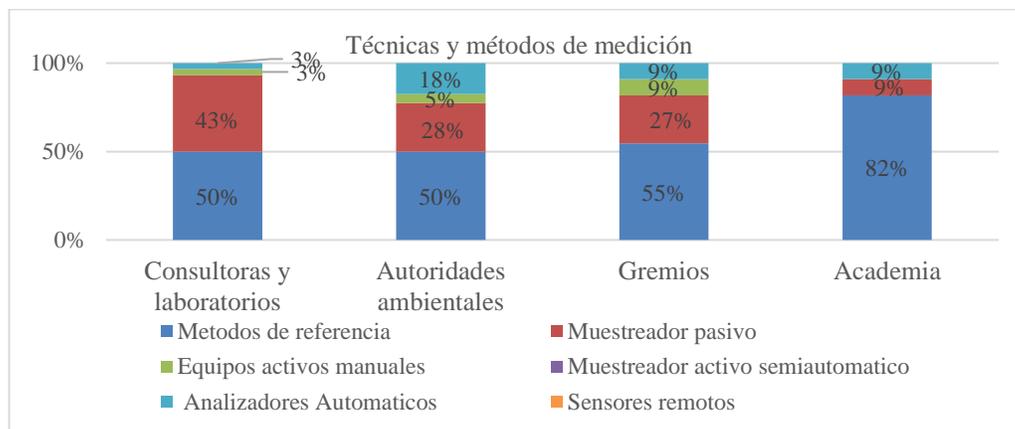


Figura 21. Criterios priorizados por talleres focales para las técnicas y métodos de medición.

### 6.2.5.1 Métodos de referencia nacionales

En Colombia, según lo dispuesto en el artículo 2.2.8.9.1.5 del decreto 1076 de 2015'', "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible", los laboratorios de la red estarán sometidos a un sistema de acreditación e Inter calibración analítica, en los cuales se pretende validar la metodología y confiabilidad por medio de procedimientos estándar y de referencia establecidos por el IDEAM a través de documentos normativos y procedimientos regulados a nivel nacional. Basado en eso, para el monitoreo de contaminantes criterio debe utilizarse los métodos de referencia o métodos equivalentes publicados por el IDEAM, previa aprobación del MADS que podrían basarse en agencias ambientales como la EPA y la EEA (European Environment Agency). De esa manera, el IDEAM ha publicado el principio de medición y procedimiento de calibración para cada uno de los parámetros de medición requeridos en los SVCA nacionales.

Algunos autores (e.g., Gutiérrez et al., 2018; Muñoz y Rodríguez, 2018; Sanz Pérez et al., 2018; Ibáñez,2018) han desarrollo lineamientos de monitoreo de calidad del aire para parámetros específicos (PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), considerando los métodos de referencia y métodos equivalentes adoptados a nivel nacional. Dentro de los estudios realizados por dichos autores se hizo una revisión de equipos de medición, principio de funcionamiento, técnica de medición y especificaciones de calibración. En lo relacionado a la selección de los métodos de medición se identificaron métodos alternos para la medición de los contaminantes criterio (Tabla 29), que se podrán utilizar siempre y cuando se encuentre publicados por el IDEAM. Los equipos que no usen métodos de referencia se podrán utilizar en mediciones indicativas posterior a la publicación del método por parte del IDEAM (Muñoz et al., 2018).

Tabla 29. Métodos de medición contaminantes criterio.

Parámetro	Método de medición/Equipo	Técnica de medición
PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	Método gravimétrico –Equipo Hi Vol	Activo-manual
	Método gravimétrico-Equipo Low Vol	Activo-manual
Ozono	Método de quimioluminiscencia	Analizadores automáticos
	Fotometría Ultravioleta	Analizadores automáticos Activo- Semiautomáticos
	Determinación de sustancias oxidantes en la atmósfera	Activo-Manual

	Medición tipo Filtro - “Ogawa”	Pasivo
	Medición tipo Radial - Radiello	Pasivo
	Método de oxidación de yoduro de potasio	Pasivo
	Método LIDAR (Light Detection and Ranging)	Sensor remoto
	Ozonosondas a bordo de globos.	Sensor remoto
SO <sub>2</sub>	Método de absorción de formaldehído/espectrofotometría-Pararrosanilina	Manual
	Método Thorin con trietanolamina y carbonato de sodio espectrofotometría o titulación-	Activo
	Método de Thorin después de intercambio catiónico	Pasivo
	Método de Hangartner- “Palmes” /espectrofotometría-pararrosalina	Pasivo
	Método de hargreaves y Atkins- “Palmes” /espectrofotometría	Pasivo
	Método de Fern-Cromatografía de iones	Pasivo
NO <sub>2</sub>	Método de Griess-Saltzman	Activo
	Método TGS-ANSA	Activo
	Método de película de sorbente sólido	Activo
	Medición tipo Radial – Radiello	Pasivo
	Medición tipo tubo - “Palmes”	Pasivo
	Método de Yanagisawa y Nishimura-Espectrofotometría	Pasivo
	Método modificado de Amaya-Sugiura-Espectrofotometría	Pasivo
	Método de Cadoff y Hodgeson-Espectrofotometría	Pasivo
	Método de Lewis y Mulik. -Cromatografía de iones	Pasivo
NO	Método de Yanagisawa y Nishimura, usando como oxidante a CrO <sub>3</sub> -Espectrofotometría	Pasivo
CO	Método infrarrojo no dispersivo (NDIR)	Analizador automático
	Método de correlación de un gas filtrado (GFC)	Analizador automático
	Método que utiliza una Zeolita sólida (TENAX), como absorbente	Pasivo

Fuente: Autores (2021).

Cabe mencionar que la selección de técnicas de monitoreo también tiene en cuenta la determinación de áreas-fuente (área de contaminación: alta, media, moderada o marginal) establecido a nivel nacional y según lo establecido por el MADVT (2010a). Basado en eso, se establecen condiciones de monitoreo específicas para contaminantes criterio y de acuerdo al tipo de SVCA implementado (*Tabla 30*). Para estudios de tipo indicativo y en escala local el MADVT (2010a) establece que la técnica implementada debe ser de tipo activa según el parámetro obligatorio a medir (PM<sub>10</sub>), sin embargo, para el monitoreo de otros

contaminantes requeridos en este tipo de SVCA puede integrarse muestreadores pasivos de bajo costo como se mencionó en el capítulo 6.1.5.2.

Tabla 30. Criterios para la selección de técnicas de monitoreo de los SVCA.

Parámetros	Tipo de SVCA	Técnica	Criterio	Acción
Ozono (O <sub>3</sub> )	Todos los SVCA	Pasiva	Al menos uno de los valores medios semanales de concentración alcanza 27µg/m <sup>3</sup>	Monitoreo indicativo con muestreo automático durante tres meses.
		Pasiva	Al menos uno de los valores medios semanales de concentración alcanza 30 µg/m <sup>3</sup>	Instalar una estación fija con muestreo automático.
		Automática indicativa	Si durante los tres meses de operación de la estación indicativa automática se detecta un sobrepaso a la norma horaria y de 8 horas.	Instalar una estación fija con monitoreo automático.
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) y dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	-SVCA básico -SVCA intermedio -SVCA avanzado	Pasiva	Cuando los promedios de las concentraciones de los datos válidos sean inferiores al 80% de la norma anual (extrapolando).	-Realizar monitoreo Indicativo o, - Instalar equipos de monitoreo activo permanente con monitoreo cada tercer día.
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) y material particulado (PM <sub>10</sub> ).	-SVCA básico -SVCA intermedio -SVCA avanzado -SVCAI	Activa o automática	Si menos del 10% de los datos válidos de 24 horas supera la norma anual (no se tiene ninguna condición de área fuente, directamente o por extrapolación).	Realizar monitoreo indicativo con equipos activos o automáticos según el tipo de contaminante.
		Activa o automática	Si se cumplen condiciones de área fuente marginal o moderada (directamente o por extrapolación).	Instalar una estación fija con monitoreo activo o automático según el tipo de contaminante.
		Activa o automática	Si se cumplen condiciones de área fuente media o alta.	Se debe instalar una estación fija automática.

Fuente: Adaptado de MADVT (2010a).

### 6.2.5.2. Métodos pasivos y de bajo costo

Hernández y Obregón (2020) señala que para los SVCA se debe utilizar como mínimo una tecnología de medición mediante muestreos activos, es decir en todos los SVCA se puede utilizar esta técnica, sin embargo, es importante mencionar que también se pueden utilizar los muestreos pasivos y automáticos, teniendo sistemas híbridos y cumpliendo varios objetivos de medición (Tabla 31). En ese sentido, Roncancio (2019) indica que los sensores de bajo costo pueden postularse como una herramienta complementaria a los equipos de la

red de calidad del aire que actualmente se encuentran instalados con el fin de aumentar la resolución espaciotemporal de las mediciones. Otros autores como Góngora (2020) indica que no sería conveniente transformar los SVCA ya implementados, instalando otras tecnologías para los equipos sugeridos, ya que sistemas combinados pueden presentar conflictos en la sincronización de la información. Lo anterior requiere una evaluación aplicando algunos de los métodos pasivos disponibles, como los mencionados en la *Tabla 29*, con el fin de establecer la viabilidad y factibilidad de su implementación en el monitoreo de la calidad del aire.

Tabla 31. Técnicas de muestreo para cumplir con los objetivos de medición de la calidad del aire.

<b>Objetivos</b>	<b>Pasivos</b>	<b>Activos</b>	<b>Automáticos</b>
Determinar el cumplimiento de las normas nacionales de la calidad del aire.		X	X
Evaluar las estrategias de control de las autoridades ambientales.			X
Observar las tendencias a mediano y largo plazo.			X
Evaluar el riesgo para la salud humana.		X	X
Determinar posibles riesgos para el medio ambiente.		X	X
Activar los procedimientos de control en episodios de contaminación.			X
Estudiar fuentes de contaminación e investigar quejas concretas.	X	X	X
Validar modelos de dispersión de la calidad del aire.		X	X
Adelantar investigaciones científicas.	X	X	X

Fuente: Hernández y Obregón (2020).

### **6.2.6 Grupos focales: Tecnologías meteorológicas**

Se encontró que las autoridades ambientales y gremios priorizaron el criterio de estaciones meteorológicas, las consultoras y laboratorios priorizaron el criterio de estaciones meteorológicas portátiles (66,70%) y no se obtuvieron respuestas por parte de la academia en relación con el uso de este tipo de tecnologías (*Figura 22*). Dentro de las dificultades mencionadas por los grupos focales se encuentra: la dificultad de hacer trazabilidad a la medición de variables meteorológicas, poca rigurosidad en el uso de variables meteorológicas para el diseño de SVCA industriales y la ausencia de especificaciones requeridas para la selección de equipos y estaciones meteorológicas. Basado en lo anterior, se mencionan algunos aspectos mencionados en publicaciones realizadas a nivel nacional.

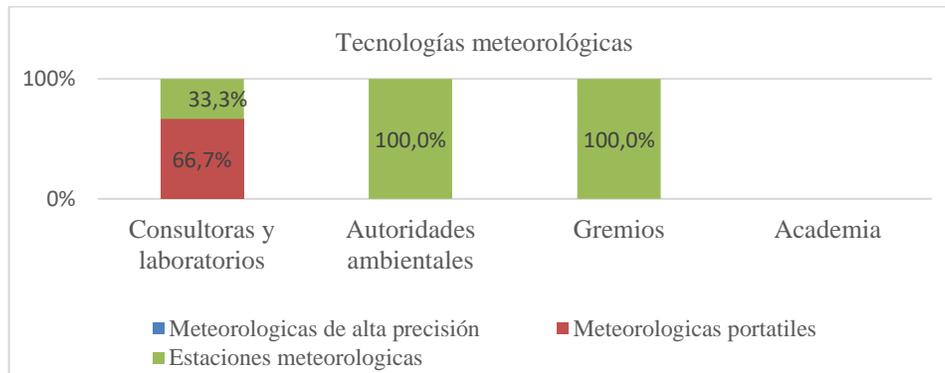


Figura 22. Criterios priorizados por talleres focales para la selección de tecnologías meteorológicas.

Inicialmente, Serrano (2006) indica que para obtener datos meteorológicos representativos en los estudios sobre la contaminación del aire es clave la ubicación adecuada de los instrumentos, resultando más económico ponerlos en el mismo sitio de los equipos de monitoreo de calidad del aire lo que implica según Hernández et al. (2020) que cada equipo de monitoreo debe contar con su estación meteorológica. Por su parte el MADVT (2010a) recomienda instalar en todas las estaciones sensores de velocidad y dirección de viento, precipitación, temperatura, brillo solar, radiación, presión y humedad. Respecto a los anteriores parámetros en la *Tabla 32* se indican los equipos meteorológicos a utilizar y algunas consideraciones en su ubicación. Además, la selección de instrumentos meteorológicos debe permitir según Hernández et al. (2020) un tiempo de muestreo continuo permitiendo así una captura de datos de forma periódica al mismo tiempo que el equipo de monitoreo, es decir que si esta captura el dato cada hora la estación lo realice de la misma forma.

Tabla 32. Parámetros y equipos meteorológicos requeridos en el monitoreo de la calidad del aire.

Parámetro	Equipo	Consideraciones
Velocidad del viento	Anemómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación en sitios amplios y lejos de obstrucciones.</li> <li>• Altura estándar de exposición de instrumentos de viento en terreno abierto: 10m sobre el suelo.</li> <li>• Emplazamiento: suficientemente alejado de árboles, edificios, muros u otros obstáculos</li> <li>• Instalación de instrumentos exteriores: en terreno llano en un área no inferior a 25 metros por 25 metros,</li> </ul>
Dirección del viento	Veleta	
Temperatura	Psicrómetro y termógrafo	
Humedad relativa	Psicrómetro e hidrógrafo	
Presión barométrica	Barómetro	
Brillo solar	Heliógrafo	
Radiación solar	Actinógrafo	
Precipitación	Pluviógrafo	

Fuente: Adaptado de IDEAM (2018).

### 6.2.7 Grupos focales: Análisis de datos

Se encontró que el criterio priorizado para la fase de análisis de datos por todos los grupos focales fue la validación de datos (Figura 24). Las respuestas estuvieron orientadas a la necesidad de establecer una metodología o procedimiento para la validación de datos de monitoreo de contaminantes criterio y monitoreo de parámetros meteorológicos, completar datos faltantes y realizar tratamiento estadístico de los mismos. En la Figura 25 se resaltan los aspectos tenidos en cuenta para la validación de datos establecido por el protocolo actual (MADVT,2010b).

La validación de los datos alimentados es responsabilidad de las Autoridades Ambientales, con base en los criterios definidos por el IDEAM (2011) en el documento “Guía práctica para la validación de datos en los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire - SVCA existentes en Colombia – GPVD”, que hace parte de la operación estadística, así como los lineamientos dados en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del Min ambiente. Además de lo mencionado, el IDEAM (2011) establece que la validación es de forma rutinaria y debe considerar mínimo el conjunto de datos del día inmediatamente anterior, así como la disponibilidad de personal idóneo con conocimiento sobre química atmosférica (IDEAM, 2011). Adicionalmente, se debe considerar el uso de un software especializado tanto para la gestión de los datos, el manejo estadístico y el uso de gráficas (IDEAM, 2011).

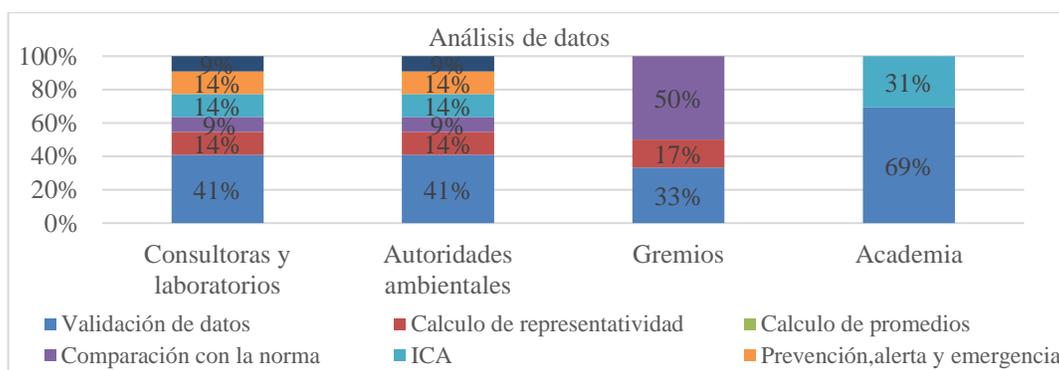


Figura 23. Criterios priorizados por los talleres focales para el análisis de datos en los SVCA.

Para el desarrollo de las gráficas es importante considerar la correlación existente entre los parámetros monitoreados de acuerdo a la química de contaminantes y la presencia de fuentes de contaminantes constantes (IDEAM, 2011). Basado en eso, se establecen las siguientes

relaciones: PST-PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub>-NO<sub>2</sub>-NO, SO<sub>2</sub>-PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>-CO. Por otro lado, se mencionan algunas herramientas estadísticas de apoyo a la validación: establecimiento de rangos por hora, verificación de datos atípicos, histogramas para visualizar el comportamiento normal de los datos y medidas de asociación como Pearson y Spearman (IDEAM, 2011).

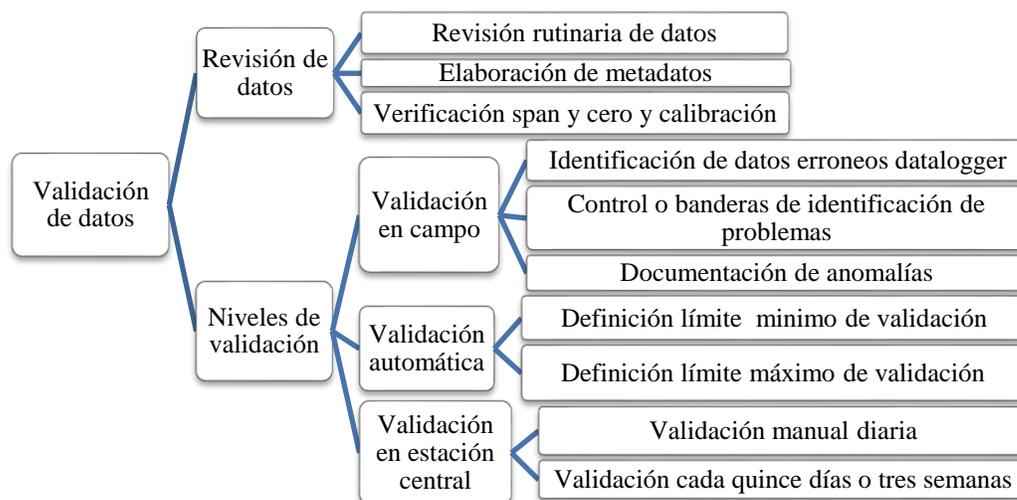


Figura 24. Aspectos considerados en la validación de datos. Fuente: Adaptado de MADVT (2010a).

### 6.2.8 Grupos focales: Presentación de la información obtenida del monitoreo

El principal criterio priorizado por autoridades ambientales, gremios y academia fue la divulgación de información (33,3%, 63,6% y 53,3%, respectivamente). Por su parte, las consultoras y laboratorios priorizaron el reporte de información (77,8%) como se observa en *Figura 26*. Las respuestas relacionadas con el reporte de información se resalta la necesidad de desarrollar un formato de boletín para realizar informes estandarizados, y establecer el contenido de informes exigidos a proyectos, obras y actividades.

Inicialmente, se debe mencionar que el nivel de organización y estandarización del reporte de información exigido a los SVCA del país es determinante para asegurar la correcta divulgación de la información obtenida del monitoreo de la calidad del aire. Es necesario considerar que a nivel nacional ese reporte de información se realiza por medio de SISAIRE, la principal fuente de captura, almacenamiento, transferencia, procesamiento y consulta de información nacional en relación a la calidad del aire (SIAC, 2016). Este sistema tiene la capacidad de cargar automáticamente las mediciones de calidad del aire entregada por

aquellas autoridades ambientales que poseen sistemas capaces de centralizar la información reportada por las estaciones, es decir que cuenten con equipos automáticos para la medición (IDEAM, 2019b).

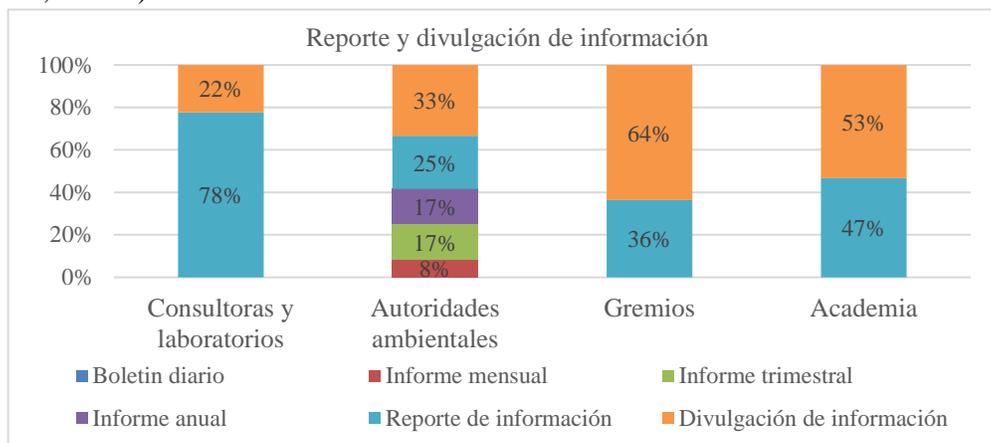


Figura 25. Criterios priorizados por grupos focales para el reporte y divulgación de información.

Según las respuestas obtenidas de los grupos focales, el aplicativo SISAIRE presenta dificultades al momento de cargar datos diarios cuando estos son emitidos por sistemas automáticos y la consulta pública de dicha información aún es limitada. Por eso, una de las principales dificultades identificadas por Ortiz (2016) en la evaluación de población expuesta a la contaminación atmosférica está asociado a la disponibilidad de datos de monitoreo e información en el SISAIRE, así como las restricciones de recursos humanos, técnicos y financieros que pueden limitar el reporte periódico. Se encontró que los aspectos comentados por los expertos también fueron contemplados en el CONPES 3943 de 2018 donde se solicita la actualización y modernización del SISAIRE a través de un nuevo sistema de información que garantice el acceso en tiempo real a los datos de calidad del aire que reporten los SVCA automáticos y manuales que operen en el país (DNP, 2018).

### 6.2.8 Grupos focales: Fase de evaluación y seguimiento

Se encontró que los grupos focales priorizaron el criterio aseguramiento de la calidad en la fase de evaluación y seguimiento de los SVCA (Figura 27). La priorización de ese criterio se debe a que en calidad del aire esta actividad permite producir datos que refleje a los usuarios de manera genuina la situación existente, cumpliendo criterios de integridad, precisión, exactitud, representatividad e interoperabilidad (MADVT, 2010b). En la Figura

28 se establece los principales procedimientos para implementar un programa de aseguramiento de la calidad en Colombia.

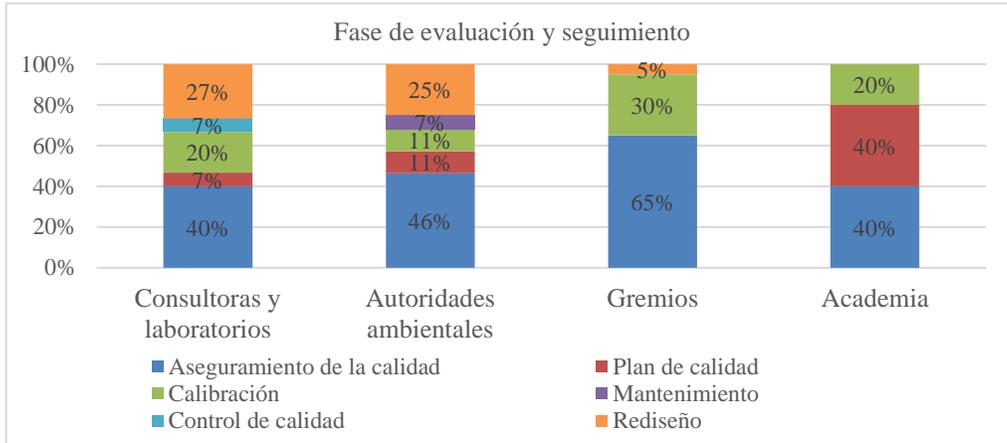


Figura 26. Criterios priorizados por grupos focales para la fase de evaluación y seguimiento.

Un aspecto fundamental en el aseguramiento de la calidad está relacionado con el proceso de acreditación realizado por el IDEAM a los SVCA. Dicho proceso comprende el reconocimiento de la competencia técnica para los laboratorios que produzcan información para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes (Gobierno de Colombia, 2020). Este proceso involucra visitas de auditoría conforme a lo establecido en la NTC17025:2017 y pruebas de desempeño para aprobar variables y métodos que al laboratorio le interesa acreditar (IDEAM, 2014).

En la revisión realizada se encontró que el protocolo presenta información amplia sobre las actividades, procedimientos y documentación requerida para el aseguramiento de la calidad. Sin embargo, no se presenta información sobre el procedimiento de acreditación y la aplicación de la NTC 17025:2017, a pesar que este tema tiene gran cantidad de mención en las respuestas entregadas por los grupos focales. De esa manera, se encontró que los grupos focales resaltaron la necesidad de explicar de manera clara el proceso de acreditación y su tiempo de duración, solicitando que se hiciera distinción de dicho proceso para entidades públicas y privadas e indicaron dar mayor relevancia a los procedimientos de acreditación mejorando la capacidad técnica y fortaleciendo el acompañamiento por parte del IDEAM en su ejecución. Dicho lo anterior, Serrano (2006) resalta los procesos de auditoría para efectuar una revisión completa de la evaluación y seguimiento de la calidad del aire y el

IDEAM (2014) muestra los pasos que hacen parte del trámite de acreditación de laboratorios contemplando la fase de auditoría y pruebas de desempeño (Figura 29).

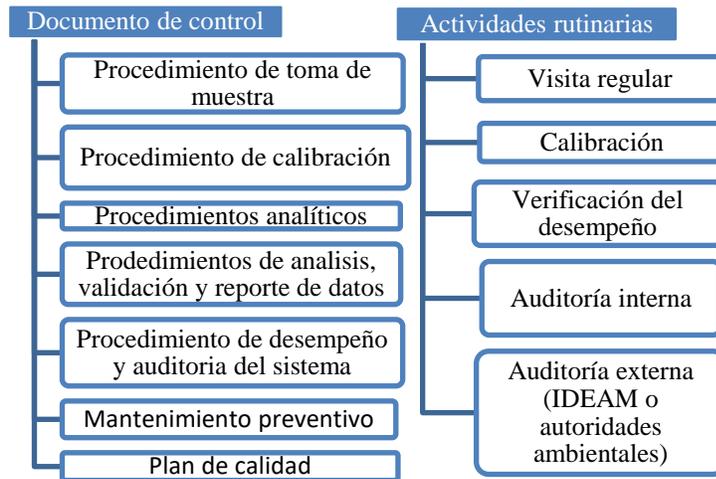


Figura 27. Procedimientos programa de aseguramiento de calidad SVCA. Fuente: MADVT (2010b).

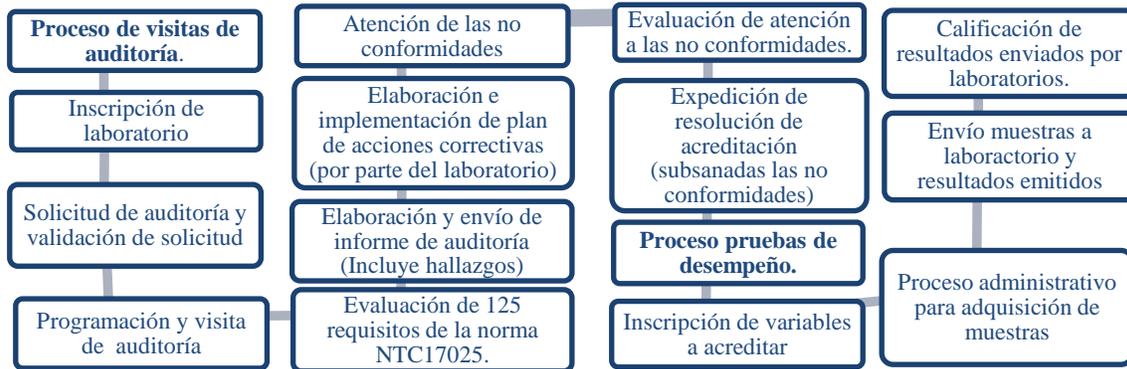


Figura 28. Procedimiento de acreditación de laboratorios. Fuente: IDEAM (2014).

### 6.2.9. Análisis comparativo: criterios priorizados a nivel nacional e internacional

Se encontró que cuatro de los criterios priorizados a nivel nacional por los grupos focales coincidieron con los criterios priorizados a nivel internacional (modelización preliminar, macro localización de estaciones, métodos de referencia y clases de estaciones meteorológicas). De acuerdo a los ítems de clasificación, se observó que a nivel mundial el principal criterio priorizado fue “Sistematización de datos” ( $Q3 = 0,583$ ), los países objeto de revisión priorizaron el criterio “Cálculo del ICA” ( $Q3 = 0,74$ ), mientras que a nivel nacional el criterio con mayor número de respuestas fue “Actividades industriales” ( $Q1 = 0,118$ ) (Tabla 33).

Como resultado del análisis estadístico para muestras no paramétricas de Spearman (*Tabla 34*) se determinó una correlación positiva alta entre los índices Q promedio a nivel mundial y en los países referentes ( $\rho = 0,712$ ), una correlación positiva baja entre el índice Q promedio a nivel mundial y el índice calculado a nivel nacional según los resultados obtenidos en los grupos focales ( $\rho = 0,213$ ), y una correlación positiva muy baja entre el índice Q promedio en los países referentes y el índice calculado a nivel nacional según los resultados obtenidos en los grupos focales ( $\rho = 0,192$ ) (*Tabla 34*). Aunque no se determinó una correlación alta para todos los criterios analizados, los resultados demuestran que algunos de los criterios se encuentran alineados con estándares internacionales ya que la normativa establecida por la mayoría de países revisados se basa en las regulaciones propuestas por la EPA y la Unión Europea. Dentro de los criterios que presentaron correlación alta se encuentra la modelización, la macro localización, la sistematización de datos y el reporte de información.

Por otro lado, otros criterios que priorizaron los expertos nacionales, requieren ser abordados de manera detallada teniendo en cuenta las dinámicas propias del contexto local y regional. Entre esos criterios se encuentran los relacionados con las actividades industriales, los muestreadores pasivos y el aseguramiento de la calidad.

Tabla 33. Análisis comparativo: Criterios priorizados para el diseño y operación de SVCA.

No.	Ítem	Criterio priorizado	Índice Q promedio mundial	Índice Q promedio países referentes	Índice Q promedio en grupos focales <sup>1</sup>	Índice promedio
1	Fase diagnóstico	Modelización preliminar	0,177	0,672	0,055	0,301
2	Fase de diseño de redes	Tipo de redes	0,499	0,362	0,019	0,293
3		Número de habitantes	0,505	0,355	0,016	0,292
4		Actividades industriales	0,323	0,199	0,110	0,211
5	Parámetros de medición	Ozono	0,202	0,321	0,001	0,175
6		Carbono negro	0,153	0,185	0,014	0,116
7		Tóxicos	0,168	0,158	0,035	0,120
8	Parámetros de diseño estaciones	Macro localización	0,485	0,538	0,026	0,350
9		Métodos de referencia	0,326	0,161	0,080	0,189

10	Técnicas y métodos de medición	Muestreadores pasivos y de bajo costo	0,121	0,102	0,042	0,088
11	Clases estaciones meteorológicas	Estaciones meteorológicas	0,168	0,147	0,013	0,109
12	Operación de redes	Sistematización de datos	0,583	0,703	0,005	0,431
13	Análisis de datos	Cálculo ICA	0,531	0,735	0,013	0,426
14	Presentación de la información obtenida del monitoreo	Reporte de información	0,512	0,483	0,042	0,346
15	Fase de evaluación y seguimiento	Plan de calidad	0,372	0,202	0,010	0,195

Nota: <sup>1</sup> Número de comentarios realizados por expertos entorno a los criterios priorizados. Fuente: Autores, 2021.

Tabla 34. Prueba de correlación índices evaluadas muestras no paramétricas de Spearman.

<b>Correlaciones</b>	<b>Índice Q promedio mundial</b>	<b>Índice Q promedio países referentes</b>	<b>Índice Q promedio grupos focales</b>
<b>Índice Q promedio mundial</b>	1,000	0,712	0,213
<b>Índice Q promedio países referentes</b>	0,712	1,000	0,191
<b>Índice Q promedio grupos focales</b>	0,213	0,191	1,000

Fuente: Autores, 2021

### **6.3. Requisitos para el diseño y operación de los sistemas de vigilancia y calidad del aire urbano en Colombia**

Basado en los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica a nivel internacional, en los países referentes y a nivel nacional, así como el desarrollo de grupos focales, se identificaron y evaluaron los principales criterios para el diseño y operación de los SVCA en Colombia (*Tabla 33*). Según la información obtenida, se estableció una hoja de ruta para implementar los criterios priorizados en el diseño y operación de SVCA en Colombia a través del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (MADVT,2010). Para el desarrollo de la hoja de ruta se tuvo en cuenta aspectos mencionados por Alviol y Lloveras (2019) como el punto de partida (situación actual), la respuesta (futuro deseable y previsible) y las líneas de acción requeridas.

#### **6.3.1. Fortalecimiento y estandarización de la modelización preliminar**

Se requiere la evaluación de los modelos implementados a nivel mundial e internacional con el fin de definir la aplicabilidad en condiciones locales (*Figura 30*). De esta manera, se propone medir el nivel de predicción de modelos como CALPUFF, AERMOD, CMAQ, CAMx y ADMS en algunas zonas del país y establecer condiciones de uso para su efectiva aplicación. Esto es importante ya que según el DNP (2018) a nivel nacional no se cuenta con un lineamiento técnico que oriente los modelos implementados por las autoridades ambientales. Por ello es importante dar continuidad al desarrollo de la guía de modelación de calidad del aire nacional que según el MADVT (2010c) establecerá procedimientos estándar permitiendo la información sea comparable a nivel nacional y se constituya en una herramienta tanto para las autoridades ambientales como para los sectores productivos. La incorporación de lineamientos de modelización permite evaluar las necesidades de reubicación o de instalación de nuevas estaciones de monitoreo de calidad del aire, así como definir acciones de intervención sobre las fuentes que generan contaminantes del aire (DNP, 2018). De igual manera, la definición de modelos en el protocolo de monitoreo y vigilancia de calidad del aire permite determinar las áreas de exposición y áreas de excedencia en la fase de diagnóstico de tal manera que brinda información base para la fase de diseño de SVCA como se observa en el *Anexo 21*.

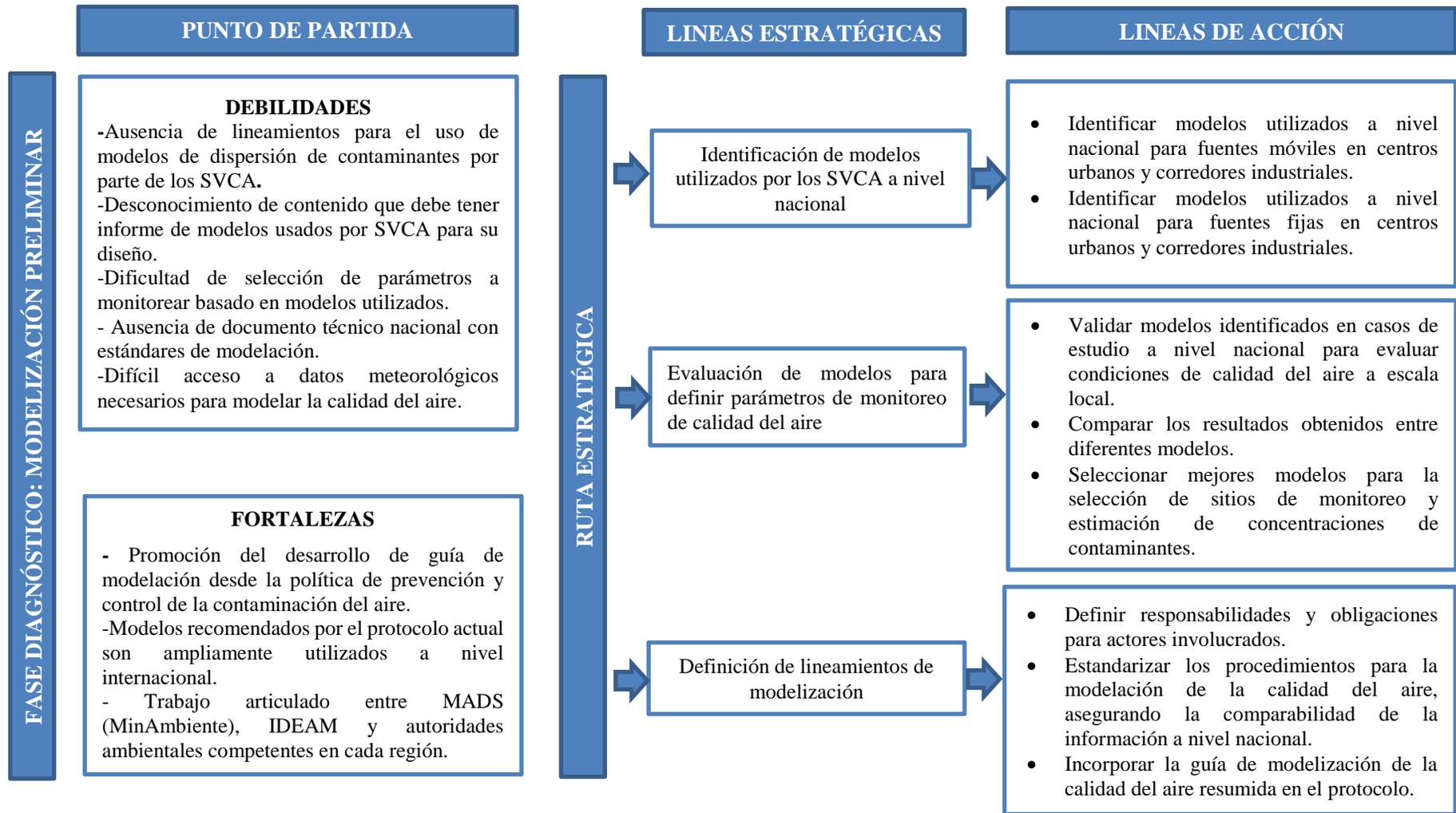


Figura 29. Hoja de ruta: fortalecimiento y estandarización de modelización preliminar.

### **6.3.2. Integración del número de habitantes y macro localización para determinar el diseño del SVCA**

El número de habitantes es uno de los criterios más importantes para el diseño de SVCA y esto implica que se incorporen metodologías que permitan evaluar adecuadamente su relación en aspectos como la definición de número de estaciones, parámetros a medir y objetivos de diseño. A pesar que el protocolo actual utiliza este criterio como principal criterio para la selección de SVCA, se requiere incorporar procedimientos técnicos que confirmen la idoneidad en el tipo de SVCA escogido como los propuestos por DEFRA (2019): la incorporación de herramientas SIG y la modelización local (Anexo 21). Lo anterior permite incorporar la densidad poblacional, las concentraciones de contaminación y la variabilidad espacial de la contaminación (Munir et al., 2019) para posteriormente en la etapa de macro localización establecer una zona de estudio, definir la ubicación y el número de estaciones de medición de calidad del aire que integrarán la red (INE, 2008a). De esta manera, es fundamental que el criterio de número de habitantes para la selección del tipo de SVCA se incorpore de manera integral con el proceso de macro localización de estaciones (Figura 31 y *Anexo 23*).

La aplicación de estos criterios debe realizarse por parte de las corporaciones autónomas regionales y las autoridades ambientales de los grandes centros urbanos en el área de su competencia y en el territorio de su jurisdicción (IDEAM., 2020). Dichas autoridades se encargan de determinar a nivel local (municipal) qué centros urbanos requieren la aplicación de SVCA y qué tipo se ajusta basado en el seguimiento, la medición, la evaluación y el control de los fenómenos de contaminación del aire que se requiera (IDEAM, 2020). Debe tenerse en cuenta que junto con el MADS y el ANLA, se encargan de determinar SVCA adicionales que requieran ser incorporados como parte de condiciones locales específicas o especiales que involucren proyectos, obras y actividades que requieren un monitoreo adicional de la calidad del aire en el territorio.

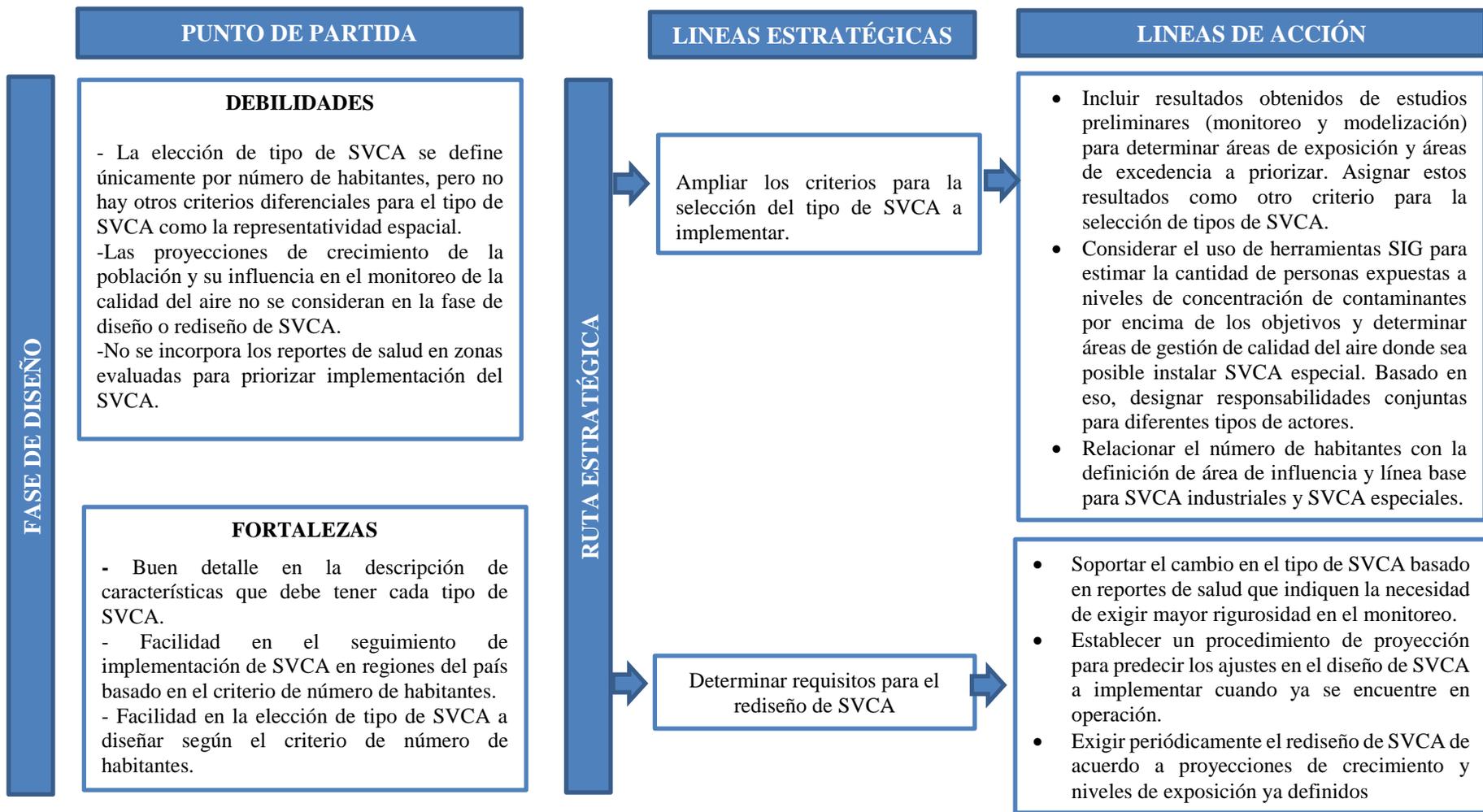


Figura 30. Integración del número de habitantes y macro localización para determinar el diseño del SVCA.

### **6.3.3. Actualización de condiciones de monitoreo para contaminantes atmosféricos**

El Ozono resultó ser el principal parámetro de medición priorizado según la revisión bibliográfica nacional e internacional (*Anexo 6*). El protocolo establece las condiciones de ubicación de estaciones basado en los niveles medidos durante una semana (MADVT, 2010a), señalando las condiciones estándar de medición. Sin embargo, se requiere puntualizar en la necesidad de hacer su monitoreo de manera simultánea con el monitoreo de óxidos de nitrógeno (Pope et al., 2014), específicamente en las estaciones representativas de dióxido de nitrógeno (INE, 2008a). Así mismo se debe definir un periodo de monitoreo de al menos diez (10) días, una o dos veces al año, en épocas caracterizadas por niveles altos de temperatura y radiación.

Además, según el Clean Air Institute (2012) es primordial monitorear el PM<sub>2.5</sub> desde una perspectiva de salud y para facilitar información representativa de las potenciales reducciones del carbono negro. Por ello, desde el protocolo actual se debe adoptar el estándar de PM<sub>2.5</sub> como criterio mínimo de medición en los SVCA, dando alcance a la resolución 2254 de 2017. Además, se debe adelantar estudios y validaciones de los métodos actuales que permiten monitorear el carbono negro de manera indicativa para promover desde el protocolo el seguimiento de este contaminante (*Figura 32*).

### **6.3.1. Evaluación de nuevos métodos y técnicas de medición**

Inicialmente, desde el protocolo actual se puede sugerir la integración de métodos manuales convencionales con estaciones de monitoreo continuo en tiempo real basado en sensores remotos como lo sugiere Gulia et al. (2019). Un sistema integrado como el mencionado anteriormente se recomienda para mediciones locales, ya que sería muy costoso y difícil de mantener a escala regional (Gulia et al., 2019). Esto se debe a que a medida que aumenta el número de dispositivos en una red, los costos asociados con el programa de calibración y mantenimiento puede llegar a ser muy extenso (Miskell, 2016).

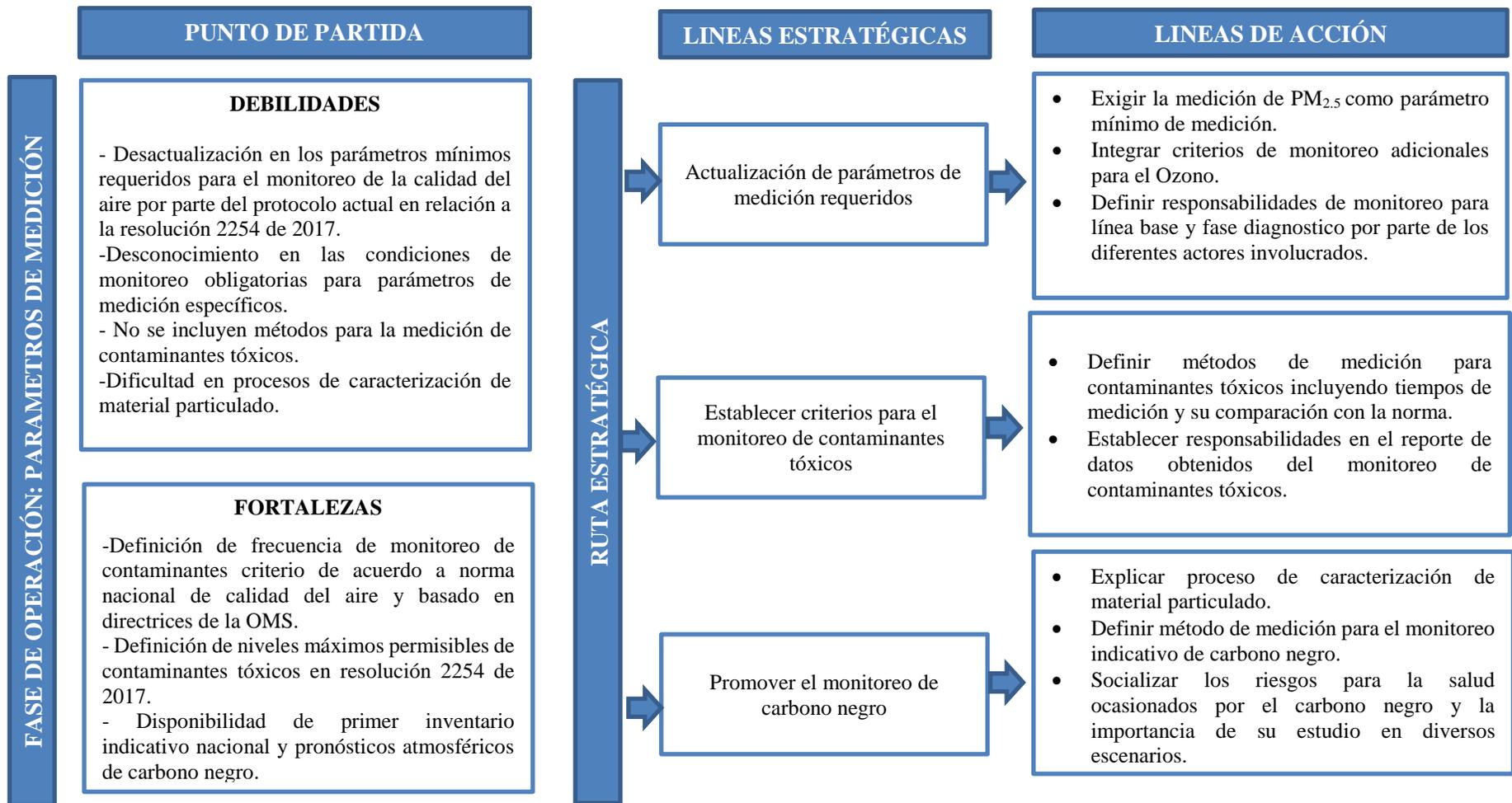


Figura 31. Hoja de ruta: Actualización de monitoreo de parámetros de medición.

En segundo lugar, el uso de muestreadores pasivos puede adoptarse por medio del protocolo actual de monitoreo para determinar concentraciones en estudios de línea base (Anexo 24), en periodos de un día a dos semanas, o inclusive, un año dependiendo del tipo de proyecto y los objetivos de monitoreo definidos (INE, 2008a). Este método se sugiere por algunos autores (p.e., Jiménez, 2007; INE, 2008a; Brauer, 2019) para estimar la distribución de la concentración de un contaminante (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, VOC's y O<sub>3</sub>), realizar estudios epidemiológicos, complementar campañas de monitoreo móvil y/o verificar los resultados del modelo de simulación. Esta técnica es utilizada en zonas donde las condiciones ambientales a lo largo del año no presentan grandes variaciones y su topografía es relativamente llana (INE, 2008a). Para su respectiva adopción se sugiere desarrollar protocolos de aseguramiento y calibración de campo para estos sensores.

#### **6.3.4. Determinar tipo y modo de operación de estaciones meteorológicas**

Es importante definir a través del protocolo (IDEAM) las características propias SVCA indicativo (**Portátil tipo I** con parámetros básicos dirección, viento, pluviómetro y temperatura), SVCA básico (**Portátil tipo II** Velocidad y dirección de viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa, pluviometría, presión barométrica) y SVCA Intermedio (tipo II). La medición de velocidad y dirección de los vientos es un componente necesario para identificar la ubicación de equipos requeridos para el monitoreo de los diferentes parámetros de medición (Gamboa y Arias, 2018; Ibáñez, 2018; Muñoz, 2018) y así como la temperatura y la humedad relativa, son parámetros meteorológicos mínimos que deben monitorearse en un SVCA. Basado en Hernández et al. (2020) es importante indicar que cada equipo de monitoreo debe contar con su estación meteorológica.

#### **6.3.5. Fortalecimiento en el análisis de datos**

El cálculo del ICA adoptado actualmente por Colombia, se basa en la metodología propuesta por la EPA. Es necesario fortalecer la interpretación de este índice para la posterior identificación de periodos de identificación y establecimiento de áreas de excedencia. Para asegurar el cálculo efectivo de este indicador se debe asegurar la disponibilidad de datos medidos en los SVCA, ya que según Garzón (2021) para el cálculo

del indicador es necesario que la cantidad de información cargada al SISAIRE, sea como mínimo el 75% de los datos que prevé medir en un año. Adicionalmente, se debe establecer condiciones estándar que permitan comparar la calidad del aire en diferentes ciudades en tiempo real a través del ICA por medio de sitios web (European Union, 2012). Lo anterior implica también fortalecer el proceso de divulgación de la información ya que el ICA es utilizado para proporcionar información simple sobre la calidad del aire local y brinda información al público sobre cómo proteger su salud (EPA,2009).

#### **6.3.6. Actualización de plataforma para el reporte y seguimiento de la información**

Como lo indica Clean Air Institute (2012) se debe mejorar el acceso a la información y aumentar la visibilidad de los datos que recoge cada SVCA. La información sobre la calidad del aire proporcionada por las autoridades ambientales debe asegurar la correcta difusión, coherencia y presentación (Peláez et al., 2020). El Clean Air Institute (CAI) recomienda que se establezca una base de datos central con los contaminantes más importantes, para formalizar y unificar la presentación y análisis de los mismos. Para ello, se debe modernizar la plataforma SISAIRE permitiendo unificar la presentación, análisis y visualización de datos monitoreados por todos los tipos de SVCA. Esto implica aumentar la capacidad de almacenamiento de datos en la plataforma, incluyendo los registros obtenidos no solo de las autoridades ambientales sino también de los proyectos, obras y actividades que realizan monitoreo a nivel nacional.

#### **6.3.7. Estandarización de los planes de calidad conforme a proceso de acreditación**

Un aspecto fundamental en la operación adecuada de los SVCA está relacionado con el aseguramiento de la calidad de los datos obtenidos en el proceso de monitoreo y el seguimiento realizado. Para ello, la ejecución de un plan de calidad estandarizado permite evidenciar la competencia técnica de los laboratorios encargados de realizar el monitoreo de la calidad del aire en cada una de las etapas relacionadas. En Colombia es importante que este documento se encuentre armonizado con los requisitos del documento NTC 17025:2017 adoptado por la resolución 268 de 2015 a nivel nacional.

## CONCLUSIONES

- Los resultados sugieren que el cálculo del ICA ( $Q = 0,735$ ), la sistematización de datos ( $Q_3 = 0,703$ ) y la modelización preliminar ( $Q = 0,566$ ) son los principales criterios tenidos en cuenta en el diseño y operación de los SVCA a nivel internacional por los países referentes. Esta información coincide con los criterios priorizados por Colombia según la revisión bibliográfica ( $Q = 0,730$ ,  $Q = 0,730$ , y  $Q = 0,645$ , respectivamente), evidenciando que estos criterios son importantes debido a que facilitan la transmisión de datos y la elaboración de pronósticos; los cuales son aspectos necesarios para la planificación eficiente de la calidad del aire.
- Se encontró una correlación positiva alta entre los índices Q promedio a nivel mundial y en los países referentes ( $\rho$ -Spearman =  $0,712$ ). Esto se debe a que la normatividad internacional de los países (Estados Unidos, México, Chile, Brasil, Japón e India) han adoptado estándares propuestos por la EPA en el código federal de regulaciones (CFR), título 40 parte 50 y parte 58. Por su parte, la Unión Europea y Reino Unido adoptaron la directiva 2008-50-CE relativa a la calidad del aire ambiente. A partir de la revisión realizada a los documentos normativos de dichos países se evidenció que en general la mayoría de países se encuentran alineados con estándares internacionales.
- Se encontró una correlación positiva muy débil ( $\rho$ -Spearman =  $0,192$ ) entre los criterios priorizados en países referentes en el monitoreo de la calidad del aire y los criterios priorizados por los grupos focales a nivel nacional. Este comportamiento se debe a que criterios como el monitoreo de tóxicos ( $Q = 0,120$ ), el diseño de SVCA para actividades industriales ( $Q = 0,110$ ), el monitoreo del carbono negro ( $Q = 0,014$ ), la frecuencia de monitoreo ( $Q = 0,039$ ) y el aseguramiento de la calidad ( $Q = 0,014$ ) fueron priorizados únicamente por expertos nacionales. Por lo tanto, esos criterios requieren estudios detallados con el fin de fortalecer su aplicación a nivel nacional por todos los actores involucrados.
- El principal criterio priorizado por los expertos en monitoreo de la calidad del aire a nivel nacional fue los métodos de referencia ( $Q = 0,080$ ). Este criterio también fue priorizado por los países referentes a nivel internacional ( $Q = 0,161$ ), siendo parte

esencial en el diseño de las redes de monitoreo. Los resultados sugieren que la adecuada aplicación de los métodos de referencia permite asegurar la calidad de los datos en la fase de operación y junto con la selección de técnicas de medición debe corresponder a la capacidad técnica y financiera disponible del tipo de SVCA a instalar.

- Los hallazgos sugieren que la definición de elementos normativos como el protocolo de la calidad del aire hace parte del proceso de planeación para el monitoreo efectivo por parte de los SVCA y en su ajuste o modificación debe incluirse a los actores involucrados en la gestión de la calidad del aire nacional (Autoridades ambientales, Consultoras, Gremios y Academia). Lo anterior considerando que a pesar que a nivel mundial se tienen estándares adoptados por países referentes en la calidad del aire presentando una correlación alta entre los índices Q promedio ( $\rho$ -Spearman = 0,712), se evidencia una correlación positiva baja entre el índice Q promedio mundial y las respuestas dadas por los expertos nacionales ( $\rho$ -Spearman = 0,213). Por lo tanto, la participación de dichos actores es vital para identificar los criterios que requieren asistencia e intensificación en el monitoreo de la calidad del aire siendo parte fundamental dentro de las estrategias para la reducción de emisiones y mejoramiento de la calidad del aire.
- La metodología utilizada en el presente estudio permitió identificar los principales aspectos tenidos en cuenta a nivel internacional y los criterios priorizados a nivel nacional para el diseño y operación de redes de monitoreo de calidad del aire. Dentro de los criterios que tuvieron mayor frecuencia de citación y repetición se encontró la sistematización de datos (Q = 0,431), el cálculo del ICA (Q = 0,426), el reporte de información (Q = 0,346), la macro localización de estaciones (Q = 0,350) y la modelización preliminar (Q = 0,301). Esto sugiere que en cada una de las fases de implementación de SVCA se deben tener en cuenta criterios que permiten recolectar, procesar, analizar y transmitir datos de gran importancia para la toma de decisiones e implementación de políticas públicas que permitan mejorar la calidad del aire.

## RECOMENDACIONES

- La modelización en la fase de diagnóstico se constituye una de las herramientas fundamentales para el diseño de SVCA brindando información importante para la ubicación de estaciones, parámetros de medición y definición de objetivos de monitoreo. Por ello, se sugiere que las autoridades competentes evalúen los modelos recomendados a nivel internacional con el fin de seleccionar aquellos que se ajusten a las condiciones locales y regionales. La implementación de modelos adecuados permitirá seleccionar adecuadamente los sitios de monitoreo y predecir las zonas que requieren una mayor gestión de la calidad del aire.
- Es necesario fortalecer el trabajo y la articulación entre los diferentes actores (Autoridades ambientales, Consultoras, Gremios y academia) encargados de la gestión de la calidad del aire en Colombia entorno a la elaboración de políticas públicas y documentos normativos como el Protocolo de Monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. De esa manera, se espera que las directrices establecidas a nivel nacional brinden respuesta a las necesidades específicas en cada municipio, fortalezca la implementación de SVCA, mejore el reporte de información y la verificación del cumplimiento de los objetivos o estándares nacionales de calidad del aire.
- Los resultados de la presente investigación permiten profundizar el conocimiento acerca del diseño y operación de SVCA y es un punto de referencia para los actores encargados de la gestión de la calidad del aire en Colombia. La validación de los criterios priorizados en el presente estudio requiere de un estudio de caso a nivel local que permita confirmar los resultados presentados en diferentes tipos de SVCA. Con esa información es posible identificar la aplicabilidad de la metodología utilizada en este estudio para la modificación, actualización o ajuste de otros elementos normativos que regulen la gestión de los recursos naturales en Colombia.
- Finalmente, las siguientes limitaciones forman parte de este estudio: (i) Frente a la aplicación de grupos focales se dificulta analizar los datos que estos generan de forma cuantitativa. Por ello, la aplicación de metodologías cualitativas para la recolección y

análisis de datos en la investigación es un reto para estudios futuros con el fin de ir más allá de la comunicación verbal y aumentar el rigor de la información obtenida de la experiencia de los actores involucrados. ii) El análisis de algunos criterios requiere estudios más detallados debido al nivel de complejidad en su aplicación. En el caso del diseño u operación de SVCA industriales y los métodos y técnicas de monitoreo, se requieren abordar futuros estudios a nivel nacional con el fin de determinar condiciones que permitan mejorar su implementación. Además, para este tipo de criterios es importante señalar que las dinámicas del territorio exigen cierta especificidad que dependerá del nivel de detalle en la fase diagnóstico.

## ANEXOS

Anexo 1. Identificación de criterios clave relacionados con la fase diagnóstico de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>.

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Modelización	Modeling	21696	0,889	17876	0,681	19200	0,087	0,552	Q3
Meteorología	Meteorology	8806	0,361	7174	0,273	17200	0,078	0,237	Q1
Inventario de emisión	Inventory	5432	0,223	5331	0,203	23200	0,105	0,177	Q1
Monitoreo preliminar	Preliminary Monitoring	4990	0,204	4431	0,169	25000	0,113	0,162	Q1

Nota. <sup>1</sup> Documentos publicados por 80 países en la base de datos SCOPUS. (\*) Índice Q promedio (\*\*) Cuartil promedio Q.

Anexo 2. Identificación de criterios clave para la fase de diagnóstico y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire.

Palabra clave Índice	Palabra clave	Key Word	COLOMBIA		USA		ESPAÑA		ITALIA		FRANCIA		REINO UNIDO		JAPÓN		INDIA		MÉXICO		CHILE		BRASIL		Índice promedio	Cuartil promedio (Q)
			*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**				
Diagnóstico	Modelización	Modeling	91	0,65	5190	0,71	1045	0,68	1233	0,69	1009	0,74	1855	0,72	3863	0,70	964	0,65	214	0,66	119	0,70	321	0,62	0,67	Q4
	Meteorología	meteorology	38	0,27	2319	0,32	514	0,34	512	0,28	534	0,39	745	0,29	1732	0,31	458	0,31	80	0,25	63	0,37	135	0,26	0,29	Q2



Diseño de sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire			
Permisos de emisiones	Actividades industriales	Número de habitantes	Tipo de redes
Emissions permit	Industrial activities	Population	Types of networks
3	24	52	46
0,02	0,17	0,37	0,33
115	1267	2859	2871
0,02	0,17	0,39	0,39
5	248	483	629
0,00	0,16	0,32	0,41
20	350	549	638
0,01	0,19	0,31	0,35
13	261	435	582
0,01	0,19	0,32	0,43
38	527	1103	1132
0,01	0,20	0,43	0,44
37	789	1428	1902
0,01	0,14	0,26	0,34
11	362	460	507
0,01	0,24	0,31	0,34
2	79	140	106
0,01	0,24	0,43	0,33
0	33	66	66
0,00	0,19	0,39	0,39
1	103	181	196
0,00	0,20	0,35	0,38
0,01	0,20	0,35	0,36
Q1	Q1	Q2	Q2

Nota. \*Documentos detectados. \*\*Índice de citación (Q)

Anexo 5. Identificación de criterios clave relacionados con los parámetros de medición de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>.

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Ozono	Ozone	5322	0,218	7590	0,289	22000	0,1	0,202	Q1
Tóxicos	Toxic	6133	0,251	4242	0,162	19900	0,090	0,168	Q1
Carbono negro	Black carbon	4675	0,192	4325	0,165	22300	0,101	0,153	Q1
Dióxido de Nitrógeno	Nitrogen dioxide	4375	0,179	4675	0,178	17800	0,081	0,146	Q1
PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>2,5</sub>	2180	0,089	4637	0,177	16900	0,077	0,114	Q1
Dióxido de sulfuro	Sulfur dioxide	3318	0,136	3142	0,120	17000	0,077	0,111	Q1
PM <sub>10</sub>	PM <sub>10</sub>	1680	0,069	3727	0,142	18400	0,084	0,098	Q1
Monóxido de carbono	Carbon Monoxide	2785	0,114	2441	0,093	17900	0,081	0,096	Q1





Parámetros de diseño				
Tipo de estaciones	Micro localización de estaciones	Toma de muestras	Costos	Macro localización de estaciones
Type of stations	Location of stations	Sampling	Costs	Scales
13	17	39	54	75
0,09	0,12	0,28	0,38	0,53
726	704	2090	2373	4439
0,10	0,10	0,29	0,33	0,61
201	197	437	421	776
0,13	0,13	0,29	0,27	0,51
200	176	459	655	983
0,11	0,10	0,26	0,36	0,55
179	163	371	369	883
0,13	0,12	0,27	0,27	0,65
292	259	695	1080	1652
0,11	0,10	0,27	0,42	0,64
528	429	1013	1251	3053
0,10	0,08	0,18	0,23	0,55
166	224	287	515	677
0,11	0,15	0,19	0,35	0,45
20	24	83	85	174
0,06	0,07	0,26	0,26	0,54
18	19	56	49	85
0,11	0,11	0,33	0,29	0,50
40	38	165	158	281
0,08	0,07	0,32	0,30	0,54
0,10	0,10	0,26	0,32	0,54
Q1	Q1	Q2	Q2	Q3

Nota. \*Documentos detectados. \*\*Índice de citación (Q)

Anexo 9. Identificación de criterios clave relacionados con las técnicas y métodos de medición de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>.

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Métodos de referencia	Reference methods	14787	0,606	4886	0,186	40700	0,185	0,326	Q2
Muestreador pasivo	Low-cost sensors	4076	0,167	2879	0,110	18700	0,085	0,121	Q1

Sensores remotos	Remote sensing	3438	0,141	3637	0,139	18500	0,084	0,121	Q1
Equipos activos manuales	Manual active equipment	2413	0,099	427	0,016	17800	0,081	0,065	Q1
Muestreador activo semiautomático	Semi-automatic active sampler	1050	0,043	446	0,017	19700	0,089	0,050	Q1
Analizadores automáticos	Automatic Analyzers	744	0,030	208	0,008	19000	0,086	0,042	Q1

Nota. <sup>1</sup> Documentos publicados por 80 países en la base de datos SCOPUS.

(\*) Índice Q promedio (\*\*) Cuartil promedio Q.

Anexo 10. Identificación criterios clave relacionados con técnicas y métodos de medición y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire.

Palabra clave Índice	Palabra clave	Key Word	COLOMBIA		USA		ESPAÑA		ITALIA		FRANCIA		REINO UNIDO		JAPÓN		INDIA		MÉXICO		CHILE		BRASIL		Índice promedio	Cuartil promedio (Q)
			*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**		
Técnicas y métodos de medición	Métodos de referencia	Reference methods	19	0,13	1570	0,22	306	0,2	408	0,23	320	0,24	694	0,27	690	0,12	269	0,18	62	0,19	26	0,15	2	0,00	0,16	Q1
	Sensores remotos	Remote sensing	22	0,16	1207	0,17	192	0,13	305	0,17	252	0,19	375	0,15	825	0,15	255	0,17	76	0,23	16	0,09	61	0,12	0,15	Q1

	Analizadores automáticos	Muestreador activo semiautomático	Equipos activos manuales	Muestreador pasivo
	Automatic Analyzers	Semi-automatic active sampler	Manual active equipment	low-cost sensors
	1	5	3	20
	0,01	0,04	0,02	0,14
	63	134	67	843
	0,01	0,02	0,01	0,12
	16	37	24	176
	0,01	0,02	0,02	0,11
	17	39	21	292
	0,01	0,02	0,01	0,16
	17	25	2	148
	0,01	0,02	0,00	0,11
	42	47	73	362
	0,02	0,02	0,03	0,14
	19	51	42	410
	0,00	0,01	0,01	0,07
	11	20	24	235
	0,01	0,01	0,02	0,16
	3	4	4	25
	0,01	0,01	0,01	0,08
	0	14	2	10
	0,00	0,08	0,01	0,06
	1	14	96	2
	0,00	0,03	0,18	0,00
	0,01	0,03	0,04	0,10
	Q1	Q1	Q1	Q1

Nota. \*Documentos detectados. \*\*Índice de citación (Q).

Anexo 11. Identificación de criterios clave relacionados con tecnologías meteorológicas de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>.

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Estaciones meteorológicas	meteorological stations	6838	0,280	3624	0,138	19000	0,086	0,168	Q1
Meteorología de alta precisión	high precision meteorological	1864	0,076	549	0,021	19300	0,088	0,062	Q1

Meteorológicas portátiles	portable meteorological	881	0,036	390	0,015	18400	0,083	0,045	Q1
---------------------------	-------------------------	-----	-------	-----	-------	-------	-------	-------	----

Nota. <sup>1</sup> Documentos publicados por 80 países en la base de datos SCOPUS. (\*) Índice Q promedio (\*\*) Cuartil promedio Q.

Anexo 12. Identificación de criterios clave relacionados con tecnología meteorológicas y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire.

Palabra clave Índice	Palabra clave	Key Word	COLOMBIA		USA		ESPAÑA		ITALIA		FRANCIA		REINO UNIDO		JAPÓN		INDIA		MÉXICO		CHILE		BRASIL		Índice promedio	Cuartil promedio (Q)		
			*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**				
Tecnologías de estaciones meteorológicas	Estaciones meteorológicas	Weather station classes	3	14	2	14	31	185	50	379	36	199	220	260	72	512	27	291	4	24	5	35	12	104	0,02	0,15		
			0,02	0,10	0,01	0,10	0,02	0,12	0,03	0,21	0,03	0,03	0,03	0,09	0,10	0,01	0,09	0,02	0,20	0,01	0,07	0,03	0,21	0,02	0,20	0,03	Q1	
			226	668	138	668	45	185	57	379	71	199	86	260	113	512	113	512	25	291	7	24	1	35	5	104	0,02	0,15
			0,03	0,09	0,02	0,09	0,03	0,12	0,03	0,21	0,05	0,03	0,03	0,09	0,10	0,01	0,09	0,02	0,20	0,02	0,07	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01	0,15	
			45	185	31	185	0,03	0,12	0,03	0,21	0,05	0,03	0,03	0,09	0,10	0,01	0,09	0,02	0,20	0,02	0,07	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01	0,15	
			57	379	50	379	71	199	86	260	113	512	113	512	25	291	25	291	25	291	7	24	7	24	7	24	7	24
			0,03	0,21	0,03	0,21	0,05	0,03	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,10	0,01	0,09	0,02	0,20	0,02	0,07	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01	0,15	
			71	199	36	199	86	260	113	512	113	512	25	291	25	291	25	291	25	291	7	24	7	24	7	24	7	24
			0,05	0,15	0,03	0,15	0,05	0,03	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,10	0,01	0,09	0,02	0,20	0,02	0,07	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01	0,15	
			86	260	220	260	113	512	113	512	25	291	25	291	25	291	25	291	25	291	7	24	7	24	7	24	7	24
			0,03	0,10	0,09	0,10	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,10	0,01	0,09	0,02	0,20	0,02	0,07	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01	0,15	
			113	512	72	512	113	512	113	512	25	291	25	291	25	291	25	291	25	291	7	24	7	24	7	24	7	24
	0,02	0,09	0,01	0,09	0,02	0,09	0,02	0,09	0,02	0,09	0,02	0,09	0,10	0,01	0,09	0,02	0,20	0,02	0,07	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01	0,15			
	25	291	27	291	25	291	25	291	25	291	25	291	25	291	25	291	25	291	7	24	7	24	7	24	7	24		
	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,20	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,07	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01	0,15		
	7	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24		
	0,02	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,07	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07		
	1	35	5	35	5	35	5	35	5	35	5	35	5	35	5	35	5	35	5	35	5	35	5	35	5	35		
	0,01	0,21	0,03	0,21	0,03	0,21	0,03	0,21	0,03	0,21	0,03	0,21	0,21	0,21	0,03	0,21	0,03	0,21	0,03	0,07	0,01	0,21	0,03	0,21	0,01	0,15		
	5	104	12	104	12	104	12	104	12	104	12	104	12	104	12	104	12	104	12	104	12	104	12	104	12	104		
	0,01	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,20	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,02	0,07	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01	0,15		
	0,02	0,15	0,03	0,15	0,03	0,15	0,03	0,15	0,03	0,15	0,03	0,15	0,15	0,15	0,03	0,15	0,03	0,15	0,03	0,07	0,01	0,21	0,03	0,15	0,02	0,15		
	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1		

Nota. \*Documentos detectados. \*\*Índice de citación (Q)

Anexo 13. Identificación de criterios clave relacionados con la fase de operación de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>.

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Sistematización de datos	Data system	21636	0,886	18767	0,715	32700	0,148	0,583	Q3
Frecuencia de monitoreo	Monitoring frequency	10910	0,447	4140	0,158	66000	0,3	0,302	Q2
Estrategia de muestreo	Sampling strategy	9065	0,371	2451	0,093	18300	0,083	0,183	Q1

Nota. <sup>1</sup> Documentos publicados por 80 países en la base de datos SCOPUS. (\*) Índice Q promedio (\*\*) Cuartil promedio Q.

Anexo 14. Identificación de criterios clave relacionados con la fase de operación y publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire.

Palabra clave Índice	Palabra clave	Key Word	COLOMBIA		USA		ESPAÑA		ITALIA		FRANCIA		REINO UNIDO		JAPÓN		INDIA		MÉXICO		CHILE		BRASIL		Índice promedio	Cuartil promedio (Q)
			*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**				
Operación de redes de monitoreo de calidad del aire	Sistematización de datos	Data system	103	0,73	5620	0,77	1077	0,70	1356	0,75	1042	0,77	1952	0,76	3759	0,68	1063	0,71	224	0,69	105	0,62	353	0,68	0,70	Q3
	Frecuencia de monitoreo	Monitoring frequency	25	0,18	1381	0,19	247	0,16	359	0,20	251	0,18	543	0,21	690	0,12	239	0,16	64	0,20	19	0,11	110	0,21	0,17	Q1

	Estrategia de muestreo	Sampling strategy
	12	
	0,09	
	857	
	0,12	
	145	
	0,09	
	200	
	0,11	
	156	
	0,11	
	348	
	0,14	
	295	
	0,05	
	112	
	0,08	
	29	
	0,09	
	13	
	0,08	
	54	
	0,10	
	0,09	
	Q1	

Nota. \*Documentos detectados. \*\*Índice de citación (Q)

Anexo 15. Identificación de criterios clave relacionados con análisis de datos de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>.

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Cálculo de promedios	Average calculates	19887	0,814	5229	0,199	137000	0,623	0,546	Q3
ICA	AQI Air quality Index	10654	0,436	18744	0,714	97400	0,443	0,531	Q3
Áreas fuente	Source areas	21320	0,873	14191	0,541	31200	0,142	0,519	Q3
Comparación con la norma	Standard comparison	14208	0,582	8662	0,330	42300	0,192	0,368	Q2
Validación de datos	Data validation	9753	0,399	6265	0,239	21100	0,096	0,245	Q1
Muestra representativa	Representative sampling	1294	0,053	1997	0,076	35700	0,162	0,097	Q1
Prevención, alerta y emergencia	Alarm events	1406	0,057	206	0,008	18100	0,082	0,049	Q1

Nota. <sup>1</sup> Documentos publicados por 80 países en la base de datos SCOPUS. (\*) Índice Q promedio (\*\*) Cuartil promedio Q.

Anexo 16. Identificación de criterios clave relacionados con el análisis de datos por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire.

Palabra clave Índice	Palabra clave	Key Word	COLOMBIA		USA		ESPAÑA		ITALIA		FRANCIA		REINO UNIDO		JAPÓN		INDIA		MÉXICO		CHILE		BRASIL		Índice promedio	Cuartil promedio (Q)
			*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**				
Análisis de Datos	ICA Índice de calidad del aire	AQI Air quality Index	103	0,73	5192	0,71	1099	0,72	1254	0,70	964	0,71	1960	0,76	4239	0,77	1080	0,72	226	0,70	121	0,71	412	0,79	0,74	Q3

Muestra representativa	Comparación con la norma	Cálculo de promedios	Validación de datos	Prevención. Alerta y emergencia	Áreas fuente
Representative sampling	Standard comparison	Average calculates	Data validation	Alarm events	Source areas
3	26	38	34	59	80
0,02	0,18	0,27	0,24	0,42	0,57
238	2021	1608	2157	2647	4269
0,03	0,28	0,22	0,30	0,36	0,59
43	291	309	422	551	859
0,03	0,19	0,20	0,28	0,36	0,56
39	404	268	541	610	924
0,02	0,22	0,15	0,30	0,34	0,51
51	312	7	542	450	736
0,04	0,23	0,01	0,40	0,33	0,54
82	752	515	750	1133	1429
0,03	0,29	0,20	0,29	0,44	0,56
107	844	1262	1196	1680	3146
0,02	0,15	0,23	0,22	0,30	0,57
36	307	297	336	517	796
0,02	0,21	0,20	0,23	0,35	0,53
6	86	82	65	145	187
0,02	0,27	0,25	0,20	0,45	0,58
3	36	49	46	68	115
0,02	0,21	0,29	0,27	0,40	0,68
13	100	101	133	195	280
0,02	0,19	0,19	0,26	0,37	0,54
0,02	0,22	0,22	0,25	0,38	0,57
Q1	Q1	Q1	Q2	Q2	Q3

Nota. \*Documentos detectados. \*\*Índice de citación (Q)

Anexo 17. Identificación de criterios clave relacionado con la presentación de información obtenida de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Reporte de información	Data report	19301	0,791	12265	0,467	61400	0,279	0,512	Q3
Informe anual	Annual report	12468	0,511	7358	0,280	85900	0,390	0,394	Q2
Boletín diario	Daily report	11280	0,462	4607	0,176	58400	0,265	0,301	Q2
Divulgación de información	Media	5802	0,237	6702	0,255	84700	0,385	0,293	Q2
Informe mensual	Monthly report	5309	0,217	2254	0,086	19200	0,087	0,130	Q1
Informe trimestral	Quarterly report	671	0,027	2551	0,097	19200	0,087	0,071	Q1

Nota. <sup>1</sup> Documentos publicados por 80 países en la base de datos SCOPUS.

(\*) Índice Q promedio (\*\*) Cuartil promedio Q.

Anexo 18. Identificación de criterios clave relacionados con la presentación de información obtenida del monitoreo publicado por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire.

Palabra clave Índice	Palabra clave	Key Word	COLOMBIA		USA		ESPAÑA		ITALIA		FRANCIA		REINO UNIDO		JAPÓN		INDIA		MÉXICO		CHILE		BRASIL		Índice promedio	Cuartil promedio (Q)
			*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**				
Presentación de información obtenida	Reporte de información	Data report	69	0,49	2732	0,38	706	0,46	914	0,51	739	0,54	1665	0,65	1956	0,35	663	0,44	157	0,48	78	0,46	247	0,47	0,48	Q2

	Informe trimestral	Informe mensual	Boletín diario	Divulgación de información	Informe anual
	Quarterly report	Monthly report	Daily report	Media	Annual report
	17	14	32	40	46
	0,12	0,10	0,23	0,28	0,33
	986	876	1666	1986	55
	0,14	0,12	0,23	0,27	0,01
	126	117	302	396	400
	0,08	0,08	0,20	0,26	0,26
	132	157	309	462	450
	0,07	0,09	0,17	0,26	0,25
	179	192	286	379	443
	0,13	0,14	0,21	0,28	0,33
	496	332	649	859	1114
	0,19	0,13	0,25	0,33	0,43
	221	396	739	1033	1026
	0,04	0,07	0,13	0,19	0,19
	125	123	238	384	410
	0,08	0,08	0,16	0,26	0,28
	28	28	72	91	99
	0,09	0,09	0,22	0,28	0,31
	11	30	28	51	40
	0,06	0,18	0,16	0,30	0,24
	38	43	94	160	147
	0,07	0,08	0,18	0,31	0,28
	0,09	0,10	0,19	0,28	0,29
	Q1	Q1	Q1	Q2	Q2

Nota. \*Documentos detectados. \*\*Índice de citación (Q)

Anexo 19. Identificación de criterios clave relacionados con la fase de evaluación y seguimiento de redes de monitoreo de calidad del aire y publicados a nivel mundial<sup>1</sup>.

Palabra clave	Key Word	Science Direct	Índice (Q)	Scopus	Índice (Q)	Google Scholar	Índice (Q)	*	**
Plan de calidad	Quality plan	15259	0,625	4612	0,176	69400	0,315	0,372	Q2
Control de calidad	Quality control	17771	0,728	531	0,020	26300	0,119	0,289	Q2
Mantenimiento	Maintenance	8195	0,336	1862	0,071	59700	0,271	0,226	Q1

Calibración	Calibration	5051	0,207	3724	0,142	19900	0,090	0,146	Q1
Aseguramiento de la calidad	Quality assurance	2613	0,107	1241	0,047	19300	0,087	0,081	Q1
Rediseño	Redesign	698	0,028	159	0,006	17200	0,078	0,038	Q1

Nota. <sup>1</sup> Documentos publicados por 80 países en la base de datos SCOPUS.

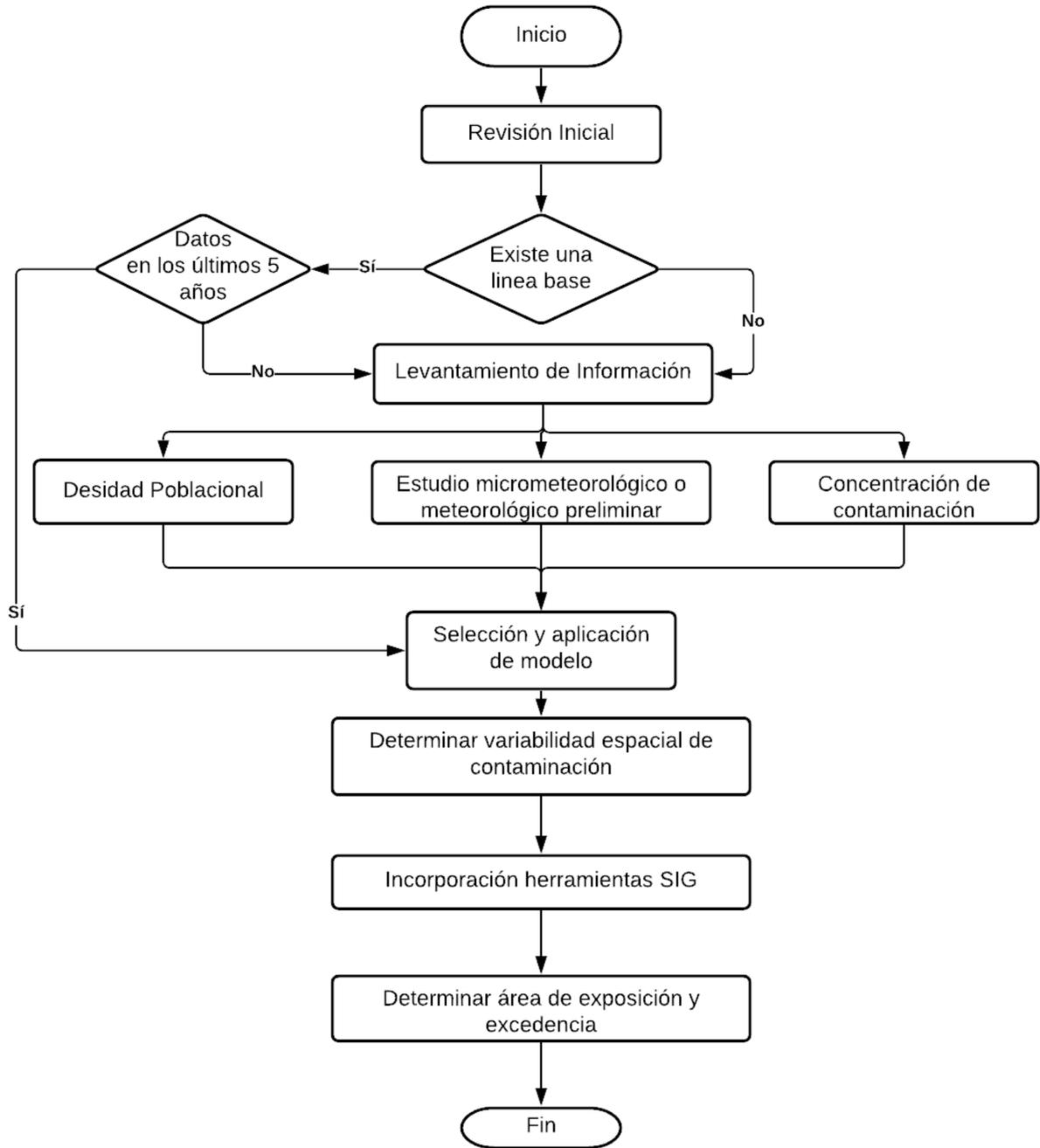
(\*) Índice Q promedio (\*\*) Cuartil promedio Q.

Anexo 20. Identificación de criterios clave relacionados con la fase de evaluación y seguimiento publicados por países referentes en el monitoreo de la calidad del aire.

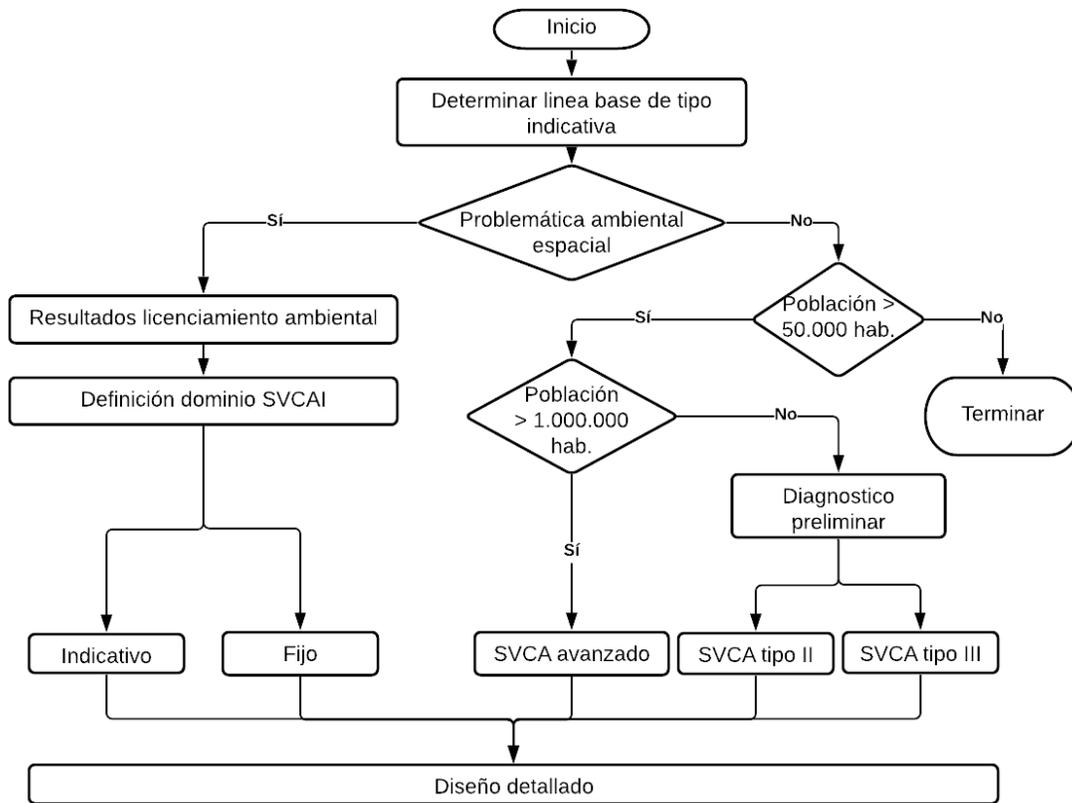
Palabra clave Índice	Palabra clave	Key Word	COLOMBIA		USA		ESPAÑA		ITALIA		FRANCIA		REINO UNIDO		JAPÓN		INDIA		MÉXICO		CHILE		BRASIL		Índice promedio	Cuartil promedio (Q)		
			*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**						
Fase de evaluación y seguimiento	Plan de calidad	Quality plan	7	43	634	1559	74	225	125	247	93	196	260	603	207	704	86	249	22	64	7	53	42	71	0,06	0,20		
			0,05	0,30	0,09	0,21	0,05	0,15	0,07	0,14	0,07	0,14	0,10	0,23	0,04	0,13	0,06	0,17	0,07	0,20	0,04	0,31	0,08	0,14	0,14	0,20		
	Calibración	Calibration	7	13	634	1300	74	259	125	342	93	267	260	456	207	706	86	192	22	27	7	34	42	75	0,06	0,14		
			0,05	0,09	0,09	0,18	0,05	0,17	0,07	0,19	0,07	0,20	0,10	0,18	0,04	0,13	0,06	0,13	0,07	0,08	0,04	0,20	0,08	0,14	0,14	0,14		
	Mantenimiento	Maintenance	7	13	634	1300	74	259	125	342	93	267	260	456	207	706	86	192	22	27	7	34	42	75	0,06	0,14		
			0,05	0,09	0,09	0,18	0,05	0,17	0,07	0,19	0,07	0,20	0,10	0,18	0,04	0,13	0,06	0,13	0,07	0,08	0,04	0,20	0,08	0,14	0,14	0,14		

	Control de la calidad	Rediseño	Aseguramiento de la calidad
	Quality control	Redesign	Quality assurance
	3	0	8
	0,02	0,00	0,06
	90	53	496
	0,01	0,01	0,07
	41	7	75
	0,03	0,00	0,05
	43	8	91
	0,02	0,00	0,05
	31	6	61
	0,02	0,00	0,04
	43	25	171
	0,02	0,01	0,07
	2	14	145
	0,00	0,00	0,03
	33	11	70
	0,02	0,01	0,05
	12	4	12
	0,04	0,01	0,04
	6	3	8
	0,04	0,02	0,05
	8	184	20
	0,02	0,35	0,04
	0,02	0,05	0,05
	Q1	Q1	Q1

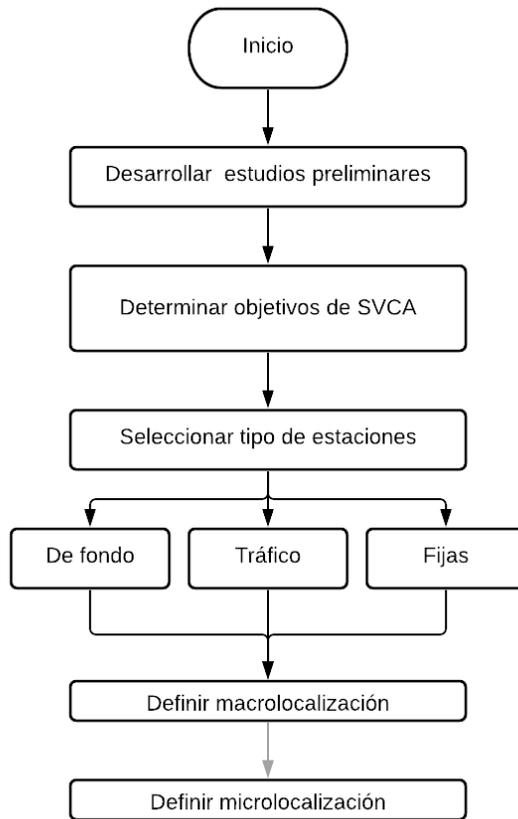
Nota. \*Documentos detectados. \*\*Índice de citación (Q)



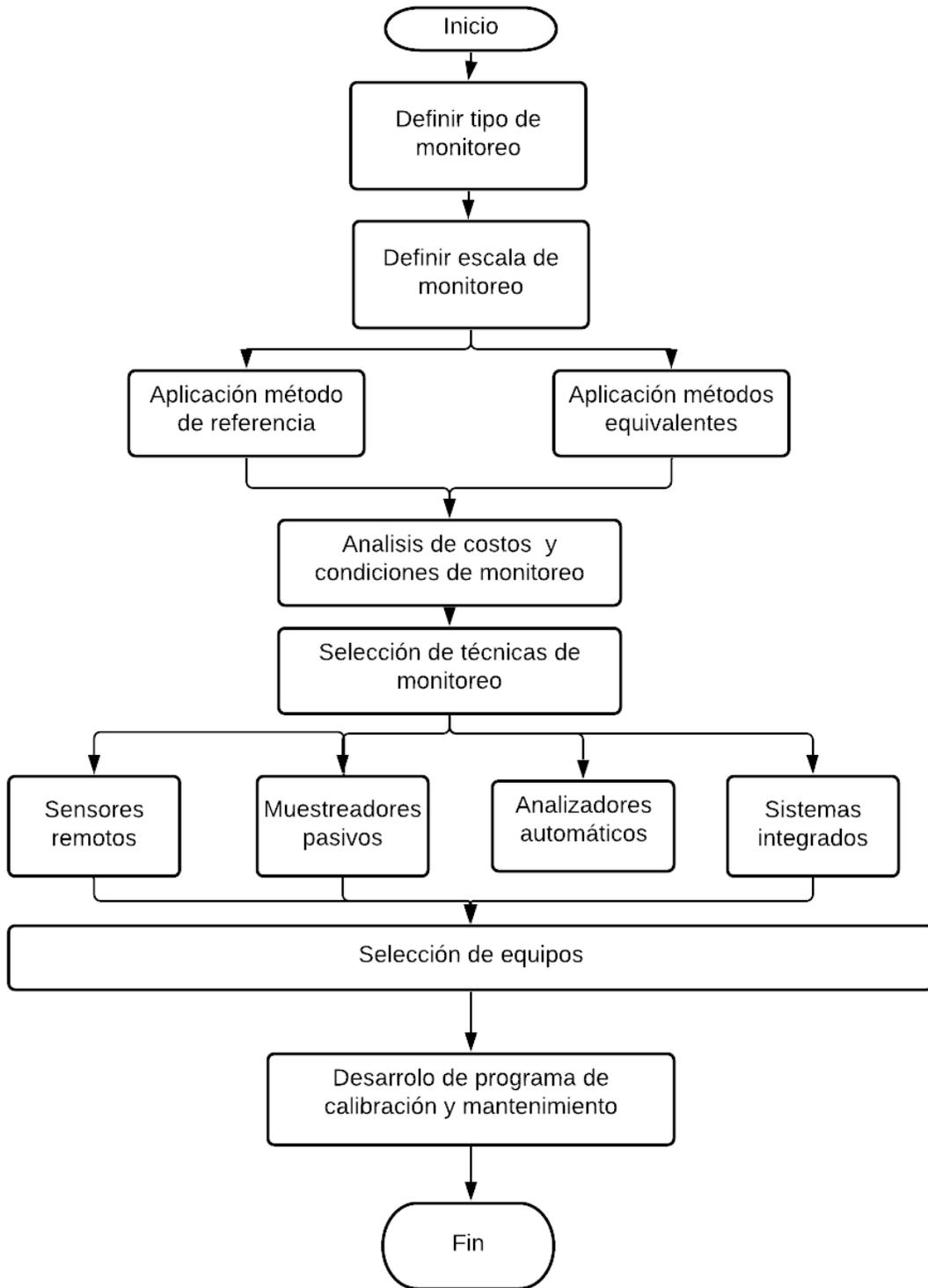
Anexo 21. Fase diagnostico SVCA. Fuente: Autores (2021).



Anexo 22. Fase de diseño de SVCA. Fuente: Adaptado de MADVT, 2010a.



Anexo 23. Macro localización SVCA. Fuente: Autores (2021).



Anexo 24. Métodos y técnicas de monitoreo. Fuente: Autores (2021).

## BIBLIOGRAFÍA

- 40 CFR: *Código de regulaciones federales Título 40 Sección 58*. Vigilancia de la calidad del aire ambiental. 2018.
- 40CFR: *Código de regulaciones federales Título 40 Sección 53*. Referencia de monitoreo ambiental del aire y métodos equivalentes. 2018.
- 40 CFR: *Código de regulaciones federales Título 40. Sección 50*. Normas nacionales de calidad del aire ambiente primario y secundario. 2018.
- Agencia Europea de Medio Ambiente, AEMA. (2013). *La calidad del aire en Europa: Informe 2012*. AEMA: Agencia Europea de Medio Ambiente. Madrid. Recuperado de: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/Calidad Aire en Europa\\_tcm30-185090.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/Calidad_Aire_en_Europa_tcm30-185090.pdf)
- Agencia Portuguesa do Ambiente (2010). *Manual de métodos e de procedimentos operativos das redes de monitorização da qualidade do ar*. Portugal. Recuperado de: [https://apambiente.pt/\\_zdata/LRA/Manuais,%20Guias,%20Notas%20Tecnicas/MANUAL%20DE%20MTODOS%20E%20DE%20PROCEDIMENTOS%20OPERATIVOS%20DAS%20REDES%20DE%20MONITORIZAO%202010\\_1.pdf](https://apambiente.pt/_zdata/LRA/Manuais,%20Guias,%20Notas%20Tecnicas/MANUAL%20DE%20MTODOS%20E%20DE%20PROCEDIMENTOS%20OPERATIVOS%20DAS%20REDES%20DE%20MONITORIZAO%202010_1.pdf)
- Albiol Rodríguez, J., & Lloveras Macia, J. (2009). *Proyectos de innovación a través de Roadmaps*. Recuperado de: [https://www.aepro.com/files/congresos/2009badajoz/ciip09\\_0207\\_0217.2451.pdf](https://www.aepro.com/files/congresos/2009badajoz/ciip09_0207_0217.2451.pdf)
- Ángel Macías, M. A., & Gallini, S. (2019). *Cooperación técnico-científica internacional en la construcción de redes de monitoreo atmosférico*. El caso de Bogotá (1960-2016). Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socio ambientales, (25), 143–167. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.25.2019.3619>

- Apte, J. S., Kirchstetter, T. W., Reich, A. H., Deshpande, S. J., Kaushik, G., Chel, A., ... & Nazaroff, W. W. (2011). *Concentrations of fine, ultrafine, and black carbon particles in auto-rickshaws in New Delhi, India*. *Atmospheric Environment*, 45(26), 4470-4480.
- Arnaudo, E., Farasin, A. y Rossi, C. (2020). *Un análisis comparativo para la estimación de la calidad del aire a partir de datos meteorológicos y de tráfico*. *Ciencias Aplicadas*, 10 (13), 4587.
- Arregoces, H. A., Mendoza, Y. I., & Rojano, R. E. (2018). *Evaluación del CALPUFF para Estimar Concentraciones Ambientales de PM 10 de una Cantera en Terrenos Complejos*. *Información tecnológica*, 29(5), 131-142
- Baldauf, R. W., Lane, D. D., Marotz, G. A., Barkman, H. W., & Pierce, T. (2002). *Application of a risk assessment-based approach to designing ambient air quality monitoring networks for evaluating non-cancer health impacts*. *Environmental monitoring and assessment*, 78(3), 213-227.
- Ban-Weiss, G. A., Lunden, M. M., Kirchstetter, T. W., & Harley, R. A. (2009). *Measurement of black carbon and particle number emission factors from individual heavy-duty trucks*. *Environmental science & technology*, 43(5), 1419-1424.
- Barrero, M. A., Orza, J. A. G., Cabello, M., & Cantón, L. (2015). *Categorization of air quality monitoring stations by evaluation of PM10 variability*. *Science of the Total Environment*, 524–525, 225–236.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.138>
- Bazurto, J., Zamora, W., Larrea, J., Muñoz, D. y Alvia, D. (2020). *System for monitoring air quality in urban environments applying low-cost solutions*, 2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). (pages. 1-6). IEEE.
- Bentley, J. P. (2005). *Principles of Measurement System*. Inglaterra: Pearson Education

- Bonilla Sánchez, J. S. (2016). *Evaluación sitios de instalación para una estación de monitoreo de la calidad del aire* (Bachelor's thesis, Uniandes), Bogotá.
- Bower, J., Hanninen, O., Kotlik, B., Mucke, H. G., Ozkaynak, H., Tarkowski, S., Tonnisen, K. (1999). *Monitoring ambient air quality for health impact assessment*. World Health Organization Regional Publications - European Series. World Health Organization. Recuperado de: [http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8785/Monitoring\\_Ambient\\_Air\\_Quality\\_for\\_Health\\_Impact\\_Assessment.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8785/Monitoring_Ambient_Air_Quality_for_Health_Impact_Assessment.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Brauer, M., Guttikunda, S. K., Nishad, K. A., Dey, S., Tripathi, S. N., Weagle, C., & Martin, R. V. (2019). *Examination of monitoring approaches for ambient air pollution: A case study for India*. *Atmospheric Environment*, 216, 116940.
- Brienza, S., Galli, A., Anastasii, G., & Bruschi, P. (2015). *A Low-Cost Sensing System for Cooperative Air Quality Monitoring in Urban Areas*. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s150612242>
- Cannistraro, G., Cannistraro, M., Cao, J., & Ponterio, L. (2018). *New technique monitoring and transmission environmental data with mobile systems*. *Instrum. Mes. Metrol*, 17, 549-562.
- Caubel, J. J., Cados, T. E., Preble, C. V., & Kirchstetter, T. W. (2019). *A distributed network of 100 black carbon sensors for 100 days of air quality monitoring in West Oakland, California*. *Environmental science & technology*, 53(13), 7564-7573.
- Central Pollution Control Board. (2003). *Guidelines for Ambient Air Quality Monitoring*. *Central Pollution Control Board*. [http://www.indiaairquality.info/wp-content/uploads/docs/2003\\_CPCB\\_Guidelines\\_for\\_Air\\_Monitoring.pdf](http://www.indiaairquality.info/wp-content/uploads/docs/2003_CPCB_Guidelines_for_Air_Monitoring.pdf)
- Chambliss, S. E., Preble, C. V., Caubel, J. J., Cados, T., Messier, K. P., Alvarez, R. A., ... & Apte, J. S. (2020). *Comparison of mobile and fixed-site black carbon measurements for high-resolution urban pollution mapping*. *Environmental Science & Technology*, 54(13), 7848-7857.

- Charmaz, K. (2000). *Grounded theory: Objectivist and constructivist methods*. En N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), *Handbook of qualitative research* (2.a ed., pp. 509-535). Thousand Oaks, CA, EE. UU.: Sage
- Cheng, W. L., Chen, Y. S., Zhang, J., Lyons, T. J., Pai, J. L., & Chang, S. H. (2007). *Comparison of the revised air quality index with the PSI and AQI indices*. *Science of the Total Environment*, 382(2-3), 191-198.
- Chiesa, G. (2020). *Technological Paradigms and Digital Eras*. In Politecnico di Torino (Ed.), *PoliTO Springer Series*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-26199-3>
- Ciro, L. L., & Barriga, J. E. C. (2018). *Metodología para la caracterización espacio-temporal de PM2.5 en el área urbana de la ciudad de Medellín-Colombia*. *Revista EIA*, 15(30), 113-132.
- CITEAIR II (Common Information to European Air). Indices definition. Recuperado el 1 de Febrero de 2021 de: [http://www.airqualitynow.eu/about\\_indices\\_definition.php](http://www.airqualitynow.eu/about_indices_definition.php)
- Clean Air Initiative for Asian Cities, CAI Asia. (2010). *Air Quality in Asia : Status and Trends 2010*. *Air Quality in Asia: Status and Trends 2010*, 21. <https://doi.org/10.5897/IJMMS12.082>
- Comisión Europea. (2018). *Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones*. Bruselas, Bélgica. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0330&from=FR>
- De Miranda, R. M., Pérez -Martínez, P. J., de Fátima Andrade, M., & Ribeiro, F. N. D. (2019). *Relationship between black carbon (BC) and heavy traffic in São Paulo, Brazil*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 68, 84-98.

- Decreto 104. *Norma primaria de calidad del aire para dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)*. Ministerio de Ambiente, Chile, 16 de mayo de 2019. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/N?i=1131641&f=2019-05-16&p>
- Decreto 112. *Norma primaria de calidad del aire para Ozono (O<sub>3</sub>)*. Ministerio Secretaría General Presidencia. Chile, 06 de Marzo de 2003. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/N?i=208198&f=2003-03-06&p>
- Decreto 114. *Norma primaria de calidad de aire para Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)*. Ministerio Secretaría General Presidencia. Chile, 06 de marzo de 2003. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/N?i=208185&f=2003-03-06&p>
- Decreto 115. *Norma primaria de calidad del aire para Monóxido de Carbono (CO)*. Ministerio Secretaría General de la presidencia. Chile, 10 de septiembre de 2002. Recuperado: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=202437>
- Decreto 12. *Norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirables MP 2,5*. Ministerio de medio ambiente. Chile, 09 de mayo de 2011. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1025202>
- Decreto 136. *Norma de calidad del aire para plomo en el aire*. Ministerio Secretaría General de la presidencia. Chile, 6 de enero de 2001. Recuperado de: [https://www.leychile.cl/Navegar/index\\_html?idNorma=179878](https://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=179878)
- Decreto 22. *Norma de calidad del aire secundaria de aire para anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>)*. Ministerio Secretaría General de la presidencia. Chile, 16 de abril 2010. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1012498>
- Decreto 25 de mayo de 1998. *Norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia*. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=99434>

- Decreto 40. *Reglamento del sistema de evaluación de Impacto ambiental*. Ministerio del Medio Ambiente. Chile, 12 de agosto de 2013. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1053563&idVersion=2014-10-06>
- Decreto 61. *Reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos*. Ministerio de salud; subsecretaría de salud pública. Chile, 19 de noviembre de 2008. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=281728>
- Department for Environment food and rural affairs-DEFRA (2019). *Air pollution in the UK 2018*. Annual report, United Kingdom. Recuperado de: <https://uk-air.defra.gov.uk/library/annualreport/index>
- Departamento Nacional de Planeación, DNP. (2005). *Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire*. Documento Conpes, 29. Recuperado de: [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2005/Conpes\\_3344\\_2005.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2005/Conpes_3344_2005.pdf)
- Departamento Nacional de Planeación, DNP. (2017). *Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones*. Departamento Nacional de Planeación. Bogotá D.C. Recuperado de: [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)
- Departamento Nacional de Planeación, DNP. (2018). *Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire*. Conpes, 86. Recuperado de: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3943.pdf>
- Department for Environment Food and Rural Affairs. (2018). *Local Air Quality Management Technical Guidance (TG16)*. Environment (Northern Ireland) Order 2002 Part III. Recuperado de: <https://laqm.defra.gov.uk/technical-guidance/>

- DIGESA. (2005). *Protocolo de Calidad del Aire*. Perú. Recuperado de: [http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma\\_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf)
- Directiva (2008/50/EC). *Directiva de Calidad del aire ambiente y más limpio para Europa*. Unión Europea. Recuperado de: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Directiva%202008-50-CE\\_calidad%20del%20aire\\_tcm30-187869.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Directiva%202008-50-CE_calidad%20del%20aire_tcm30-187869.pdf)
- Doyle, M. (2019). *International best practice in air quality monitoring network design (Vol. 61)*. Recuperado de: <https://www.environment.nsw.gov.au/-/media/OEH/Corporate-Site/Documents/Air/nepm-air-quality-monitoring-networks-review.pdf>
- Dresser, A. L., & Huizer, R. D. (2011). *CALPUFF and AERMOD model validation study in the near field: Martins Creek revisited*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(6), 647-659.
- Duyzer, J., van den Hout, D., Zandveld, P., & van Ratingen, S. (2015). *Representativeness of air quality monitoring networks*. *Atmospheric Environment*, 104, 88-101.
- Environmental Protection Agency, EPA. (2008). *Ambient Air Monitoring Strategy for State, Local, and Tribal Air Agencies*. Recuperado de: [https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/monitorstrat/AAMS for SLTs - FINAL Dec 2008.pdf](https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/monitorstrat/AAMS_for_SLTs_FINAL_Dec_2008.pdf)
- Environmental Protection Agency, EPA (2009). *Air Quality Index—A Guide to Air Quality and Your Health*, Recuperado el 3 de Abril de 2021 de: <https://www.airnow.gov/>
- Environmental Protection Agency, EPA. (2013). *Quality assurance handbook for air pollution measurement systems, Vol II. Ambient Air Quality Monitoring*

- Program. Recuperado de: <https://tisch-env.com/wp-content/uploads/2015/05/QA-Handbook-Vol-II.pdf>
- Environmental Protection Agency, EPA. (2017). *Criteria Air Pollutants*. Recuperado de: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
  - Environmental Protection Agency, EPA. (2018). *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*. Office of Air Quality Planning and Standards. Recuperado de: <https://www.airnow.gov/publications/air-quality-index/technical-assistance-document-for-reporting-the-daily-aqi/>
  - Escobar, J., & Bonilla Jiménez, I. (2009). *Grupos Focales: Una Guía Conceptual Y Metodológica*. Cuadernos Hispanoamericanos de Psicología, 9(1), 51–67.
  - European Environment Agency. (2016). *Air pollution monitoring in Europe- Problems and trends*. Copenhagen. Recuperado el 6 de septiembre de 2020 de: <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-058-8/page010.html>  
[f&src=s&st1=air+urban+quality+monitoring+network&nlo=&nlr=&nls=&sid=4373c2fe06c7616b6ac67b3cc3aa8600&sot=b&sdt=sisr&sl=51&s=TITLE-ABS-KEY%28air+urban+quality+monitoring+network%29&ref=%28july%29&relpos=6&citeCnt=0&searchTerm=](https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-058-8/page010.html)
  - Feichtinger, M., de Wit, R., Goldenits, G., Kolejka, T., Hollósi, B., Žuvela-Aloise, M., & Feigl, J. (2020). *Case-study of neighborhood-scale summertime urban air temperature for the City of Vienna using crowd-sourced data*. Urban Climate, 32, 100597.
  - Fernández Patier, R. (2007). *Metodología de la evaluación de la calidad del aire*. In Monografía XXII. Contaminación y Salud (Vol. 2, pp. 404–436). Madrid: Real Academia Nacional de Farmacia. Recuperado de: <https://www.analesranf.com/index.php/mono/article/view/606/623>

- Ferradás, E. G., Miñarro, M. D., Terrés, I. M. M., & Martínez, F. J. M. (2010). *An approach for determining air pollution monitoring sites*. Atmospheric Environment, 44(21-22), 2640-2645.
- Galindo-Domínguez, H. (2020). *Estadística para no estadísticos: una guía básica sobre la metodología cuantitativa de trabajos académicos* (Vol. 59). 3Ciencias.
- Garzón W.Y. (2021). Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Aire - ICA (Versión 1,1). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 7 recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/641368/2.01+HM+Indice+calidad+aire.pdf/5130ffb3-a1bf-4d23-a663-b4c51327cc05>
- Gobierno de Colombia (2020). *Acreditación de laboratorios ambientales en Colombia*. Trámites y servicios, Colombia. Recuperado de: <https://www.gov.co/ficha-tramites-y-servicios/T1711>
- Goitom, H. (2018). Regulación de la contaminación atmosférica: Sudáfrica. Recuperado el 19 de enero, 2020. Recuperado de: <https://www.loc.gov/law/help/air-pollution/southafrica.php>
- Gómez Comba, C. A. (2017). *Contaminación del aire de Medellín por PM10 y PM2.5 y sus efectos en la salud*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. Recuperado de: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17019/G%F3mezCombaCieloAmparo2017.pdf?sequence=1>
- Góngora Torres, M. J. (2020). *Consideraciones técnicas en el diseño de un sistema de vigilancia de calidad del aire para la Zona Metropolitana de Bucaramanga*. Universidad Santo Tomás, Bogotá. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/28431>
- Green, J., & Sánchez, S. (2013). *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica*. Clean Air Institute, 2020. Recuperado de:

[https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion\\_atmosferica/La\\_Calidad\\_del\\_Aire\\_en\\_América\\_Latina.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/La_Calidad_del_Aire_en_América_Latina.pdf)

- Gressent, A., Malherbe, L., Colette, A., Rollin, H. y Scimia, R. (2020). *Fusión de datos para el mapeo de la calidad del aire utilizando observaciones de sensores de bajo costo: viabilidad y valor agregado*. Environment International, 143, 105965.
- Guisande, C., Vaamonde, A., & Barreiro, A. (2011). *Tratamiento de datos con R, STATISTICA Y SPSS*. España: Díaz de Santos.
- Gulia, S., Nagendra, S. S., Barnes, J., & Khare, M. (2018). *Urban local air quality management framework for non-attainment areas in Indian cities*. Science of the Total Environment, 619, 1308-1318.
- Gulia, S., Nagendra, S. S., Khare, M., & Khanna, I. (2015). *Urban air quality management-A review*. Atmospheric Pollution Research, 6(2), 286-304.
- Gulia, S., Khanna, I., Shukla, K., Khare, M., (2019) *Ambient air pollutant monitoring and analysis protocol for low- and middle-income countries: An element of comprehensive urban air quality management framework*, Atmospheric Environment, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117120>
- Gutiérrez Gamboa, M. A., & Pinilla Arias, S. V (2018). *Lineamientos de la medición de la calidad del aire en cuanto A PM 2.5 y su implementación en programas de seguimiento y monitoreo*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Harrabin, R. (2019). *What is in the government's new environment bill?* BBC environment analyst, October 15th 2019. Recuperado de: <https://www.bbc.com/news/uk-politics-50044870>
- Hernández Camelo, I. M., & Obregón Rodríguez, A (2020). *Situación actual de los sistemas de vigilancia de calidad del aire y su proyección a 2030*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Recuperado de: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25381>

- Ibáñez Tique, J. A (2018). *Lineamientos de la medición de la calidad del aire en cuanto a monóxido de Carbono (CO) y su implementación en programas de seguimiento y monitoreo*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Instituto Hidrológico, meteorológico y de Estudios Ambientales, IDEAM (2011). *Guía práctica para la validación de datos en los sistemas de vigilancia de calidad del aire-SVCA existentes en Colombia-GPD*. Bogotá D.C. Recuperado de: <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/publicaciones.xhtml?clase=DOCUMENTOS>
- Instituto Hidrológico, meteorológico y de Estudios Ambientales, IDEAM (2014). *Acreditación de laboratorios*. Participación ciudadana, Colombia. Recuperado el 10 de Junio de 2021 de: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/acreditacion-laboratorios>
- Instituto Hidrológico, meteorológico y de Estudios Ambientales, IDEAM (2017). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2016*. Bogotá D.C. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/3.+Informe+del+Estado+de+la+Calidad+del+Aire+en+Colombia+2016.pdf/fb3eee92-6bcf-4979-9ea2-de0101496a2f?version=1.0>
- Instituto Hidrológico, meteorológico y de Estudios Ambientales, IDEAM (2018). *Ficha metodológica operación estadística variables meteorológicas*. Subdirección de meteorología. Bogotá D.C. Recuperado el 20 de mayo de 2021 de: <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Ficha+metodologica+variables+meteorologicas.pdf/d5915289-f08c-45c4-ad62-62efe957a1a3>
- Instituto Hidrológico, meteorológico y de Estudios Ambientales, IDEAM (2019a). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2018*. Bogotá, D.C.
- Instituto Hidrológico, meteorológico y de Estudios Ambientales, IDEAM (2019b). *Documento Metodológico-Estadísticas de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad*

- del Aire-EMSCA. Bogotá D.C. Recuperado de:*  
[http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72065195/M-GCI-M003+Documento+Metodologico+Monitoreo+y+Seguimiento+de+la+Calidad+d+el+Aire\\_Completo.pdf/7a53be28-cd96-432e-ac4e-898fbeb94300](http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72065195/M-GCI-M003+Documento+Metodologico+Monitoreo+y+Seguimiento+de+la+Calidad+d+el+Aire_Completo.pdf/7a53be28-cd96-432e-ac4e-898fbeb94300)
- Instituto Hidrológico, meteorológico y de Estudios Ambientales, IDEAM (2020). Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2019. Bogotá, D.C. Recuperado de:  
[http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023898/InformeCalidadAire\\_2019.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023898/InformeCalidadAire_2019.pdf)
  - IDEAM, MADS, Coalición del clima y aire limpio (2019). Inventario Nacional Indicativo de Emisiones de Contaminantes Criterio y Carbono Negro. Bogotá, Colombia.
  - Instituto Nacional de Ecología- INE (2016). *Manuales de monitoreo atmosféricos de México*. México. Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>
  - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2016). *Manuales de monitoreo atmosférico en México*. Recuperado el 18 de enero de 2020 de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/>
  - Instituto Nacional de Ecología, INE. (2008a). *Manual 3: Redes, estaciones y equipos de medición de la calidad del aire*. México. Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/3> - Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire.pdf
  - Instituto Nacional de Ecología, INE. (2008b). *Manual 5: Protocolo de manejo de datos de calidad del aire*. México. Recuperado de: <http://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/5%20-%20Protocolo%20de%20Manejo%20de%20Datos%20de%20la%20Calidad%20de%20Aire.pdf>

- Instituto Nacional de Salud, INS. (2018). *Carga de enfermedad ambiental en Colombia*. Informe Técnico Especial 10, 177. Recuperado de: [https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10\\_Carga\\_de\\_enfermedad\\_ambiental\\_en\\_Colombia.pdf](https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10_Carga_de_enfermedad_ambiental_en_Colombia.pdf)
- Jiang, X., & Yoo, E. H. (2018). The importance of spatial resolutions of community multiscale air quality (CMAQ) models on health impact assessment. *Science of the Total Environment*, 627, 1528-1543.
- Jiménez, R. (2009). *Campañas de medición: Herramientas esenciales para entender los fenómenos que determinan la calidad del aire y el flujo de gases de efecto invernadero*. In *Memorias II Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública* (p. 131).
- Jiménez, E. (2007). *Estudio, diseño y gestión de sistemas de medición de la contaminación atmosférica en Tarragona*. Escuela técnica de ingeniería, Universidad Rovira i Virgili, España. Recuperado de: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1130pub.pdf>
- Joly, C (2019). *An implementation of optimal interpolation for fine-scaled pollution modeling over the Paris area*. 19th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Harmo 2019.
- Khwaja, M. A., Umer, F., Shaheen, N., Sherazi, A., & Haq Shaheen, F. (2012). *Air Pollution Reduction and Control in South Asia Sustainable Development Policy Institute (SDPI)*. Working Paper Series 121, 31(May), 51–68. Recuperado de: [url: www.sdpi.org](http://www.sdpi.org)
- Krecl, P., Targino, A. C., Landi, T. P., & Ketzel, M. (2018). *Determination of black carbon, PM<sub>2.5</sub>, particle number and NO<sub>x</sub> emission factors from roadside measurements and their implications for emission inventory development*. *Atmospheric Environment*, 186, 229-240 doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.05.042

- Kuklinska, K., Wolska, L., & Namiesnik, J. (2015). *Air quality policy in the U.S. and the EU - A review*. Atmospheric Pollution Research, 6(1), 129–137. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.015>
- Larssen, S & Otto, H. (1996). *Air Pollution monitoring in Europe problems and trends*. Copenhagen. European Environment Agency. Recuperado el 13 de Septiembre de 2020 de: <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-058-8/#additional-files>
- Lewis, J. (1985, November). *Birth of EPA*. Environmental Protection Agency Journal, pp. 1–8. Recuperado de: [https://archive.epa.gov/epa/aboutepa/birth-epa.html%0Ahttp://heinonlinebackup.com/hol-cgi-bin/get\\_pdf.cgi?handle=hein.journals/epajrnl11&section=132](https://archive.epa.gov/epa/aboutepa/birth-epa.html%0Ahttp://heinonlinebackup.com/hol-cgi-bin/get_pdf.cgi?handle=hein.journals/epajrnl11&section=132)
- Li, S. T., & Shue, L. Y. (2004). *Data mining to aid policy making in air pollution management*. *Expert Systems with Applications*, 27(3), 331-340.
- Liang, J. (2013). *Chemical Modeling for Air Resources 1st Edition*. Chemical Modeling for Air Resources (I). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408135-2.00009-4>
- Malaver, J (2018). *Propuesta metodológica para la modificación y actualización del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Recuperado de: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/15514>
- Maldonado Maya, A. C., & Rojas Monroy, N. F. (2019). *Propuesta de bajo costo para el monitoreo de material particulado PM2.5 y PM10 en tiempo real en la Universidad El Bosque*, Bogotá.
- Martínez Rebollar, A., & Campos Francisco, W.. (2015). *Correlación entre Actividades de Interacción Social Registradas con Nuevas Tecnologías y el grado de Aislamiento Social en los Adultos Mayores*. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 36(3), 181-191. <https://doi.org/10.17488/RMIB.36.3.4>

- Mayor of London (2016). *London local air quality management (LLAQM). Technical Guidance*. Recuperado de: [https://www.london.gov.uk/sites/default/files/llaqm\\_technical\\_guidance\\_llaqm.tg\\_16.pdf](https://www.london.gov.uk/sites/default/files/llaqm_technical_guidance_llaqm.tg_16.pdf)
- Medina Palacios, N. V., & Larios Moraga, C. A. (2018). *Sistema de monitoreo remoto, inalámbrico y en tiempo real de los niveles de concentración de dos contaminantes atmosféricos definidos en la Norma técnica Nicaragüense de calidad del aire* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de: <http://ribuni.uni.edu.ni/2316/1/92077.pdf>
- Minambiente & IDEAM. (2018). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia*. Bogotá D.C. Recuperado de: [http://www.andi.com.co/Uploads/Informe\\_ECalidadl\\_Aire\\_2017\\_636748401757382604.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Informe_ECalidadl_Aire_2017_636748401757382604.pdf)
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2013). *La calidad del aire en Europa-Informe 2012*. Informe técnico de la AEMA. Recuperado de: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/sub\\_publicaciones\\_aire.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/sub_publicaciones_aire.aspx)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Estrategia Nacional de Calidad del Aire*. Bogotá D.C: Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de: [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones\\_atmosfericas\\_contaminantes/ESTRATEGIA\\_NACIONAL\\_DE\\_CALIDAD\\_DEL\\_AIRE\\_1.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/ESTRATEGIA_NACIONAL_DE_CALIDAD_DEL_AIRE_1.pdf)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. (2010c). *Política de prevención y control de la contaminación del aire*, 1, 53–59. Recuperado de: [https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Políticas\\_de\\_la\\_Dirección/Política\\_de\\_PrevenCIÓN\\_y\\_Control\\_de\\_la\\_Contaminación\\_del\\_Aire.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Políticas_de_la_Dirección/Política_de_PrevenCIÓN_y_Control_de_la_Contaminación_del_Aire.pdf)

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MADVT. (2010a). *Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del aire*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ed. (II). Bogotá. Recuperado de: [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/aire/res\\_2154\\_021110\\_manual\\_diseno.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/aire/res_2154_021110_manual_diseno.pdf)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MADVT. (2010b). *Manual de operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del aire*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ed. (II)
- Ministerio de Ambiente: Oficina de Agua y aire del Medio Ambiente (2007). *Manual de monitoreo continuo de la atmósfera ambiental*. 5ta Edición. Japón.
- Ministerio del medio ambiente (2016). *Guía de calidad del aire y educación ambiental*. Ministerio Del Medio Ambiente. Gobierno de Chile, 3, 103.
- Ministerio del medio ambiente (2018). *Tercer informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático*. Gobierno de Chile. Recuperado de: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPANish.pdf>
- Ministerio del medio ambiente. (2012). *Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA*. Gobierno de Chile. [https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration\\_files/guias/Guia\\_uso\\_modelo\\_calidad\\_del\\_aire\\_seia.pdf](https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_calidad_del_aire_seia.pdf)
- Ministry of Environment & Forests (2003). *Guidelines for Ambient Air Quality Monitoring*. Central Pollution Control Board. India
- Miñarro, M. D., Bañón, D., Egea, J. A., Costa-pela, I., & Caracena, A. B. (2020). *A multi-pollutant methodology to locate a single air quality monitoring station in small and medium-size urban areas*. Environmental Pollution, 266, 115279.
- Miranda, A. I., Silveira, C., Ferreira, J., Monteiro, A., Lopes, D., Relvas, H., ... & Volta, M. (2014). *Urban air quality plans in Europe: a review on applied methodologies*. Air Pollution XXII, 183, 315.

- Miranda, A., Silveira, C., Ferreira, J., Monteiro, A., Lopes, D., Relvas, H., ... & Roebeling, P. (2015). *Current air quality plans in Europe designed to support air quality management policies*. Atmospheric pollution research, 6(3), 434-443.
- Miskell, G., Salmond, J., Alavi-Shoshtari, M., Bart, M., Ainslie, B., Grange, S., & Williams, D. E. (2016). *Data verification tools for minimizing management costs of dense air-quality monitoring networks*. Environmental science & technology, 50(2), 835-846.
- Miskell, G., Salmond, J., Alavi-Shoshtari, M., Bart, M., Ainslie, B., Grange, S., ... & Williams, D. E. (2016). *Data verification tools for minimizing management costs of dense air-quality monitoring networks*. Environmental science & technology, 50(2), 835-846.
- Mocerino, L., Murena, F., Quaranta, F., & Toscano, D. (2020). *A methodology for the design of an effective air quality-monitoring network in port areas*. Scientific reports, 10(1), 1-10. doi: 10.1038/s41598-019-57244-7
- Mondragón, M. (2014). *Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia*, Movimiento científico 8(1), 98-104. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/281120822\\_USO\\_DE\\_LA\\_CORRELACION\\_DE\\_SPEARMAN\\_EN\\_UN\\_ESTUDIO\\_DE\\_INTERVENCION\\_EN\\_FISIOTERAPIA](https://www.researchgate.net/publication/281120822_USO_DE_LA_CORRELACION_DE_SPEARMAN_EN_UN_ESTUDIO_DE_INTERVENCION_EN_FISIOTERAPIA).
- Munir, S., Mayfield, M., Coca, D., & Jubb, S. A. (2019). *Structuring an integrated air quality-monitoring network in large urban areas – Discussing the purpose, criteria and deployment strategy*. Atmospheric Environment: X, 2 (March). <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100027>
- Muñoz Díaz, J. L., & Rodríguez Alvarado, E. K. (2018). *Lineamientos para la medición de la calidad del aire en cuanto a ozono y la implementación en programas de seguimiento y monitoreo*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Recuperado de: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14091>

- Nakamori, Y., & Sawaragi, Y. (1984). *Interactive design of urban level air quality monitoring network*. *Atmospheric Environment* (1967), 18(4), 793-799.
- Narváez, V. M. A., Bolaños, E. Q., Bolaños, M. H., Suárez, C. A., Berdugo, J., & Rivas, I. D. R. (2016). *Metodología para la selección de sitios de monitoreo atmosférico en zonas urbanas afectada por las emisiones de fuentes móviles*. *Revista UIS Ingenierías*, 15(2), 73-84.
- Nejadkoorki, F., Nicholson, K., & Hadad, K. (2011). *The design of long-term air quality monitoring networks in urban areas using a spatiotemporal approach*. *Environmental monitoring and assessment*, 172(1), 215-223.
- Ome Barrera, O.; Zafra Mejía, C. 2018. *Factores clave en procesos de biorremediación para la depuración de aguas residuales. una revisión*. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 21(2):573-585. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1037>
- Onwuegbuzie, A. J., Dickinson, W. B., Leech, N. L., & Zoran, A. G. (2011b). *Un marco cualitativo para la recolección y análisis de datos en la investigación basada en grupos focales*. *Paradigmas*, 3, 127-157.
- Onwuegbuzie, Anthony & Combs, Julie. (2011a). *Data Analysis in Mixed Research: A Primer*. *International Journal of Education*. 3. 10.5296/ije.v3i1.618.
- Organización Holandesa para la Investigación Científica Aplicada -TNO-. (2016). *Air Quality Monitoring - Network design*. *Environment, Health and Safety*, 1–2. Recuperado de: [https://www.tno.nl/media/1404/104e\\_bo\\_mil\\_air\\_quality\\_monitoring\\_network.pdf](https://www.tno.nl/media/1404/104e_bo_mil_air_quality_monitoring_network.pdf)
- Organización Mundial de la Salud, OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*, 1–21. Recuperado de:

- [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf;jsessionid=E5EC1BA1333C83EA7530384B913D526D?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=E5EC1BA1333C83EA7530384B913D526D?sequence=1)
- Organización Mundial de la Salud, OMS. (2018). *Calidad del aire y salud*. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(16\)30143-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(16)30143-7)
  - Ortiz, N (2016). *Propuesta de Indicadores de Referencia Nacional para Medir los Efectos Económicos, Ambientales y Sociales de la Implementación de una Política de Crecimiento Verde de Largo Plazo*, Bogotá. Recuperado el 14 de Junio de 2021 de:  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Ambiente/Mision%20Crecimiento%20Verde/diagnostico/Informe%20final%20INDICADORES%20CV.pdf>
  - Özden, Ö., Döğeroğlu, T., & Kara, S. (2008). *Assessment of ambient air quality in Eskişehir, Turkey*. *Environment International*, 34(5), 678-687.
  - Parra Sierra, L. M., & Patiño Ortiz, J. C. (2005). *Programa de aseguramiento y control de calidad para la red de monitoreo de calidad de aire de Bogotá*. Recuperado de: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1629](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1629)
  - Peláez, L. M. G., Santos, J. M., de Almeida Albuquerque, T. T., Reis Jr, N. C., Andreão, W. L., & de Fátima Andrade, M. (2020). *Air quality status and trends over large cities in South America*. *Environmental Science & Policy*, 114, 422-435.
  - Poirault, J. (2020). *La legislación europea en relación con el aire — Agencia Europea de Medio Ambiente*, 2–4. Recuperado de: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2013/articulos/la-legislacion-europea-en-relacion>
  - Pope, R., & Wu, J. (2014). *A multi-objective assessment of an air quality-monitoring network using environmental, economic, and social indicators and GIS-based models*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(6), 721-737. DOI: 10.1080/10962247.2014.888378

- Popoola, O. A., Carruthers, D., Lad, C., Bright, V. B., Mead, M. I., Stettler, M. E., & Jones, R. L. (2018). *Use of networks of low-cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings*. *Atmospheric environment*, 194, 58-70.
- Prieto, M. A., & Cerdá, J. M. (2002). Investigación cualitativa. Paso a paso en el diseño de un estudio mediante grupos focales. *Consultantes*, 149. <https://core.ac.uk/download/pdf/82496721.pdf>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA & Organización Mundial de la Salud, OMS. (2002). *Aseguramiento de la calidad en el monitoreo de la calidad del aire urbano PNUMA*. Nairóbi. Recuperado de: [https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_docman&view=download&category\\_slug=manuals-training-materials-9834&alias=44640-manuales-metodologia-gems-aire-volumen-1-aseguramiento-calidad-monitoreo-calidad-aire-urbano-1994-spanish-only-640&Itemid=270&lang=](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=manuals-training-materials-9834&alias=44640-manuales-metodologia-gems-aire-volumen-1-aseguramiento-calidad-monitoreo-calidad-aire-urbano-1994-spanish-only-640&Itemid=270&lang=)
- Ramanathan, N., Lukac, M., Ahmed, T., Kar, A., Praveen, P. S., Honles, T., ... & Ramanathan, V. (2011). *A cellphone-based system for large-scale monitoring of black carbon*. *Atmospheric environment*, 45(26), 4481-4487.
- Ramírez, J. A. L., Zapata, Á. M. P., Méndez, N. D. D., & Aristizabal, B. (2016). *Generación y representación de Indicadores de calidad de aire: caso de estudio aplicado a Manizales*. *ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería*, 13(2), 174-184.
- Rattigan, O. V., Carpenter, A. C., Civerolo, K. L., & Felton, H. D. (2020). *Pollutant measurements at near road and urban background sites in New York, USA*. *Atmospheric Pollution Research*, 11(5), 859-870.
- Reche, C., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Pey, J., Moreno, T., ... & Quincey, P. (2011). *New considerations for PM, Black Carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(13), 6207-6227.

- Represa, N. S. (2020). *Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos* (Doctoral dissertation).
- Resolução N.491. *Dispõe sobre padrões de qualidade do ar*. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, Brasil, 19 de Novembro de 2018  
Recuperado de:  
<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=21/11/2018&jornal=515&pagina=155&totalArquivos=178>
- Restrepo, L. F., & González, J. (2007). *From Pearson to Spearman*. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 20(2), 183-192.
- Riddle, A., Carruthers, D., Sharpe, A., McHugh, C. y Stocker, J. (2004). *Comparaciones entre FLUENT y ADMS para el modelado de dispersión atmosférica*. Ambiente atmosférico, 38 (7), 1029-1038.
- Righi, S., Lucialli, P. y Pollini, E. (2009). *Evaluación estadística y diagnóstica del modelo ADMS-Urban comparado con una red de monitoreo de la calidad del aire urbano*. Ambiente atmosférico, 43 (25), 3850-3857.
- Riojas Rodríguez, H., Da Silva, A. S., Texcalac Sangrador, J. L., & Moreno Banda, G. L. (2016). *Air pollution management and control in Latin America and the Caribbean: Implications for climate change*. Pan American Journal of Public Health, 40(3), 150–159.
- Rojas, N., & Galvis, B. (2005). *Relación entre PM2.5 y PM10 en la ciudad de Bogotá*. Revista de ingeniería, (22), 54-60.
- Roncancio Valbuena, L. X. (2019). *Evaluación del desempeño de sensores de bajo costo como complemento para el monitoreo de la calidad del aire de Bogotá y como herramienta para la determinación del grado de exposición de una población caso de estudio*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería

Química y Ambiental. Bogotá. Recuperado de:  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77273>

- Rojano, R. E., Angulo, L. C., & Restrepo, G. (2013). *Niveles de partículas suspendidas totales (PST), PM10 y PM2.5 y su relación en lugares públicos de la ciudad Riohacha*, Caribe Colombiano. *Información tecnológica*, 24(2), 37-46.
- Rood, A. S. (2014). *Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset*. *Atmospheric Environment*, 89, 707-720.
- Sanabria Orozco, A. F. (2012). *Operación de la estación de calidad del aire del IDEAM para el diagnóstico, verificación y determinación de la representatividad en cuanto al uso y ubicación de la misma*. Universidad Santo Tomás, Bogotá. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2634>
- Sandelowski, M. (2001). *Real qualitative researchers do not count. The use of numbers in qualitative research*. *Research in Nursing & Health*, 24, 230-240.
- Sanguinet, R. (2007). *Programa Control de Monitoreo Objetivo*. Santiago, Chile. Recuperado el 10 de julio de 2020 de: <https://sinca.mma.gob.cl/uploads/documentos/74f0834ddb1f0119cf13725cf1416525.pdf>
- Sanz Pérez, E. T., & González Salinas, S. D (2018). *Lineamientos De La Medición De La Calidad Del Aire En Cuanto A SO2 Y NOx Y Su Implementación En Programas De Seguimiento y Monitoreo*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Serrano Rojas, M. L. (2006). *Diseño de la red de evaluación y seguimiento de la calidad del aire para la ciudad de Neiva - Huila*. Recuperado de: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/683](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/683)

- Sistema de Información Ambiental de Colombia-SIAC (2016). *¿Qué es SISAIRE?*, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia. Recuperado el 10 de Junio de 2021 de: <http://www.siac.gov.co/sisaire>
- Shahbazi, H., Ganjiazad, R., Hosseini, V. y Hamedí, M. (2017). *Investigar la influencia de los planes de reducción de emisiones del tráfico en la calidad del aire de Teherán utilizando herramientas de modelado WRF / CAMx*. Investigación sobre transporte Parte D: Transporte y medio ambiente, 57, 484-495.
- Siciliano, B., Dantas, G., Silva, C. M. D., & Arbilla, G. (2020). *The updated Brazilian national air quality standards: a critical review*. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 31(3), 523-535.
- Sierra Sánchez, J., & Sotelo González, J. (2012). *El estado actual del protocolo a nivel jurídico y profesional*. *Revista ICONO14. Revista Científica de Comunicación y Tecnologías Emergentes*, 6(2), 144–178. <https://doi.org/10.7195/ri14.v6i2.355>
- United Nations Environment Programme, UNEP. (2019). *Air pollution in Asia and the Pacific: Science-based solutions*. Bangkok, Thailand. Recuperado de: <https://www.ccacoalition.org/en/resources/air-pollution-asia-and-pacific-science-based-solutions-summary-full-report>
- United Nations Environment Programme-UNEP. (2011). *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone Summary for Decision Makers*. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8028>
- United Nations Environment Programme-UNEP. (2011). *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone Summary for Decision Makers*. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8028>
- Wetsman, N. (2018). *Africa study seeks to fill pollution data gap*. *Nature*, 556(7701), 284.
- U.S. Environmental Protection Agency-EPA. (2017). *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems*. Ambient air quality monitoring program

Vol. II. EPA-454/B-17-001. Recuperado el 3 de Abril de 2021 de:  
[https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/qa/Final Handbook Document 1\\_17.pdf](https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/qa/Final%20Handbook%20Document%201_17.pdf)

- Wong, D. W., Yuan, L., & Perlin, S. A. (2004). *Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data*. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 14(5), 404-415.
- World Health Organization, WHO. (2017). *Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- World Health Organization, WHO. (2018). *Ambient (outdoor) air pollution. Air Quality and Health — Fact Sheet*. [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Yu, H., Russell, A., Mulholland, J., Odman, T., Hu, Y., Chang, H. H., & Kumar, N. (2018). *Cross-comparison and evaluation of air pollution field estimation methods*. *Atmospheric environment*, 179, 49-60.
- Zhang, C., Di, L., Sun, Z., Lin, L., Eugene, G. Y., & Gaigalas, J. (2019). *Exploring cloud-based Web Processing Service: A case study on the implementation of CMAQ as a Service*. *Environmental Modelling & Software*, 113, 29-41.
- Zoroufchi Benis, K., Fatehifar, E., Shafiei, S., Keivani Nahr, F., & Purfarhadi, Y. (2016). *Design of a sensitive air quality-monitoring network using an integrated optimization approach*. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(3), 779–793. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1189-z>

