

Mejoramiento del monitoreo de la calidad del aire y la respuesta institucional ante eventos de contaminación atmosférica, bajo el marco del plan de gestión ambiental de Corponor en Norte de Santander, a través del marco lógico.

John Jairo Ortega García

Trabajo de grado para optar el título de Magister en Dirección y Gestión de Proyectos

Director

Vladimir Plata Chávez

PhD en Ingeniería Química

Universidad Santo Tomas, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones

2025

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	V° B° POR:
<u>John Jairo Ortega García</u> AUTOR <i>Estudiante de Maestría</i>	<u>Vladimir Plata Chávez</u> Director <i>Director del Trabajo de grado</i>	Comité de posgrado

Dedicatoria

Primeramente, a *Dios*, por ser la fuente inagotable de sabiduría, fuerza y propósito. Su guía constante me sostuvo en cada etapa de este proceso, brindándome luz incluso en los momentos más desafiantes.

A *mi esposa* y compañera de vida por su amor incondicional, paciencia y apoyo permanente. Su compañía fue mi mayor motivación y su fe en mí, el impulso que me permitió seguir adelante.

A *mis padres*, quienes, con su ejemplo, sacrificio y valores, sembraron en mí la disciplina y el compromiso necesarios para alcanzar este logro. Este triunfo también es de ustedes.

Con profunda gratitud, les dedico este trabajo.

Agradecimientos

Agradezco de manera especial a la *Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – Corponor*, por su invaluable respaldo técnico e institucional, y por facilitar el acceso a la información ambiental necesaria para el desarrollo de este proyecto. Su compromiso con la protección del medio ambiente en Norte de Santander fue fundamental para orientar y enriquecer este trabajo. Así mismo, reconozco la disposición y colaboración de los profesionales de la Subdirección de Medición y Análisis Ambiental a cargo del monitoreo del Sistema de Vigilancia y Calidad del Aire (SVCA), cuya experiencia fue clave para comprender los desafíos reales que enfrenta la región frente a la contaminación atmosférica.

Contenido

Resumen.....	12
Abstract.....	14
Glosario.....	15
Introducción.....	16
1. Aspectos contextuales	18
1.1 Planteamiento del problema	18
2. Objetivos.....	21
2.1 Objetivo general	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
2.2.1 Objetivo específico 1.....	21
2.2.2 Objetivo específico 2.....	21
2.2.3 Objetivo específico 3.....	21
3. Descripción institucional Corponor	22
4. Marco referencial.....	23
4.1 Marco conceptual.	23
4.1.1 Corporaciones autónomas regionales	23
4.1.2 Condiciones de referencia	24
4.1.3 Emisión.....	24
4.1.4 Fuente de emisión.....	25
4.1.5 Criterios para ubicación de los equipos	25
4.1.6 Sistema de control de emisiones	26
4.1.7 Calidad del aire.....	26
4.1.8 Material particulado (PM).....	26
4.1.9 Monitoreo de calidad del aire.....	27
4.2 Estado del arte	27
4.2.1 Panorama internacional.....	27
4.2.2 Panorama nacional y regional	28
4.2.3 Tecnologías de monitoreo	32
4.2.4 Aplicaciones en zonas urbanas y rurales	33

4.2.5	Monitoreo en tiempo real y estudios atmosféricos.....	35
4.2.6	Comparación internacional y limitaciones de Colombia	35
4.2.7	Ventajas y desventajas comparativas.....	38
5.	Análisis de interesados - involucrados.....	39
5.1	Matriz influencia – interés.....	41
5.2	Desarrollo de estrategias de gestión.....	42
6.	Análisis del problema	43
6.1	Modelo árbol de problemas.....	44
7.	Análisis de objetivos.....	45
7.1	Modelo árbol de objetivos.....	45
8.	Análisis de Alternativas.....	46
8.1	Identificación de alternativas	46
8.2	Evaluación de alternativas.....	46
8.2.1	Criterios de evaluación.....	47
8.2.2	Escala de puntuación.....	47
8.2.3	Ponderación de criterios.....	47
8.2.4	Matriz comparativa	49
8.3	Selección de la alternativa de solución	49
8.3.1	Ampliación de la red de monitoreo (Puntaje total: 7.5)	50
8.3.2	Implementación de tecnologías modernas (Puntaje total: 7.9)	50
8.3.3	Desarrollo de un protocolo institucional (Puntaje total: 7.9)	51
8.3.4	Gestión integral (combinación de alternativas - Puntaje total: 8.2).....	51
9.	Construcción del modelo analítico del proyecto	52
9.1	Estructura analítica	52
9.2	Matriz de marco lógico.....	53
9.3	Resumen narrativo.....	54
9.3.1	Fin.....	54
9.3.2	Propósito.....	55
9.3.3	Componentes o productos	55

9.3.4	Entregables	56
9.3.5	Actividades	58
9.4	Indicadores.....	60
9.4.1	Indicadores de propósito	60
9.4.2	Indicadores de componentes	61
9.4.3	Indicadores de Actividades	62
9.5	Medios de verificación	64
9.6	Supuestos	67
10.	Recursos humanos, materiales y económicos.....	71
10.1	Recursos humanos.....	72
10.2	Recursos materiales.....	72
10.3	Recursos económicos	73
11.	Cronograma	75
12.	Difusión y comunicación.....	76
12.1	Objetivos del plan de comunicación	76
12.2	Público objetivo y canales de comunicación	77
12.3	Estrategias de comunicación y difusión.....	77
13.	Método de evaluación de los resultados de la implementación	79
13.1	Criterios de evaluación.....	79
13.2	Métodos de evaluación.....	79
13.2.1	Análisis cuantitativo de datos ambientales	79
13.2.2	Indicadores clave de desempeño (KPI)	79
13.2.3	Métodos cualitativos	80
13.2.4	Comparación con proyectos similares	80
13.2.5	Elaboración de un informe final	80
14.	Resultados.....	81
14.1	Resultados Objetivo 1	81
14.1.1	Identificación de fuentes de contaminación	81
14.1.2	Análisis de datos ambientales y meteorológicos	83

14.1.3	Definición de criterios de selección de ubicaciones.....	88
14.1.4	Selección de sitios estratégicos para estaciones de monitoreo	93
14.2	Resultados Objetivo 2	94
14.2.1	Investigación de tecnologías disponibles.....	94
14.2.2	Evaluación ambiental y financiera.....	95
14.2.3	Selección de tecnologías óptimas	99
14.3	Resultado Objetivo 3	102
14.3.1	Diseño del protocolo de actuación.....	103
14.3.2	Recomendación de herramientas de comunicación.....	104
14.3.3	Capacitación y Validación del Protocolo	107
15.	Discusión	109
16.	Conclusiones.....	111
17.	Recomendaciones	112
	Referencias.....	114
	Apéndices.....	118

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Tecnologías actuales en zonas urbanas y rurales.</i>	33
Tabla 2. <i>Comparativa internacional monitoreo de calidad del aire</i>	36
Tabla 3. <i>Interesados - involucrados directos</i>	39
Tabla 4. <i>Interesados-involucrados indirectos</i>	40
Tabla 5. <i>Matriz de influencia – interés</i>	41
Tabla 6. <i>Evaluación de influencia - interés</i>	42
Tabla 7. <i>Árbol del problema</i>	44
Tabla 8. <i>Árbol de objetivos</i>	45
Tabla 9. <i>Identificación de alternativas</i>	46
Tabla 10. <i>Ponderación de criterios</i>	48
Tabla 11. <i>Matriz comparativa.</i>	49
Tabla 12. <i>Matriz de marco lógico</i>	53
Tabla 13. <i>Entregables</i>	56
Tabla 14. <i>Tareas por actividad</i>	58
Tabla 15. <i>Indicadores de propósito</i>	60
Tabla 16. <i>Indicador de componente 1</i>	61
Tabla 17. <i>Indicador de componente 2</i>	61
Tabla 18. <i>Indicador de componente 3</i>	62
Tabla 19. <i>Indicadores de actividades</i>	63
Tabla 20. <i>Medios de verificación: indicadores de propósito</i>	64
Tabla 21. <i>Medios de verificación: indicadores de componentes</i>	65
Tabla 22. <i>Medios de verificación: indicadores de actividades</i>	66
Tabla 23. <i>Supuestos de propósito</i>	68

Tabla 24. <i>Supuestos de componentes</i>	68
Tabla 25. <i>Supuestos de actividades</i>	70
Tabla 26. <i>Roles y responsabilidades claves</i>	72
Tabla 27. <i>Recursos materiales identificados.</i>	73
Tabla 28. <i>Presupuesto requerido</i>	73
Tabla 29. <i>Ejecución actividad – tarea</i>	75
Tabla 30. <i>Público objetivo y canales de comunicación</i>	77
Tabla 31. <i>Estrategias de comunicación y difusión.</i>	78
Tabla 32. <i>Indicadores clave de desempeño</i>	79
Tabla 33. <i>Base de datos de fuentes emisoras de contaminación.</i>	82
Tabla 34. <i>Datos meteorológicos y su relación con la dispersión de contaminantes</i>	86
Tabla 35. <i>Impacto de las condiciones meteorológicas en la contaminación</i>	87
Tabla 36. <i>Criterios de priorización</i>	89
Tabla 37. <i>Recolección de datos</i>	90
Tabla 38. <i>Normalización de los valores</i>	91
Tabla 39. <i>Rangos de prioridad</i>	92
Tabla 40. <i>Clasificación de ubicaciones según IP.</i>	92
Tabla 41. <i>Sitios estratégicos</i>	93
Tabla 42. <i>Matriz comparativa de tecnologías de monitoreo y evaluación ambiental y financiera</i>	97
Tabla 43. <i>Criterios para la selección.</i>	99
Tabla 44. <i>Evaluación de criterios de selección</i>	100
Tabla 45. <i>Niveles de contingencia por concentración de contaminantes</i>	103
Tabla 46. <i>Acciones por nivel de contaminación</i>	104

Tabla 47. <i>Listado de contenido recomendados.</i>	106
--	-----

Lista de figuras

Figura 1. <i>Comportamiento del ICA – enero 2025.</i>	20
Figura 2. <i>Diagrama de Gantt</i>	76
Figura 3. <i>Localización geográfica sector industrial</i>	83
Figura 4. <i>Comportamiento índice de la calidad del aire ICA</i>	84
Figura 5. <i>Comportamiento Meteorología junio 2025.</i>	85
Figura 6. <i>Modelación de trayectorias masas de aire – marzo 2025</i>	88
Figura 7. <i>Mapa de localización de estaciones de monitoreo</i>	93

Lista de apéndices

Apéndice A. <i>Tablero digital ICA</i>	118
Apéndice B. <i>Prototipo interfaz gráfica</i>	119
Apéndice C. <i>Acta de Reunión 03 de marzo de 2025</i>	120
Apéndice D. <i>Acta de Reunión 11 de marzo de 2025</i>	123
Apéndice E. <i>Documento técnico Plan de Actualización</i>	126

Resumen

La ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana enfrentan un incremento significativo en los niveles de contaminación atmosférica, causado principalmente por actividades industriales, el tráfico vehicular y otras acciones antropogénicas como las quemas de biomasa y la expansión urbana. Esta situación ha generado impactos directos en la salud pública y en la calidad ambiental del territorio, afectando tanto a las comunidades como a los ecosistemas. En respuesta a esta problemática, el presente trabajo tuvo como objetivo mejorar el monitoreo de la calidad del aire y fortalecer la respuesta institucional frente a eventos de contaminación crítica, bajo el marco del Plan de Gestión Ambiental de Corponor y con la aplicación del enfoque del marco lógico como herramienta metodológica.

Para alcanzar este propósito, se desarrolló un proceso que comprendió la identificación y priorización de zonas geográficas clave para la instalación de estaciones de monitoreo, con base en criterios técnicos, ambientales y sociales. Posteriormente, se evaluaron diversas tecnologías de medición de la calidad del aire, considerando su eficiencia, sostenibilidad y viabilidad financiera, a fin de seleccionar aquellas más adecuadas al contexto regional. Finalmente, se diseñó un protocolo institucional orientado a la gestión de episodios de alta contaminación, el cual establece lineamientos de respuesta, mecanismos de articulación interinstitucional, estrategias de comunicación con la ciudadanía y herramientas de evaluación post-evento.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la implementación de una estrategia integrada que combine la expansión de la red de monitoreo, el uso de tecnologías modernas y el fortalecimiento de las capacidades institucionales, representa una alternativa viable y eficaz para mejorar la gestión ambiental en la región. Esta propuesta no solo responde a los desafíos actuales en materia de calidad del aire, sino que también sienta las bases para una

acción preventiva y sostenible a largo plazo, alineada con los objetivos nacionales de protección ambiental y salud pública.

Palabras clave: calidad del aire, material particulado, estaciones de monitoreo, respuesta institucional, Corponor.

Abstract

The problem in the city of Cúcuta and its metropolitan area is the increasing air pollution caused by industrial activity, vehicular emissions, and biomass burning, which significantly affect public health and environmental quality. *The objective* of this study was to enhance the air quality monitoring system and institutional response capabilities under the framework of CORPONOR's environmental management plan, using the Logical Framework Approach. *The method* included the identification and prioritization of critical geographical areas, the technical and financial evaluation of sustainable monitoring technologies, and the development of an institutional protocol for response to high pollution events. *The results* highlighted the prioritization of industrial zones, traffic corridors, and densely populated areas for station deployment. In addition, the selected technologies enable real-time data acquisition and integration with existing systems. The institutional protocol proposed outlines the stages of response, inter-agency coordination, risk communication, and post-event evaluation. *The discussion* underscores the need to strengthen infrastructure, improve data quality, and foster intersectoral collaboration to manage pollution effectively. The proposed strategy contributes to improving the technical and operational capacities of CORPONOR and aligns with Colombia's national air quality management objectives.

Keywords: air quality, particulate matter, environmental monitoring, institutional response, CORPONOR.

Glosario

Calidad del aire: estado del aire medido por la presencia de contaminantes que afectan la salud humana y el ambiente.

Corponor: entidad ambiental encargada de la gestión y protección de los recursos naturales en Norte de Santander.

Material Particulado (PM): partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, clasificadas según su tamaño (PM_{10} y $PM_{2.5}$).

Protocolo institucional: conjunto de acciones predefinidas para responder ante eventos de contaminación atmosférica.

SVCA (Sistema de Vigilancia y Control Ambiental): red de estaciones que mide y registra datos sobre la calidad del aire.

Marco lógico: herramienta metodológica para planificar, monitorear y evaluar proyectos, estructurada en objetivos, actividades, productos e indicadores.

Introducción

La Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana, ubicadas en el departamento de Norte de Santander, es una región en constante crecimiento económico, principalmente por actividades industriales y comerciales. Sin embargo, este desarrollo ha venido acompañado de un incremento en la contaminación atmosférica, particularmente en la emisión de material particulado (MP). Factores como la actividad industrial (incluyendo la transformación de arcilla y carbón), el intenso tráfico vehicular y las actividades antropogénicas (quemadas de biomasa y construcción) han contribuido a una creciente degradación de la calidad del aire. De acuerdo con Laura Rodríguez (2020, p. 138) “la exposición a material particulado, como PM_{10} y $PM_{2.5}$, se asocia con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y muertes prematuras; en Colombia, estos contaminantes generaron altos costos en salud y miles de muertes en 2015”.

Los antecedentes reflejan que el crecimiento industrial durante los últimos diez años, junto con la proximidad de estas actividades al perímetro urbano, ha intensificado los desafíos ambientales de la región. Sin embargo, la infraestructura actual de monitoreo ambiental, liderada por el Sistema de Vigilancia y Control Ambiental (SVCA) de Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental - Corponor, no es suficiente para evaluar de manera precisa y representativa la calidad del aire en el área. “El fortalecimiento del monitoreo del aire en Cúcuta requiere mediciones confiables, personal capacitado y análisis continuo de datos; además, se propone la acreditación del SVCA y revisiones periódicas para adaptarse a cambios territoriales y nuevas necesidades” (Hill Consulting; Corponor, 2022, p. 62).

El propósito de este trabajo es mejorar la capacidad de monitoreo ambiental en la Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana, mediante la ampliación de la red de estaciones de monitoreo a través de la identificación y priorización de áreas geográficas claves para su instalación, la evaluación e implementación de tecnologías eficientes y sostenibles, y el desarrollo de un protocolo institucional de respuesta ante eventos de contaminación crítica. Estas acciones buscan garantizar una cobertura más amplia y datos fiables que sustenten la toma de decisiones para mitigar los riesgos asociados a la contaminación atmosférica.

La fundamentación de esta propuesta se centra en la necesidad de proteger la salud pública y el medio ambiente, asegurando un equilibrio entre el desarrollo económico y la sostenibilidad. Además, se apoya en los principios de gestión ambiental integrada y en el compromiso institucional de Corponor para fortalecer las capacidades tecnológicas y operativas del SVCA, de manera que se puedan abordar los desafíos presentes y futuros relacionados con la calidad del aire en la región.

1. Aspectos contextuales

1.1 Planteamiento del problema

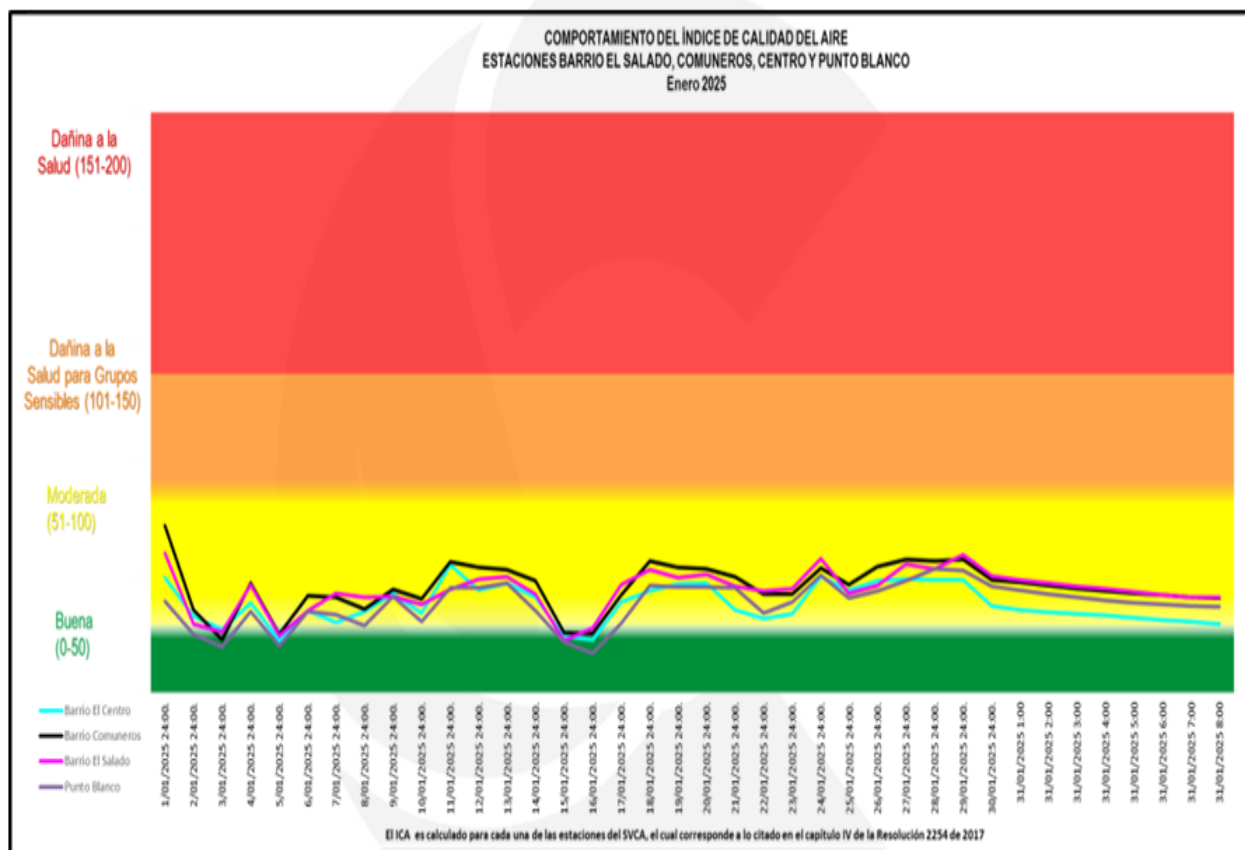
La Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana es una región en constante desarrollo, con una economía que se sustenta principalmente en la actividad industrial y el comercio. La presencia de numerosas industrias de diferentes sectores tales como la arcilla, el carbón, entre otros, contribuye significativamente a la emisión de contaminantes atmosféricos, incluido el MP. Además, la actividad antropogénica, que incluye las quemas de biomasa y la construcción, también aporta a la carga de contaminación en el aire. A esto se suma el intenso tráfico vehicular, tanto de carga como particular, que circula por las principales vías de los municipios y contribuye con emisiones de MP provenientes de los gases de la combustión vehicular. Es indudable que el crecimiento industrial de los últimos diez (10) años está representado en las industrias anteriormente mencionadas “la proyección de emisiones en Cúcuta-Región estima un aumento futuro basado en el crecimiento industrial y del transporte, asumiendo prácticas y tecnologías actuales, lo cual evidencia la necesidad de implementar estrategias de control para evitar mayores impactos ambientales” (Hill Consulting; Corponor, 2022, p. 20).

A pesar de la importancia económica de estas actividades, la falta de control y monitoreo de las emisiones de contaminantes atmosféricos plantea serios riesgos para la salud pública y el medio ambiente en la Ciudad de Cúcuta y Su Área Metropolitana. La exposición a concentraciones elevadas de MP se ha asociado con una serie de problemas de salud, incluidos trastornos respiratorios, cardiovasculares y neurológicos. Según Oduber (2022, p. 70) “la exposición a contaminantes atmosféricos, como PM_{10} y $PM_{2.5}$, afecta a la mayoría de la población urbana y se asocia con enfermedades cardíacas, respiratorias y

neurológicas, aumentando hospitalizaciones, morbilidad y mortalidad en contextos de alta contaminación”.

Ante este panorama, resulta imperativo abordar el fortalecimiento y crecimiento tecnológico para la obtención de información precisa y actualizada sobre la calidad del aire mediante la ampliación en número de las estaciones de monitoreo pertenecientes al actual SVCA que la Corporación tiene instalado en la Ciudad de Cúcuta.

En la figura 1, durante el mes de enero de 2025, el comportamiento del ICA en las estaciones de monitoreo ubicadas en los barrios El Salado, Comuneros, Centro y Punto Blanco mostró una tendencia general favorable, con valores del Índice de Calidad del Aire (ICA) predominantemente dentro de las categorías "Buena" (0-50) y "Moderada" (51-100), sin registrarse episodios que alcanzaran niveles considerados "Dañinos para grupos sensibles" ni "Dañinos para la salud", de acuerdo con los rangos establecidos en la Resolución 2254 de 2017. Las mayores fluctuaciones se presentaron durante la primera quincena del mes, particularmente en la estación del barrio El Salado, que registró los valores más altos dentro de la categoría moderada, posiblemente por condiciones meteorológicas locales o incremento de fuentes emisoras. En contraste, las estaciones de Comuneros, Centro y Punto Blanco se mantuvieron con mayor estabilidad, destacando esta última con los niveles más bajos del periodo. A partir de la segunda mitad del mes, se observa una tendencia descendente en los valores de ICA en todas las estaciones, consolidándose en la franja de calidad "Buena", lo que evidencia un comportamiento controlado del contaminante y cumplimiento de la normativa nacional, aunque se recomienda mantener la vigilancia activa y fortalecer acciones de control en zonas críticas.

Figura 1. Comportamiento del ICA – enero 2025.

Nota: tomado de (Corponor & SMAA, 2025, p. 12)

Además, la contaminación atmosférica puede tener impactos adversos en los ecosistemas locales, afectando la calidad del suelo, el agua y la biodiversidad. Ante este panorama, resulta imperativo abordar el fortalecimiento y crecimiento tecnológico para la obtención de información precisa y actualizada sobre la calidad del aire en la Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana mediante la ampliación de las estaciones de monitoreo pertenecientes al actual SVCA que la Corporación tiene instalado en la Ciudad de Cúcuta.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Mejorar el monitoreo de la calidad del aire y la respuesta institucional ante eventos de contaminación atmosférica, bajo el marco del plan de gestión ambiental de Corponor en Norte de Santander a través del marco lógico.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 *Objetivo específico 1*

Determinar las áreas geográficas prioritarias en Norte de Santander para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire, mediante la identificación de fuentes de contaminación y el análisis de datos, garantizando una cobertura representativa y estratégica.

2.2.2 *Objetivo específico 2*

Evaluar las opciones tecnológicas disponibles para la medición de la calidad del aire a través de un análisis técnico, ambiental y financiero, con el fin de seleccionar soluciones eficientes y sostenibles.

2.2.3 *Objetivo específico 3*

Establecer un protocolo institucional de respuesta ante eventos de contaminación atmosférica, mediante la definición de acciones y herramientas de comunicación, para informar a las autoridades gubernamentales y a la ciudadanía en caso de niveles peligrosos de contaminación atmosférica.

3. Descripción institucional Corponor

La Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – Corponor, es la entidad encargada de la gestión ambiental en el departamento de Norte de Santander, Colombia. Fundada en 1960, Corponor es una autoridad pública responsable de administrar, proteger y conservar los recursos naturales en su jurisdicción, que abarca 40 municipios del departamento, incluida la Ciudad de Cúcuta y su Área (Decreto 1384, 1985, p. 1).

La misión principal de Corponor es implementar políticas de desarrollo sostenible que equilibren el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente. Entre sus funciones destacan la planificación y ejecución de proyectos de conservación de cuencas hidrográficas, protección de la biodiversidad, gestión de residuos sólidos y regulación del uso del suelo y el agua. Además, promueve el uso racional de los recursos naturales y la mitigación de los efectos del cambio climático (Corponor, 2024, p. 62)

Corponor también supervisa el cumplimiento de la normativa ambiental y otorga permisos para actividades que puedan afectar el entorno, como la minería, la agricultura y el desarrollo urbano. Colabora estrechamente con las comunidades locales y otras entidades gubernamentales para impulsar la participación ciudadana en la protección ambiental (Corponor, 2024, p. 10).

Uno de los grandes retos de Corponor es la gestión de la frontera colombo-venezolana, un área estratégica por su diversidad biológica, pero vulnerable debido a la explotación de recursos y la migración. A través de programas educativos, reforestación y control ambiental, la corporación busca fomentar una cultura de respeto por el medio ambiente, mientras trabaja para mejorar la calidad de vida en la región (Corponor, 2024, p. 79)

En resumen, Corponor desempeña un papel clave en el desarrollo sostenible de Norte de Santander, abordando desafíos ambientales locales y globales en un territorio de gran importancia ecológica y socioeconómica.

4. Marco referencial

La calidad del aire es un factor clave para la salud pública y la sostenibilidad ambiental. “La contaminación atmosférica, generada por actividades humanas y procesos naturales, libera compuestos como SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} que afectan gravemente la salud humana y los ecosistemas” (Yepes & Trejos, 2024, p. 61). Estos contaminantes, especialmente provenientes de la quema de combustibles fósiles, son regulados en Colombia mediante límites máximos permisibles establecidos en la normativa nacional, con el fin de orientar acciones preventivas y de control por parte de las autoridades ambientales.

4.1 Marco conceptual.

4.1.1 Corporaciones autónomas regionales

En Colombia, la gestión ambiental descentralizada está liderada por las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), instituciones clave para la planificación y ejecución de políticas ambientales en cada región del país. Estas corporaciones responden a criterios geográficos, ecológicos e hídricos que permiten una administración más ajustada a las particularidades del territorio. Actúan como articuladoras entre el Gobierno Nacional, las entidades territoriales y las comunidades, fomentando la conservación, el uso racional de los recursos y la sostenibilidad. “Las Corporaciones Autónomas Regionales son entes públicos con autonomía administrativa y financiera, encargadas de gestionar el medio ambiente y los

recursos naturales en su jurisdicción, promoviendo el desarrollo sostenible según la ley y las políticas del Ministerio de Ambiente” (Ley 99, 1993, p. 15). Su rol es esencial para garantizar la protección de los ecosistemas y el cumplimiento de los objetivos ambientales a nivel regional y nacional.

4.1.2 Condiciones de referencia

La gestión de la calidad del aire en Colombia se fundamenta en la regulación de contaminantes criterio, cuya medición debe realizarse bajo parámetros estandarizados para garantizar la comparabilidad y confiabilidad de los resultados. Estas condiciones de referencia incluyen variables específicas como la temperatura, presión y tiempo de exposición, que permiten evaluar de forma objetiva el cumplimiento de los límites establecidos. Esta estandarización es clave para la formulación de políticas públicas eficaces y la toma de decisiones en materia ambiental. “La resolución establece niveles máximos permisibles de contaminantes criterio bajo condiciones de referencia, aplicables desde el 1 de enero de 2018, con el fin de proteger la salud humana y garantizar un ambiente sano en el territorio nacional” (Resolución 2254 de 2017, 2017, p. 11). De este modo, se promueve una gestión técnica y coherente del recurso aire a nivel nacional.

4.1.3 Emisión

El concepto de emisión en calidad del aire se refiere a la liberación de sustancias contaminantes a la atmósfera, como gases (dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre) o partículas (PM_{2.5}, PM₁₀), provenientes de fuentes de emisión (Porta et al., 2018, p. 60).

4.1.4 Fuente de emisión

Pueden ser fijas (industrias, chimeneas), móviles (vehículos) o fugitivas (emisiones no canalizadas, como polvo de construcciones). Estas emisiones impactan la calidad del aire, la salud humana y el medio ambiente, contribuyendo a problemas como smog, lluvia ácida o cambio climático (Porta et al., 2018, p. 60).

4.1.5 Criterios para ubicación de los equipos

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010, p. 60), “establece los criterios de representatividad para la localización de los sitios de muestreo de partículas suspendidas totales” de la siguiente forma:

- Altura de la toma de muestra sobre el piso: 2-15 m.
- Distancia al árbol más cercano: > 20 m de la circunferencia que marca el follaje o las raíces y por lo menos 10 m, si los árboles actúan como un obstáculo.
- La distancia del muestreador a obstáculos como edificios, debe ser mínimo, el doble de la altura en que sobresale el obstáculo sobre el muestreador. Se recomienda un radio libre de 10 m.
- El equipo debe tener un flujo de aire sin restricciones, 270° alrededor de la toma de muestra y/o un ángulo de 120° libre por encima del equipo.
- No podrá haber flujos de hornos o de incineración cercanos. Se recomienda 20 m de distancia del sitio de muestreo.
- La distancia a las carreteras/caminos debe ser de 2 a 10 m del borde a la línea de tráfico más cercana.

Además, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos para el sitio de muestreo:

- Fácil acceso, para visitas regulares de inspección, mantenimiento, calibración, etc.
- Seguridad contra vandalismo.
- Infraestructura: el sitio debe contar con energía eléctrica segura y teléfono.
- Libre de obstáculos que afecten el flujo de aire en las cercanías del muestreador (ejemplo: edificios, árboles, balcones, etc.).

4.1.6 Sistema de control de emisiones

Los sistemas de control de emisiones reportan su existencia, eficiencia (en porcentaje), tipo de alimentación de combustible y descripción de equipos utilizados para la alimentación, asegurando la reducción de contaminantes liberados a la atmósfera (Hill Consulting & Corponor, 2022, p. 49).

4.1.7 Calidad del aire

Se refiere al estado del aire en función de su composición química y la presencia de contaminantes que pueden tener efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente (OMS, 2005, p. 7). Los contaminantes más relevantes incluyen el PM_{10} y $PM_{2.5}$, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y O_3 .

4.1.8 Material particulado (PM)

Es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. Se clasifica según su tamaño, donde el $PM_{2.5}$ (diámetro menor a 2.5 micrómetros) penetra profundamente en los pulmones, y el PM_{10} puede afectar tanto el sistema respiratorio como el cardiovascular (Hill Consulting & Corponor, 2022, p. 7).

4.1.9 Monitoreo de calidad del aire

El monitoreo de calidad del aire, realizado por autoridades ambientales competentes, implica medir y seguir contaminantes según un protocolo establecido, asegurando datos precisos para evaluar y gestionar la calidad atmosférica (Resolución 2254 de 2017, 2017, p. 4). Este proceso es esencial para identificar fuentes de contaminación, como emisiones industriales o vehículos, y tomar medidas efectivas para proteger la salud pública y el medio ambiente, adaptándose a normativas locales e internacionales.

4.2 Estado del arte

El estado del arte examina los avances más relevantes en tecnologías, estrategias y enfoques empleados en el monitoreo de la calidad del aire, contextualizándolos en función de las necesidades de la Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana.

4.2.1 Panorama internacional

La contaminación atmosférica representa una de las principales amenazas para la salud pública a nivel global, generando una carga significativa de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y muertes prematuras. En respuesta, organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud han desarrollado directrices actualizadas que, aunque no son de cumplimiento obligatorio, ofrecen un marco técnico basado en evidencia científica para la gestión de la calidad del aire. Estas guías incluyen concentraciones recomendadas para contaminantes clave como PM_{2.5}, PM₁₀, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono, así como metas intermedias y buenas prácticas para partículas menos estudiadas. “El monitoreo de la calidad del aire es fundamental para orientar políticas basadas en evidencia, reducir niveles de contaminantes clave y proteger la salud pública, al

proporcionar guías cuantitativas sobre riesgos asociados a la exposición prolongada o puntual a estos contaminantes” (OMS, 2021, p. 3). Así, el seguimiento continuo y riguroso de estos parámetros se convierte en una herramienta esencial para la toma de decisiones y la mejora progresiva de las condiciones ambientales y sanitarias.

En el contexto de la posguerra y la expansión del modelo desarrollista impulsado por organismos internacionales como la ONU, se promovieron acciones de cooperación técnica y financiera dirigidas a los países catalogados como “subdesarrollados”, con el objetivo de integrarlos a la lógica de crecimiento económico del primer mundo. Estas intervenciones, marcadas por relaciones de poder asimétricas, también incluyeron estrategias ambientales alineadas con intereses industriales y geopolíticos. De acuerdo con Macías (2019, p. 148) “la Red PANAIRE surgió en 1965 como parte de iniciativas impulsadas por la ONU para diagnosticar la calidad del aire en latinoamericana, enfocándose en contaminantes industriales en contextos de cooperación desigual y expansión del modelo desarrollista promovido por potencias occidentales”. Esta red buscó principalmente identificar los efectos de las emisiones industriales en zonas urbanas estratégicas, como en México, país clave en el apoyo manufacturero a Estados Unidos durante la guerra y la posguerra.

4.2.2 *Panorama nacional y regional*

En Colombia, la gestión de la calidad del aire ha evolucionado significativamente gracias al fortalecimiento institucional y normativo de las autoridades ambientales. Las Corporaciones Autónomas Regionales y las entidades responsables en grandes centros urbanos tienen la tarea de monitorear, evaluar y mitigar los efectos de la contaminación atmosférica, en coordinación con los municipios y distritos, como lo establece el Decreto 1076 de 2015. Este proceso se apoya en instrumentos técnicos como el “Protocolo para el

Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire”, adoptado mediante la Resolución 650 de 2010 y ajustado por la Resolución 2154 del mismo año, que define los criterios para el diseño y operación de los sistemas de vigilancia. “En las últimas décadas, Colombia ha avanzado en el monitoreo de la calidad del aire mediante la implementación de Sistemas de Vigilancia (SVCA), guiados por protocolos técnicos establecidos, fortaleciendo así la capacidad de las autoridades ambientales para evaluar y controlar la contaminación atmosférica” (IDEAM, 2022, p. 33). Estos avances han permitido consolidar una red de monitoreo más robusta y alineada con los estándares internacionales, mejorando la toma de decisiones ambientales.

La calidad del recurso aire en Colombia y su acelerada contaminación, la cual ha constituido uno de los principales problemas para las autoridades ambientales y de salud en el país, es el punto de partida para que diferentes autores centren sus conocimientos y esfuerzos en estudiar la calidad del recurso en diferentes ciudades de la nación algunos de estos estudios se relacionan a continuación:

Durante las décadas de 1960 y 1970, Bogotá enfrentaba profundas problemáticas sociales derivadas de la migración interna, los asentamientos informales, la pobreza urbana y la violencia en el campo, lo cual relegaba las preocupaciones ambientales frente a necesidades básicas como la vivienda y los servicios públicos. “En Bogotá, a finales de los sesenta, la contaminación industrial no era prioritaria frente a problemas sociales y urbanos, aunque el apoyo internacional permitió instalar estaciones de medición del aire sin un criterio técnico claro sobre la distribución real de contaminantes” (Macías & Gallini, 2019, p. 150). A pesar de ello, entre 1967 y 1980 se implementaron once estaciones de monitoreo, cuya ubicación fue decidida más por requerimientos logísticos del convenio internacional que por un análisis técnico del comportamiento espacial de la contaminación en la ciudad.

El Valle de Aburra en el marco de una estrategia integral de transformación digital y sostenibilidad urbana, ha venido fortaleciendo sus sistemas de gestión ambiental y movilidad. La implementación de tecnologías inteligentes para el control del transporte público y el monitoreo ambiental ha permitido avanzar hacia un modelo más seguro, eficiente y participativo. “La red de monitoreo del Valle de Aburrá cuenta con 20 estaciones y sensores ciudadanos, incluyendo dispositivos en bicicletas que registran calidad del aire, temperatura y humedad, fortaleciendo una gestión ambiental participativa e innovadora en el marco de la transformación digital” (Cadavid et al., 2021, p. 208). Esta integración de herramientas tecnológicas también se proyecta hacia infraestructuras como ciclo rutas y redes peatonales, donde la sensórica puede facilitar el control de la calidad del aire, el conteo de usuarios y la mejora de la seguridad, consolidando así un enfoque moderno y colaborativo de gestión ambiental urbana.

En el contexto del monitoreo de material particulado PM_{10} , se han validado diversas técnicas para la cuantificación de metales pesados como Pb, Cd, Ni, Cr y As, destacándose entre ellas la espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y la espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito. Estas técnicas han sido comparadas con la metodología validada en este estudio, la cual incorpora parámetros como linealidad, efecto matriz, límites de detección y cuantificación, precisión y veracidad, con el propósito de verificar su aplicabilidad en la evaluación del cumplimiento normativo. “La metodología validada por el Grupo GAIA para cuantificar metales en PM_{10} en el Valle de Aburrá ofrece resultados precisos y confiables, y permite evaluar el cumplimiento de la Resolución 2254 de 2017 al superar los requisitos de sensibilidad establecidos” (Sarmiento et al., 2021, p. 165). Esta validación técnica garantiza que la herramienta utilizada sea eficaz

para el seguimiento ambiental y la gestión de la calidad del aire conforme a los estándares legales vigentes.

De manera local, en un estudio sobre la caracterización de MP en la Ciudad de Cúcuta, se desarrolló un sistema móvil innovador para monitorear la contaminación, mostrando que los niveles de $PM_{2.5}$ y PM_{10} cumplen con los estándares establecidos (Eslava et al., 2021, p. 95)

Según el Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2022, p. 40), “en el informe del estado de la Calidad del aire en Colombia, la Ciudad de Cúcuta requiere mejorar su SVCA de tipo III intermedio, el cual estipula estaciones de monitoreo fijas con medición de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y Ozono (O_3)”.

Así mismo, los Municipios de El Zulia, Villa del Rosario, Los Patios y Ocaña no cuentan con equipos de medición; por ende, no se cuenta con registro de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

De acuerdo al IDEAM (2022, p. 33) “Los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en Colombia son fundamentales para monitorear contaminantes atmosféricos, generar datos en tiempo real y orientar acciones ambientales que prevengan riesgos a la salud y mejoren la gestión del recurso aire a nivel regional”. Estas redes, implementadas por las Corporaciones Autónomas Regionales y autoridades ambientales urbanas, integran tecnologías manuales, automáticas e híbridas que permiten evaluar con precisión las concentraciones de contaminantes como el material particulado, ozono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, entre otros. Además, los SVCA facilitan el análisis de tendencias, la identificación de fuentes contaminantes y la toma de decisiones informadas para la formulación de políticas públicas. Su importancia también radica en que fortalecen la

capacidad institucional del país para cumplir con las normas nacionales e internacionales en materia de calidad del aire, promoviendo el derecho de la ciudadanía a un ambiente sano.

La red de monitoreo atmosférico de Bogotá ha sido limitada por su dependencia tecnológica externa, baja inversión y débil desarrollo científico nacional, lo que restringe su capacidad para responder eficazmente a los desafíos actuales de calidad del aire en la ciudad (Macías & Gallini, 2019, p. 19). En el contexto de la calidad del aire y el monitoreo atmosférico, Bogotá ha desarrollado una red que, si bien proporciona información valiosa para la gestión ambiental, aún presenta deficiencias estructurales derivadas de su fuerte dependencia de tecnologías extranjeras. Estas limitaciones han obstaculizado su capacidad para adaptarse a las transformaciones urbanas y atender de forma oportuna los nuevos focos de contaminación. La escasa inversión pública y el bajo nivel de innovación científica y técnica local han hecho que la red no responda con eficacia a las necesidades actuales. A pesar de su modernización en 2008, los equipos enfrentan dificultades de mantenimiento por falta de recursos, lo que subraya la urgencia de fortalecer las capacidades nacionales para lograr un sistema de vigilancia ambiental más autónomo, sostenible y contextualizado.

4.2.3 Tecnologías de monitoreo

Según Mendoza Carmona (2020, p. 18), “abordó el impacto de la explotación minera en el municipio de Toluviejo, Sucre, particularmente en relación con la emisión de material particulado PM_{10} generado por las actividades de extracción de caliza”. La minería a cielo abierto, especialmente en las canteras de caliza, se ha identificado como una fuente significativa de emisión de PM_{10} , que puede afectar tanto la salud humana como el medio ambiente. El estudio utilizó un inventario de emisiones atmosféricas, tomando en cuenta los factores de emisión mineros de la EPA, y calculó las emisiones totales provenientes de

diversas actividades mineras, como voladuras y trituración. Los resultados mostraron que las áreas de patio de acopio y trituración fueron las principales fuentes de emisión. Además, se utilizó el software Screen View para modelar la dispersión del contaminante y analizar su concentración y comportamiento según la distancia, revelando la influencia significativa de la meteorología en la dispersión del PM_{10} . Las simulaciones indicaron que la situación ambiental de la zona es crítica, lo que llevó a la recomendación de realizar más monitoreos en el área y aplicar medidas de mitigación del material particulado.

4.2.4 Aplicaciones en zonas urbanas y rurales

La medición de la calidad del aire en entornos urbanos y rurales requiere la aplicación de diversas tecnologías que permitan obtener datos precisos y representativos, tanto en tiempo real como a largo plazo. Estas tecnologías varían en su alcance espacial, temporal y en la complejidad de los equipos utilizados, abarcando desde métodos de referencia validados a nivel internacional hasta sistemas de monitoreo emergentes como sensores de bajo costo y técnicas de teledetección. La combinación de estas herramientas es fundamental para garantizar la cobertura en zonas densamente pobladas y en áreas rurales donde la infraestructura de medición es limitada, así como para generar insumos confiables para la modelización y la gestión ambiental (Querol, 2018, pp. 28-34).

Tabla 1. *Tecnologías actuales en zonas urbanas y rurales.*

Tecnología	Descripción	Aplicación en zonas urbanas	Aplicación en zonas rurales	Referencia
Métodos tradicionales de referencia y equivalentes	Incluyen el muestreo gravimétrico para partículas (PM10, PM2,5) y analizadores automáticos para gases criterio como SO ₂ , NO ₂ , O ₃ y CO. Proporcionan datos precisos y comparables internacionalmente.	Monitoreo en redes oficiales para cumplimiento normativo y estudios de salud pública.	Medición puntual o estacional en estaciones de fondo rural para evaluar transporte regional de contaminantes.	(Querol, 2018, pp. 28-29)
Sensores de bajo costo y redes comunitarias	Dispositivos de menor precisión pero de amplia cobertura y fácil despliegue. Complementan la vigilancia oficial y permiten participación ciudadana.	Incremento de la resolución espacial en áreas con alta variabilidad de contaminantes.	Útiles para cubrir grandes extensiones con baja densidad de estaciones oficiales.	(Querol, 2018, pp. 30-31)
Teledetección satelital y drones	Uso de sensores remotos en satélites y plataformas aéreas no tripuladas para estimar concentraciones y transporte de contaminantes.	Detección de episodios de contaminación y validación de modelos en grandes ciudades.	Seguimiento de incendios forestales, polvo desértico y transporte de contaminantes.	(Querol, 2018, pp. 32-33)
Modelos de dispersión atmosférica	Herramientas matemáticas que integran datos medidos y condiciones meteorológicas para simular la dispersión y transformación de contaminantes.	Evaluación de impacto de políticas de reducción de emisiones y predicción de episodios críticos.	Estimación de concentraciones en zonas sin estaciones, considerando transporte a larga distancia.	(Querol, 2018, pp. 33-34)

4.2.5 Monitoreo en tiempo real y estudios atmosféricos

Desde 2018, las autoridades ambientales deben implementar monitoreo automático en tiempo real en puntos críticos de contaminación, con plazo hasta 2022, sin excluir el uso de tecnologías manuales para caracterización de material particulado (Resolución 2254 de 2017, 2017, p. 4). Esta disposición fortalece la capacidad institucional para la gestión ambiental, permitiendo una respuesta oportuna ante episodios de alta contaminación y facilitando la toma de decisiones basada en evidencia. El uso de tecnologías automáticas mejora la precisión y continuidad de los datos, mientras que las metodologías manuales siguen siendo esenciales para estudios específicos de composición química o fuentes emisoras, asegurando una evaluación integral de la calidad del aire.

Según el IDEAM (2022, p. 19), “El análisis satelital permite comprender la dinámica espacial y temporal de contaminantes atmosféricos en Colombia, complementando datos terrestres mediante reanálisis y sensores como Tropomi y CAMS, lo que fortalece la gestión de la calidad del aire en el territorio”. Estos sistemas, con alta resolución espacial y temporal, permiten identificar anomalías en la distribución de contaminantes como PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 y O_3 . Además, amplían la cobertura en zonas sin monitoreo terrestre, lo que mejora la precisión en la toma de decisiones ambientales. La validación estadística y el uso conjunto de herramientas de teledetección han sido clave para priorizar acciones en salud pública y planificación territorial con base en evidencia científica.

4.2.6 Comparación internacional y limitaciones de Colombia

El monitoreo de la calidad del aire constituye una herramienta fundamental para la gestión ambiental y la protección de la salud pública, ya que permite generar información oportuna sobre la presencia y concentración de contaminantes atmosféricos. A nivel

internacional, los sistemas de monitoreo varían en su cobertura, tecnologías empleadas, periodicidad de reporte y disponibilidad de datos en tiempo real. En el contexto latinoamericano y, particularmente, en Colombia, el fortalecimiento de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) es esencial para cumplir con las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y las regulaciones nacionales. La siguiente matriz (Tabla 2) presenta una comparación de distintos países en cuanto a sus sistemas de monitoreo, tecnologías empleadas, disponibilidad de datos, valores promedio de PM_{2.5} y casos destacados de ciudades con mejor y peor calidad del aire, con un énfasis especial en la acción de Colombia frente a este reto ambiental.

Tabla 2. *Comparativa internacional monitoreo de calidad del aire*

País / Región	Tecnología de monitoreo	¿Tiempo real?	Cobertura y características	PM _{2.5} anual µg/m³	Ciudad con mejor calidad del aire	Ciudad con peor calidad del aire	Referencia
Unión Europea	Estaciones automáticas fijas integradas a la red EEA; medición de PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , SO ₂ , O ₃ ; plataformas de datos abiertas.	Sí	Red más completa (>3.500 estaciones). Clasificación y mapeo interactivo.	12.5	Umeå (Suecia)	Nowy Sacz (Polonia)	(IQAir, 2022, p. 30; Maldonado & Rincón, 2024, p. 6)
Estados Unidos	EPA Air Quality System (AQS), monitores automáticos/manuales, integración con modelización satelital.	Sí	Cobertura nacional amplia, datos públicos.	8.0	Honolulu (Hawái)	Fresno (California)	(IQAir, 2022, p. 14)
China	Estaciones urbanas automáticas, sensores de bajo costo, satélites,	Sí	Cobertura en todas las provincias.	32.6	Lhasa (Tíbet)	Hotan (Xinjiang)	(IQAir, 2022, p. 19)

País / Región	Tecnología de monitoreo	¿Tiem po real?	Cobertura y característic as	PM _{2.5} anual µg/m ³	Ciudad con mejor calidad del aire	Ciudad con peor calidad del aire	Referencia
	reporte nacional en línea.						
Chile	Red SINCA con estaciones automáticas para PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , SO ₂ , O ₃ . Datos abiertos.	Sí	Cobertura en principales ciudades; foco en Santiago.	21.0	Punta Arenas	Coyhai que	(Maldonado & Rincón, 2024, p. 15)
México	SINAICA, monitores automáticos/ma nuales.	Sí	Cobertura en zonas metropolitan as; variabilidad de calidad de datos.	20.5	Guadal ajara	Toluca	(IQAir, 2022, p. 23)
Colombia	SVCA con estaciones automáticas/man uales para PM _{2.5} , PM ₁₀ y gases criterio; plataformas locales (Bogotá, Medellín, Cali) y reporte al IDEAM.	Sí parcial	Cobertura desigual; mejor infraestructu ra en capitales, baja en áreas rurales.	16.4	Pasto	Medellí n	(IQAir, 2022, p. 41; Maldonado & Rincón, 2024, p. 18)

En Colombia, los SVCA operan con cobertura desigual; las capitales cuentan con redes más robustas, pero zonas rurales y municipios intermedios presentan vacíos.

- *Limitaciones:* baja densidad de estaciones, escasa integración de sensores de bajo costo y teledetección en la gestión operativa, y limitada interoperabilidad de datos entre regiones.
- *En contraste,* la Unión Europea, Estados Unidos y China integran tecnologías de referencia, monitoreo satelital, sensores móviles y datos abiertos, con redes densas y mantenimientos planificados, logrando detección temprana y respuesta coordinada.

- *Oportunidad para Colombia:* incrementar la integración de datos satelitales y de sensores comunitarios, optimizar ubicación de estaciones mediante análisis geoespacial y priorizar la interoperabilidad de plataformas de datos.

4.2.7 Ventajas y desventajas comparativas

El monitoreo de la calidad del aire en Colombia presenta fortalezas y debilidades significativas cuando se compara con los avances internacionales y regionales. Entre las ventajas, destaca el fortalecimiento institucional y normativo, con normativas como el Decreto 1076 de 2015 y el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Resoluciones 650 y 2154 de 2010), que han permitido consolidar Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) robustos en ciudades como Bogotá y el Valle de Aburrá. Estas regiones han implementado tecnologías avanzadas, como sensores ciudadanos y estaciones de monitoreo, integradas con enfoques innovadores como la transformación digital en el Valle de Aburrá, que incluye dispositivos en bicicletas para medir calidad del aire, temperatura y humedad. Además, estudios locales, como el de Cúcuta, han mostrado el desarrollo de sistemas móviles innovadores que cumplen con estándares de PM_{2.5} y PM₁₀, mientras que técnicas validadas, como las del Grupo GAIA, garantizan precisión en la cuantificación de metales pesados en PM₁₀, alineándose con normativas como la Resolución 2254 de 2017. La incorporación de análisis satelital, con herramientas como Tropomi y CAMS, amplía la cobertura en zonas sin monitoreo terrestre, fortaleciendo la capacidad de respuesta ante episodios de contaminación.

Por otro lado, las desventajas incluyen una cobertura desigual de los SVCA, con vacíos significativos en zonas rurales y municipios intermedios como El Zulia, Villa del Rosario, Los Patios y Ocaña, donde no existen equipos de medición. La dependencia de

tecnologías extranjeras, como en el caso de Bogotá, limita la autonomía y sostenibilidad de las redes de monitoreo, mientras que la baja inversión y el débil desarrollo científico nacional restringen la capacidad de adaptación a nuevos focos de contaminación. Comparado con sistemas internacionales, como los de la Unión Europea, Estados Unidos y China, que integran redes densas, monitoreo satelital, sensores móviles y datos abiertos, Colombia enfrenta retos en la densidad de estaciones, la interoperabilidad de datos y la integración operativa de sensores de bajo costo y teledetección. Estudios como el de Mendoza Carmona en Toluvié evidencian la criticidad de fuentes específicas de contaminación, como la minería, pero la falta de monitoreo continuo en estas áreas dificulta la mitigación efectiva.

En conclusión, Colombia ha avanzado en la implementación de sistemas de monitoreo alineados con estándares internacionales, pero debe superar limitaciones estructurales mediante la optimización de la ubicación de estaciones con análisis geoespacial, la integración de tecnologías emergentes como sensores de bajo costo y el fortalecimiento de la interoperabilidad de datos. Estas mejoras, inspiradas en modelos internacionales exitosos, son cruciales para garantizar una gestión ambiental efectiva y contextualizada a las necesidades de la Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana.

5. Análisis de interesados - involucrados

A partir de los objetivos específicos del presente proyecto, se identificaron los principales grupos involucrados e interesados, considerando sus roles, expectativas e influencia en el desarrollo y los resultados del proyecto:

Tabla 3. *Interesados - involucrados directos*

Interesados-involucrados	Rol	Intereses
Corporación	Ejecutor el proyecto.	Fortalecer el SVCA, mejorar la gestión ambiental y cumplir con las regulaciones nacionales.
Autoridades locales (gobernación y alcaldías)	Colaborar con la priorización de áreas geográficas y la implementación del protocolo institucional.	Proteger la salud pública y reducir los impactos negativos de la contaminación en sus comunidades.
Proveedores de tecnología y servicios	Ofrecer soluciones tecnológicas y equipos de monitoreo ambiental adecuados para las necesidades del proyecto.	Establecer relaciones comerciales y mostrar el desempeño de sus productos.
Academia	Apoyar en la evaluación de tecnologías, metodologías de priorización y validación del protocolo.	Generar datos de calidad y promover la innovación en el monitoreo ambiental.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (López et al., 2016, p. 7).

Tabla 4. *Interesados-involucrados indirectos*

Interesados-involucrados	Rol	Intereses
Ciudadanía	Beneficiarse de un sistema de monitoreo más eficiente y de un protocolo de respuesta ante eventos críticos por contaminación atmosférica.	Acceder a información confiable sobre el estado de la calidad del aire y ser protegidos ante niveles peligrosos de contaminación.
Sector industrial y empresarial	Participar indirectamente en el cumplimiento de normativas relacionadas con la calidad del aire.	Minimizar posibles impactos económicos por restricciones ambientales y mejorar su sostenibilidad.
Autoridades ambientales (MINAMBIENTE, IDEAM)	Proveer directrices, supervisar la implementación y evaluar el impacto del proyecto a nivel nacional.	Asegurar el cumplimiento de la normatividad nacional y consolidar un sistema de vigilancia ambiental en el país.

Interesados-involucrados	Rol	Intereses
ONGs y colectivos ambientales	Actuar como veedores del cumplimiento de los objetivos y promotores de la concienciación ambiental.	Incrementar la transparencia y fomentar acciones ambientales responsables.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (P. López et al., 2016, p. 7).

5.1 Matriz influencia – interés

De acuerdo con Acuña (2012, p. 10), “El Modelo de Poder e Interés de Gardner clasifica stakeholders por su poder y grado de interés en estrategias empresariales, orientando relaciones específicas para definir estrategias efectivas con cada grupo”. Este enfoque permite a las empresas identificar a los actores clave, como aquellos con alto poder e interés que requieren colaboración estrecha, y a los de bajo interés que pueden necesitar solo monitoreo. Al aplicar esta matriz, las organizaciones pueden priorizar recursos y diseñar planes de comunicación personalizados, fortaleciendo su gestión de stakeholders en un contexto dinámico.

Se clasifican a los actores según su influencia y nivel de interés en el proyecto, considerando las siguientes preguntas:

- A. Influencia: ¿Qué tanto pueden influir en las decisiones o el éxito del proyecto?
- B. Interés: ¿Qué tan interesados están en el proyecto, ya sea porque los afecta o les interesa?

A continuación, se presentan la matriz de influencia – interés (Tabla 3) y la evaluación de influencia – interés (Tabla 4). Este análisis asegura la gestión adecuada de las relaciones y compromisos necesarios para cumplir con los objetivos específicos del proyecto.

Tabla 5. *Matriz de influencia – interés*

		Interés	
		Bajo	Alto
Influencia	Alta	• MINAMBIENTE • IDEAM	• Corponor • Autoridades locales • Ciudadanía
	Baja	• Proveedores tecnológicos	• Academia

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (Acuña, 2012, p. 10)

Tabla 6. *Evaluación de influencia - interés*

Interesados-involucrados	Influencia	Interés	Justificación
Corponor	Alta	Alta	Encargado de la supervisión ambiental en la región.
Autoridades locales	Alta	Alta	Responsables de implementar políticas y garantizar ejecución local.
Ciudadanía	Alta	Alta	Directamente afectada por los resultados del proyecto.
MINAMBIENTE	Alta	Baja	Marco regulatorio, pero no involucrado directamente en la ejecución.
IDEAM	Alta	Baja	Brinda datos, pero no gestiona el proyecto directamente.
ONGs	Baja	Alta	Tienen un alto interés en el impacto ambiental.
Academia	Baja	Alta	Interesada en los datos y estudios que genera el proyecto.
Proveedores tecnológicos	Baja	Baja	Solo involucrados en la implementación técnica inicial.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (Acuña, 2012, p. 10)

5.2 Desarrollo de estrategias de gestión

Cada cuadrante de la matriz de Influencia-Interés dicta cómo manejar a los interesados-involucrados:

A. Alta influencia, alto interés (Corponor, autoridades locales, ciudadanía).

Estrategia: Involucrarlos activamente. Consultarlos en las decisiones y mantenerlos informados constantemente.

B. Alta influencia, bajo interés (MINAMBIENTE, IDEAM). Estrategia:

Mantenerlos satisfechos. Actualizarlos de forma periódica para garantizar apoyo cuando sea necesario.

C. Baja influencia, alto interés (ONGs, Academia). Estrategia: Informarles con

detalle. Compartir avances e incluirlos en actividades que reflejen sus intereses.

D. Baja influencia, bajo interés (Proveedores tecnológicos). Estrategia: Mantenerlos

involucrados sólo en los aspectos relevantes a sus funciones específicas.

6. Análisis del problema

La ciudad de Cúcuta y su área Metropolitana es una región en constante desarrollo, con una economía que se sustenta principalmente en la actividad industrial y el comercio. La presencia de numerosas industrias de diferentes sectores tales como la arcilla, el carbón, entre otros, contribuye significativamente a la emisión de contaminantes atmosféricos, incluido el MP. Además, la actividad antropogénica, que incluye las quemas de biomasa y la construcción, también aporta a la carga de contaminación en el aire. A esto se suma el intenso tráfico vehicular, tanto de carga como particular, que circula por las principales vías de los municipios y contribuye con emisiones de MP provenientes de los gases de la combustión vehicular. Es indudable que el crecimiento industrial de los últimos diez (10) años está

representado en las industrias anteriormente mencionadas, las cuales se encuentran a menos de diez (10) kilómetros del perímetro urbano.

A pesar de la importancia económica de estas actividades, la falta de control y monitoreo de las emisiones de contaminantes atmosféricos plantea serios riesgos para la salud pública y el medio ambiente en la Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana. La exposición a concentraciones elevadas de MP se ha asociado con una serie de problemas de salud, incluidos trastornos respiratorios, cardiovasculares y neurológicos.

Además, "Los estudios ecológicos de serie temporal analizan variaciones en el tiempo, evaluando exposición y contaminación ambiental, identificando factores clave para gestionar impactos y definir estrategias de mitigación." (Ballester et al., 1999, p. 111)

Ante este panorama, resulta imperativo abordar el fortalecimiento y crecimiento tecnológico para la obtención de información precisa y actualizada sobre la calidad del aire mediante la ampliación en número de las estaciones de monitoreo pertenecientes al actual SVCA que la Corporación tiene instalado en la Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana.

6.1 Modelo árbol de problemas

Tabla 7. *Árbol del problema*

Efectos Indirectos	Incremento en los riesgos para la salud pública por enfermedades respiratorias.	Afectación de la eficiencia y sostenibilidad.	Imposibilidad de tomar medidas adecuadas para el control de aportes de parámetros contaminantes ante eventos por mala calidad del aire.
Efectos Directos	Columnas dispersas en el aire de material particulado.	Adquisición de equipos con tecnología incompatible con el SVCA actual.	Baja efectividad de las acciones para atender eventos de contaminación.
Problema	<i>Limitación del monitoreo de la calidad del aire y la respuesta institucional ante eventos de contaminación atmosférica, bajo el marco del plan de gestión ambiental de CORPONOR en Norte de Santander a través del marco lógico.</i>		
Causas Directas	Desconocimiento de las áreas geográficas prioritarias en Norte de Santander para la instalación	Falta de evaluación de las opciones tecnológicas disponibles para la medición	Carencia de un protocolo institucional de respuesta ante eventos de

	de estaciones de monitoreo de calidad del aire, mediante la identificación de fuentes de contaminación y el análisis de datos, garantizando una cobertura representativa y estratégica.	de la calidad del aire a través de un análisis técnico, ambiental y financiero, con el fin de seleccionar soluciones eficientes y sostenibles	contaminación atmosférica, mediante la definición de acciones y herramientas de comunicación, para informar a las autoridades gubernamentales y a la ciudadanía en caso de niveles peligrosos de contaminación atmosférica
Causas Indirectas	Desconocimiento del comportamiento de las concentraciones de Material Particulado PM _{2.5} y PM ₁₀ en Norte de Santander.	Limitada tecnología avanzada que permita la medición en tiempo real.	Desarticulación institucional ante eventos de contaminación atmosférica.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (DNP, 2023, p. 26).

7. Análisis de objetivos

7.1 Modelo árbol de objetivos

Tabla 8. *Árbol de objetivos*

Reducción en los riesgos para la salud pública por enfermedades respiratorias.	Incremento de la eficiencia y sostenibilidad	Posibilidad de tomar medidas adecuadas para el control de aportes de parámetros contaminantes ante eventos por mala calidad del aire.
Conocimiento de las trayectorias del material particulado.	Adquisición de equipos con tecnología compatible con el SVCA actual.	Alta efectividad de las acciones para atender eventos de contaminación.
<i>Mejorar el monitoreo de la calidad del aire y la respuesta institucional ante eventos de contaminación atmosférica, bajo el marco del plan de gestión ambiental de CORPONOR en Norte de Santander a través del marco lógico.</i>		
Determinar las áreas geográficas prioritarias en Norte de Santander para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire, mediante la identificación de fuentes de contaminación y el análisis de datos, garantizando una cobertura representativa y estratégica.	Evaluar las opciones tecnológicas disponibles para la medición de la calidad del aire a través de un análisis técnico, ambiental y financiero, con el fin de seleccionar soluciones eficientes y sostenibles.	Establecer un protocolo institucional de respuesta ante eventos de contaminación atmosférica, mediante la definición de acciones y herramientas de comunicación, para informar a las autoridades gubernamentales y a la ciudadanía en caso de niveles peligrosos de contaminación atmosférica.
Conocimiento del comportamiento de las concentraciones de Material Particulado PM _{2.5} y PM ₁₀ en Norte de Santander.	Amplia tecnología avanzada que permita la medición en tiempo real.	Articulación institucional ante eventos de contaminación atmosférica.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (DNP, 2023, p. 42).

8. Análisis de Alternativas

8.1 Identificación de alternativas

De acuerdo con el árbol de problemas y objetivos presentados, las alternativas se estructuraron para abordar el problema central de manera estratégica:

Tabla 9. *Identificación de alternativas*

Alternativa	Descripción	Beneficio Esperado
Ampliación de la red de monitoreo	Incrementar la cobertura del monitoreo ambiental instalando estaciones en áreas priorizadas de Norte de Santander, identificadas mediante análisis geoespacial.	Generar datos representativos para una mejor toma de decisiones en la gestión de calidad del aire.
Implementación de tecnologías modernas	Evaluar y seleccionar equipos tecnológicos avanzados compatibles con el SVCA que permitan mediciones en tiempo real y análisis de parámetros como PM _{2.5} y PM ₁₀ .	Garantizar datos precisos, oportunos y sostenibles para mejorar el monitoreo.
Desarrollo de un protocolo institucional	Diseñar un protocolo formal de respuesta ante eventos críticos de contaminación que articule las acciones entre Corponor, autoridades locales y la ciudadanía.	Reducir los tiempos de reacción y mejorar la gestión de riesgos para la salud pública.
Gestión integral de (combinación de alternativas)	Implementar de manera conjunta las estrategias de ampliación de la red, modernización tecnológica y creación de protocolos.	Abordar simultáneamente las causas y efectos del problema, logrando un impacto significativo en la calidad del aire y la salud pública.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (DNP, 2023, p. 43).

8.2 Evaluación de alternativas

La evaluación se fundamenta en “el proceso de análisis jerárquico de decisión, desarrollado por Thomas L. Saaty, resuelve problemas complejos con múltiples criterios

mediante evaluaciones subjetivas, jerarquizando alternativas con prioridades estandarizadas” (Bermúdez & Quiñones, 2018, p. 94).

8.2.1 Criterios de evaluación

El impacto ambiental y social, medida en que la alternativa mejora la calidad del aire y reduce los riesgos para la salud.

La viabilidad técnica, factibilidad de implementar la alternativa según las capacidades técnicas disponibles.

El costo y sostenibilidad financiera, Relación entre los recursos necesarios y los beneficios esperados a corto y largo plazo.

La aceptación institucional y ciudadana, nivel de apoyo y cooperación por parte de actores clave como Corponor, autoridades locales y comunidad.

8.2.2 Escala de puntuación

Se emplea una escala del 1 al 10 para puntuar cada alternativa según cada criterio:

- A. 1-3: bajo cumplimiento del criterio.
- B. 4-6: cumplimiento moderado del criterio.
- C. 7-9: alto cumplimiento del criterio.
- D. 10: cumplimiento total del criterio.

8.2.3 Ponderación de criterios

La asignación de los porcentajes para la ponderación de los criterios fue resultado de un análisis detallado que consideró las características particulares de la problemática de contaminación atmosférica en la Ciudad de Cúcuta y su Área Metropolitana. A continuación

en la tabla 10, se describen las consideraciones para determinar la importancia relativa de cada criterio.

Tabla 10. *Ponderación de criterios*

Criterio	Ponderación	Justificación	Factores Clave	Importancia
Impacto ambiental y social	40%	Mitigar los efectos negativos de la contaminación atmosférica, que afecta directamente la salud pública y los ecosistemas.	• Cumplimiento de normativas ambientales y mejora de indicadores clave de calidad del aire. • Incidencia en la reducción de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.	La urgencia de abordar los riesgos ambientales y sociales justifica su ponderación más alta.
Viabilidad técnica	25%	Disponibilidad y efectividad de tecnologías adaptadas al actual SVCA.	• Disponibilidad de tecnologías de monitoreo. • Capacidad de las instituciones locales para operar y mantener los equipos. • Compatibilidad de las tecnologías con las condiciones actuales del SVCA.	Aunque fundamental, la viabilidad técnica se ponderó ligeramente menos que el impacto ambiental y social, ya que este último tiene un alcance más amplio.
Costo y sostenibilidad financiera	20%	Un análisis de costos permite priorizar opciones que maximicen los beneficios dentro de las limitaciones presupuestarias.	• Inversión inicial requerida para las tecnologías y el protocolo. • Costo de operación y mantenimiento.	Aunque el costo es un aspecto relevante, no se priorizó sobre el impacto social y ambiental, dado el carácter crítico del problema que se busca resolver.
Aceptación institucional y ciudadana	15%	El éxito del proyecto depende de la cooperación y apoyo tanto de las instituciones públicas como de la comunidad.	• Disposición de las autoridades locales para implementar políticas y medidas. • Compromiso ciudadano con respecto a la calidad del aire. • Comunicación efectiva de los	Aunque fundamental, se asignó el menor porcentaje debido a que, con estrategias de comunicación y sensibilización adecuadas, este criterio puede reforzarse en

Criterio	Ponderación	Justificación	Factores Clave	Importancia
			beneficios del proyecto.	paralelo a la ejecución del proyecto.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (Bermúdez & Quiñones, 2018, p. 94).

8.2.4 Matriz comparativa

A continuación, se detalla cada una de las alternativas con base en el criterio de evaluación establecido, con el fin de obtener la alternativa más favorable.

Tabla 11. Matriz comparativa.

Alternativa	Impacto ambiental y social (40%)	Viabilidad técnica (25%)	Costo y sostenibilidad financiera (20%)	Aceptación institucional y ciudadana (15%)	Puntaje total/10
Ampliación de la red de monitoreo	8 (3.2)	6 (1.5)	7 (1.4)	9 (1.4)	7.5
Implementación de tecnologías modernas	9 (3.6)	8 (2.0)	6 (1.2)	7 (1.1)	7.9
Desarrollo de un protocolo institucional	7 (2.8)	9 (2.3)	8 (1.6)	8 (1.2)	7.9
Gestión integral (combinación de alternativas)	10 (4.0)	7 (1.8)	5 (1.0)	9 (1.4)	8.2

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (Bermúdez & Quiñones, 2018, p. 96).

8.3 Selección de la alternativa de solución

Luego de haber realizado la evaluación de alternativas, se obtuvo como resultado:

8.3.1 Ampliación de la red de monitoreo (Puntaje total: 7.5)

Impacto ambiental y social (3.2/4.0), la ampliación de la red tiene un impacto ambiental positivo al permitir un monitoreo más detallado y localizado de la calidad del aire. Esto mejora la capacidad de reacción ante eventos críticos y proporciona datos esenciales para diseñar políticas públicas.

Viabilidad técnica (1.5/2.5), moderadamente viable dado que las tecnologías de monitoreo están disponibles, pero puede requerir infraestructura adicional y recursos técnicos para garantizar su correcto funcionamiento.

Costo y sostenibilidad financiera (1.4/2.0), requiere una inversión inicial significativa para instalar estaciones, pero los costos de operación pueden mantenerse bajo control con un diseño eficiente.

Aceptación institucional y ciudadana (1.4/1.5), ya que se percibe como una medida concreta y proactiva para abordar la contaminación atmosférica.

8.3.2 Implementación de tecnologías modernas (Puntaje total: 7.9)

El impacto ambiental y social (3.6/4.0), las tecnologías modernas como sensores avanzados y herramientas digitales, tienen un impacto directo en la precisión del monitoreo y la capacidad de reacción, mejorando la calidad del aire y los beneficios sociales.

La viabilidad técnica (2.0/2.5), dado que estas tecnologías están bien desarrolladas, pero podrían requerir personal capacitado para su instalación y mantenimiento.

El costo y sostenibilidad financiera (1.2/2), es un desafío, ya que las tecnologías avanzadas tienden a ser más costosas, tanto en adquisición como en mantenimiento.

La aceptación institucional y ciudadana (1.1/1.5), debido a que podría percibirse como costosa, aunque sus beneficios son evidentes a largo plazo.

8.3.3 Desarrollo de un protocolo institucional (Puntaje total: 7.9)

El impacto ambiental y social (2.8/4.0), aunque no actúa directamente sobre las emisiones, un protocolo bien diseñado tiene un impacto indirecto importante, mejorando la coordinación institucional y la capacidad de respuesta ante emergencias ambientales.

La viabilidad técnica (2.3/2.5), es alta ya que no requiere inversiones significativas en tecnología, pero sí en procesos y formación del personal institucional.

El costo y sostenibilidad financiera (1.6/2), relativamente bajo costo en comparación con otras alternativas, ya que se basa en la mejora de procesos existentes.

La aceptación institucional y ciudadana (1.2/1.5), resalta buena aceptación institucional debido a la mejora en la gestión, aunque puede carecer de impacto visible inmediato para la ciudadanía.

8.3.4 Gestión integral (combinación de alternativas - Puntaje total: 8.2)

El impacto ambiental y social (4.0/4.0), al combinar diferentes estrategias esta alternativa maximiza los beneficios, abordando tanto la monitorización como la mitigación y gestión institucional.

La viabilidad técnica (1.8/2.5), moderadamente viable ya que implica la integración de múltiples enfoques, lo que puede presentar desafíos técnicos y logísticos.

El costo y sostenibilidad financiera (1.0/2.0), menor puntuación debido al alto costo de implementar varias estrategias simultáneamente. Requiere una sólida planificación financiera.

La aceptación institucional y ciudadana (1.4/1.5), es alta ya que aborda el problema de manera integral, demostrando un compromiso sólido para mejorar la calidad del aire.

Como resultado, la *gestión integral* obtuvo el puntaje más alto (8.2), siendo la mejor opción para el proyecto debido a su capacidad de combinar los beneficios de las otras alternativas y abordar la problemática desde múltiples ángulos. Aunque implica mayores costos y desafíos técnicos, su impacto ambiental y social significativo, junto con su alta aceptación, la convierten en la mejor opción. Las alternativas de implementación de tecnologías modernas y desarrollo de un protocolo institucional (7.9 cada una) son también viables y podrían priorizarse según las limitaciones financieras o técnicas. La ampliación de la red de monitoreo (7.5) es una solución útil, pero podría complementarse con las otras medidas para maximizar los beneficios.

9. Construcción del modelo analítico del proyecto

9.1 Estructura analítica

"Elaborar la estructura analítica del proyecto implica recolectar información, seleccionar estrategias óptimas y construir alternativas con 4 niveles: fin, propósito, componentes y actividades" (Ortegón et al., 2015, p. 80).

La aplicación del enfoque del marco lógico garantiza una alineación efectiva entre las metas y las actividades del proyecto, permitiendo una evaluación continua del progreso y la identificación de ajustes necesarios. A través de este enfoque, el proyecto establece una visión integral que cubre desde la identificación de áreas prioritarias hasta la implementación de tecnologías adecuadas y la definición de protocolos institucionales. "La Metodología Marco Lógico es una *ayuda para pensar*, no sustituye el análisis creativo, guiando la evaluación de proyectos. Incluye identificación de problemas y planificación con matriz de marco lógico"(Ortegón et al., 2015, p. 15).

9.2 Matriz de marco lógico

Es una herramienta para la conceptualización, el diseño, la ejecución, el seguimiento del desempeño y la evaluación de proyectos. “La Matriz de Marco Lógico presenta en forma resumida los aspectos clave del proyecto con cuatro columnas: objetivos, indicadores, medios de verificación y supuestos, en cuatro momentos de su vida” (Ortegón et al., 2015, p. 22).

Tabla 12. *Matriz de marco lógico*

Resumen	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos
Fin	Mejora en el monitoreo de la calidad del aire en Norte de Santander.	Reportes del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA).	Apoyo continuo de las instituciones locales y nacionales para políticas de control de emisiones contaminantes.
Propósito	Fortalecimiento del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) y de la capacidad institucional de respuesta.	Informes de CORPONOR sobre la ampliación de estaciones de monitoreo y protocolos implementados.	Disponibilidad de recursos financieros, tecnológicos y humanos suficientes para garantizar la sostenibilidad.
	Incremento en la cobertura geográfica del monitoreo de la calidad del aire.	Mapas actualizados de cobertura del sistema de monitoreo y reportes periódicos sobre la calidad del aire.	Coordinación efectiva entre las instituciones gubernamentales y los entes locales.
	Reducción en el tiempo de respuesta institucional ante eventos críticos de contaminación atmosférica.	Reportes internos y auditorías sobre tiempos y eficiencia en la gestión de emergencias de contaminación.	Eficiencia en la implementación del protocolo institucional y acceso a tecnologías modernas.
	1. Áreas clave definidas y seleccionadas para estaciones de monitoreo.	Listado de áreas críticas y mapas georreferenciados.	Acceso a datos confiables sobre fuentes de emisión y recursos para análisis técnico y geoespacial.
Componentes (productos)	2. Tecnologías sostenibles y eficientes seleccionadas para el	Matriz de evaluación comparativa de tecnologías (técnica, ambiental y financiera).	Disponibilidad en el mercado de tecnologías adecuadas al contexto regional.

Resumen	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos
	monitoreo ambiental.		
	3. Protocolo institucional desarrollado e implementado.	Documento del protocolo validado, talleres de capacitación y plan de comunicación implementado.	Capacitación adecuada del personal encargado y aceptación por parte de las autoridades y la comunidad.
Actividad	1. Determinar las áreas geográficas prioritarias en Norte de Santander para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire.	Informe de identificación de fuentes de contaminación.	Disponibilidad de datos y personal capacitado para realizar los estudios.
	2. Evaluar tecnologías disponibles para seleccionar soluciones eficientes.	Matriz de comparación y criterios de decisión establecidos.	Acceso a tecnologías innovadoras y acuerdos con proveedores para adquisición e implementación.
	3. Diseñar e implementar un protocolo institucional de respuesta ante emergencias de contaminación.	Documento del protocolo aprobado, cronograma de implementación y retroalimentación post-evento.	Colaboración y aceptación interinstitucional y del protocolo diseñado.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 23).

9.3 Resumen narrativo

9.3.1 Fin

El proyecto tiene como objetivo último mejorar el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) en Norte de Santander, monitoreando los niveles de contaminación atmosférica y, con ello, los impactos negativos en la salud pública y el medio ambiente. Esto se busca a través de un enfoque integral que combina tecnologías avanzadas, fortalecimiento institucional y una mayor cobertura de monitoreo. Como resultado, se espera una

disminución en las enfermedades respiratorias relacionadas con la contaminación y una protección más efectiva de los ecosistemas locales. La sostenibilidad del impacto dependerá del compromiso continuo de las instituciones, la participación ciudadana y la implementación de políticas de control y prevención.

9.3.2 Propósito

El propósito del proyecto es fortalecer el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) de Corponor, asegurando una gestión eficiente de eventos críticos de contaminación atmosférica. Este fortalecimiento implica la ampliación de la cobertura geográfica del monitoreo de calidad del aire, la incorporación de tecnologías eficientes y sostenibles y la implementación de un protocolo institucional para gestionar emergencias relacionadas con la contaminación. El éxito de este propósito se medirá a través de indicadores como el incremento en las áreas monitoreadas, la reducción de tiempos de respuesta institucional y la mejora en la precisión y disponibilidad de datos sobre la calidad del aire. La efectividad dependerá de recursos suficientes, coordinación interinstitucional y una aceptación social amplia.

9.3.3 Componentes o productos

Áreas clave definidas y seleccionadas para estaciones de monitoreo, se llevará a cabo un análisis técnico y geoespacial que permita determinar las áreas más críticas para la instalación de estaciones de monitoreo, asegurando que la red cubra los puntos estratégicos en términos de emisión de contaminantes y vulnerabilidad ambiental. Este producto incluye mapas georreferenciados, bases de datos ambientales y validación de las áreas seleccionadas.

Tecnologías sostenibles y eficientes seleccionadas para el monitoreo, se evaluarán distintas opciones tecnológicas en función de criterios técnicos, ambientales y financieros. El objetivo es seleccionar soluciones que sean eficientes en la medición de contaminantes clave, sostenibles a largo plazo y adecuadas al contexto regional. Este componente generará una matriz de comparación y criterios de decisión establecidos.

Protocolo institucional desarrollado e implementado, se diseñará e implementará un protocolo que establezca acciones claras para responder ante eventos de contaminación atmosférica crítica. Este protocolo incluirá herramientas de comunicación para informar a las autoridades y a la ciudadanía, procedimientos operativos para mitigar los impactos, y planes de capacitación para las subdirecciones responsables. Los productos relacionados serán el documento del protocolo aprobado y reportes de talleres de capacitación.

9.3.4 Entregables

Tabla 13. Entregables

Objetivo específico	Actividad	Entregable principal	Detalles complementarios
1.Determinar las áreas geográficas prioritarias en Norte de Santander para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire.	Identificación de fuentes de contaminación	Base de datos de fuentes emisoras de contaminación	Listado de industrias, tráfico vehicular, incendios forestales y otras fuentes. Mapas preliminares con ubicación georreferenciada.
	Análisis de datos ambientales y meteorológicos	Informe de tendencias y patrones de contaminación	Mapas geoespaciales de concentración de contaminantes. Análisis estadístico de correlaciones con condiciones meteorológicas.

Objetivo específico	Actividad	Entregable principal	Detalles complementarios
	Definición de criterios de selección de ubicaciones	Documento metodológico de priorización de sitios de monitoreo	Justificación de criterios de selección. Parámetros de evaluación (densidad poblacional, proximidad a fuentes, dispersión de contaminantes).
	Selección de sitios estratégicos	Informe de selección de ubicaciones	Listado final de sitios priorizados. Validación de sitios con expertos y autoridades.
2. Evaluar las opciones tecnológicas disponibles para la medición de la calidad del aire.	Investigación de tecnologías disponibles	Matriz comparativa de tecnologías de monitoreo	Listado de tecnologías evaluadas con especificaciones técnicas. Comparación de compatibilidad (software ENVISTA), precisión y costos.
	Evaluación ambiental y financiera	Matriz de evaluación ambiental y financiera.	Evaluación de costos de adquisición, operación y mantenimiento. Análisis de impacto ambiental y compatibilidad con el entorno.
	Selección de tecnologías óptimas	Matriz de selección tecnológica	Pruebas piloto en campo con sensores seleccionados. Análisis de desempeño y calidad de datos recolectados.
3. Establecer un protocolo institucional de respuesta ante eventos de contaminación atmosférica.	Diseño del protocolo de actuación	Protocolo institucional de respuesta ante contaminación	Definición de niveles de alerta y acciones de mitigación. Asignación de roles y responsabilidades para actores clave.
	Recomendación de herramientas de comunicación (dirigida a la Secretaría General – Oficina de Comunicaciones).	Diseño sugerido para plataforma web institucional.	- Recomendación de tablero interactivo con visualización del ICA en tiempo real. - Sugerencia de sistema de alertas visibles (banners o pop-ups según nivel de contingencia).
	Capacitación y validación del protocolo	-. Actas de socialización del protocolo con dependencias internas.	-. Documentos que certifiquen las reuniones de socialización del protocolo con cada subdirección o área involucrada (incluyendo

Objetivo específico	Actividad	Entregable principal	Detalles complementarios
		- Publicación oficial del protocolo en la página web institucional. - Plan de actualización periódica del protocolo.	aportes, observaciones y compromisos asumidos). - Evidencia de la subida del protocolo en el portal oficial de CORPONOR en la sección de calidad del aire. - Documento interno que establece una hoja de ruta o cronograma para la revisión anual o bianual del protocolo con responsables asignados.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (Lledó & Rivarola, 2007, p. 28)

9.3.5 Actividades

A continuación, se detallan las tareas por actividad necesarias para obtener cada uno de los componentes esperados.

Tabla 14. *Tareas por actividad*

Objetivo específico	Tareas	Subtareas	Componentes esperados
1. Determinar las áreas geográficas prioritarias en Norte de Santander para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire.	Identificación de fuentes de contaminación	- Recopilación de información sobre fuentes emisoras.	- Base de datos de fuentes emisoras.
	Análisis de datos ambientales y meteorológicos	- Recopilación de datos de calidad del aire existentes. - Estudio de patrones meteorológicos.	- Gráfica del comportamiento del índice de la calidad del aire ICA. - Modelación de las trayectorias.
	Definición de criterios de selección de ubicaciones	- Desarrollo de una metodología de priorización.	- Matriz de clasificación de ubicaciones según

Objetivo específico	Tareas	Subtareas	Componentes esperados
			índice de priorización.
	Selección de sitios estratégicos para estaciones de monitoreo	- Aplicación de la metodología de selección.	- Matriz de sitios estratégicos. - Mapa de localización de estaciones de monitoreo.
2. Evaluar las opciones tecnológicas disponibles para la medición de la calidad del aire.	Investigación de tecnologías disponibles	- Revisión de sensores y equipos de monitoreo existentes. - Análisis de precisión y confiabilidad de las tecnologías.	- Matriz comparativa de tecnologías.
	Evaluación ambiental y financiera de las opciones	- Análisis del impacto ambiental de cada tecnología. - Estudio de costos de adquisición, mantenimiento y operación.	- Matriz de evaluación ambiental y financiera.
	Selección de tecnologías óptimas para el contexto local	- Consulta con expertos y fabricantes. - Pruebas piloto en diferentes entornos.	- Matriz de evaluación de criterios de selección.
3. Establecer un protocolo institucional de respuesta ante eventos de contaminación atmosférica.	Diseño del protocolo de actuación	- Definición de umbrales de alerta y niveles de respuesta. - Desarrollo de un plan de acciones por nivel de contaminación.	- Documento del protocolo con lineamientos y niveles de alerta.
	Recomendación de herramientas de comunicación (dirigida a la Secretaría General – Oficina de Comunicaciones)	- Diseñar propuesta de tablero digital con ICA en tiempo real. - Proponer sistema de alertas visibles por nivel de contingencia. - Propuesta de un modelo de biblioteca digital educativa.	- Diseño sugerido de sección web "Norte de Santander Respira". - Prototipo de interfaz gráfica para alertas y visualizaciones. - Listado de contenidos recomendados: infografías, videos, guías
	Capacitación y validación del protocolo	- Realizar socialización interna	- Actas de socialización institucional.

Objetivo específico	Tareas	Subtareas	Componentes esperados
		del protocolo con dependencias. - Gestionar publicación del protocolo en el sitio web institucional. - Elaborar y aprobar plan de actualización periódica del protocolo.	- Link activo del protocolo en la web de Corponor. - Documento técnico del plan de actualización.

Nota: las tareas y subtareas fueron diseñadas con base en los objetivos específicos definidos en la propuesta y validadas con el equipo técnico de Corponor.

Nota: la tabla fue elaborada a partir de la fuente de referencia (Lledó & Rivarola, 2007, p. 28)

9.4 Indicadores

De acuerdo a Ortegón E. (2015, p. 81) el propósito es construir la columna de resumen narrativo de la MML, sintetizando actividades, productos y resultados de corto, mediano y largo plazo, requiriendo un conocimiento detallado del proyecto.

9.4.1 Indicadores de propósito

Permiten mejorar el monitoreo de la calidad del aire y la respuesta institucional ante eventos de contaminación atmosférica, bajo el marco del plan de gestión ambiental de Corponor en Norte de Santander.

Tabla 15. *Indicadores de propósito*

Indicador	Unidad de medida	Meta esperada	Fuente de verificación
Cobertura de monitoreo en áreas prioritizadas.	Porcentaje de cobertura (%)	90% de las áreas críticas prioritizadas cubiertas con estaciones de monitoreo funcionales.	Informes de monitoreo geoespacial y técnico.

Indicador	Unidad de medida	Meta esperada	Fuente de verificación
Reducción del tiempo de respuesta institucional ante emergencias.	Tiempo promedio (horas)	Reducción del tiempo promedio de respuesta en un 50%	Reportes post-evento de emergencias gestionadas.
Incremento en la medición de datos de calidad del aire.	Nivel de medición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	95% de medición de contaminantes claves (material particulado – MP).	Validación de datos de las tecnologías instaladas.
Capacitación del personal técnico e institucional.	Número de personas capacitadas	100% del personal asignado capacitado en tecnologías y protocolos.	Listas de asistencia, certificados de capacitación.

Nota: la tabla fue elaborada a partir del marco lógico del proyecto, considerando criterios de pertinencia, verificabilidad y disponibilidad de medios de verificación.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 82).

9.4.2 Indicadores de componentes

Estos se derivan de los entregables claves de cada actividad:

A. *Componente 1, informe de análisis geoespacial y técnico.*

Tabla 16. *Indicador de componente 1*

Indicador	Unidad de medida	Meta esperada	Fuente de verificación
Número de áreas prioritizadas	Número de áreas	5 áreas críticas prioritizadas para monitoreo.	Informe técnico de análisis geoespacial.

Nota: los indicadores fueron contruidos a partir del marco lógico del proyecto, considerando criterios de pertinencia, verificabilidad y disponibilidad de medios de verificación.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 82).

B. *Componente 2, evaluación y selección de tecnologías.*

Tabla 17. *Indicador de componente 2*

Indicador	Unidad de medida	Meta esperada	Fuente de verificación
Cantidad de tecnologías evaluadas	Número de tecnologías	Al menos 3 tecnologías comparadas	Matriz de comparación de tecnologías.

Nota: los indicadores fueron contruidos a partir del marco lógico del proyecto, considerando criterios de pertinencia, verificabilidad y disponibilidad de medios de verificación.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 82).

C. *Componente 3, protocolo institucional implementado.*

Tabla 18. *Indicador de componente 3*

Indicador	Unidad de medida	Meta esperada	Fuente de verificación
Número de simulacros realizados	Número de simulacros	2 simulacros realizados con retroalimentación registrada.	Actas de simulacros realizados.
Aceptación del protocolo por las instituciones	Porcentaje de aceptación (%)	100% de aceptación del protocolo institucional	Actas de reuniones y aprobaciones formales

Nota: los indicadores fueron contruidos a partir del marco lógico del proyecto, considerando criterios de pertinencia, verificabilidad y disponibilidad de medios de verificación.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 82).

9.4.3 Indicadores de Actividades

Estos están vinculados directamente a los pasos necesarios para completar cada componente.

Tabla 19. *Indicadores de actividades*

Objetivo Específico	Indicador	Unidad de Medida	Meta Esperada	Fuente de Verificación
OE1. Determinar las áreas prioritarias para la instalación de estaciones de monitoreo	Número de fuentes emisoras identificadas	Registro / Base de datos	≥ 1 base consolidada con georreferenciación	Base de datos de fuentes emisoras, informes técnicos
OE1	Número de análisis de datos ambientales y meteorológicos realizados	Informe	≥ 1 informe técnico de patrones y trayectorias	Informe de análisis de datos, gráficas ICA
OE1	Matriz de clasificación de ubicaciones elaborada	Documento metodológico	1 matriz validada	Documento metodológico de priorización
OE1	Número de sitios estratégicos definidos	Sitios	≥ 5 sitios priorizados	Informe de selección de sitios, mapas
OE2. Evaluar tecnologías para la medición de calidad del aire	Número de tecnologías revisadas y documentadas	Tecnologías	≥ 3 tecnologías comparadas	Matriz comparativa de tecnologías
OE2	Número de evaluaciones ambiental y financiera realizadas	Matriz técnica-financiera	1 evaluación consolidada	Matriz de evaluación ambiental y financiera
OE2	Número de tecnologías seleccionadas para pruebas	Tecnología/s seleccionada/s	≥ 1 solución validada	Informe de selección y pruebas piloto
OE3. Establecer un protocolo institucional ante contaminación atmosférica	Protocolo diseñado y aprobado	Documento	1 protocolo institucional	Documento del protocolo, actas de validación
OE3	Herramientas de comunicación diseñadas y sugeridas	Prototipos / propuestas	1 paquete de herramientas digitales	Diseño sugerido (web, alertas, infografías)
OE3	Número de eventos de capacitación y validación	Talleres / Actas	≥ 2 eventos documentados	Actas de socialización, plan de actualización

Nota: los indicadores fueron contruidos a partir del marco lógico del proyecto, considerando criterios de pertinencia, verificabilidad y disponibilidad de medios de verificación.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 82).

9.5 Medios de verificación

A continuación, se describen los *medios de verificación* para cada nivel de indicadores (*propósito, componentes y actividades*) (tablas 20, 21 y 22), especificando las fuentes de información utilizadas para evaluar el comportamiento o desempeño de los indicadores.

Tabla 20. *Medios de verificación: indicadores de propósito*

Objetivo específico	Indicador	Medio de verificación
1. Determinar las áreas geográficas prioritarias en Norte de Santander para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire.	Número de fuentes de contaminación identificadas	Base de datos de fuentes emisoras y reportes técnicos.
	Número de mapas de concentración de contaminantes elaborados	Documentos técnicos con mapas geoespaciales y análisis de dispersión.
	Documento metodológico de selección de sitios desarrollado	Informe de metodología validado por expertos y autoridades.
	Número de ubicaciones estratégicas seleccionadas	Informe final de sitios recomendados con sustento técnico.
2. Evaluar las opciones tecnológicas disponibles para la medición de la calidad del aire.	Número de tecnologías evaluadas y comparadas	Matriz comparativa de tecnologías y ficha técnica de cada opción.
	Documento técnico-financiero de evaluación tecnológica elaborado	Informe técnico con análisis de costos, beneficios y sostenibilidad.
	Tecnología recomendada seleccionada y justificada	Documento de selección tecnológica con criterios técnicos y financieros.
3. Establecer un protocolo institucional de respuesta ante eventos de contaminación atmosférica.	Protocolo de respuesta ante contaminación desarrollado	Documento oficial del protocolo validado por entidades competentes.

Objetivo específico	Indicador	Medio de verificación
	Número de herramientas de comunicación implementadas	Informe de implementación de la plataforma de alerta y materiales educativos.
	Número de personas capacitadas en la implementación del protocolo	Listas de asistencia y reportes de talleres de formación.
	Número de simulaciones realizadas para validar el protocolo	Informes de simulaciones con análisis de desempeño y mejoras propuestas.

Nota: esta serie de tablas especifica las fuentes documentales, técnicas y operativas utilizadas para verificar el cumplimiento de los indicadores a nivel de propósito, componentes y actividades.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 86).

Tabla 21. Medios de verificación: indicadores de componentes

Componente	Indicador	Medio de verificación
Identificación de fuentes de contaminación	Número de fuentes de contaminación identificadas y clasificadas	Base de datos de fuentes emisoras y reportes técnicos.
	Número de mapas preliminares con ubicación de fuentes	Mapas geoespaciales con georreferenciación de fuentes contaminantes.
Análisis de datos ambientales y meteorológicos	Número de reportes de tendencias y patrones de contaminación generados	Documentos técnicos con análisis de correlación entre contaminantes y condiciones meteorológicas.
	Número de mapas de concentración de contaminantes elaborados	Informes con representación visual de la distribución espacial de contaminantes.
Definición de criterios de selección de ubicaciones	Documento metodológico de priorización desarrollado y validado	Documento metodológico aprobado por expertos y autoridades.
	Número de criterios de selección definidos	Matriz de evaluación con criterios ponderados.
Selección de sitios estratégicos	Número de ubicaciones seleccionadas para instalación de estaciones de monitoreo	Informe final con justificación técnica y mapas de ubicación de estaciones.
	Número de visitas de campo realizadas para validación de sitios	Actas de visita y reportes fotográficos de los sitios evaluados.
Investigación y evaluación de tecnologías de monitoreo	Número de tecnologías identificadas y analizadas	Matriz comparativa con especificaciones técnicas, costos y desempeño.

Componente	Indicador	Medio de verificación
	Número de informes técnicos y financieros elaborados	Documentos con evaluación de costos, sostenibilidad y eficiencia de tecnologías.
Selección de tecnología óptima	Número de pruebas piloto realizadas con las tecnologías preseleccionadas	Informes de desempeño y calidad de datos obtenidos en pruebas piloto.
	Tecnología seleccionada para implementación	Documento de recomendación con justificación técnica y económica.
Diseño del protocolo de respuesta	Documento oficial del protocolo institucional desarrollado	Documento validado por entidades competentes y actores clave.
	Número de niveles de alerta y acciones definidas	Plan de acción detallado con umbrales de contaminación y medidas de mitigación.
Implementación de herramientas de comunicación	Número de herramientas de notificación temprana implementadas	Reportes de activación de alertas vía SMS, app y/o medios digitales.
	Número de materiales educativos diseñados y distribuidos	Infografías, guías informativas y reportes de distribución a la ciudadanía.
Capacitación y validación del protocolo	Número de personas capacitadas en la aplicación del protocolo	Listas de asistencia, encuestas de evaluación y reportes de capacitación.
	Número de simulaciones de eventos de contaminación realizadas	Informes de simulación con resultados y oportunidades de mejora.

Nota: esta serie de tablas especifica las fuentes documentales, técnicas y operativas utilizadas para verificar el cumplimiento de los indicadores a nivel de propósito, componentes y actividades.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 86).

Tabla 22. *Medios de verificación: indicadores de actividades*

Actividad	Indicador	Medio de verificación
Identificación de fuentes de contaminación	Número de fuentes de contaminación documentadas	Base de datos de fuentes emisoras y reportes técnicos.
	Número de entrevistas realizadas con expertos y autoridades	Actas de entrevistas y documentos de validación.
Análisis de datos ambientales y meteorológicos	Número de reportes de tendencias de contaminación generados	Informes técnicos con análisis de datos históricos.
	Número de mapas geoespaciales elaborados	Documentos con visualización de datos y mapas SIG.
Definición de criterios de selección de ubicaciones	Número de criterios de selección definidos y documentados	Documento metodológico aprobado por expertos.

Actividad	Indicador	Medio de verificación
	Número de reuniones de validación con especialistas	Actas de reuniones con retroalimentación técnica.
Selección de sitios estratégicos	Número de sitios preseleccionados	Informe preliminar con listado de ubicaciones candidatas.
	Número de visitas de campo realizadas	Reportes fotográficos y actas de visita de los sitios evaluados.
Investigación de tecnologías disponibles	Número de tecnologías identificadas y analizadas	Matriz comparativa de opciones tecnológicas.
	Número de consultas con expertos y fabricantes	Informes de reuniones y fichas técnicas obtenidas.
Evaluación ambiental y financiera de tecnologías	Número de tecnologías evaluadas bajo criterios técnicos y económicos	Documento de análisis técnico-financiero.
	Número de factores ambientales analizados en cada tecnología	Reportes con evaluación de impacto ambiental.
Selección de tecnología óptima	Número de tecnologías preseleccionadas para pruebas piloto	Documento de recomendación de tecnologías.
	Número de pruebas piloto realizadas	Informes de desempeño de las tecnologías evaluadas.
Diseño del protocolo de respuesta	Documento del protocolo de respuesta elaborado	Documento oficial del protocolo con lineamientos operativos.
	Número de niveles de alerta definidos	Informe técnico con umbrales de contaminación y acciones a implementar.
Implementación de herramientas de comunicación	Número de canales de notificación implementados	Reportes de activación de alertas (SMS, web, app).
	Número de materiales educativos desarrollados y distribuidos	Infografías, guías y registros de distribución.
Capacitación en protocolo de respuesta	Número de actores clave capacitados en el protocolo	Listas de asistencia y encuestas de evaluación.
	Número de simulaciones de contaminación realizadas	Informes de simulaciones con análisis de desempeño.

Nota: esta serie de tablas especifica las fuentes documentales, técnicas y operativas utilizadas para verificar el cumplimiento de los indicadores a nivel de propósito, componentes y actividades.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 86).

9.6 Supuestos

El propósito del proyecto es mejorar el monitoreo de la calidad del aire y la respuesta institucional ante eventos de contaminación atmosférica en el marco del plan de gestión

ambiental de Corponor en Norte de Santander. A continuación, se detallan los supuestos, riesgos y el manejo del riesgo (tablas 23, 24 y 25).

Tabla 23. *Supuestos de propósito*

Supuesto	Riesgo	Manejo del riesgo
El marco regulatorio ambiental de Colombia no cambiará significativamente durante el proyecto.	Cambios en leyes o normativas que afecten los objetivos del proyecto	Mantener comunicación constante con las autoridades regulatorias para adaptar el proyecto si es necesario.
Las condiciones sociopolíticas en la región permitirán la implementación del proyecto.	Conflictos sociales, bloqueos o inestabilidad política en Norte de Santander.	Realizar evaluaciones de riesgo social y política periódicamente y ajustar los cronogramas si es necesario.
El presupuesto asignado por CORPONOR se mantendrá según lo planificado.	Reducción o redireccionamiento de los recursos financieros asignados al proyecto.	Buscar financiamiento alternativo de entidades públicas o privadas en caso de recortes presupuestales.

Nota: los supuestos y riesgos fueron definidos con base en escenarios regionales posibles, considerando factores regulatorios, sociales, técnicos y financieros.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 88).

Tabla 24. *Supuestos de componentes*

Componente	Supuesto	Riesgo	Manejo del riesgo
Identificación de fuentes de contaminación	Se cuenta con acceso a datos actualizados y precisos sobre fuentes contaminantes.	Información desactualizada o insuficiente sobre fuentes de contaminación.	Coordinar con entidades ambientales, sector académico e industriales para acceso a datos confiables. Complementar con mediciones en campo.

Componente	Supuesto	Riesgo	Manejo del riesgo
Análisis de datos ambientales y meteorológicos	Se dispone de datos meteorológicos y de calidad del aire de registros previos.	Falta de datos históricos o datos con baja calidad.	Utilizar datos satelitales y de fuentes secundarias. Aplicar modelos de interpolación y proyecciones.
Definición de criterios de selección de ubicaciones	Los criterios definidos serán aceptados por expertos y autoridades locales.	Falta de consenso entre actores clave sobre los criterios de selección.	Realizar talleres participativos con expertos y autoridades para validación y ajuste de criterios.
Selección de sitios estratégicos	Se podrán validar en campo las ubicaciones preseleccionadas.	Dificultades de acceso a ciertas zonas o negativa de propietarios para instalación de estaciones.	Buscar ubicaciones alternativas cercanas. Gestionar acuerdos con propietarios o autoridades.
Investigación de tecnologías disponibles	Existen tecnologías adecuadas y accesibles para las necesidades locales.	Tecnología no disponible en el país o costos elevados.	Evaluar importación de equipos o adaptación de tecnologías nacionales. Analizar alternativas de financiamiento.
Evaluación ambiental y financiera de tecnologías	Se puede obtener información confiable sobre costos y desempeño de tecnologías.	Falta de transparencia en costos o desempeño real de equipos.	Comparar múltiples fuentes, realizar pruebas piloto y consultas con expertos.
Selección de tecnología óptima	Las tecnologías seleccionadas cumplirán con los estándares de calidad requeridos.	Tecnología seleccionada con desempeño inferior al esperado.	Establecer pruebas de desempeño antes de la compra. Ajustar criterios de selección si es necesario.
Diseño del protocolo de respuesta	Las autoridades y actores clave adoptarán el protocolo diseñado.	Falta de compromiso o voluntad política para implementación del protocolo.	Realizar capacitaciones y sensibilización con tomadores de decisión. Incluir normativas vigentes para mayor respaldo.
Implementación de herramientas de comunicación	La ciudadanía utilizará activamente las herramientas de alerta y comunicación.	Bajo nivel de adopción de la plataforma de alertas o desconocimiento de la información.	Llevar a cabo campañas de divulgación, capacitación en comunidades y promoción en redes sociales.
Capacitación en protocolo de respuesta	Los actores clave participarán en los talleres de capacitación.	Baja asistencia o desinterés en las capacitaciones.	Coordinar con instituciones locales para garantizar convocatoria. Ofrecer incentivos para la participación.

Componente	Supuesto	Riesgo	Manejo del riesgo
Validación del protocolo mediante simulaciones	Se podrán realizar simulaciones sin afectar a la población.	Falta de recursos para la ejecución de simulaciones.	Diseñar simulaciones de bajo costo con ejercicios de escritorio y modelación digital.

Nota: los supuestos y riesgos fueron definidos con base en escenarios regionales posibles, considerando factores regulatorios, sociales, técnicos y financieros.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 88).

Tabla 25. *Supuestos de actividades*

Actividad	Supuesto	Riesgo	Manejo del riesgo
Identificación de fuentes de contaminación	Se cuenta con acceso a registros actualizados sobre fuentes contaminantes.	Información desactualizada o restringida por parte de entidades o empresas.	Gestionar convenios con entidades ambientales y sector privado. Realizar visitas de campo para validar datos.
Análisis de datos ambientales y meteorológicos	Existen registros históricos suficientes para análisis.	Insuficiencia o discontinuidad en los datos disponibles.	Complementar con datos satelitales y de estaciones cercanas. Utilizar modelos de interpolación y tendencias.
Definición de criterios de selección de ubicaciones	Expertos y autoridades locales colaborarán en la definición de criterios.	Falta de consenso entre actores clave sobre los criterios de selección.	Realizar mesas de trabajo participativas. Ajustar criterios con base en evidencia técnica.
Selección de sitios estratégicos	Se podrán realizar visitas de campo a las ubicaciones preseleccionadas.	Dificultades de acceso a algunas zonas o restricciones por parte de propietarios.	Identificar ubicaciones alternativas cercanas. Gestionar acuerdos con propietarios y autoridades locales.
Investigación de tecnologías disponibles	Existen tecnologías adecuadas y accesibles en el mercado nacional e internacional.	Tecnología no disponible localmente o con costos elevados.	Evaluar importación o adaptación de tecnología. Buscar alianzas con fabricantes y universidades.
Evaluación ambiental y financiera de tecnologías	Se podrá acceder a información confiable sobre desempeño y costos de las tecnologías.	Información incompleta o sesgada sobre costos y rendimiento.	Realizar consultas con expertos y pruebas piloto. Analizar experiencias de otras ciudades o países.
Selección de tecnología óptima	Las tecnologías preseleccionadas serán probadas en campo	Fallas en las pruebas piloto o incompatibilidad con condiciones locales.	Realizar pruebas en diferentes entornos. Ajustar criterios de

Actividad	Supuesto	Riesgo	Manejo del riesgo
	para validar su desempeño.		selección si es necesario.
Diseño del protocolo de respuesta	Las autoridades y entidades clave participarán en la construcción del protocolo.	Falta de compromiso o interés por parte de las instituciones.	Sensibilizar sobre la importancia del protocolo. Alinear con normativas vigentes para asegurar adopción.
Implementación de herramientas de comunicación	La ciudadanía utilizará activamente los canales de comunicación sobre calidad del aire.	Bajo nivel de adopción o desconocimiento de la plataforma de alertas.	Campañas de difusión y educación. Integración con redes sociales y medios locales.
Capacitación en protocolo de respuesta	Se contará con la participación activa de actores clave en los talleres.	Baja asistencia o falta de interés en las capacitaciones.	Coordinar con instituciones y actores locales para garantizar convocatoria. Ofrecer incentivos a la participación.
Validación del protocolo mediante simulaciones	Se podrán realizar simulaciones sin afectar la operatividad de las instituciones.	Falta de recursos o disponibilidad de actores clave para participar en simulaciones.	Diseñar simulaciones escalables y de bajo costo. Utilizar modelación digital y ejercicios de escritorio si es necesario.

Nota: los supuestos y riesgos fueron definidos con base en escenarios regionales posibles, considerando factores regulatorios, sociales, técnicos y financieros.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 88).

10. Recursos humanos, materiales y económicos

"La planificación de recursos del proyecto determina qué recursos físicos (personal, equipamiento, materiales) son necesarios, en qué magnitud y cuándo, además de su disponibilidad" (Lledó & Rivarola, 2007, p. 39). A continuación, se identifican, definen y establecen los recursos necesarios, agrupados en tres categorías principales: recursos humanos, materiales y económicos.

10.1 Recursos humanos

"La administración de recursos humanos del proyecto debe incluir procesos para asegurar un uso eficiente de las capacidades de las personas involucradas" (Ortegón et al., 2015, p. 97).

Tabla 26. *Roles y responsabilidades claves*

Descripción	Responsabilidad	Perfil requerido
Coordinador general del proyecto	Responsable de la planificación, coordinación y supervisión general del proyecto.	Profesional en gestión de proyectos o áreas afines, con experiencia mínima de 5 años.
Especialista en calidad del aire.	Realiza el análisis técnico de los datos de calidad del aire y supervisa la selección de tecnologías.	Ingeniero y/o Especialista ambiental o afín, con experiencia en monitoreo, gestión ambiental y manejo de herramientas GIS.
Profesional en tecnologías de monitoreo	Evalúa y selecciona tecnologías de monitoreo de calidad del aire.	Ingeniero electrónico o mecánico, con conocimientos en instrumentación ambiental.
Técnico de campo	Realiza actividades de recolección de datos en las áreas priorizadas.	Técnicos con experiencia en trabajo de campo y recolección de información ambiental.

Nota. los roles fueron definidos según la estructura organizacional de Corponor y sus competencias ambientales.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Lledó & Rivarola, 2007, p. 100).

10.2 Recursos materiales

"La planificación del proyecto requiere considerar las cantidades y tipos de recursos necesarios para realizar cada tarea" (Ortegón et al., 2015, p. 41).

Tabla 27. Recursos materiales identificados.

Ítem	Descripción	Especificación técnica
1	Equipos de monitoreo de calidad del aire	
1.1	Estación de calidad del aire	Monitores automáticos de medición para material particulado PM2.5 y PM10. Sistema de Adquisición de Datos - Datalogger
1.2	Estación meteorológica	Sensores meteorológicos. Mástil telescópico.
1.3	Consumibles y Repuestos	Kit de consumibles y Repuestos de operación continua por estación de monitoreo.
1.4	Mantenimiento	Servicio de mantenimiento para cada estación de monitoreo.
2	Tecnología de análisis geoespacial	
2.1	Software ArcGIS	Herramienta SIG para analizar información geográfica.
3	Capacitación	
3.1	Capacitación al personal operativo.	Capacitación en el manejo de los equipos que incluye los siguientes temas: - Principio de operación y configuración - Puesta en marcha, calibración y/o verificación
4	Infraestructura y Logística	
4.1	Servicios de internet	Envío de datos en tiempo real por cada estación de monitoreo.
4.2	Punto eléctrico.	Adecuación de las conexiones eléctricas para las estaciones.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Lledó & Rivarola, 2007, p. 60).

10.3 Recursos económicos

"La estimación de costos consiste en aproximar cuánto costarán los recursos necesarios para las actividades del proyecto, incluyendo mano de obra, materiales y reservas, evitando rentabilidad negativa" (Lledó & Rivarola, 2007, p. 60).

Tabla 28. Presupuesto requerido

Ítem	Descripción	Especificación	Unidad	Cant.	VR. Unit.	VR. Total
Financiable						
1	Recursos materiales					\$ 2.658.636.000

Ítem	Descripción	Especificación	Unidad	Cant.	VR. Unit.	VR. Total
1.1	Equipos de monitoreo de calidad del aire					\$ 2.648.836.000
1.1.1	Estación de calidad del aire	Monitores automáticos de medición para material particulado PM2.5 y PM10. Sistema de Adquisición de Datos - Datalogger	Und	5	\$ 386.489.950	\$ 1.932.449.750
1.1.2	Estación meteorológica	Sensores meteorológicos. Mástil telescópico	Und	5	\$ 112.222.250	\$ 561.111.250
1.1.3	Consumibles y repuestos	Kit de consumibles y Repuestos de operación continua por estación de monitoreo.	Und	5	\$ 24.255.000	\$ 121.275.000
1.1.4	Mantenimiento	Servicio de mantenimiento para las 5 estaciones de monitoreo.	Und	1	\$ 34.000.000	\$ 34.000.000
1.2	Tecnología de análisis geoespacial					\$ -
1.2.1	Software ArcGIS	Herramienta SIG para analizar información geográfica.	Und	1	\$ -	\$ -
1.3	Capacitación					\$ 7.400.000
1.3.1	Capacitación al personal operativo.	Capacitación en el manejo de los equipos que incluye los siguientes temas: - Principio de operación y configuración - Puesta en marcha, calibración y/o verificación.	Und	1	\$ 7.400.000	\$ 7.400.000
1.4	Infraestructura y logística					\$ 2.400.000
1.4.1	Servicios de internet	Envío de datos en tiempo real por cada estación de monitoreo.	Und	5	\$ 30.000	\$ 150.000
1.4.2	Punto eléctrico.	Adecuación de las conexiones eléctricas para las estaciones.	Und	5	\$ 450.000	\$ 2.250.000
Contrapartida - Corponor						
2	Recursos humanos					\$ 45.000.000
2.1	Coordinador general del proyecto	1 profesional en gestión de proyectos o áreas afines, con experiencia mínima de 5 años	Mes	3	\$ 5.000.000	\$ 15.000.000
2.2	Especialista en calidad del aire.	1 ingeniero y/o Especialista ambiental o afín, con experiencia en monitoreo, gestión ambiental y manejo de herramientas GIS	Mes	3	\$ 4.000.000	\$ 12.000.000
2.3	Profesional en tecnologías de monitoreo	1 ingeniero electrónico o mecánico, con conocimientos en instrumentación ambiental.	Mes	3	\$ 3.500.000	\$ 10.500.000

Ítem	Descripción	Especificación	Unidad	Cant.	VR. Unit.	VR. Total
2.4	Técnico de campo	1 técnico con experiencia en trabajo de campo y recolección de información ambiental.	Mes	3	\$ 2.500.000	\$ 7.500.000
Valor total financiable						\$ 2.658.636.000
Valor total contrapartida						\$ 45.000.000
Valor total proyecto						\$ 2.703.636.000

Nota: la Corporación cuenta con licencia de ArcGIS, por tanto no se detalla costo de este ítem.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Lledó & Rivarola, 2007, p. 62)

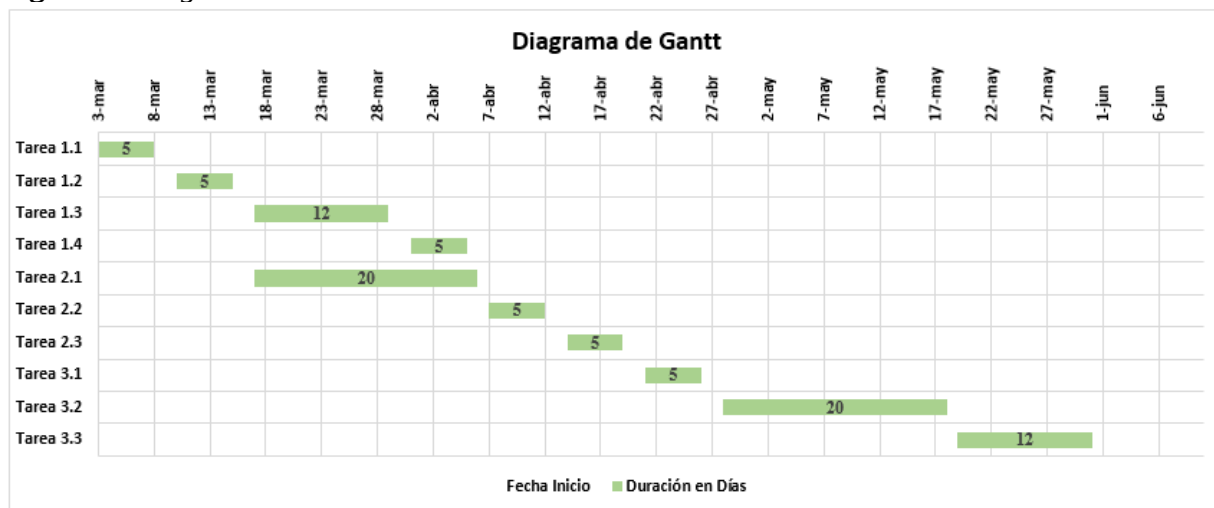
11. Cronograma

Con base en la información desarrollada en los capítulos anteriores, se define el cronograma a través del cual se desarrollarán las actividades y se obtendrán los entregables identificados para el proyecto, con el fin de atender el objetivo que se ha propuesto para el mismo.

Tabla 29. Ejecución actividad – tarea

Objetivo específico	Actividad	Tarea	Fecha inicio	Duración en días	Fecha fin
Objetivo 1	Actividad 1.1	Tarea 1.1.1	3-mar	5	8-mar
	Actividad 1.2	Tarea 1.1.2	10-mar	5	15-mar
	Actividad 1.3	Tarea 1.1.3	17-mar	12	29-mar
	Actividad 1.4	Tarea 1.1.4	31-mar	5	5-abr
Objetivo 2	Actividad 2.1	Tarea 2.2.1	17-mar	20	6-abr
	Actividad 2.2	Tarea 2.2.2	7-abr	5	12-abr
	Actividad 2.3	Tarea 2.2.3	14-abr	5	19-abr
Objetivo 3	Actividad 3.1	Tarea 3.3.1	21-abr	5	26-abr
	Actividad 3.2	Tarea 3.3.2	28-abr	20	18-may
	Actividad 3.3	Tarea 3.3.3	19-may	12	31-may

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Lledó & Rivarola, 2007, p. 53).

Figura 2. Diagrama de Gantt

Nota: la figura fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Lledó & Rivarola, 2007, p. 53).

12. Difusión y comunicación

"La gestión de comunicaciones incluye procesos para generar, recolectar, distribuir y almacenar información a tiempo, siendo el vínculo crítico entre personas, ideas y éxito del proyecto. (Ortegón et al., 2015, p. 103)". Se planteará un plan de comunicación integral, que incluirá estrategias dirigidas a distintos públicos objetivo.

12.1 Objetivos del plan de comunicación

- Informar sobre el propósito, avances y resultados del proyecto a los diferentes actores involucrados.
- Promover la participación ciudadana en la vigilancia de la calidad del aire.
- Sensibilizar a la población sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud y el medio ambiente.

- Facilitar la toma de decisiones basada en evidencia de recolección de datos técnicos.

12.2 Público objetivo y canales de comunicación

En la tabla 30, se identifican los grupos de interés con el canal de comunicación descrito para transmitir la información relevante en la temática de calidad del aire.

Tabla 30. *Público objetivo y canales de comunicación*

Grupo de interés	Canal de comunicación	Frecuencia
Comunidad en general	Redes sociales, medios de comunicación, talleres informativos, foros abiertos.	Mensual
Autoridades ambientales y gubernamentales	Informes técnicos, reuniones, boletines especializados.	Trimestral
Instituciones académicas e investigadores	Acceso a bases de datos, conversatorios.	Semestral
Empresas y sectores industriales	Reportes sobre impacto ambiental, mesas de trabajo, conferencias.	Bianual
Organizaciones no gubernamentales (ONGs)	Alianzas estratégicas, eventos comunitarios.	Según requerimiento

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ortegón et al., 2015, p. 106).

12.3 Estrategias de comunicación y difusión

Las estrategias de comunicación pueden elaborarse a partir de la identificación de un problema existente dentro de una comunidad u organización, o bien como resultado del análisis de un diagnóstico previo. En este sentido, “las herramientas comunicativas son instrumentos y recursos que facilitan el proceso comunicativo, estableciendo relaciones sociales para la construcción del conocimiento y el desarrollo comunitario” (Ríos et al., 2020, p. 15).

Tabla 31. Estrategias de comunicación y difusión.

Estrategia	Herramienta	Descripción
Plataformas digitales y tecnológicas	Portal web con información actualizada sobre calidad del aire	– Datos en tiempo real de las estaciones de monitoreo. – Reportes históricos con tendencias de contaminación. – Blog con artículos educativos sobre calidad del aire.
	Redes sociales y medios digitales	– Publicaciones periódicas con infografías, videos y contenido explicativo sobre la contaminación del aire. – Uso de podcasts para ampliar la difusión. – Implementación de campañas en redes con hashtags como #AireLimpioNorteDeSantander.
Campañas de sensibilización y educación ambiental	Charlas y talleres educativos en colegios y universidades	– Impactos de la contaminación del aire y la importancia del monitoreo.
	Capacitaciones a sectores productivos	– Estrategias para reducir sus emisiones contaminantes.
	Creación de material didáctico (folletos, videos, podcasts, infografías)	– Recomendaciones prácticas para la comunidad.
Reportes técnicos para la toma de decisiones	Boletines trimestrales	– Dirigidos a entidades gubernamentales con análisis de la calidad del aire.
	Informes anuales	– Con recomendaciones de gestión para la prevención de contaminación.
	Comparación de datos con estándares internacionales.	– Para evaluar el impacto de las acciones implementadas.
Espacios de participación y mecanismos de retroalimentación	Foros comunitarios.	– Para la presentación de resultados del monitoreo.
	Líneas de atención	– Para la recepción de denuncias sobre contaminación.
	Encuestas ciudadanas	– para medir el nivel de conocimiento y percepción sobre la contaminación atmosférica.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Ríos et al., 2020, p. 33).

13. Método de evaluación de los resultados de la implementación

La evaluación de los resultados del proyecto permitirá medir su impacto y determinar si se han alcanzado los objetivos propuestos en términos de mejora en la calidad del aire y concienciación de la comunidad.

13.1 Criterios de evaluación

- A. *Eficacia*: determinar si el sistema de monitoreo logró generar información útil y confiable para la toma de decisiones.
- B. *Eficiencia*: evaluar si los recursos financieros, materiales y humanos se utilizaron de manera óptima.
- C. *Impacto*: medir el grado de cambio en la calidad del aire y en las políticas públicas relacionadas con el control de la contaminación.
- D. *Sostenibilidad*: verificar si el sistema de monitoreo puede mantenerse en funcionamiento después de la finalización del proyecto.

13.2 Métodos de evaluación

13.2.1 Análisis cuantitativo de datos ambientales

Análisis de correlaciones entre calidad del aire y eventos climáticos (viento, lluvia, temperatura).

13.2.2 Indicadores clave de desempeño (KPI)

Tabla 32. *Indicadores clave de desempeño*

Indicador	Meta esperada anual	Fuente de verificación
Número de estaciones de monitoreo operativas	90% en funcionamiento	Reportes técnicos
Número de personas sensibilizadas a través de talleres	1,000 personas capacitadas	Encuestas post-taller
Cantidad de reportes publicados en medios.	12 publicaciones	Registros de medios

Nota. los KPI permiten medir la efectividad anual del proyecto, vinculando metas cuantitativas con medios institucionales de verificación.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (Montero, 2016, p. 67).

13.2.3 Métodos cualitativos

- Entrevistas a actores clave (autoridades, investigadores, líderes comunitarios) para evaluar la percepción del impacto del proyecto.
- Encuestas a la comunidad sobre cambios en su conocimiento y actitud frente a la contaminación del aire.
- Grupos focales con representantes de empresas e instituciones para discutir mejoras en la gestión de la calidad del aire.

13.2.4 Comparación con proyectos similares

Revisión de casos de éxito en otras ciudades o países para evaluar diferencias y similitudes en la implementación.

13.2.5 Elaboración de un informe final

Presentación de resultados en un documento técnico oficial, con recomendaciones para futuras mejoras.

14. Resultados

A continuación, se detallan los resultados obtenidos a partir de cada uno de los objetivos planteados.

14.1 Resultados Objetivo 1

Determinar las áreas geográficas prioritarias en Norte de Santander para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire, mediante la identificación de fuentes de contaminación y el análisis de datos, garantizando una cobertura representativa y estratégica.

14.1.1 Identificación de fuentes de contaminación

La recopilación de información sobre fuentes emisoras, en el informe “inventario de emisiones atmosféricas Cúcuta – Región, presenta un “registro de las emisiones atmosféricas en la Ciudad de Cúcuta y su área Metropolitana, abarcando contaminantes como material particulado (PM₁₀) y (PM_{2.5}), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (NMVOC)” (Hill Consulting; Corponor, 2022, p. 6).

El estudio incluyó emisiones provenientes de fuentes móviles en los municipios de San José de Cúcuta, Los Patios y Villa del Rosario, así como de fuentes fijas puntuales. Para estas últimas, el análisis se llevó a cabo dentro de un área delimitada que abarca la zona urbana de los tres municipios y sus alrededores, considerando su posible influencia en las concentraciones de contaminantes en sectores con mayor densidad poblacional. La ilustración I muestra la contribución de cada sector en términos de material particulado (PM₁₀

y PM_{2.5}), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y compuestos orgánicos volátiles (NMVOC).

Tabla 33. Base de datos de fuentes emisoras de contaminación.

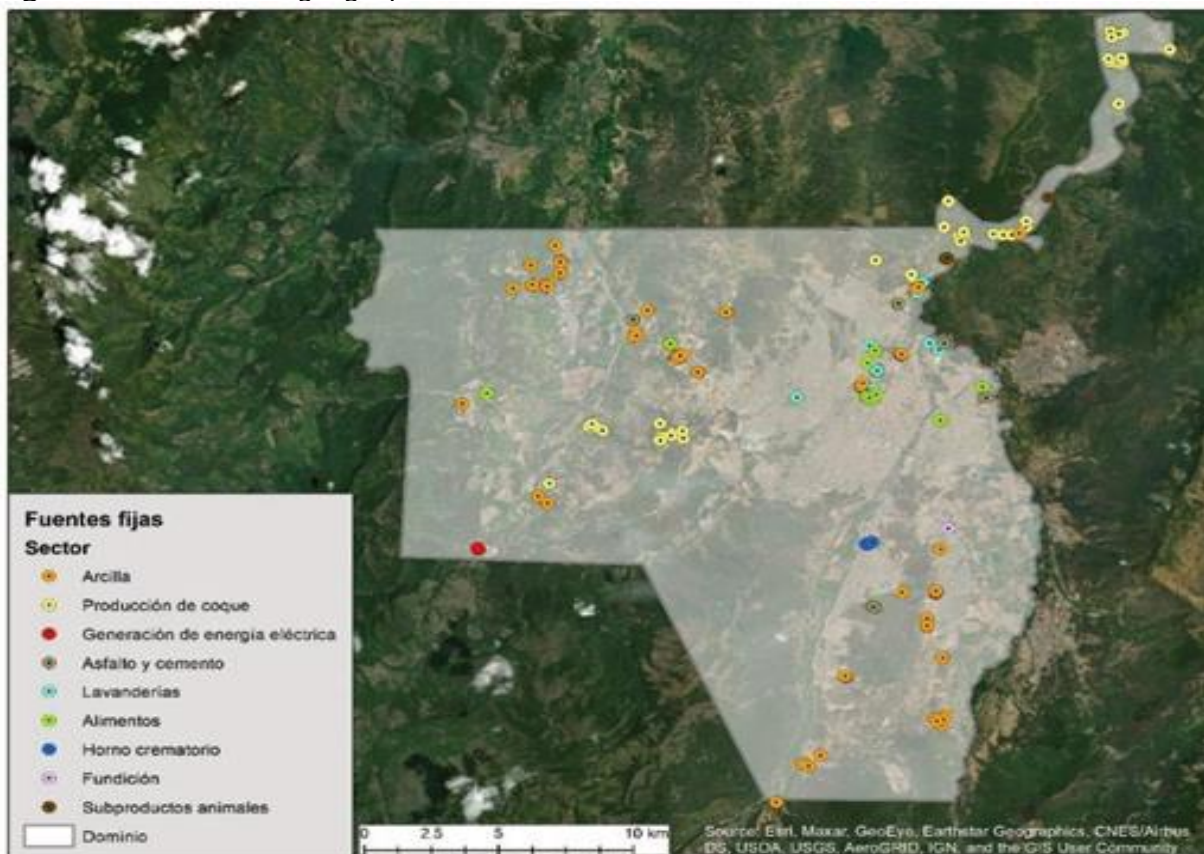
Categoría	Sector	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	CO	NMVOC
Fuentes fijas	Producción de coque	572.4	358.5	4,715.9	1,533.1	635.7	87.9
	Arcilla	681.7	435.4	2,100.4	1,644.7	2,491.3	40.3
	Generación energía eléctrica.	98.0	58.7	10,174.9	4,056.9	178.3	89.2
	Asfalto y cemento	84.4	65.1	449.5	238.9	37.5	5.4
	Lavanderías	12.0	6.0	42.3	32.6	5.1	0.9
	Hornos crematorios	0.62	0.62	-	0.20	0.60	0.02
	Alimentos	24.7	9.4	3.1	12.0	12.4	0.4
	Subproductos animales	0.91	0.38	4.01	3.10	0.10	0.05
	Fundición	0.05	0.03	0.04	0.10	0.20	0.03
Fuentes móviles	Autos	35.7	20.7	7.0	580.8	6,809.6	745.9
	Buses	35.4	31.2	0.6	728.7	945.7	151.5
	Camiones	17.1	13.2	0.7	399.4	210.3	176.3
	Motos 2T	63.6	61.8	0.8	7.8	4,742.0	2,801.4
	Motos 4T	37.2	27.2	3.6	401.4	12,570.3	1,152.0
Total (t/año)		1,663.8	1,088.2	17,503.0	9,639.6	28,639.1	5,252.3

Adaptado de (Hill Consulting; Corponor, 2022, p. 6).

Por otra parte, “el inventario de emisiones identificó 118 empresas en sectores como producción de coque, arcilla, energía eléctrica, asfalto, cemento, lavanderías, hornos crematorios, alimentos y fundición” (Hill Consulting; Corponor, 2022, p. 14). Esta información permite relacionar el impacto de estas industrias con la contaminación del aire y priorizar acciones de vigilancia y control. A continuación, se presenta un mapa detallado

de la distribución geográfica de los sectores industriales en la Ciudad de Cúcuta y municipios aledaños como El Zulia, Los Patios, Durania, San Cayetano, Bochalema, Villa del Rosario y Santiago.

Figura 3. Localización geográfica sector industrial



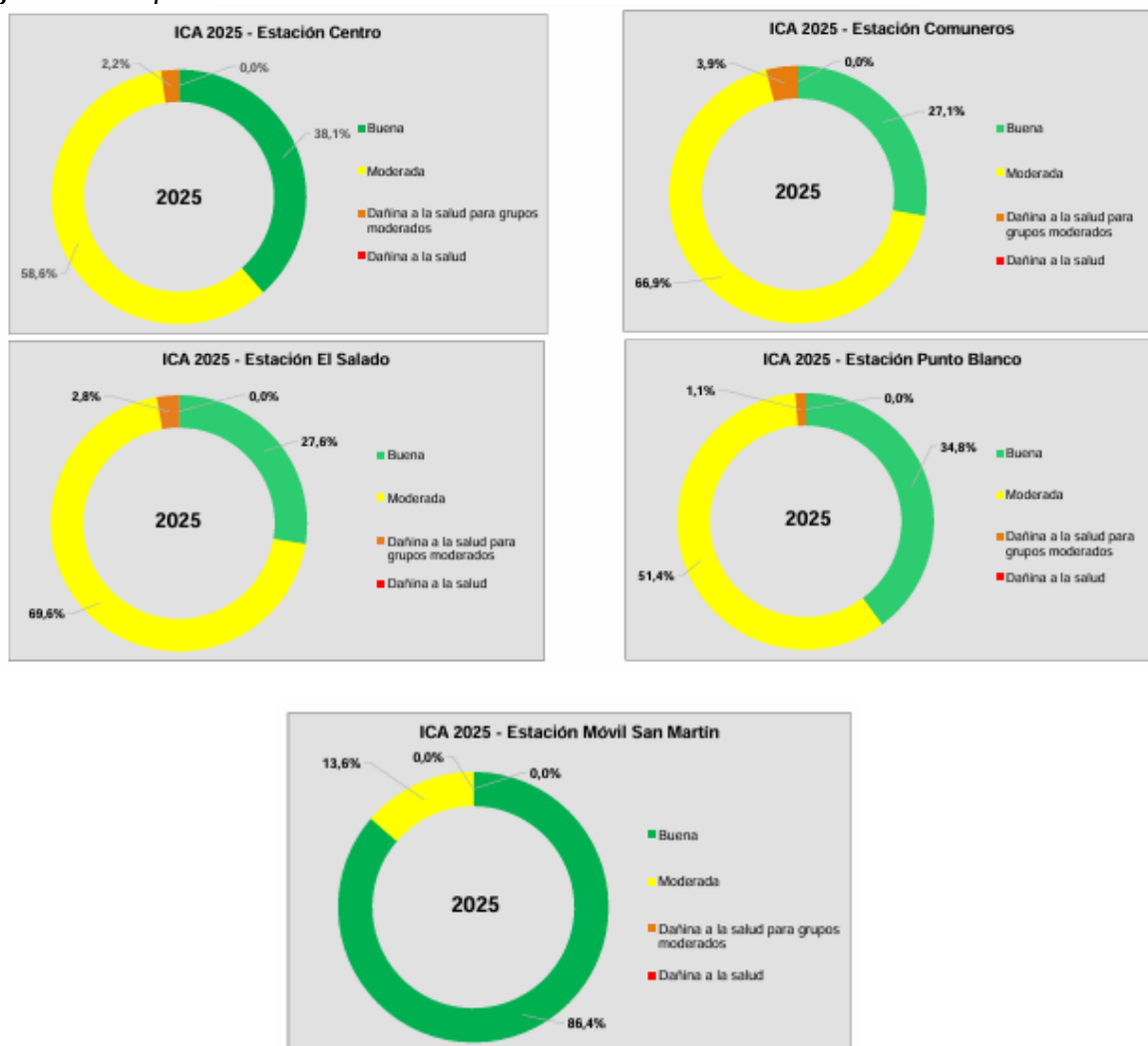
Adaptado de (Hill Consulting; Corponor, 2022, p. 15)

14.1.2 Análisis de datos ambientales y meteorológicos

“El análisis de las gráficas del Índice de Calidad del Aire (ICA) acumulado a junio de 2025 para San José de Cúcuta, basado en los datos proporcionados por Corponor, revela un panorama variado en cada estación” (Corponor SMAA, 2025, p. 2). La estación El Centro muestra un 61.8% de días clasificados como *Buena* calidad del aire, con un 27.2% *Moderada* y un 11% *Mala*, indicando una tendencia generalmente aceptable pero con episodios notables

de contaminación. Comuneros presenta un 64.9% *Buena*, 27.6% *Moderada* y 7.5% *Mala*, sugiriendo un comportamiento similar, aunque con menor incidencia de días críticos. El Salado destaca con un 86.8% *Buena*, 13.2% *Moderada* y 0% *Mala*, reflejando la mejor calidad del aire entre las estaciones. Punto Blanco, con 51.4% *Buena*, 46.6% *Moderada* y 1.1% *Mala*, muestra mayor variabilidad, mientras que Móvil San Martín lidera con 88.4% *Buena*, 11.6% *Moderada* y 0% *Mala*, indicando condiciones óptimas en promedio.

Figura 4. Comportamiento índice de la calidad del aire ICA

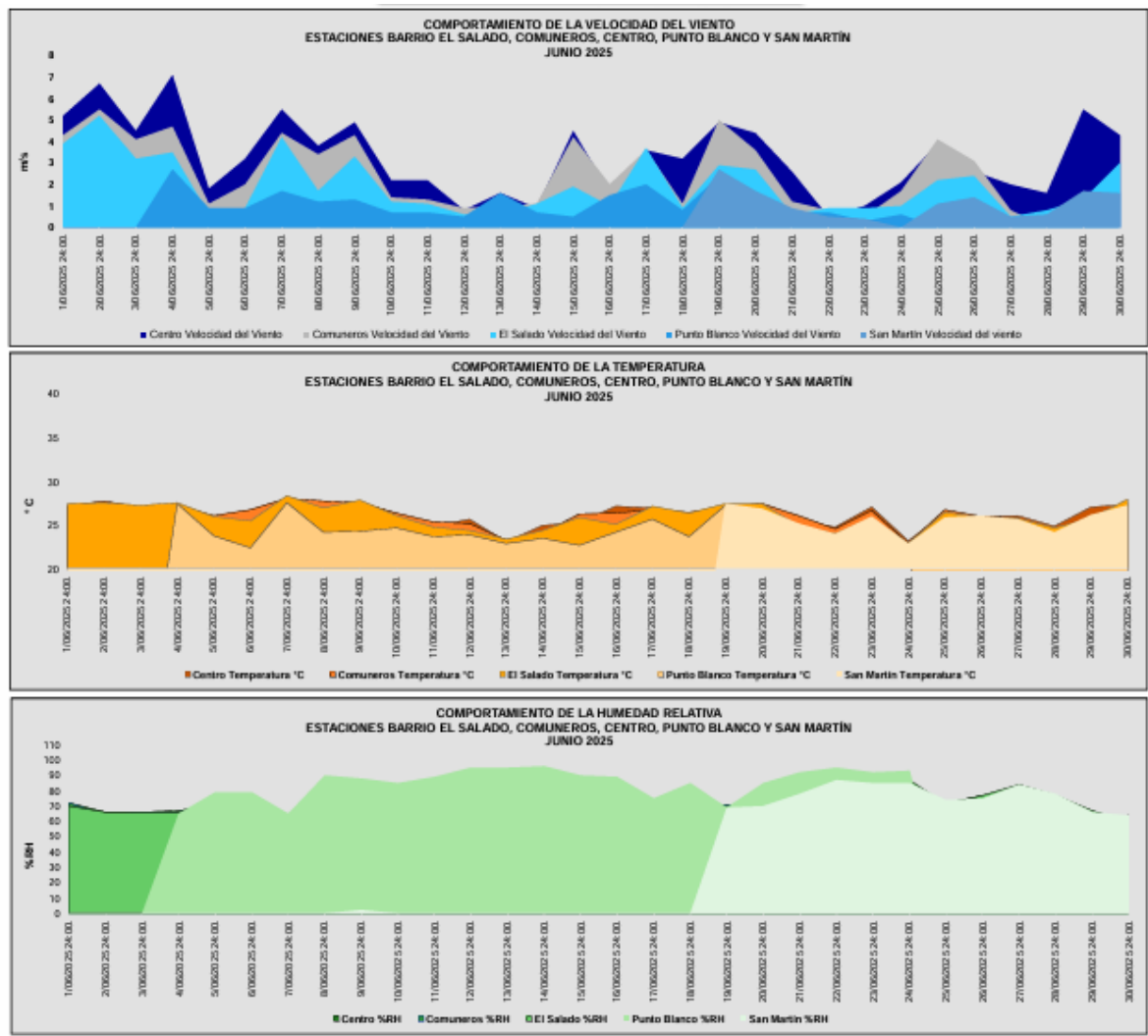


Adaptado de (Corponor SMAA, 2025, p. 2).

Así mismo, “el análisis de las gráficas de componentes del Índice de Calidad del Aire (ICA) y variables meteorológicas para las estaciones del SVCA en junio de 2025, basado en los datos de” (Corponor SMAA, 2025, p. 5). La gráfica superior muestra la velocidad del viento, con valores entre 0 y 6 m/s. El Salado y Móvil San Martín exhiben velocidades más consistentes (2-4 m/s), favoreciendo la dispersión de $PM_{2.5}$ y reflejando una calidad del aire generalmente buena. En contraste, Comuneros y Punto Blanco presentan picos más bajos (0-2 m/s) a mediados y finales de mes, lo que podría explicar episodios de acumulación moderada de $PM_{2.5}$, sugiriendo una influencia urbana o industrial en días de baja ventilación.

La gráfica media, que representa la temperatura, oscila entre 20°C y 35°C, con un aumento hacia mediados de junio y una estabilización posterior. El Salado y Móvil San Martín mantienen temperaturas más bajas (22-28°C), mientras que Comuneros y Punto Blanco alcanzan hasta 33°C, correlacionándose con mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ en estas estaciones, posiblemente por menor dispersión en condiciones cálidas. La gráfica inferior, de humedad relativa (50-90%), muestra niveles más altos en El Salado y Móvil San Martín (70-90%), lo que podría reducir $PM_{2.5}$ al favorecer su deposición, mientras que Comuneros y Punto Blanco, con humedad de 50-70%, reflejan mayor acumulación. Estos patrones indican que bajas velocidades de viento, temperaturas altas y humedad moderada en áreas urbanas impactan negativamente la calidad del aire en junio de 2025.

Figura 5. *Comportamiento Meteorología junio 2025.*



Adaptado de (Corponor, 2025, p. 5).

Partiendo de lo anterior se puede inferir sobre variables meteorológicas clave para evaluar la dispersión de contaminantes que se detallan en la siguiente tabla 34.

Tabla 34. Datos meteorológicos y su relación con la dispersión de contaminantes

Parámetro	Descripción
Temperatura	– Variaciones en la temperatura afectan la dispersión de contaminantes.

Parámetro	Descripción
	– Durante enero de 2025, las condiciones térmicas favorecieron la acumulación de material particulado en ciertas zonas.
Humedad relativa (%RH)	– Influye en la condensación de partículas y su permanencia en el aire. – Se observó que los días con alta humedad coincidieron con niveles elevados de PM_{2.5}.
Velocidad del viento (m/s)	– Vientos predominantes del Sur, Sureste y Este, lo que indica transporte de contaminantes desde zonas industriales y transfronterizas (Táchira, Venezuela) . – En los días con vientos débiles, la acumulación de contaminantes fue mayor.
Rosa de contaminantes	– Se generaron gráficos que muestran la dirección predominante de las masas de aire contaminadas hacia cada estación de monitoreo. – Se determinó que los contaminantes provienen de sectores industriales locales y emisiones de origen transfronterizo

Nota. adaptado de (IDEAM, 2022, p. 108).

El Estudio de patrones de contaminación y clima, con base en el análisis realizado de los parámetros meteorológicos y los niveles de contaminación, en la tabla 35 se detalla el impacto de las condiciones meteorológicas en la contaminación.

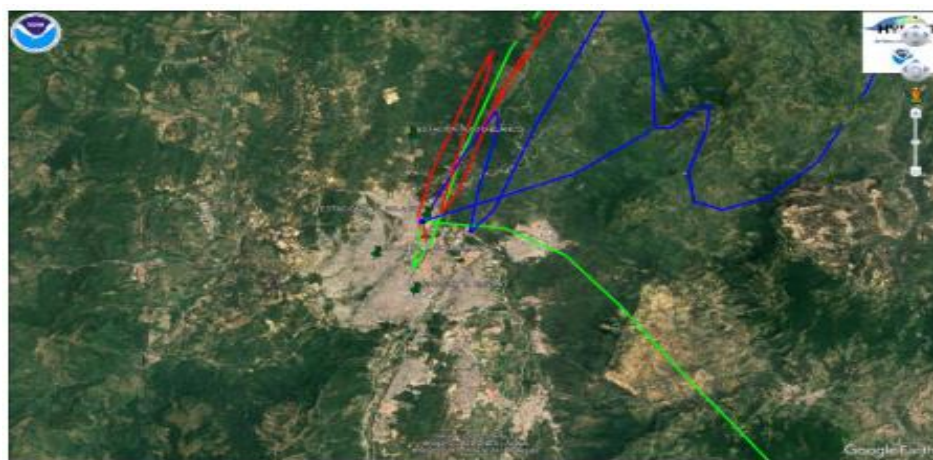
Tabla 35. *Impacto de las condiciones meteorológicas en la contaminación*

Impacto	Descripción
Influencia de la dispersión de contaminantes	– En días de baja velocidad del viento, se observó un aumento en las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀, lo que sugiere una menor capacidad de dispersión. – La influencia del transporte transfronterizo fue significativa en estaciones como El Salado.
Diferencias entre estaciones	– Barrio Comuneros: Alta influencia de emisiones vehiculares e industriales locales. – Barrio El Salado: Impacto de fuentes transfronterizas y locales. – Punto Blanco: Menor afectación, al estar ubicado en zona rural.
Tendencias y patrones	– La calidad del aire tiende a deteriorarse en ciertas horas del día, lo que sugiere un patrón de emisión relacionado con la actividad industrial y vehicular

Nota: adaptado de (IDEAM, 2022, p. 108).

"El estudio de trayectoria hacia adelante con HYSPLIT, recomendado por NOAA ARL, simula la dirección de masas de aire usando GDAS, aunque una sola trayectoria no explica el crecimiento de partículas" (Bera et al., 2022, p. 3). Utilizando la herramienta de modelación HySplit, el cual permite validar las presuntas trayectorias de las masas de aire, y tomando como referencia la data registrada en el primer trimestre del año 2020 (Subdirección de medición y análisis ambiental, 2020), donde se presentó un fuerte episodio de contaminación atmosférica, en la ilustración 4 se aprecia el ingreso de las masas de aire con origen fronterizo en dirección noreste, impactando los niveles de concentración captados por las estaciones del SVCA.

Figura 6. *Modelación de trayectorias masas de aire – marzo 2025*



Nota: tomado de (Corponor, 2025, p. 16)

14.1.3 Definición de criterios de selección de ubicaciones

"El análisis del comportamiento de aproximaciones multicriterio evalúa su efectividad, eficacia y eficiencia en tres etapas: validez, robustez y estabilidad, en los niveles estratégico, táctico y operativo" (Moreno et al., 1998, p. 396). En el contexto de la selección

de sitios óptimos para estaciones de calidad del aire, este enfoque resulta esencial para garantizar decisiones informadas. En la etapa de *validez*, se verifica que los criterios (como cobertura geográfica, densidad poblacional y fuentes de contaminación) sean relevantes; en *robustez*, se evalúa la consistencia del modelo frente a variaciones de datos, como patrones climáticos en Cúcuta; y en *estabilidad*, se asegura que la solución seleccionada, como ubicaciones en El Salado o Punto Blanco, permanezca viable ante cambios operativos, optimizando el monitoreo de la calidad del aire.

La *Definición de criterios de priorización y ponderación*, fueron definidos con base en la relevancia de cada factor en la selección de sitios para estaciones de monitoreo de calidad del aire. La asignación de pesos se realizó a partir de *técnicas de decisión multicriterio AHP*. "La primera etapa del AHP establece la jerarquía del problema, define objetivos y criterios, usa matrices y comparaciones pareadas con la escala de Saaty para valorar alternativas cuantitativa y cualitativamente" (S. López et al., 2021, p. 331). Este proceso, desarrollado por Thomas Saaty, es fundamental para estructurar la toma de decisiones. Al utilizar matrices jerárquicas y comparaciones pareadas, se integran criterios y subcriterios, permitiendo un ranking numérico que combina datos cuantitativos (costos) y cualitativos (impacto ambiental), apoyado por un equipo multidisciplinario para garantizar soluciones efectivas y sostenibles.

Tabla 36. *Criterios de priorización*

Criterio	Descripción	Referencia	Peso (%)	Justificación
Proximidad a fuentes emisoras	Ubicar estaciones en áreas con	(MAVDT, 2010, p. 64)	30%	Mayor peso por influencia directa de

Criterio	Descripción	Referencia	Peso (%)	Justificación
	concentraciones altas de exposición poblacional.			industrias, tráfico y quemas de biomasa.
Concentración de contaminantes	Monitorear zonas con altos niveles de contaminantes específicos.	(MAVDT, 2010, p. 61)	25%	Prioridad por exposición a PM10 y PM2.5, clave para evaluar contaminación.
Densidad poblacional	Considerar la exposición de la población para proteger la salud pública.	(MAVDT, 2010, p. 26)	20%	Importante por medir el impacto potencial en la salud de las personas expuestas.
Accesibilidad y seguridad	Seleccionar sitios con acceso seguro y continuo para operación y mantenimiento.	(MAVDT, 2010, p. 49)	15%	Factores logísticos que afectan instalación y mantenimiento de la estación.
Disponibilidad de infraestructura	Garantizar infraestructura adecuada para el funcionamiento óptimo.	(MAVDT, 2010, p. 50)	5%	Menor peso, criterio técnico que facilita instalación sin afectar monitoreo.
Cobertura geográfica	Distribuir estaciones estratégicamente para representar diversas zonas.	(MAVDT, 2010, p. 48)	5%	Considerada para optimizar la red, pero con menor prioridad que otros criterios.

La recolección de datos y normalización, se seleccionaron posibles ubicaciones candidatas en la Ciudad de Cúcuta, su Área Metropolitana y otros municipios, asignando valores a cada criterio en una escala de 0 a 10 (Tabla 37).

Tabla 37. *Recolección de datos*

Ubicación	Proximidad a fuentes emisoras.	Concentración de contaminantes	Densidad poblacional	Accesibilidad y seguridad	Disponibilidad de infraestructura	Cobertura geográfica
Barrio La Libertad	6	7	6	8	8	9
Jardín plaza	9	8	7	8	8	9
Prados del Este	6	5	10	7	8	6
Ceiba	5	6	10	8	6	4
El Zulia	9	8	9	7	8	8

Ubicación	Proximidad a fuentes emisoras.	Concentración de contaminantes	Densidad poblacional	Accesibilidad y seguridad	Disponibilidad de infraestructura	Cobertura geográfica
Villa del Rosario	8	7	9	7	7	8
Los Patios	8	7	8	8	8	9
Pamplona	7	6	8	9	9	9
Mutiscua	2	1	6	7	7	6
Bochalema	4	3	5	7	8	5

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (S. López et al., 2021, p. 331)

Normalización de los valores, se realizó con la fórmula:

$$X_{normalizado} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Donde X_{max} y X_{min} son los valores máximo y mínimo de cada criterio. Posteriormente, estos valores se normalizaron en una escala de 0 a 1 para hacerlos comparables (Tabla 38).

Tabla 38. Normalización de los valores

Ubicación	Proximidad a fuentes emisoras.	Concentración de contaminantes	Densidad poblacional	Accesibilidad y seguridad	Disponibilidad de infraestructura	Cobertura geográfica
Barrio La Libertad	0,57	0,71	0,57	0,86	0,86	1,00
Jardín plaza	1,00	0,86	0,71	0,86	0,86	1,00
Prados del Este	0,57	0,43	1,14	0,71	0,86	0,57
Ceiba	0,43	0,57	1,14	0,86	0,57	0,29
El Zulia	1,00	0,86	1,00	0,71	0,86	0,86
Villa del Rosario	0,86	0,71	1,00	0,71	0,71	0,86
Los Patios	0,86	0,71	0,86	0,86	0,86	1,00
Pamplona	0,71	0,57	0,86	1,00	1,00	1,00
Mutiscua	0,00	-0,14	0,57	0,71	0,71	0,57
Bochalema	0,29	0,14	0,43	0,71	0,86	0,43

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (S. López et al., 2021, p. 331)

Definición de rangos de prioridad según el índice de priorización (IP), Dado que los valores del IP están en una escala de 0 a 1, se pueden establecer los umbrales detallados en la Tabla 39.

Tabla 39. Rangos de prioridad

Rango de IP	Nivel de prioridad	Interpretación
0.75 – 1	Alta	Ubicación ideal para la instalación de una estación de monitoreo. Alta exposición a contaminantes y relevancia ambiental.
0.50 – 0.74	Media	Ubicación con condiciones adecuadas, pero no tan críticas como las de alta prioridad. Puede ser considerada en una segunda fase de instalación.
0,00 – 0,49	Baja	Ubicación con menor impacto ambiental o menor necesidad de monitoreo en comparación con otras áreas. No es prioritaria para la instalación.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (López Serrano et al., 2021, p. 331).

Con base a la tabla 40, la clasificación de *ubicaciones según el IP* calculado, El Zulia (0,91), Jardín Plaza (0,88), Los Patios (0,83), Villa del Rosario (0.79) y Pamplona (0.78) tienen *alta prioridad*, lo que significa que son los sitios más adecuados para la instalación de estaciones de monitoreo.

Tabla 40. Clasificación de ubicaciones según IP.

Ubicación	IP calculado	Nivel de prioridad
Municipio de El Zulia	0,91	Alta
Sector Jardín Plaza	0,88	Alta
Municipio de Los Patios	0,83	Alta
Municipio Villa del Rosario	0,82	Alta
Municipio de Pamplona	0,78	Alta

Ubicación	IP calculado	Nivel de prioridad
Barrio La Libertad	0,69	Media
Prados del Este	0,69	Media
Ceiba	0,67	Media
Municipio de Bochalema	0,38	Baja
Municipio de Mutiscua	0,25	Baja

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (López Serrano et al., 2021, p. 331).

14.1.4 Selección de sitios estratégicos para estaciones de monitoreo

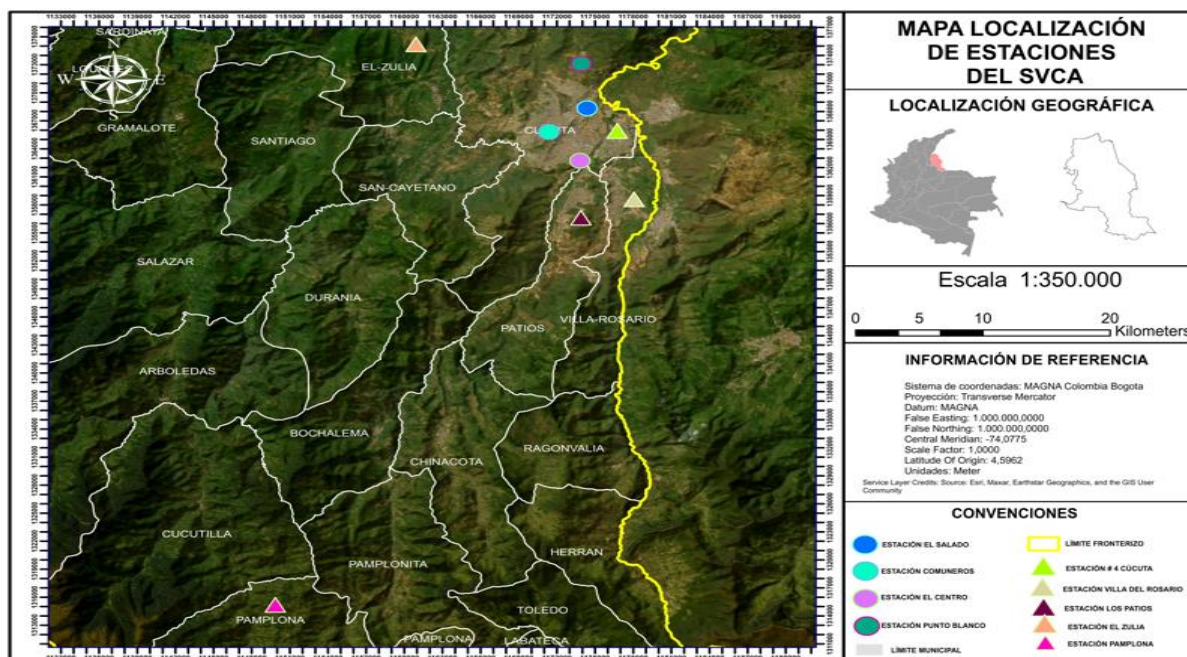
La aplicación de la metodología de selección, con base en el análisis anterior, se seleccionaron los puntos con prioridad alta, teniendo en consideración los criterios: Accesibilidad y seguridad y disponibilidad de infraestructura (MAVDT, 2010, p. 48).

Tabla 41. Sitios estratégicos

Ubicación	Sitio	Coordenadas
Municipio de El Zulia	Alcaldía	Lat. 9.929837° / Long. - 72.600794°
Sector Jardín Plaza	Centro comercial	Lat. 7.921945° / Long. - 72.479494°
Municipio de Los Patios	Hospital	Lat. 7.819849° / Long. - 72.514193°
Municipio Villa del Rosario	Instituto de tránsito (Lomitas)	Lat. 7.860614° / Long. - 72.478949°
Municipio de Pamplona	Hospital San Juan de Dios	Lat. 7.374123° / Long. - 72.644304°

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (MAVDT, 2010, p. 48)

Figura 7. Mapa de localización de estaciones de monitoreo



Nota: diseño del mapa de localización incorporando las nuevas estaciones de monitoreo, adaptado de (Corponor, 2025, p. 6)

14.2 Resultados Objetivo 2

Evaluar las opciones tecnológicas disponibles para la medición de la calidad del aire, a través de un análisis técnico, ambiental y financiero, con el fin de seleccionar soluciones eficientes y sostenibles.

14.2.1 Investigación de tecnologías disponibles

En el marco del proceso investigativo, se llevó a cabo un análisis de tecnologías disponibles para la medición de $PM_{2.5}$. La matriz comparativa desarrollada (Tabla 40) permitió contrastar equipos reconocidos por su robustez técnica, como el BAM-1022, TAPI BAM-1020 y Thermo 5030i, basados en el principio de atenuación beta y certificados por la US EPA como Métodos Equivalentes Federales (FEM). Estas tecnologías presentan alta confiabilidad para redes de monitoreo oficiales y son plenamente compatibles con el sistema

ENVISTA y la normativa colombiana (Resolución 2254 de 2017). El análisis arrojó que, si bien estos equipos requieren esquemas de mantenimiento constantes y personal capacitado, su precisión y aceptación internacional los posicionan como referentes para aplicaciones institucionales.

Por otro lado, la inclusión en la matriz de tecnologías emergentes como los sensores ópticos de bajo costo y el muestreador Hi-Vol gravimétrico permitió ampliar el espectro de evaluación hacia aplicaciones complementarias. Los sensores ópticos, si bien no cuentan con certificación US EPA y compatibilidad ENVISTA, ofrecen ventajas en despliegues comunitarios o entornos rurales, dado su bajo impacto ambiental, bajo consumo energético y versatilidad para vigilancia indicativa. El método Hi-Vol, por su parte, sigue siendo relevante para análisis gravimétricos en estudios puntuales, aunque presenta limitaciones operativas y ambientales, como la generación diaria de residuos sólidos y la ausencia de datos en tiempo real. Finalmente, la tecnología PALAS FIDAS 200 destaca como una opción moderna con validación FEM, alta resolución temporal y eficiencia ambiental, al no requerir consumibles críticos. Este enfoque permite orientar la selección tecnológica hacia esquemas sostenibles, interoperables y acordes con las capacidades institucionales y los objetivos de la gestión ambiental del aire.

14.2.2 Evaluación ambiental y financiera

La evaluación ambiental y financiera de las tecnologías analizadas revela una clara relación entre el nivel de sofisticación tecnológica, el costo de adquisición y operación, y su impacto ambiental. Las tecnologías de atenuación beta como el *Thermo 5030i* y el *BAM-1022* presentan altos estándares de precisión y confiabilidad, siendo compatibles con sistemas como ENVISTA y certificadas por la EPA como métodos equivalentes (FEM). Sin

embargo, su implementación conlleva costos financieros considerables que oscilan entre \$18,000 y \$32,000 USD y un impacto ambiental moderado a alto, principalmente por el consumo energético constante, uso de cintas o filtros y generación de residuos electrónicos. Por su parte, el *TAPI BAM-1020* se posiciona como una alternativa intermedia en términos de costo y sostenibilidad, con mantenimiento y residuos manejables, lo que lo hace ampliamente adoptado en la región. En contraste, los *sensores de bajo costo* destacan por su accesibilidad económica (menos de \$1,000 USD) y bajo impacto ambiental, siendo ideales para proyectos educativos y de ciencia ciudadana, aunque no cumplen estándares oficiales. Finalmente, el *Hi-Vol gravimétrico*, aunque económico en su adquisición (\$8,000 – 12,000 USD), presenta un impacto ambiental elevado debido a su dependencia de filtros diarios y análisis externos en laboratorio, lo que lo hace menos viable para monitoreo continuo y más adecuado para auditorías puntuales.

Tabla 42. Matriz comparativa de tecnologías de monitoreo y evaluación ambiental y financiera.

Tecnología	Principio de Medición	Descripción	Ventajas	Desventaja	Compatible ENVISTA	Certificado US EPA	Norma Colombiana (Res. 2254/2017)	Costo de Adquisición y Mantenimiento (USD)	Mantenimiento	Impacto Ambiental	Referencia
BAM-1022 (Met One)	Atenuación Beta	Medidor automático de PM _{2.5} mediante atenuación beta continua.	Alta precisión. Aprobado por US EPA. Compatible con redes CAI.	Costo elevado. Requiere mantenimiento frecuente.	Sí	FEM	Sí	\$18,000 – \$25,000	Bajo: limpieza óptica, cambio de cinta y calibración anual.	Moderado: uso de cintas, energía y residuos consumibles.	US EPA (2016)
PALAS FIDAS 200	Dispersión óptica (aerodinámica)	Sensor óptico avanzado con verificación FEM.	Alta resolución temporal. Sin consumibles críticos. Bajo impacto ambiental.	Costo alto de adquisición.	Sí	FEM	No	\$28,000 – \$35,000	Bajo-medio: limpieza y verificación anual.	Bajo: no genera residuos críticos.	Información técnica PALAS (2023)
Thermo 5030i	Atenuación Beta automática	Estación de monitoreo continuo basada en atenuación beta.	Precisión y confiabilidad. Aprobado por US EPA.	Alto costo operativo. Requiere técnicos especializados.	Sí	FEM	Sí	\$28,000 – \$32,000	Medio-alto: sensores, filtros y recambios electrónicos.	Alto: consumo energético o elevado y residuos electrónicos.	Thermo Fisher

Tecnología	Principio de Medición	Descripción	Ventajas	Desventaja	Compatible ENVISTA	Certificado US EPA	Norma Colombia (Res. 2254/2017)	Costo de Adquisición y Mantenimiento (USD)	Mantenimiento	Impacto Ambiental	Referencia
TAPI BAM-1020	Atenuación Beta	Monitor de partículas aprobado por US EPA. Compatible con redes latinoamericanas.	Cobertura regional amplia. Facilita integración con plataformas regulatorias	Requiere infraestructura eléctrica estable.	Sí	FEM	Sí	\$20,000 – \$25,000	Medio: cinta, filtros, calibración mensual.	Moderado: residuos con eficiencia energética aceptable.	Teledyne API
Sensores de bajo costo	Dispersión óptica (láser)	Dispositivos ópticos compactos no certificados como referencia.	Bajo costo. Fácil instalación. Compatible con ciencia ciudadana.	Menor precisión. No certificados por US EPA como método de referencia.	No	No	No	\$200 – \$1,000	Muy bajo: limpieza ocasional.	Bajo: consumo energético mínimo. Ideal para escalas locales.	Kumar et al. (2015)
Hi-Vol Gravimétrico	Gravimetría por filtro	Captura de PM _{2.5} en filtros para análisis posterior en laboratorio.	Alta confiabilidad en estudios de laboratorio.	No genera datos en tiempo real. Alto manejo manual.	No	FRM	Sí	\$8,000 – \$14,000	Alto: operación manual, análisis externo.	Alto: residuos de filtros y alta carga operativa.	Zhou & Hopke (2011)

Nota: la comparación de tecnologías incluye análisis técnico, ambiental y económico para seleccionar la alternativa más viable, adaptado de (MAVDT, 2010, p. 51).

14.2.3 Selección de tecnologías óptimas

Para garantizar una selección técnica y estratégica adecuada de tecnologías de monitoreo de calidad del aire, se establecieron criterios fundamentales alineados con los requerimientos normativos, operativos y de sostenibilidad en el contexto colombiano. Entre los principales criterios considerados se incluyeron: la compatibilidad con la plataforma de gestión ENVISTA, que permite la integración en tiempo real con la red del SVCA de Corponor; la certificación US EPA como método FEM (Métodos automatizados) o FRM (Métodos de referencia oficial), indispensable para asegurar la confiabilidad y el cumplimiento de estándares internacionales; y el cumplimiento con la normatividad del Ministerio de Ambiente de Colombia, específicamente la Resolución 2254 de 2017, que regula la medición oficial de contaminantes atmosféricos. Adicionalmente, se evaluó el tipo de tecnología empleada, su disponibilidad de soporte técnico en la región andina, el costo total de propiedad (TCO) que abarca desde la adquisición hasta el mantenimiento y la facilidad de operación y mantenimiento, elemento clave para reducir interrupciones del sistema y asegurar una operación continua. Estos criterios integrales permiten una evaluación equilibrada que considera tanto el rendimiento técnico como la viabilidad económica y ambiental de las opciones disponibles.

Tabla 43. Criterios para la selección.

Criterio	Descripción	Justificación
Compatibilidad con ENVISTA	Capacidad del equipo para integrarse con software de gestión y análisis ambiental como ENVISTA.	Asegura integración en tiempo real con la red SVCA y automatización del reporte.
Certificación US EPA	Validación como FEM (Federal Equivalent Method) o FRM (Federal Reference Method).	Cumple con estándares internacionales para redes oficiales de calidad del aire.

Criterio	Descripción	Justificación
Cumplimiento normatividad MINAMBIENTE	Alineado con la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente de Colombia.	Requisito legal obligatorio para medición oficial.
Tipo de tecnología	Mecanismo de medición (atenuación beta, dispersión óptica, gravimetría, etc.).	Determina la precisión, confiabilidad y aplicabilidad del equipo.
Disponibilidad de soporte técnico	Existencia de servicios técnicos en Colombia o región andina.	Garantiza mantenimiento, repuestos y sostenibilidad del sistema.
Costo total de propiedad (TCO)	Considera compra, mantenimiento, operación, calibraciones y repuestos.	Permite evaluar la viabilidad financiera a largo plazo.
Facilidad de operación y mantenimiento	Nivel de especialización requerido, frecuencia de mantenimientos preventivos y correctivos.	Reduce el riesgo de fallas prolongadas o paradas del sistema.

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (MAVDT, 2010, p. 51).

Tabla 44. Evaluación de criterios de selección

Criterio	BAM-1022 (Met One)	PALAS FIDAS 200	Thermo 5030i	TAPI BAM-1020	Sensores Bajo Costo	Hi-Vol Gravimétrico
Compatibilidad ENVISTA	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
Certificación US EPA	FEM	FEM	FEM	FEM	No	FRM
Cumplimiento normativo MINAMBIENTE	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Tipo de tecnología	Atenuación Beta	Óptica avanzada	Atenuación Beta Autom.	Atenuación Beta	Dispersión óptica (láser)	Gravimetría por filtro
Soporte técnico en Colombia	Disponibile	Limitado (creciente)	Especializado	Amplio y accesible	Limitado	Requiere laboratorio
Costo total de propiedad (TCO)	Medio-bajo (\$18k–25k)	Medio-alto (\$28k–35k)	Alto (\$28k–32k)	Medio (\$20k–25k)	Muy bajo (\$200–1k)	Bajo compra.
Facilidad de operación/mantenimiento	Alta	Alta	Media	Alta	Muy alta	Baja
Impacto ambiental	Moderado	Bajo	Alto	Moderado	Muy bajo	Alto
Recomendación técnica	Alternativa válida	Alternativa premium	Alto costo y demanda	Recomendada	Solo usos no oficiales	Uso limitado puntual

Nota: la tabla fue adaptada a partir de la fuente de referencia (MAVDT, 2010, p. 51).

Con base en lo anterior, y partiendo de un análisis técnico, ambiental y financiero comparativo de las principales tecnologías disponibles para el monitoreo de material particulado en aire, se identificaron dos alternativas viables y complementarias que pueden responder tanto a los lineamientos normativos como a los objetivos de sostenibilidad operativa de la entidad: el *TAPI BAM-1020* y el *PALAS FIDAS 200*.

El *TAPI BAM-1020* sigue destacándose como la opción más equilibrada entre precisión, confiabilidad, costos y facilidad de operación. Certificado por la US EPA como método FEM, y plenamente compatible con la plataforma *ENVISTA*, este equipo se alinea con la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Su costo de adquisición y operación se mantiene dentro de un rango medio (\$20,000–25,000 USD), con soporte técnico disponible localmente, y una operación sencilla que no requiere personal altamente especializado. Aunque genera residuos como filtros o cintas, su impacto ambiental es moderado y gestionable.

Por otro lado, el monitor *PALAS FIDAS 200*, surge como una alternativa premium altamente tecnológica, especialmente recomendada para zonas urbanas densas, corredores industriales o áreas de monitoreo continuo estratégico. Este equipo utiliza tecnología de dispersión óptica con clasificación aerodinámica y proporciona datos de altísima resolución sin necesidad de consumibles (filtros o cintas), lo que reduce significativamente su impacto ambiental y los costos operativos a largo plazo. A pesar de que su costo inicial es superior (\$28,000–35,000 USD) y el soporte técnico en Colombia aún es limitado, su bajo mantenimiento, robustez y confiabilidad lo posicionan como una inversión a futuro en

monitoreo de calidad del aire. Además, cuenta con certificación FEM de la US EPA, asegurando cumplimiento normativo y validación internacional.

En conclusión, la recomendación técnica principal es optar por el *TAPI BAM-1020* para el fortalecimiento inmediato y rentable de la red de monitoreo. Sin embargo, en función de la disponibilidad presupuestaria y la estrategia de modernización tecnológica, se recomienda considerar la inclusión progresiva de unidades FIDAS 200 en puntos críticos o como nodos de referencia, contribuyendo a una red más sostenible, precisa y avanzada tecnológicamente.

Por otra parte, las pruebas piloto en diferentes entornos no se ejecutaron en el presente proyecto debido a que aún no se cuenta con la disponibilidad de los equipos. No obstante, esto no impidió la evaluación de las opciones tecnológicas disponibles para la medición de la calidad del aire.

14.3 Resultado Objetivo 3

Establecer un protocolo institucional de respuesta ante eventos de contaminación atmosférica, mediante la definición de acciones y herramientas de comunicación, para informar a las autoridades gubernamentales y a la ciudadanía en caso de niveles peligrosos de contaminación atmosférica.

Para cumplir con el objetivo de establecer un protocolo institucional de respuesta, se desarrollaron las siguientes actividades, integrando los lineamientos del Plan *de contingencia institucional ante eventos de contaminación atmosférica*.

14.3.1 Diseño del protocolo de actuación

Se estructuró un sistema escalonado de niveles de contingencia que garantiza una respuesta proporcional a la gravedad del evento de contaminación.

La definición de umbrales de alerta y niveles de respuesta, según Hill (2022, p. 15) y en la normativa vigente, se establecieron cuatro niveles de contingencia: Preparación, Prevención, Alerta y Emergencia. Estos niveles se activan con base en las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} medidas en un periodo de 24 horas y corresponden a rangos específicos del Índice de Calidad del Aire - ICA (Tabla 45).

Tabla 45. Niveles de contingencia por concentración de contaminantes

Nivel	Tiempo de Exposición	PM ₁₀	PM _{2.5}
Nivel I: Preparación	24 horas	75 - 154	25 - 37
Nivel II: Prevención	24 horas	155 - 254	38 - 55
Nivel III: Alerta	24 horas	255 - 354	56 - 150
Nivel IV: Emergencia	24 horas	≥ 355	≥ 151

Nota: la tabla fue tomada del Plan de contingencia ante eventos de alta contaminación (Hill Consulting, 2022, p. 17)

El desarrollo de un plan de acciones por nivel de contingencia, para cada nivel, se definieron acciones y responsabilidades específicas para las dependencias de Corponor, garantizando una respuesta coordinada (Tabla 46). El protocolo se activa mediante un monitoreo continuo: si más del 75% de los datos en un tiempo de 48 horas superan los umbrales, y los modelos de trayectoria indican un posible incremento, se emite un comunicado técnico. Para niveles superiores a "Preparación", se promulga una resolución de declaratoria.

Tabla 46. *Acciones por nivel de contaminación*

Nivel de Contingencia	Dependencia	Acciones
Nivel I (Preparación)	Subdirección de Medición y Análisis Ambiental	- Realiza el monitoreo horario de las estaciones del SVCA e informa a la Dirección General y al bloque de "Comunicación Primaria. Convoca a la Mesa de Calidad del Aire para socializar la situación.
	Oficina de Comunicaciones	- Publica boletines informativos sobre el estado de la calidad del aire en la página web de la Corporación.
Nivel II (Prevención)	Dirección General	- Lidera las mesas de trabajo. Coordina las acciones con autoridades locales y regionales.
	Subdirección de Desarrollo Sectorial Sostenible	- Realiza visitas de control y seguimiento a los planes de contingencia del sector industrial priorizado.
	Subdirección Jurídica	- Construye y emite los actos administrativos correspondientes a la declaratoria del nivel de prevención.
	Oficina de Comunicaciones	- Divulga la información sobre el evento a través de la página web institucional.
Nivel III (Alerta)	Todas las dependencias	- Las acciones de los niveles anteriores se intensifican.
	Oficina de Control y Vigilancia Ambiental	- Ejecuta medidas sancionatorias por incumplimiento de los planes de contingencia por parte del sector industrial.
Nivel IV (Emergencia)	Todas las dependencias	- Se intensifican todas las medidas anteriores.
	Oficina de Control y Vigilancia Ambiental	- Ejecuta rigurosas medidas sancionatorias y acciones de control para garantizar el cumplimiento de las medidas impuestas.

Nota: la tabla fue adaptada del entregable Plan de contingencias institucional para la atención de eventos o episodios de contaminación atmosférica de Corponor (Ortega et al., 2025, p. 17)

14.3.2 Recomendación de herramientas de comunicación

Esta recomendación está dirigida a la Secretaría General – Oficina de Comunicaciones y *contempla* el portal web institucional como principal canal de comunicación. Así mismo, la implementación de:

- A. *Tablero digital con ICA en tiempo real*, Dashboard interactivo, generado a partir de los datos generados por el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), que permite la visualización en tiempo real del Índice de Calidad del

Aire (ICA) por estación de monitoreo. Esta herramienta optimiza el acceso a la información mediante una interfaz gráfica intuitiva y amigable, facilitando la interpretación del estado del aire en diferentes zonas del área metropolitana. Además, el tablero ofrece un análisis detallado del comportamiento del contaminante PM_{2.5} y de las principales variables meteorológicas (temperatura, humedad y velocidad del viento), lo que permite contextualizar los episodios de contaminación y mejorar la toma de decisiones en tiempo oportuno (Apéndice A).

- B. *Sistema de digital de alertas visibles por nivel de contingencia*, sistema de alertas visibles e interactivas, integradas en el portal web institucional, que refleja en tiempo real el nivel de contingencia atmosférica vigente conforme al protocolo adoptado mediante un mecanismo de visualización tipo banner o ventana emergente, codificado por colores de acuerdo con la escala oficial del ICA. Además de su carácter informativo, cada alerta debe vincularse directamente a los documentos oficiales que respaldan la activación del nivel correspondiente, incluyendo el acto administrativo emitido por la Subdirección Jurídica y el boletín técnico producido por la Subdirección de Medición y Análisis Ambiental. Desde el punto de vista técnico, se sugiere que el sistema cuente con un backend sincronizado con el SVCA para actualizar automáticamente la condición del aire en cada estación monitoreada. Asimismo, que permita que la Oficina de Comunicaciones pueda editar el contenido y activar manualmente comunicados específicos según directriz institucional. Este componente será clave para garantizar la oportuna divulgación institucional durante eventos críticos, fortalecer la percepción pública de la gestión ambiental, y cumplir con el principio

de acceso a la información ambiental consagrado en la normatividad colombiana, Ley 1712 de 2014 y Decreto 1076 de 2015 (Apéndice B)

C. *Modelo de biblioteca digital educativa*, biblioteca institucional especializada en calidad del aire, alojada en el portal web de Corponor, que concentre de manera estructurada y accesible todos los recursos educativos, informativos y técnicos dirigidos a la ciudadanía y actores institucionales. Esta biblioteca debe cumplir una doble función: por un lado, servir como plataforma de divulgación científica y técnica sobre los contaminantes atmosféricos, sus impactos en la salud y el ambiente; y por otro, como repositorio de herramientas prácticas para orientar el comportamiento ciudadano durante episodios de contingencia. El diseño de esta biblioteca debe contemplar la categorización de contenidos por tipo de usuario (ciudadanía general, población vulnerable, instituciones educativas, tomadores de decisiones), por nivel de contingencia (preparación, prevención, alerta, emergencia) y por tipo de recurso (infografías, boletines, videos explicativos, guías prácticas, normatividad aplicable, estudios técnicos). A nivel técnico, se recomienda que la plataforma permita una navegación responsiva, opción de descarga en formatos accesibles (PDF, HTML5, subtítulos en videos), y motor de búsqueda interno por palabra clave. Contenidos iniciales sugeridos (Tabla 47).

Tabla 47. *Listado de contenido recomendados.*

Tipo de Recurso	Contenido sugerido	Público objetivo	Propósito	Formato recomendado
Infografías	- ¿Qué es el PM_{2.5} y PM₁₀? - ¿Cómo se interpreta el ICA? - Fuentes locales de emisión (movilidad, industria, quema de residuos)	Ciudadanía en general, instituciones educativas	Sensibilizar sobre la calidad del aire y su impacto en la salud	Imagen PNG / PDF descargable

Tipo de Recurso	Contenido sugerido	Público objetivo	Propósito	Formato recomendado
	- Recomendaciones según nivel de alerta			
Videos educativos	- Efectos de la contaminación atmosférica en la salud - ¿Cómo protegerse durante episodios críticos? - ¿Qué hace Corponor ante eventos de emergencia ambiental? - Tutorial para consultar el estado del aire en la web	Niños, adultos mayores, docentes, funcionarios	Educación de manera audiovisual, facilitar comprensión	Video MP4 (1-2 min), con subtítulos e íconos accesibles
Guías prácticas	- Recomendaciones para personas vulnerables por nivel ICA - Protocolos comunitarios de prevención - Guía de buenas prácticas ambientales (hogar, transporte, industria)	Comunidades vulnerables, líderes locales, gestores ambientales	Orientar acciones concretas frente a episodios de mala calidad del aire	Documento PDF, diseño amigable y lectura fácil
Documentos técnicos y normativos	- Resolución 2254 de 2017 (norma de calidad del aire) - Decreto 1076 de 2015 - Plan de Contingencia institucional - Boletines técnicos por contingencia	Técnicos, tomadores de decisión, universidades	Apoyar consulta especializada y la trazabilidad normativa y técnica	PDF descargable, enlaces internos y externos

Nota. esta tabla sintetiza los recursos sugeridos para la biblioteca digital del protocolo de contingencia, organizada por tipo, público y formato.

Nota: adaptado de (Lledó & Rivarola, 2007, p. 107)

Esta biblioteca se consolidará como una herramienta clave en la estrategia de comunicación del riesgo, fortaleciendo la transparencia institucional, la educación ambiental y la corresponsabilidad ciudadana frente a los eventos de contaminación atmosférica.

14.3.3 Capacitación y Validación del Protocolo

Realizar *socialización interna del protocolo con dependencias*, esta actividad contempló la ejecución de espacios formativos y participativos con cada una de las

subdirecciones responsables de la implementación del protocolo. Su propósito era garantizar el entendimiento institucional del contenido técnico y operativo, resolver dudas sobre responsabilidades y flujos de activación, y recopilar observaciones que permitan afinar el documento final. Las sesiones se registraron mediante lista de asistencia institucional firmadas, así como comunicados internos que evidencian los aportes, validación técnica y compromisos adquiridos (Apéndice C).

Gestionar publicación del protocolo en el sitio web institucional, una vez aprobado formalmente mediante resolución por parte de la Dirección General y validado jurídicamente, el Plan de Contingencia Institucional ante eventos de contaminación atmosférica 2025 debe ser publicado en el portal oficial de Corponor. Este documento ya se encuentra disponible para consulta pública en la sección de Calidad del Aire, a través del siguiente enlace directo: https://Corponor.gov.co/calidad_del_aire/2025/AIRE/PLANES-CONTINGENCIA/Plan_de_contingencia_institucional_ante_eventos_de_contaminacion_atmosferica_2025.pdf

Esta publicación asegura el acceso libre y oportuno a la información ambiental, conforme a la Ley 1712 de 2014 de transparencia y el Decreto 1076 de 2015. Además, debe ser acompañada de un comunicado institucional que explique los alcances del protocolo, las acciones por niveles de contingencia y las recomendaciones a la ciudadanía. Se sugiere su difusión en la página principal de la Corporación y redes sociales como parte de la estrategia integral de comunicación del riesgo.

Elaborar un plan de actualización periódica del protocolo, la elaboración del documento de actualización del protocolo constituye un proceso estratégico e interinstitucional que busca garantizar la pertinencia, vigencia técnica y legal, y aplicabilidad operativa del Protocolo Institucional ante eventos de contaminación atmosférica (Apéndice

D). Esta actividad se estructura en seis etapas articuladas que permiten consolidar un documento robusto y alineado con las condiciones reales del territorio y los marcos regulatorios aplicables.

15. Discusión

El presente trabajo evidencia la necesidad urgente de fortalecer la capacidad técnica e institucional de Corponor frente a los eventos de contaminación atmosférica que afectan a la Ciudad de Cúcuta y su área metropolitana, alineándose con el marco teórico que destaca la contaminación como amenaza global y regional. Internacionalmente, las directrices sobre contaminantes clave como $PM_{2.5}$ y PM_{10} marcan el monitoreo como esencial para políticas basadas en evidencia, mientras que iniciativas históricas como redes de diagnóstico en Latinoamérica enfocadas en emisiones industriales establecen un contexto de cooperación técnica. La identificación de zonas críticas principalmente áreas industriales, corredores viales y zonas de alta densidad poblacional, valida los enfoques territoriales del estado del arte, como los análisis geoespaciales en ciudades donde la ubicación de estaciones priorizó logística sobre distribución espacial de contaminantes. En regiones como el Valle de Aburrá, la integración de estaciones y sensores ciudadanos para monitoreo participativo ofrece un modelo aplicable. Esto cambia el panorama local al optimizar la ubicación de estaciones, pasando de una cobertura limitada con SVCA tipo III intermedio que requiere mejoras para PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 a una representativa, reduciendo vacíos en municipios como El Zulia o Villa del Rosario.

Los resultados del análisis multicriterio demuestran que la alternativa de gestión integral que combina la ampliación de la red de monitoreo, la adopción de tecnologías modernas y la implementación de un protocolo institucional, es la opción más robusta en

términos de impacto ambiental, viabilidad técnica y aceptación social, validando el marco conceptual de entidades regionales como articuladoras sostenibles. La validación técnica de métodos para metales en PM₁₀ confirma la aplicabilidad de tecnologías precisas en contextos normativos. Este trabajo cambia el *enfoque reactivo a preventivo* mediante protocolos escalonados, basados en niveles de contingencia del Índice de Calidad del Aire (ICA), fortaleciendo la respuesta ante episodios críticos y alineándose con objetivos nacionales de salud pública, que reconocen los riesgos de materia particulado (PM) en enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Desde el punto de vista técnico, la implementación de tecnologías en tiempo real, como atenuación beta o dispersión óptica avanzada, mejora significativamente la detección de concentraciones críticas, validando avances del estado del arte, como el monitoreo automático obligatorio y estudios satelitales para anomalías en PM/NO₂. Esto permite una respuesta ágil y genera confianza ciudadana, cambiando la gestión de datos fragmentados a integrados. Comparado internacionalmente, Colombia valida su progreso con sistemas híbridos en regiones avanzadas, pero no alcanza la interoperabilidad de sistemas en la Unión Europea, EE.UU. o China, que integran redes densas con sensores móviles y datos abiertos para detección temprana.

El protocolo institucional de respuesta representa una herramienta fundamental para estructurar decisiones y comunicación en emergencias ambientales, validando el marco referencial sobre planes de contingencia. Su efectividad dependerá de la formación del personal, interoperabilidad interinstitucional y validación social de alertas, como dashboard ICA y biblioteca digital. Un aspecto clave es el enfoque mixto propuesto estaciones de referencia con sensores de bajo costo calibrados, que amplíen la cobertura territorial, especialmente en zonas rurales. El Valle de Aburrá aplica este modelo con estaciones y

sensores ciudadanos. Internacionalmente, el enfoque mixto ha sido exitoso: en ciudades como Nantes, sensores en vehículos se calibran contra referencia para mapeo PM₁₀; en Kraków, monitoreo móvil híbrido aborda contaminación minera/rural; y en proyectos como aquellos en Italia o EE.UU., híbridos llenan gaps espaciales. Estudios sobre PM₁₀ en minería refuerzan la necesidad de monitoreo dinámico en áreas críticas, como las industriales de Cúcuta. Este enfoque valida la propuesta para Cúcuta, cambiando de *monitoreo estático a dinámico*, pero requiere pruebas piloto para superar limitaciones como baja densidad de estaciones vs. redes densas en China/UE.

16. Conclusiones

Con base al *objetivo específico 1*, se identificaron las áreas geográficas prioritarias para la instalación de estaciones de monitoreo, considerando factores de emisión, densidad poblacional y vulnerabilidad ambiental. Esta priorización fortalece la representatividad espacial del SVCA.

Por su parte el *objetivo específico 2*, la evaluación de tecnologías permitió seleccionar opciones eficientes, sostenibles y compatibles con los sistemas actuales, incorporando criterios técnicos, ambientales y financieros que aseguran una inversión responsable y estratégica.

Finalmente del *objetivo específico 3*, el protocolo institucional diseñado proporciona una hoja de ruta clara para la atención de eventos críticos de contaminación. Establece roles, niveles de alerta, herramientas de comunicación y mecanismos de evaluación, mejorando la capacidad de respuesta de Corponor.

17. Recomendaciones

Para garantizar la implementación efectiva de la estrategia propuesta para mejorar el monitoreo de la calidad del aire y la respuesta institucional en Norte de Santander, se presentan las siguientes recomendaciones, organizadas según los objetivos específicos del proyecto y clasificadas en horizontes de corto (0-1 año), mediano (1-3 años) y largo plazo (3-5 años). Esta estructura busca priorizar acciones y facilitar la toma de decisiones por parte de Corponor y otras entidades, promoviendo una gestión ambiental eficiente y sostenible.

- Identificación de Áreas Prioritarias para Estaciones de Monitoreo; en el *corto plazo*, se recomienda actualizar la base de datos de fuentes emisoras, como industrias, vías de alto tráfico y zonas en expansión urbana, para identificar áreas críticas con datos actuales. Además, se debe diseñar un protocolo institucional que integre criterios técnicos, ambientales y sociales para validar sitios de monitoreo, articulándose con alcaldías para asegurar la disponibilidad de estos espacios. *En el mediano plazo*, se sugiere implementar herramientas como Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos meteorológicos para optimizar la ubicación de estaciones, considerando la dispersión de contaminantes. *A largo plazo*, se propone establecer un programa continuo de actualización de sitios de monitoreo, adaptándose a cambios urbanos e industriales para mantener la relevancia de la red.
- Evaluación de Tecnologías para Medir la Calidad del Aire: a *corto plazo*, es prioritario realizar pruebas piloto con sensores de bajo costo calibrados, verificando su compatibilidad con el software ENVISTA, y establecer alianzas con universidades para apoyar estas evaluaciones. En el *mediano plazo*, se recomienda implementar un enfoque mixto que combine estaciones

de referencia con sensores de bajo costo, ampliando la cobertura en zonas rurales, y priorizar tecnologías con soporte técnico nacional para garantizar operatividad. *A largo plazo*, se debe fortalecer la capacidad local mediante formación técnica en mantenimiento y calibración, e incorporar tecnologías emergentes como sensores móviles o integración satelital, inspiradas en modelos internacionales.

- Creación de un Protocolo Institucional ante Eventos de Contaminación: en el *corto plazo*, se sugiere formalizar el protocolo institucional, asignando roles claros a las dependencias, capacitar al personal en gestión de riesgos y alertas, y diseñar una estrategia de comunicación con tableros en tiempo real y alertas en el portal de Corponor. *A mediano plazo*, se deben implementar campañas informativas en medios digitales y comunitarios, junto con simulacros anuales para ajustar el protocolo. *A largo plazo*, se propone evaluar anualmente el protocolo mediante auditorías e indicadores, integrándolo con sistemas de alerta regionales y nacionales para fortalecer la coordinación interinstitucional.

Referencias

- Acuña, P. A. (2012). *LA GESTION DE LOS STAKEHOLDERS ANÁLISIS DE LOS DIFERENTES MODELOS* Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Argentina <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/ar>. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4441>
- Ballester, F., Tenías, J., & Pérez, S. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud. En *Rev Esp Salud Pública* (Vol. 73). <https://www.scielo.org/pdf/resp/1999.v73n2/109-121/es>
- Bera, B., Bhattacharjee, S., Sengupta, N., & Saha, S. (2022). Variation and dispersal of PM10 and PM2.5 during COVID-19 lockdown over Kolkata metropolitan city, India investigated through HYSPLIT model. *Geoscience Frontiers*, 13(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101291>
- Bermúdez, C., & Quiñones, E. (2018). Aplicación práctica del proceso de análisis jerárquico (AHP), para la toma de decisiones. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 5(9), 91-100. <https://doi.org/10.21017/rimci.2018.v5.n9.a43>
- Cadavid, N., Orrego, A., & Barrera, H. (2021). Calidad del aire en el Valle de Aburrá, ¿Qué podríamos esperar de la ciudad inteligente? *Ingeniería y Ciencia*, 17(33). <https://doi.org/10.17230/ingciencia.17.33.8>
- Corponor. (2024). *Plan de acción Cuatrienal 2024-2027 Marco General*. 1-241. https://corponor.gov.co/PLANES/PAC_2024_2027/1_MARCO_GENERAL_APROBADO.pdf
- Corponor. (2025). *Resolución N° 197 Declaratoria Nivel II*. https://corponor.gov.co/ACTOSJURIDICOS/RESOLUCIONES/2025/Resolucion_197_NIVEL_II_2025_3.pdf
- Corponor SMAA. (2025). *Estado de la calidad del aire*. https://corponor.gov.co/calidad_del_aire/2025/AIRE/JUNIO/ESTADO_DE_LA_CALIDAD_DEL_AIRE_JUNIO_2025_CORPONOR.pdf
- Corponor, & SMAA. (2025). *Informe Mensual Calidad del Aire*. https://corponor.gov.co/calidad_del_aire/2025/AIRE/ENERO/INFORME_MENSUAL_CALIDAD_DEL_AIRE_ENERO_2025.pdf
- Decreto 1384, 1 (1985). https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=66965

- DNP, D. N. de P. (2023). *Lineamientos conceptuales que soportan la Metodología General Ajustada para Colombia Metodología General Ajustada para la formulación de proyectos de inversión pública en Colombia*.
https://mgaayuda.dnp.gov.co/Recursos/Documento_conceptual_2023.pdf
- Eslava, J., Martínez, F., Soto, Á., Vera, E., & Guevara, D. (2021). Generación de mapas de contaminación por material particulado mediante sistemas embebidos: caso de estudio en Cúcuta (Colombia). *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 13(3).
<https://doi.org/10.22335/rlct.v13i3.1433>
- Hill Consulting. (2022). *Plan de contingencia ante eventos de alta contaminación*.
<https://corponor.gov.co/web/wp-content/uploads/2022/05/Plan-de-contingencia-ante-eventos-de-alta-contaminacion.pdf>
- Hill Consulting; Corponor. (2022). Inventario de emisiones de atmosféricas. En *Corponor*.
- Hill Consulting, & Corponor. (2022). *Plan de Prevención, Reducción y Control de la Contaminación del Aire Cúcuta-Región Alcaldía de San José de Cúcuta Gobernación de Norte de Santander Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental-CORPONOR Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Hill Equipo formulador Gestión administrativa Apoyo comunicaciones Contenido* (pp. 1-78). https://corponor.gov.co/web/wp-content/uploads/2022/05/Inventario_emisiones_atmosfericas-Cucuta-Region.pdf
- IDEAM. (2022). *informe_del_estado_de_la_calidad_del_aire_en_colombia_2022_final* (1).
<https://www.ideam.gov.co/file-download/download/public/6783>
- IQAir. (2022). *2021 World Air Quality Report Region & City PM2.5 Ranking*.
<https://www.iqair.com/dl/pdf-reports/world-air-quality-report-2021-en.pdf>
- Ley 99, 1 (1993). https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=297
- Lledó, P., & Rivarola, G. (2007). *Gestión de Proyectos Cómo dirigir proyectos exitosos, coordinar los recursos humanos y administrar los riesgos*.
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55794167/Gestion_De_Proyectos-libre.pdf?1518546090=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGestion_De_Proyectos.pdf&Expires=1752633374&Signature=H8UwnCYGaLhilgmMkIdniocE1nBkBZQ2zZzYCta~J2RrJaZHqzl0Tcq-Ws6Z1Zaz9qJfiCHdukQbx6g8A8V5tQ0SjYjIdg6jIf5PX0jRr6g8tMbk1AZ1m9jlk5~yfFIXk97OWroPk0Qvq8NLFIWe9pGUduPkw3TgB7zwnTcvIsVuwtdUCtyruev1JtJZ-1hnUINCH21uolNNV35e7Osyi17x8qEztjV9dY5Lg-

K9bjunfFdQ1VjY4885i7kVFfHCpa9e4kuHd5pFZYBoecJe~t9rfiKKYuC5ZRcx0AaA8CVx2
7w0lz6qBtgLVioudYY6T8pmv4lnWSq1S6DZjvjSYg__&Key-Pair-
Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- López, P., Balsera, V., Concepción, J., González, A., & Antonio, J. (2016). *Stakeholders as Instrumental and Strategic Actors in New Management for the Public Sector*. http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/777/CIDIP2016_01053.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- López, S., Chung, P., & Ramírez, M. (2021). Analytical Hierarchy Process (AHP) as a multi-criteria method for optimal location of intermodal stations. *Economía, Sociedad y Territorio*, 21(66), 315-358. <https://doi.org/10.22136/est20211583>
- Macías, Á., & Gallini, S. (2019). Cooperación técnico-científica internacional en la construcción de redes de monitoreo atmosférico. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 25. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.25.2019.3619>
- Maldonado, E., & Rincón, P. (2024). *Calidad de aire y sostenibilidad: revisión de la contaminación atmosférica por PM2.5 en ciudades de América Latina y Europa*. <https://dnb.info/132130238X/34>
- MAVDT, M. de A. V. y D. T. (2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire* (pp. 1-135). https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf
- Montero, G. (2016). *Diseño de indicadores para la gestión de proyectos* [Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/22086/Tesis1183-170112.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moreno, J., Aguaron, J., Cano, F., & Escobar, M. (1998). *Validez Robustez y Estabilidad en Decision Multicriterio Analisis de Sensibilidad en el Proceso Analitico Jerarquico* (pp. 387-397). https://www.researchgate.net/profile/Jose-Maria-Moreno-Jimenez/publication/28290958_Validez_Robustez_y_Estabilidad_en_Decision_Multicriterio_Analisis_de_Sensibilidad_en_el_Proceso_Analitico_Jerarquico/links/0deec518191c8a89f4000000/Validez-Robustez-y-Estabilidad-en-Decision-Multicriterio-Analisis-de-Sensibilidad-en-el-Proceso-Analitico-Jerarquico.pdf
- Oduber Pérez, F. I. (2022). calidad del aire que respiramos. *Ambiociencias*, 20. <https://doi.org/10.18002/ambioc.i20.7489>

- OMS, O. M. de la S. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS*. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=CBB7B4789B7D5DCBE30CDEDFE6D78612?sequence=1
- Ortega, J., Ramirez, M., & Corponor, S. (2025). *Plan de contingencias institucional para la atención de eventos o episodios de contaminación atmosférica*. https://corponor.gov.co/calidad_del_aire/2025/AIRE/PLANES-CONTINGENCIA/Plan_de_contingencia_institucional_ante_eventos_de_contaminacion_atmosferica_2025.pdf
- Ortegón, E., Pacheco, J. F., & Prieto, A. (2015). *Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*. www.cepal.org/es/suscripciones
- Porta, A., Yanina Sanchez, E., & Lerner, E. C. (2018). *Calidad del aire Libros de Cátedra* (Vol. 1). <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/1080/1066/3503-1>
- Querol, X. (2018). *Calidad del aire reto mundial*. 1-300. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=qZkYQxIAAAAJ&start=300&pagesize=100&citation_for_view=qZkYQxIAAAAJ:VFGfXyYpp08C
- Resolución 2254, 1 (2017). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>
- Ríos, E. F., Héverd, P., Páez, A., Jairo, Q., & Barbos, F. (2020). *ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN DISEÑO, EJECUCIÓN Y SEGUIMIENTO* (pp. 1-82). www.redipe.org
- Rodríguez, L., Sierra, R., & Blanco, L. (2020). Análisis espacial de las concentraciones de PM_{2,5} en Bogotá según los valores de las guías de la calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud para enfermedades cardiopulmonares, 2014-2015. *Biomédica*, 40(1). <https://doi.org/10.7705/biomedica.4719>
- Sarmiento, M., Ramos, C., Flórez, S., & Molina, F. (2021). Determinación de metales pesados en material particulado atmosférico por espectroscopía de absorción atómica: validación. *Revista Politécnica*, 17(34). <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v17n34a10>
- Yepes, D., & Trejos, G. (2024). Planes de calidad del aire en lugares con episodios críticos de contaminación atmosférica. *Teuken Bidikay - Revista Latinoamericana de Investigación en Organizaciones, Ambiente y Sociedad*, 14(22). <https://doi.org/10.33571/teuken.v14n22a3>

Apéndices

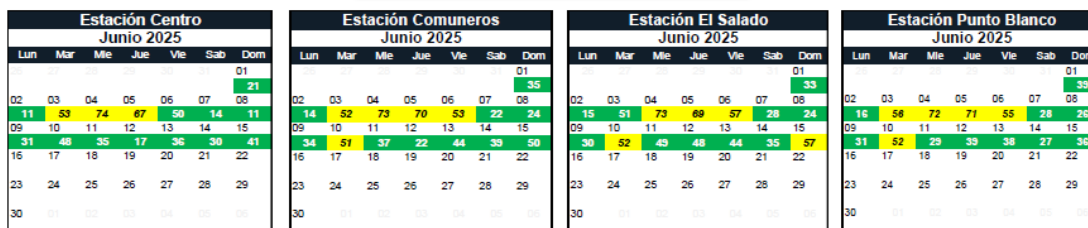
Apéndice A. Tablero digital ICA



BOLETÍN GRÁFICO EJECUTIVO - SVCA



ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE - ICA

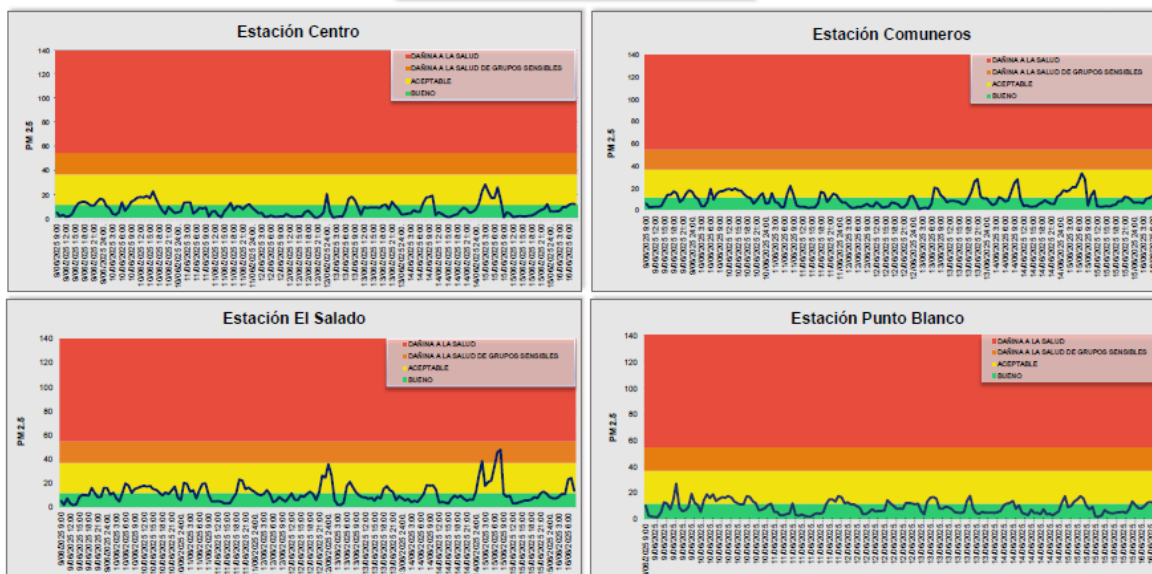


ESTADO ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE

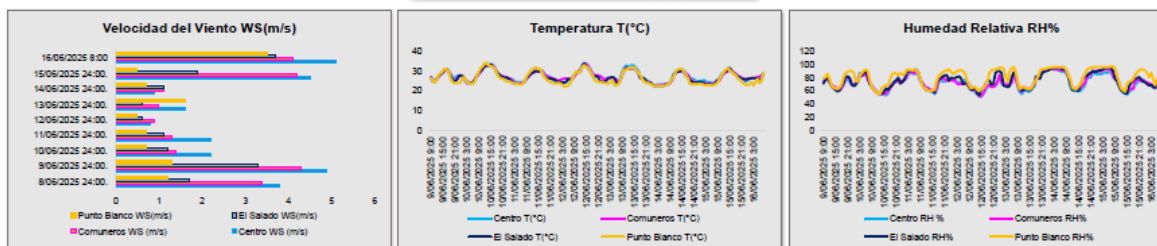
FECHA 16/05/2025 HORA DE CORTE 8:00:00

ESTACIÓN CENTRO	ESTACIÓN COMUNEROS	ESTACIÓN EL SALADO	ESTACIÓN PUNTO BLANCO
Concentración (µg/m³) 7,5	Concentración (µg/m³) 17,1	Concentración (µg/m³) 32,5	Concentración (µg/m³) 14,2
Media Móvil (µg/m³) 6,7	Media Móvil (µg/m³) 9,8	Media Móvil (µg/m³) 14,3	Media Móvil (µg/m³) 11,3
ICA 28	ICA 41	ICA 54	ICA 47

COMPORTAMIENTO PM2.5 (µg/m³)

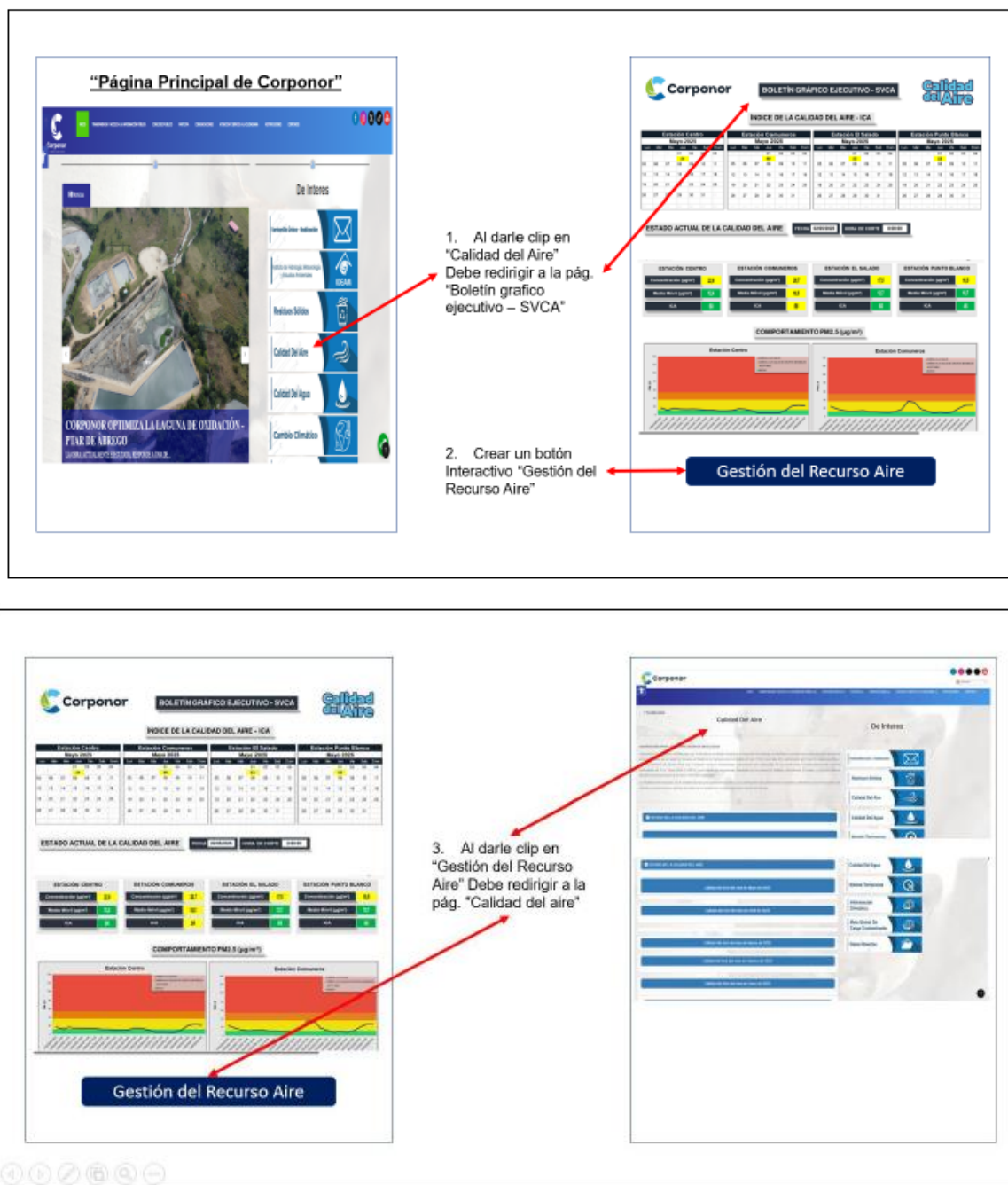


VARIABLES METEOROLÓGICAS



Apéndice B. Prototipo interfaz gráfica

REDISEÑO PÁGINA DE CALIDAD DEL AIRE



Apéndice C. Acta de Reunión 03 de marzo de 2025

ACTA DE REUNION	
PROCESO:	N/A
GRUPO/COMITE:	N/A
ASUNTO:	Socialización Plan de Contingencia ante eventos de contaminación atmosférica.
LUGAR Y FECHA:	Corponor - 03/03/2025
ACTA DE REUNION No. (Si aplica)	N/A

1. ASISTENTES

(Principales participantes de la reunión o que conforman el grupo de trabajo o Comité)

Nombres y Apellidos	Cargo	Oficina / Entidad
John Jairo Ortega Garcia	Contratista	Corponor / SMAA
Miguel Antonio Ramirez Salcedo	Contratista	Corponor / SMAA
Fermín Rolón	Funcionario	Secretaria de ambiente Gobernación N de S.
Alberto Martínez	Funcionario	Secretaria de Tránsito Departamental
Yeiner Figueroa	Contratista	Gobernación
Luis Pantaleón	Contratista	Gestión del Riesgo
Yrany Rubio	Contratista	IDS

2. TEMAS A TRATAR / AGENDA A DESARROLLAR

Socialización Plan de Contingencia ante eventos de contaminación atmosférica.

3. DESARROLLO DE LA REUNION

La reunión inició con la presentación general del Plan de Contingencia ante eventos de contaminación atmosférica, elaborado en el marco de las competencias de CORPONOR como autoridad ambiental en el departamento de Norte de Santander. Se expusieron los objetivos del plan, destacando la necesidad de establecer protocolos de actuación inmediata para mitigar los efectos de eventos críticos de calidad del aire, y fortalecer la capacidad institucional de respuesta ante emergencias ambientales.

Durante la socialización, se abordaron los siguientes puntos clave:



ACTA DE REUNION

Identificación de escenarios críticos: Se presentaron las áreas geográficas con mayor susceptibilidad a eventos de contaminación atmosférica, según registros históricos, modelos de dispersión y monitoreos realizados.

Activación del plan: Se explicó el protocolo para declarar un episodio crítico, detallando los criterios técnicos (como umbrales de PM10 y PM2.5) que determinan las fases de alerta (prevención, alerta, emergencia ambiental).

Roles institucionales: Se asignaron responsabilidades preliminares a cada entidad participante, en el marco de sus competencias, para garantizar una respuesta articulada ante la ocurrencia de un episodio.

Medidas de respuesta y mitigación: Se discutieron acciones de corto y mediano plazo, como restricciones a fuentes móviles y fijas de emisión, campañas de sensibilización ciudadana, y monitoreo intensificado.

Instrumentos de apoyo: Se presentó la propuesta de utilización de herramientas como el modelo HYSPLIT, sensores de bajo costo, y redes de información interinstitucional para el seguimiento de eventos.

Los asistentes manifestaron la importancia de fortalecer la articulación entre CORPONOR, la Gobernación, el IDS, la Secretaría de Tránsito y las entidades de Gestión del Riesgo, con el fin de implementar de forma efectiva el plan. Se propuso realizar mesas técnicas periódicas para afinar los protocolos de activación y asegurar recursos logísticos necesarios.

Asimismo, se acordó incorporar recomendaciones específicas sobre comunicación de riesgo, criterios de priorización de medidas y participación ciudadana, como insumos al documento definitivo.



ACTA DE REUNION

4. EVIDENCIA FOTOGRAFICAS.



Apéndice D. Acta de Reunión 11 de marzo de 2025**Corponor**Modelo Integrado
de Planeación
y Gestión**ACTA DE REUNION**

PROCESO:	N/A
GRUPO/COMITE:	N/A
ASUNTO:	Socialización Plan de Contingencia ante eventos de contaminación atmosférica.
LUGAR Y FECHA:	Corponor - 11/03/2025
ACTA DE REUNION No. (Si aplica)	N/A

1. ASISTENTES

(Principales participantes de la reunión o que conforman el grupo de trabajo o Comité)

Nombres y Apellidos	Cargo	Oficina / Entidad
John Jairo Ortega Garcia	Contratista	Corponor / SMAA
Miguel Antonio Ramirez Salcedo	Contratista	Corponor / SMAA
Jorge Henrique Arenas Hernández	Subdirector	Corponor / SMAA
Edwin Cardona	Sub secretario de medio ambiente	Alcaldía de Cúcuta
Sector Industria	N/A	Coque / Arcilla

2. TEMAS A TRATAR / AGENDA A DESARROLLAR

Socialización Plan de Contingencia ante eventos de contaminación atmosférica.

3. DESARROLLO DE LA REUNION

En la sesión llevada a cabo en la sede de CORPONOR el 11 de marzo de 2025, se procedió a socializar el contenido del Plan de Contingencia ante eventos de contaminación atmosférica, con énfasis en su aplicación a escenarios urbanos e industriales del área metropolitana de Cúcuta.

El objetivo principal fue presentar a los actores institucionales y del sector industrial los lineamientos operativos del plan, resaltando su importancia para la protección de la salud pública y el medio ambiente ante incrementos críticos en los niveles de material particulado (PM10 y PM2.5).

Durante el encuentro se desarrollaron los siguientes aspectos:

Marco normativo y técnico: Se contextualizó el plan con base en la normativa nacional (Res. 2254 de 2017) y en los compromisos adquiridos en el Plan de Gestión Ambiental Territorial. Se explicó



ACTA DE REUNION

la base técnica para la identificación de episodios críticos, a través de redes de monitoreo y modelación atmosférica.

Intervención del sector institucional: La Subdirección de Calidad y Control Ambiental de CORPONOR expuso el protocolo de respuesta institucional, los niveles de alerta y los mecanismos de activación del plan. La Alcaldía de Cúcuta, a través de la Subsecretaría de Medio Ambiente, manifestó su disposición para incorporar este plan en su estrategia local de gestión del riesgo.

Participación del sector industrial: Representantes del sector coque y arcilla manifestaron interés en conocer los criterios de restricción operativa propuestos en el plan, así como las medidas de autorregulación ambiental que pueden implementarse para evitar sanciones durante eventos críticos.

Articulación interinstitucional: Se resaltó la necesidad de definir canales de comunicación eficaces entre CORPONOR, los entes territoriales y los actores privados, para asegurar una respuesta oportuna y coordinada ante la ocurrencia de eventos de contaminación.

Finalmente, se acordó la necesidad de realizar talleres técnicos con el sector productivo para socializar los indicadores de activación, la plataforma de monitoreo y los procedimientos para reporte de acciones de mitigación.

4. EVIDENCIA FOTOGRAFICAS.





ACTA DE REUNION



Apéndice E. *Documento técnico Plan de Actualización*



**Plan de Actualización Periódica del Protocolo Institucional de
Respuesta ante Eventos de Contaminación Atmosférica**

Corponor Subdirección de Medición y Análisis Ambiental
Junio 2025



Contenido

Plan de Actualización Periódica del Protocolo Institucional de Respuesta ante Eventos de Contaminación Atmosférica	1
1. Objetivos del Plan	3
2. Periodicidad de la Actualización	3
3. Responsables de la actualización	4
4. Etapas del Proceso de Actualización	5
5. Productos Esperados	6



1. Objetivos del Plan

El presente plan tiene como objetivo establecer una metodología clara y estructurada para la revisión, actualización y mejora continua del Protocolo Institucional de Respuesta ante Eventos de Contaminación Atmosférica de Corponor. Esta actualización busca asegurar que el protocolo permanezca alineado con las condiciones ambientales locales, las disposiciones normativas nacionales e internacionales vigentes, los avances tecnológicos en monitoreo de calidad del aire y las experiencias operativas acumuladas por la Corporación.

2. Periodicidad de la Actualización

La periodicidad prevista se enmarca en una lógica de gestión por ciclos de mejora continua (Planificar–Hacer–Verificar–Actuar, PHVA):

- **Revisión Regular:** Evaluación integral basada en datos, informes y retroalimentación institucional, permitiendo integrar nuevas tendencias normativas, científicas y tecnológicas. Se llevará a cabo cada dos (2) años, con el objetivo de incorporar ajustes técnicos, normativos y operativos que se hayan identificado durante el período de implementación.
- **Revisión Extraordinaria:** Activada por eventos disruptivos, emergencias, fallos en la ejecución del protocolo, o introducción de tecnologías disruptivas en el monitoreo de calidad del aire. Esta revisión será clave para mantener la resiliencia institucional ante escenarios no previstos, siguiendo los principios de la gestión proactiva del riesgo. La misma podrá realizarse en cualquier momento si se presentan condiciones que ameriten una intervención urgente, tales como:



- Cambios sustanciales en la normatividad ambiental nacional o regional.
- Incidentes graves que evidencien debilidades operativas o de coordinación institucional.
- Incorporación de nuevas tecnologías o estaciones de monitoreo.
- Cambios en la estructura organizacional de Corponor que modifiquen las responsabilidades definidas en el protocolo.

3. Responsables de la actualización

El proceso de actualización estará liderado por las siguientes dependencias, quienes cumplirán funciones específicas:

Tabla 1. Responsables

Dependencia	Responsabilidad
Subdirección de Medición y Análisis Ambiental	Liderar el componente técnico de la actualización. Recopilar informes operativos, datos de monitoreo y lecciones aprendidas. Proponer ajustes al protocolo.
Secretaría General – Oficina Jurídica	Revisar que los cambios cumplan con la normatividad vigente. Preparar y emitir el acto administrativo para la aprobación formal del protocolo actualizado.
Oficina de Comunicaciones	Publicar el documento actualizado en el sitio web institucional. Elaborar materiales informativos para divulgar la



	actualización a nivel interno y externo.
Dirección General	Aprobar formalmente la versión ajustada del protocolo. Convocar reuniones de validación interdependencias cuando sea necesario.

4. Etapas del Proceso de Actualización

El proceso de actualización se desarrollará en seis (6) etapas consecutivas, diseñadas para garantizar una revisión integral, participativa y técnicamente fundamentada:

4.1. Diagnóstico Técnico Multifuente

Implica la recolección y análisis de:

- Informes de activación de protocolos (cuantificación de eventos, tiempos de respuesta, eficacia de medidas).
- Evaluaciones técnicas de desempeño por estación de monitoreo.
- Resultados de modelaciones HYSPLIT u otros modelos de dispersión atmosférica.
- Evaluaciones participativas (encuestas a actores internos y externos).

4.2. Taller de Validación Interna.

Convocatoria a reuniones técnicas interdependencias para revisar los hallazgos y propuestas. Se recogerán observaciones específicas y se construirán consensos sobre los ajustes requeridos.



4.3. Redacción Técnica del Documento

Se incorporan los ajustes en el protocolo con control de cambios. La trazabilidad de estos es esencial para evaluar el aprendizaje institucional. Se recomienda el uso de software colaborativo (ej. SharePoint, Confluence) y plantillas ISO 9001 para gestión documental.

4.4. Revisión Jurídica.

La Oficina Jurídica debe asegurar que las modificaciones cumplen con el marco normativo nacional (Ley 99 de 1993, Decreto 1076 de 2015, Resoluciones sobre calidad del aire, etc.), así como estándares internacionales (OMS, normativa OCDE si aplica).

4.5. Aprobación Formal.

Emisión del acto administrativo mediante resolución por parte de la Dirección General. Se incluye una comunicación oficial a todas las dependencias notificando la entrada en vigencia de la nueva versión.

4.6. Publicación y Divulgación.

Carga del protocolo actualizado en la página institucional, acompañado de un boletín o comunicado oficial informando sobre su contenido y cambios clave.

5. Productos Esperados

Los productos que se derivarán de este proceso de actualización son:

- Informe técnico de evaluación del protocolo anterior, incluyendo fortalezas, debilidades y propuestas de mejora.



- Protocolo actualizado con control de versiones y trazabilidad de cambios.
- Resolución interna que aprueba la nueva versión del protocolo.
- Publicación del protocolo actualizado en el portal institucional de Corponor.
- Material de difusión institucional (boletín de prensa, resumen ejecutivo, infografía digital).