DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA SALUD HUMANA ASOCIADO A LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM 2.5 EN LA ZONA MINERA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR.

AUTOR(ES):

YESSICA PAOLA FLOREZ GORDILLO

JULIANA MARIA URIBE MENDOZA

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2026

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA SALUD HUMANA ASOCIADO A LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM 2.5 EN LA ZONA MINERA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR.

AUTOR(ES):

YESSICA PAOLA FLOREZ GORDILLO

JULIANA MARIA URIBE MENDOZA

DIRECTOR:

ING. RONNY JAVIER LOPEZ HERNANDEZ

MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES

CODIRECTORA

SINDY CAROLINA GALVIS ROJAS

ESPECIALISTA EN SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2026

DEDICATORIA

A Dios, por sostenerme en los días difíciles y permitirme alcanzar este logro. A mi madre, Amparo Gordillo, por su amor incondicional, por toda una vida de sacrificios, por creer siempre en mí y ser mi mayor apoyo, inspiración y ejemplo de resiliencia, por darme la fortaleza para culminar este proceso; te lo debo todo. A mi padre, Emiro Florez, porque, a pesar de la huella profunda que dejó su partida, conservo cada una de las enseñanzas que me brindó durante el tiempo que estuvo a mi lado, por enseñarme a ser responsable y a valerme por mí misma; tu recuerdo permanece siempre conmigo y espero que, dondequiera que estés, te sientas orgulloso.

Yessica Paola Florez Gordillo, 2026.

En primer lugar, dedico este proyecto a Dios, por ser mi guía y por darme la sabiduría necesaria para permitirme alcanzar esta meta tan importante en mi vida. A mis padres, Alberto Uribe y Carmen Mendoza, por ser los pilares fundamentales de mi vida, por su amor incondicional, sus sacrificios y su apoyo constante. Gracias por creer en mí, por motivarme a seguir adelante en los momentos difíciles. Este logro también les pertenece, porque detrás de cada paso que he dado está su compañía, sus consejos y el deseo de hacerlos sentir orgullosos.

Juliana María Uribe Mendoza, 2026.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la sabiduría, guiar cada uno de mis pasos y darme la fortaleza necesaria para no rendirme. A mi madre, Amparo Gordillo, quien, a pesar de la distancia, se ha encargado de hacerme sentir su compañía reconfortante, por sus consejos y por los valores inculcados, que me convirtieron en la persona que soy hoy. A mi hermana, Carolina Florez, por escucharme, alentarme y hacerme sentir su abrazo, incluso en la distancia. A aquellos familiares que estuvieron presentes durante este proceso y me brindaron su apoyo y amor; así como a aquellas personas que, aunque no compartimos lazos de sangre, me acompañaron, estuvieron pendientes de mí y me brindaron su cariño a lo largo de este camino.

Asimismo, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi compañera de proyecto y de carrera, Juliana Uribe, por compartir conmigo los desafíos y alegrías de este proceso, por su amistad, apoyo mutuo y dedicación. A mi amigo y compañero de carrera, Isaac Vega, por el apoyo, experiencias compartidas y las risas durante estos cinco años. Al ingeniero Ronny López, director de este proyecto, por su orientación, disposición y acompañamiento durante su desarrollo, y por los valiosos aportes que contribuyeron a mi formación profesional.

Finalmente, agradezco a la Universidad Popular del Cesar y a los docentes que hicieron parte de mi formación académica, por compartir sus conocimientos y experiencias, los cuales enriquecieron significativamente a mi crecimiento personal y profesional.

Yessica Paola Florez Gordillo, 2026.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por acompañarme durante este proceso. A mi compañera de trabajo, Yessica Florez, y a su madre, Amparo Gordillo, por su apoyo y generosidad durante este proceso. Al profesor Ronny López, tutor y coordinador del proyecto, por su invaluable orientación, disposición y compromiso, fundamentales para el desarrollo de este trabajo. A mi compañero de clases, Isaac Vega, por su compañerismo y apoyo durante mi formación académica. Finalmente, agradezco a la universidad por brindarme los conocimientos, las herramientas y los espacios necesarios para mi crecimiento profesional y para alcanzar esta importante meta.

Juliana María Uribe Mendoza, 2026.

RESUMEN

La contaminación atmosférica asociada al material particulado fino (PM2.5), generada en el contexto de las actividades de minería a cielo abierto, constituye un factor de riesgo relevante para la salud pública en la zona minera del departamento del Cesar. En este marco, la presente investigación tuvo como propósito evaluar el impacto potencial sobre la salud de la población expuesta a concentraciones de PM2.5 en los municipios de La Jagua de Ibirico, El Paso, Becerril y Chiriguaná. Para ello, se realizó un análisis espacial y temporal de las concentraciones registradas durante el periodo 2021-2025, complementado con el análisis de rosas de viento y Polar Plots para establecer relaciones entre las condiciones meteorológicas y las posibles fuentes de emisión. Posteriormente, mediante el modelo AirQ+, se estimó la mortalidad atribuible por causas naturales en la población mayor de 30 años, considerando diferentes escenarios asociados tanto a los límites establecidos por la normativa nacional como a las recomendaciones internacionales.

Los resultados mostraron que las concentraciones promedio de PM2.5 superaron de manera recurrente el valor de referencia de 5 µg/m³. Adicionalmente, se identificaron episodios de elevada concentración a escala diaria, como el registrado en La Jagua de Ibirico durante 2021, donde se alcanzó un valor máximo diario de 58,25 µg/m³. Asimismo, la aplicación del modelo AirQ+ permitió estimar que, durante 2023, hasta el 8,56 % de las muertes por causas naturales en La Jagua de Ibirico podrían atribuirse a la exposición prolongada al contaminante. En consecuencia, los resultados evidencian un impacto potencial relevante sobre la salud de las poblaciones estudiadas y muestran que los niveles elevados de PM2.5 asociados al contexto minero representan un factor de riesgo que requiere medidas de seguimiento, prevención y mitigación.

Palabras clave: Calidad del aire; Material particulado PM2.5; Contaminación atmosférica; Mortalidad atribuible; Evaluación de impacto en la salud; Modelo AirQ+.

ABSTRACT

Air pollution associated with fine particulate matter (PM2.5), generated in the context of open-pit mining activities, constitutes a relevant risk factor for public health in the mining area of the department of Cesar. Within this framework, the present study aimed to assess the potential health impact on the population exposed to PM2.5 concentrations in the municipalities of La Jagua de Ibirico, El Paso, Becerril, and Chiriguaná. To this end, a spatial and temporal analysis of the concentrations recorded during the 2021–2025 period was conducted, complemented by wind rose and Polar Plot analyses to establish relationships between meteorological conditions and potential emission sources. Subsequently, using the AirQ+ model, attributable mortality due to natural causes was estimated among the population over 30 years of age, considering different scenarios associated with both the limits established by national regulations and international recommendations.

The results showed that the average PM2.5 concentrations recurrently exceeded the reference value of 5 µg/m³. Additionally, episodes of elevated concentrations were identified on a daily scale, such as the one recorded in La Jagua de Ibirico in 2021, when a maximum daily concentration of 58.25 µg/m³ was reached. Likewise, the application of the AirQ+ model estimated that, during 2023, up to 8.56% of deaths from natural causes in La Jagua de Ibirico could be attributable to prolonged exposure to the pollutant. Consequently, the results demonstrate a relevant potential impact on the health of the populations studied and indicate that elevated PM2.5 levels associated with the mining context represent a risk factor requiring monitoring, prevention, and mitigation measures.

Keywords: Air quality; PM2.5 particulate matter; Air pollution; Attributable mortality; Health impact assessment; AirQ+ model.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 16
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 17
2. JUSTIFICACIÓN 18
3. OBJETIVOS 20
3.1. OBJETIVO GENERAL 20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 20
4. MARCO REFERENCIAL 21
4.1. ANTECENDENTES 21
4.2. MARCO TEÓRICO 24
4.2.1. Contaminación Del Aire Por PM 2.5 24
4.2.2. Fuentes De Emisión De Material Particulado 24
4.2.2.1. Emisiones De PM 2.5 Procedentes De La Minería De Carbón. 24
4.2.3. Zona Minera Del Departamento Del Cesar 25
4.2.4. Sistemas De Vigilancia De Calidad Del Aire 25
4.2.5. Efectos De Las Partículas PM 2.5 En La Salud 26
4.2.6. Directrices Mundiales De La OMS Sobre La Calidad Del Aire 26
4.2.7. AirQ+ 27
4.2.8. Evaluación De Impacto 27
4.2.8.1. Riesgo Relativo. 27
4.2.8.2. Método Log-Lineal. 28
4.2.8.3. Tasa De Mortalidad por 100,000 Habitantes. 28
4.2.9. R OpenAir Para El Análisis De Datos De Calidad Del Aire 28

4.3. MARCO CONCEPTUAL 28
4.3.1. Calidad Del Aire 28
4.3.2. Contaminación Atmosférica 28
4.3.3. Morbilidad 29
4.3.4. Mortalidad 29
4.3.5. Rosa De Viento 29
4.3.6. Rosa De Contaminación 29
4.4. MARCO CONTEXTUAL 29
4.5. MARCO LEGAL 31
5. MARCO METODOLÓGICO 33
5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN 33
5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN 33
5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN 33
5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO 34
5.5. MUESTRA POBLACIONAL 34
5.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN 34
5.7. ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS 35
Fase 1: Análisis De La Variación Temporal Y Espacial De Las Concentraciones De PM2.5 En La Zona Minera Del Departamento Del Cesar, A Partir De Datos Del Sistema De Vigilancia De Calidad Del Aire 35
Actividad 1.1. Recolección y validación de datos en los municipios que presentan muestreo de PM 2.5 en la zona minera del departamento del Cesar. 35
Actividad 1.2. Crear Una Base De Datos De Las Concentraciones De PM 2.5 A Partir Del Sistema De Vigilancia De Calidad Del Aire. 35
Actividad 1.3. Análisis estadístico de la variación temporal y espacial de las concentraciones de PM 2.5 en la zona minera del departamento de Cesar. 36

Fase 2: Estimación De La Mortalidad Atribuible A La Exposición A PM2.5, Utilizando La Herramienta AirQ+ 36

Actividad 2.1. Ingreso De Datos En El Software AirQ+ Para La Evaluación de Impacto. 36

Actividad 2.2. Análisis de los resultados de evaluación de impacto obtenidos mediante el software AirQ+. 36

Fase 3: Validación De Las Concentraciones Locales De PM2.5 Con Estándares Internacionales (OMS) Para Evaluar El Riesgo Potencial En La Salud De La Población Expuesta 37

Actividad 3.1. Aplicación Del Modelo AirQ+ Bajo Escenario De Normativa Local Y Estándares Internacionales De La OMS. 37

Actividad 3.2. Evaluación De Resultados Y Formulación De Estrategias A Partir De Los Modelos Aplicados. 37

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS 39

6.1. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM2.5 EN LA ZONA MINERA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR, A PARTIR DE DATOS DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE 39

6.1.1. Recolección Y Validación De Datos En Los Municipios Que Presentan Muestreo De PM 2.5 En La Zona Minera Del Departamento Del Cesar 39

6.1.2. Crear Base De Datos De Las Concentraciones De PM 2.5 A Partir Del Sistema De Vigilancia De Calidad Del Aire 42

6.1.3. Análisis Estadístico De La Variación Temporal Y Espacial De Las Concentraciones De PM 2.5 En La Zona Minera Del Departamento De Cesar 45

6.1.3.1. Tendencia Central y Dispersión Acumulada. 46

6.1.3.2. Eventos Episódicos y Valores Atípicos (Outliers) 47

6.1.3.3. Evaluación del Cumplimiento Normativo (Resolución 2254 de 2017). 47

6.1.3.4. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2021). 48

6.1.3.5. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2022).....51

6.1.3.6. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2023).....53

6.1.3.7. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2024).....56

6.1.3.8. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2025).....58

6.1.3.9. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2021). 60

6.1.3.10. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2022). 63

6.1.3.11. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2023). 65

6.1.3.12. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2024). 67

6.1.3.13. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2025). 70

6.1.3.14. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Aurora (2021). 72

6.1.3.15. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Aurora (2022). 74

6.1.3.16. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Aurora (2023). 76

6.1.3.17. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Aurora (2024). 78

6.1.3.18. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Palmeras de Alamosa (2025)…….....80

6.2. ESTIMACIÓN DE LA MORTALIDAD ATRIBUIBLE A LA EXPOSICIÓN A PM2.5, UTILIZANDO LA HERRAMIENTA AIRQ+.....82

6.2.1. Ingreso De Datos En El Software AirQ+ Para La Evaluación de Impacto 82

6.2.2. Análisis De Los Resultados De Evaluación De Impacto Obtenidos Mediante El Software AirQ+.....86

6.2.2.1. Evaluación De Impacto Para El Municipio La Jagua De Ibirico.....88

6.2.2.2. Evaluación De Impacto Para El Municipio De El Paso.....91

6.2.2.3. Evaluación De Impacto Para El Municipio de Chiriguaná.....94

6.2.2.4. Evaluación De Impacto Para El Municipio de Becerril.....95

6.3. VALIDACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES LOCALES DE PM2.5 CON ESTÁNDARES INTERNACIONALES (OMS) PARA EVALUAR EL RIESGO POTENCIAL EN LA SALUD DE LA POBLACIÓN EXPUESTA 96

6.3.1. Aplicación Del Modelo AirQ+ Bajo Escenario De Normativa Local Y Estándares Internacionales De La OMS 96

6.3.2. Evaluación De Resultados Y Formulación De Estrategias A Partir De Los Modelos Aplicados 98

6.3.2.1. Evaluación De Impacto En La Salud - Municipio De La Jagua de Ibirico (2025)…….....100

6.3.2.2. Evaluación De Impacto En La Salud - Municipio: El Paso (2025). 100

6.3.2.3. Evaluación De Impacto En La Salud - Municipio: Chiriguaná (2025). 101

6.3.2.4. Evaluación De Impacto En La Salud - Municipio: Becerril (2025). 102

6.3.2.5. Formulación De Estrategias Orientadas A La Gestión Del Riesgo Asociado A La Exposición A PM2.5.....103

7. CONCLUSIÓN.....105

8. RECOMENDACIONES.....108

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....111

ANEXOS 115

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. 30
Figura 2. 41
Figura 3. 44
Figura 4. 45
Figura 5. 46
Figura 6. 50

Figura 7. 52
Figura 8. 55
Figura 9. 57
Figura 10. 59
Figura 11. 62
Figura 12. 64
Figura 12. 66
Figura 14. 69
Figura 15. 71
Figura 16. 73
Figura 17. 75
Figura 18. 77
Figura 19. 79
Figura 20. 81
Figura 21. 85
Figura 22. 86
Figura 23. 98

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. 27
Tabla 2. 31
Tabla 3. 40
Tabla 4. 42
Tabla 5. 43
Tabla 6. 84
Tabla 7. 87
Tabla 8. 97
Tabla 9. 99

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica constituye un problema de alta relevancia a escala regional y global, debido a sus significativos efectos adversos sobre la salud humana. Dentro de los contaminantes, el material particulado (PM) adquiere especial relevancia por sus características físicas, que favorecen su permanencia y dispersión en el aire y su ingreso a las vías respiratorias. La exposición a este contaminante se ha relacionado con efectos adversos sobre la salud, particularmente con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, por lo que su evaluación representa un aspecto de interés para la salud pública y la gestión de la calidad del aire. En 2013, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) determinó que las partículas finas (PM2,5) son carcinógenas para el ser humano (Sangkham et al., 2024).

Colombia se posiciona como el principal productor de carbón en América Latina y uno de los más importantes a nivel mundial, con una oferta dominada ampliamente por la minería a cielo abierto. En particular, las actividades asociadas con la extracción, manipulación y transporte del carbón pueden contribuir al deterioro de la calidad del aire mediante la generación y dispersión de partículas, entre ellas el material particulado PM2.5 (Rojano et al., 2015).

En la región al norte del Caribe Colombiano se desarrolla una intensa actividad minera de carbón a cielo abierto, considerada uno de los principales motores económicos, pero que a su vez genera impactos ambientales negativos significativos, especialmente en la calidad del aire por la emisión de PM 2.5 (ANLA, 2018). Dadas estas circunstancias, Colombia cuenta con instrumentos para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, entre ellos los Sistemas Especiales de Vigilancia de la Calidad del Aire (SEVCA), establecidos para zonas que presentan problemáticas ambientales específicas, como aquellas asociadas a actividades mineras (Rojano et al., 2015).

En este contexto, resulta pertinente estudiar no solo el comportamiento de las concentraciones de PM2.5, sino también sus posibles implicaciones sobre la salud de la población expuesta. La necesidad de desarrollar este análisis surge del interés por generar información que permita caracterizar la distribución temporal y espacial del contaminante y, a

partir de ella, estimar indicadores relacionados con el impacto en salud. De esta manera, el estudio buscó aportar información técnica que contribuyera al conocimiento de la problemática ambiental de la zona minera del Cesar, así como al fortalecimiento de los procesos de gestión de la calidad del aire. Esta investigación también representa un aporte profesional al integrar el análisis de contaminantes atmosféricos con herramientas de evaluación de sus posibles efectos sobre la salud.

Para el desarrollo de la investigación se empleó un enfoque cuantitativo y un alcance exploratorio, con un diseño no experimental-longitudinal de tendencia, de acuerdo con lo establecido en el marco metodológico del proyecto. La población de estudio está conformada por los habitantes de los municipios de Agustín Codazzi, El Paso y La Jagua de Ibirico, correspondientes a los habitantes mayores de 30 años, para un total de 175.097 habitantes.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto en la salud humana asociado a la exposición a las concentraciones de material particulado fino (PM2.5) en la zona minera del departamento del Cesar. Para ello, se recopilará registros en la base de datos del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire en el área de estudio, con el fin de analizar la variación temporal y espacial de las concentraciones de PM 2.5, Estimar la mortalidad atribuible a dicha exposición y comparar las concentraciones locales de PM2.5 con los estándares internacionales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

El documento se encuentra estructurado en diferentes capítulos. En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema y la formulación de la pregunta de investigación; el segundo desarrolla la justificación del estudio; y el tercero contiene el objetivo general y los objetivos específicos. El cuarto capítulo corresponde al marco referencial, conformado por los antecedentes, el marco teórico, el marco conceptual, el marco contextual y el marco legal. En el quinto capítulo se desarrolla el marco metodológico, que comprende el enfoque, alcance, población, muestra, diseño y estrategias metodológicas de la investigación. El sexto capítulo presenta los resultados obtenidos y su respectivo análisis. El séptimo capítulo corresponde a las conclusiones, en las cuales se sintetizan los principales hallazgos de la investigación en relación con los objetivos planteados. Finalmente, el octavo capítulo presenta las recomendaciones derivadas de los resultados y conclusiones del estudio.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la contaminación del aire es reconocida como uno de los principales problemas ambientales críticos para la salud pública a nivel global, dado que una gran proporción de la población está expuesta de forma cotidiana a concentraciones nocivas de contaminantes atmosféricos, una situación que de cierta manera contribuye significativamente a la mortalidad prematura y a la pérdida de años de vida saludable (OMS, 2021). Se estima que la contaminación del aire por exposición a PM 2.5, está relacionada con cerca de 4.9 millones de fallecimientos al año, un equivalente al 8.7% de las muertes totales y afecta de la misma forma a los años de vida en todo el mundo (Grisales et al., 2021)

El deterioro presentado en la calidad del aire puede asociarse de manera directa con el aumento de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y disminución en la calidad y esperanza de vida de la población. En este sentido, el material particulado PM 2.5 es uno de los contaminantes más peligrosos por la capacidad que tiene de penetrar profundamente en el sistema respiratorio, al tener un diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros (Martínez, 2023).

En numerosos países de América del Sur, más del 80% de la población se encuentra expuesta a concentraciones de PM 2.5 consideradas como un riesgo para la salud, aunque se han puesto en práctica políticas que buscan la reducción de la contaminación atmosférica, la mejora ha sido insuficiente (Mardoñez et al., 2025).

En Colombia, esta problemática se ha intensificado en regiones con alta actividad industrial y minera, donde los procesos productivos generan emisiones significativas de contaminantes atmosféricos. Asimismo, en la ciudad de Barranquilla se han registrado concentraciones de PM 2.5, asociadas a fuentes urbanas e industriales que alcanzan valores promedios de hasta 20,9 $\mu g/m^3$, los cuales superan las recomendaciones establecidas por la Organización Mundial de la Salud (Moreno et al., 2026).

Según (Negrete et al., 2024), en el departamento del Cesar se ha identificado alta concentración de material particulado PM 2.5 relacionadas a la actividad minera por la extracción y transporte de carbón. Aunque de forma general las concentraciones cumplen con la Resolución 2254 de 2017, se han registrado eventos diarios que superan el límite máximo

permisible de 37 µg/m^3 para 24 horas, evidenciando episodios de alta contaminación. Adicionalmente, dichas concentraciones también exceden los valores recomendados por la OMS, la cual tiene un límite de 5 µg/m^3 para PM 2.5 (OMS, 2021).

En la zona minera del Cesar existe escasa información que relacione la morbilidad, mortalidad con la exposición al material particulado PM 2.5, lo que dificulta evaluar cuál es el impacto en la salud de la población. Esta limitación impide comprender con precisión la magnitud del problema y sus efectos en los grupos más vulnerables. De mantenerse esta situación, podrían incrementarse las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y el deterioro de la calidad de vida.

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la falta de estudios asociados a los efectos del material particulado PM 2.5 por minería de carbón a cielo abierto en el departamento del Cesar, surge la necesidad de evaluar el impacto en la salud de la población en esta zona minera de este departamento. En este contexto, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo evaluar el impacto en la salud humana asociado a las concentraciones de material particulado PM 2.5 en la zona minera del departamento del Cesar?

2. JUSTIFICACIÓN

En el departamento del Cesar, la actividad minera de carbón genera emisiones de material particulado fino (PM2.5), uno de los principales contaminantes para la salud humana que genera mayor riesgo. El tipo de minería desarrollada en este departamento es a través de la explotación de carbón a cielo abierto, esto generando emisiones directas de partículas en el aire, lo que puede provocar efectos adversos como enfermedades respiratorias y cardiovasculares en la población expuesta. (Rodríguez, 2024)

Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire en la zona minera han permitido evidenciar episodios elevados de concentraciones de contaminantes de material particulado, atribuibles a actividades propias de la minería de carbón a cielo abierto, como la perforación, la voladura, la carga y el transporte; las cuales generan importantes emisiones de este contaminante hacia la atmósfera (Penchala et al., 2025).

El desarrollo de esta investigación tiene como finalidad evaluar el impacto en la salud humana por exposición al material particulado PM2.5 mediante la utilización de información obtenida del sistema de vigilancia de calidad del aire en el departamento del Cesar, específicamente en la zona minera. Para ello, se hará uso de la herramienta AirQ+, un software diseñado por la Oficina Regional para Europa de la Organización Mundial de la Salud, adoptado institucionalmente por la Organización Panamericana de la Salud y el Ministerio de Salud de Colombia (Minsalud), la cual logra evaluar los impactos en la salud, tanto a corto como a largo plazo, considerando los indicadores de muertes (mortalidad) o de enfermedades (morbilidad) (WHO, 2020).

La pertinencia del presente estudio radica en realizar una evaluación del impacto del material particulado PM2.5 en la salud de la población expuesta a las actividades minera de carbón en el departamento del Cesar mediante la herramienta AirQ+. Las emisiones y la dispersión de este contaminante incrementan la exposición de la población y por ende sus efectos adversos en la salud.

Bajo estas circunstancias, es fundamental analizar el comportamiento del PM2.5 en términos de su variación temporal y espacial, ya que estos patrones permiten identificar

periodos de mayor exposición y zonas con concentraciones elevadas del contaminante. No obstante, en la zona minera del departamento del Cesar se evidencia la ausencia de investigaciones que aborden de manera integral la distribución de este material Particulado PM 2.5 y su relación con la salud de la población expuesta.

Por lo tanto, la caracterización espacio-temporal de las concentraciones de PM2.5, basada en registros provenientes de los sistemas especial de vigilancia de la calidad del aire, se consolida como un insumo fundamental para estimar mortalidad atribuible a este contaminante. Asimismo, la estimación de la mortalidad asociada a la exposición a PM2.5 permite evidenciar los efectos del deterioro de la calidad del aire sobre la población, aportando elementos técnicos para la toma de decisiones en salud pública y gestión ambiental. La generación de este tipo de información adquiere particular importancia en contextos regionales donde aún es limitada la disponibilidad de estudios que articulen la evaluación de contaminantes atmosféricos con indicadores de impacto en salud.

En última instancia, esta investigación se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente con el ODS 3 (Salud y bienestar), al generar evidencia sobre los riesgos derivados de la contaminación atmosférica, y con el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al fortalecer el conocimiento sobre los factores que inciden en la calidad del aire y sus implicaciones para el bienestar de la población.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto en la salud humana asociado a las concentraciones de material particulado PM 2.5 en la zona minera del departamento del Cesar.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar la variación temporal y espacial de las concentraciones de PM2.5 en la zona minera del departamento del Cesar, a partir de datos del sistema de vigilancia de calidad del aire.

Estimar la mortalidad atribuible a la exposición a PM2.5, utilizando la herramienta AirQ+.

Validar las concentraciones locales de PM2.5 con estándares internacionales (OMS) como base para la evaluación del riesgo potencial en la salud de la población expuesta.

4. MARCO REFERENCIAL

A continuación, se exponen los antecedentes relevantes, los fundamentos teóricos del proyecto y los principales conceptos utilizados. Asimismo, se presenta la contextualización del área de estudio y los marcos legales aplicables.

4.1. ANTECENDENTES

(Marín et al., 2025), desarrollaron la investigación titulada "Exposición prolongada a PM2.5 y mortalidad cardiorrespiratoria: un estudio ecológico de pequeñas áreas en cinco ciudades de Colombia", con el objetivo de analizar la relación entre la exposición a largo plazo al PM2.5 y la mortalidad cardiorrespiratoria en Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla y Bucaramanga, identificando patrones espaciales de riesgo y aportando evidencia sobre sus efectos en la salud pública a nivel intraurbano; para ello recopilaron datos de mortalidad cardiovascular y respiratoria entre 2015 y 2019, definieron unidades geográficas a nivel de sectores censales, estimaron la exposición mediante modelos LUR integrando variables de uso del suelo, densidad poblacional, red vial, altitud y meteorología, y aplicaron modelos bayesianos y regresiones binomiales negativas controlando variables demográficas y socioeconómicas. Los productos incluyeron mapas de distribución espacial, tasas suavizadas y modelos de asociación, y los resultados evidenciaron asociaciones significativas entre PM2.5 y mortalidad cardiorrespiratoria en Bucaramanga y Medellín, con incrementos de riesgo por cada aumento de 5 $\mu g/m^3$; los aportes al presente estudio son metodológicos y prácticos, al ofrecer un enfoque sólido y criterios técnicos aplicables para evaluar el impacto del material particulado en contextos urbanos.

(Peñaranda & Rodriguez, 2024), desarrollaron la investigación titulada "Evaluación de la calidad del aire (PM10 y PM2.5) en Valledupar" con la finalidad de analizar el comportamiento de las concentraciones de material particulado antes, durante y después de la pandemia por COVID-19, y evaluar su relación con la movilidad y las condiciones ambientales de la ciudad. Esta investigación se realizó para identificar posibles riesgos para la salud asociados a la exposición a PM10 y PM2.5 y apoyar la gestión local de la calidad del aire. Primero, los autores recopilaron datos del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire correspondientes a los años 2019, 2020 y 2021. Luego, analizaron las concentraciones

promedio y máximas de PM10 y PM2.5, comparándolas con los límites establecidos en la Resolución 2254 de 2017 y con el índice de calidad del aire. Finalmente, evaluaron la influencia de factores como la movilidad vehicular y los puntos de calor, y propusieron un plan de acción para la mitigación de emisiones. Los productos de esta investigación incluyeron tablas, gráficas de comportamiento temporal y un diagnóstico del estado de la calidad del aire en Valledupar. Los resultados mostraron incrementos progresivos en las concentraciones de PM10 y PM2.5, con algunos valores que superaron los límites normativos, especialmente en 2020 y 2021. La investigación es relevante porque define procedimientos para obtener datos de calidad del aire.

(Arregocés et al., 2023) desarrollaron la investigación titulada "Evaluación del riesgo en salud por material particulado: aplicación del modelo AirQ+ en la región Caribe norte de Colombia" con la finalidad de estimar los impactos en la salud asociados a la exposición a PM10 y PM2.5 durante el periodo 2011–2019. Esta investigación se realizó para analizar la relación entre la contaminación atmosférica y la carga de enfermedad en una región influenciada por actividades industriales, crecimiento urbano y el aporte de polvo del Sahara. Primero, los autores recopilaron datos diarios de PM10 de estaciones de monitoreo de la calidad del aire y estimaron las concentraciones de PM2.5 mediante factores de conversión y modelos de dispersión atmosférica. Luego, integraron información poblacional y registros oficiales de salud para caracterizar la población en riesgo. Finalmente, aplicaron el modelo AirQ+ para calcular la proporción atribuible y el número de casos de mortalidad y morbilidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, como EPOC, cardiopatía isquémica, cáncer de pulmón y accidentes cerebrovasculares. Los resultados mostraron que las concentraciones de material particulado superaron los valores de referencia de la OMS y que una fracción significativa de las muertes en la región era atribuible a la exposición prolongada a PM2.5, especialmente en la zona industrial. El aporte de este estudio es de carácter metodológico, al evidenciar la aplicabilidad del modelo AirQ+ para la evaluación del impacto en la salud por exposición a PM2.5.

(Naghan et al., 2022), desarrollaron una investigación en Shahrekord-Irán titulada "Estimación de los efectos de los contaminantes PM2.5, NO_2 y O_3 en la salud de los residentes de Shahrekord mediante el software AirQ+ (2012–2018)", con la finalidad de evaluar los efectos a corto y largo plazo de estos contaminantes atmosféricos sobre la salud de la población

y cuantificar la mortalidad atribuible. Esta investigación se llevó a cabo en tres etapas: en la etapa 1, se recolectaron datos diarios de calidad del aire (PM2.5, NO_2 y O_3), así como información demográfica y de mortalidad entre 2012 y 2018; en la etapa 2, se procesaron los datos y se estimaron riesgos relativos e incidencia basal mediante el modelo AirQ+; y en la etapa 3, se calcularon los efectos en la salud a corto y largo plazo. Los productos de esta investigación fueron bases de datos consolidadas y tablas de proporción atribuible (AP). Los resultados mostraron que el PM2.5 y el NO_2 superaron con frecuencia las directrices de la OMS y fueron responsables de la mayor carga de mortalidad, mientras que el ozono no presentó efectos significativos. Los aportes directos al presente estudio son de carácter metodológico y práctico, seleccionados por su criterio técnico, ya que evidencian la utilidad del modelo AirQ+ para estimar impactos en salud por exposición a PM2.5, al servir como referencia para el diseño metodológico y la estimación de efectos en salud asociados al PM2.5.

(Rojano et al., 2015), Desarrollaron la investigación titulada “Concentración y relación de PST, PM10 y PM2.5 en poblaciones cercanas a minería a cielo abierto: caso Cerrejón Colombia”, con el objetivo de evaluar la calidad del aire y determinar la relación entre las partículas suspendidas totales (PST), PM10 y PM2.5 en centros urbanos aledaños a la explotación minera. En una primera etapa, realizaron la recolección de muestras de PST, PM10 y PM2.5 entre enero y junio de 2012 mediante campañas de monitoreo cada seis días con mediciones de 24 horas, utilizando muestreadores de alto volumen para PST y PM10 y de bajo volumen para PM2.5; en una segunda etapa, analizaron las concentraciones obtenidas en diferentes estaciones ubicadas en poblaciones cercanas a la mina, considerando también variables meteorológicas como la dirección y velocidad del viento; y en una tercera etapa, evaluaron la relación entre las partículas (PST/PM10 y PM2.5/PM10), así como su correlación y distribución espacial en función de la ubicación respecto a los tajos de explotación. Los resultados mostraron variabilidad significativa en las concentraciones de material particulado dependiendo de la ubicación de las estaciones, con mayores niveles en zonas influenciadas por las actividades mineras, evidenciando correlación significativa entre PST y PM10, destacándose además la influencia de las actividades mineras y de las condiciones meteorológicas en la dispersión del material particulado, lo que respalda su aporte al análisis de la calidad del aire en zonas de explotación minera.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Contaminación Del Aire Por PM 2.5

El material particulado forma parte de los contaminantes regulados internacionalmente y está presente en la atmósfera en forma de diminutas partículas sólidas o gotas líquidas. En particular, las PM2.5 corresponden a aquellas con un diámetro aerodinámico igual o inferior a 2,5 micrómetros, lo que las hace imperceptibles a simple vista y considerablemente más delgadas que un cabello humano. Esta característica física explica su elevada capacidad de penetración en las vías respiratorias, donde pueden depositarse en zonas profundas de los pulmones y generar efectos adversos significativos sobre la salud (Rodríguez Hinojosa, 2020)

La contaminación del aire en zonas urbanas, las partículas finas conocidas como PM2.5 han cobrado especial relevancia por su impacto en la calidad ambiental y en la salud de la población. Aunque su monitoreo no es aún sistemático en muchas ciudades, estas partículas se consideran un indicador más preciso del nivel real de contaminación que otras fracciones más gruesas, como las PM10. Esto se debe a su tamaño extremadamente reducido, que les permite permanecer suspendidas en el aire por más tiempo y alcanzar con mayor facilidad el interior del sistema respiratorio (Rodríguez Hinojosa, 2020)

4.2.2. Fuentes De Emisión De Material Particulado

El material particulado puede originarse de forma primaria o secundaria, lo que determina su morfología y composición química. Las partículas primarias se emiten directamente a la atmósfera, principalmente por actividades humanas como el tráfico, la industria y la quema de combustibles, aunque también existen fuentes naturales como el polvo arrastrado por el viento, aerosoles marinos y erupciones volcánicas. En cambio, las partículas secundarias se forman en el aire mediante reacciones químicas entre gases precursores como el SO_2, NO_x, NH_3 y compuestos orgánicos volátiles. Entre las principales fuentes de emisión destacan el tráfico vehicular y la quema de biomasa, siendo el primero predominante en áreas urbanas, tanto por emisiones de escape asociadas a la combustión como por fuentes no de escape, como el desgaste de frenos y llantas (Brito, 2022).

4.2.2.1. Emisiones De PM 2.5 Procedentes De La Minería De Carbón.

La minería de carbón, particularmente a cielo abierto, se asocia con un mayor deterioro de la calidad del aire debido a la generación y liberación de material particulado y

contaminantes gaseosos. Las emisiones de PM2.5 se originan a lo largo de diversas etapas operativas, incluyendo la perforación y voladura, así como las actividades de cargue, descargue y transporte de carbón y material estéril. A esto se suman fuentes difusas como las vías de acarreo, botaderos, pilas de almacenamiento y plantas de manejo, donde la acción mecánica y el viento favorecen la Re suspensión continua de partículas finas.

El material particulado, por su reducido tamaño, presenta alta capacidad de dispersión y permanencia en la atmósfera, lo que incrementa su impacto en áreas circundantes a la operación minera. Su presencia se ha relacionado con efectos adversos en la salud, tales como disminución de la función pulmonar, dificultad respiratoria, hipoxemia y alteraciones en la función cardiovascular, lo que lo posiciona como un contaminante crítico en contextos de explotación carbonífera intensiva (Rojano et al., 2015)

4.2.3. Zona Minera Del Departamento Del Cesar

La Zona Minera del Cesar (ZMC) comprende principalmente los municipios de Becerril, Agustín Codazzi, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y El Paso, donde se concentra la actividad de explotación de carbón del centro del departamento. Dentro de esta zona se encuentran sectores y poblaciones cercanas a los proyectos mineros, como Boquerón, La Loma, Plan Bonito y El Hatillo, que han sido considerados en los procesos de seguimiento de la calidad del aire debido a su proximidad a las actividades mineras y a las vías de transporte del carbón (Minambiente, 2020).

4.2.4. Sistemas De Vigilancia De Calidad Del Aire

En el marco de lo establecido por la Resolución 2254 de 2017 y la Resolución 2154 de 2010, la zona carbonífera del departamento del Cesar dispone de un Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire (SEVCAZCC), administrado por CORPOCESAR, orientado al seguimiento continuo de las condiciones atmosféricas en los centros poblados ubicados dentro del área de influencia minera (Minambiente, 2020).

Este sistema opera mediante una red de catorce (14) puntos de control distribuidos estratégicamente, correspondientes a estaciones de monitoreo que permiten caracterizar el comportamiento del material particulado en la región. En dichas estaciones se dispone de un total de veinticuatro (24) equipos de medición, diseñados para cuantificar concentraciones de

partículas en suspensión, específicamente en las fracciones PM10 y PM2.5, consideradas de mayor relevancia por su impacto en la calidad del aire y la salud pública (Minambiente, 2020).

4.2.5. Efectos De Las Partículas PM 2.5 En La Salud

La materia particulada ha sido reconocida como un agente cancerígeno por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), y diversos estudios han evidenciado sus efectos sobre la salud. En Corea del Sur, una investigación que siguió a más de 87 mil personas durante ocho años analizó la relación entre la exposición prolongada a PM10 y PM2.5 y la mortalidad por distintos tipos de cáncer, encontrando que el cáncer de pulmón fue el más frecuente y que las partículas finas presentaron un elevado riesgo asociado a este tipo de mortalidad. Además, estas partículas no solo se han vinculado con enfermedades oncológicas, sino también con problemas cardiovasculares.

Un estudio realizado en la provincia de Hubei, en China, mostró que la exposición a PM2.5 y PM10 incrementa la probabilidad de muerte por infarto de miocardio, con aumentos porcentuales significativos por cada incremento en la concentración de este contaminante en el aire (Brito, 2022).

4.2.6. Directrices Mundiales De La OMS Sobre La Calidad Del Aire

La carga global de enfermedad atribuible a la exposición a la contaminación atmosférica representa un impacto significativo sobre la salud pública, al estar asociada con el incremento de la morbilidad y mortalidad por patologías cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón, así como con efectos adversos en otros sistemas orgánicos.

En respuesta a esta problemática, diversos gobiernos han orientado sus políticas hacia el mejoramiento de la calidad del aire y la reducción de los riesgos y costos sanitarios derivados de la exposición a contaminantes. En este contexto, la Organización Mundial de la Salud ha establecido, desde 1987, directrices globales basadas en evidencia científica, con el objetivo de servir como referencia técnica para limitar la exposición de la población a contaminantes atmosféricos. Es por esto que, para el material particulado fino (PM2.5), se han definido valores guía que permiten establecer criterios de evaluación y control (OMS, 2021).

Tabla 1.

Niveles recomendados de las directrices sobre la calidad del aire.

Contaminante	Tiempo promedio	Meta intermedia				Nivel de las directrices sobre la calidad del aire
		1	2	3	4	
$MP_{2,5}$, µg/m³	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas[3]	75	50	37,5	25	15

Nota: Tomado de las directrices de la calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021.

4.2.7. AirQ+

Herramienta desarrollada por la Organización Mundial de la Salud, a través de su Oficina Regional para Europa, orientada a la estimación de la carga e impacto en salud asociados a la exposición a la contaminación atmosférica. Su funcionamiento integra metodologías de análisis que permiten evaluar efectos tanto a corto como a largo plazo, considerando contaminantes criterio como el material particulado en sus fracciones PM2.5 y PM10. Adicionalmente, facilita la estimación de riesgos específicos, como la probabilidad de desarrollar cáncer ante exposiciones prolongadas a contaminantes con potencial carcinogénico.

Para ello, el sistema emplea parámetros y funciones concentración–respuestas sustentadas en evidencia epidemiológica consolidada, lo que posibilita la obtención de aproximaciones cuantitativas robustas sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud poblacional (OMS, 2020).

4.2.8. Evaluación De Impacto

La evaluación de impacto en salud permite estimar los efectos que los cambios en los niveles de contaminación del aire pueden generar sobre la población. AirQ+ utiliza información sobre la exposición a contaminantes, la población, los indicadores de salud y el riesgo relativo para cuantificar posibles impactos, como las muertes atribuibles a la exposición (WHO, 2020a)

4.2.8.1. Riesgo Relativo.

El riesgo relativo refleja la magnitud en que se eleva la probabilidad de un efecto adverso a medida que suben los niveles de contaminación. Para calcular esta variación por cada

unidad de incremento del contaminante, se utiliza el coeficiente beta, un parámetro estimado a partir de evidencia epidemiológica previa (WHO, 2020b).

4.2.8.2. Método Log-Lineal.

Método estándar de la OMS para estimar impactos en la salud cuando se trabaja con concentraciones bajas de contaminantes o al evaluar escenarios con distintos puntos de corte (WHO, 2022b)

4.2.8.3. Tasa De Mortalidad por 100,000 Habitantes.

Número total de defunciones registradas en una población determinada a lo largo de un período (usualmente un año) por cada 100,000 habitantes calculados a mitad de dicho período(WHO, 2022a). Matemáticamente se expresa mediante la fórmula:

$$Tasa\ de\ Mortalidad = \left(\frac{Número\ total\ de\ muertes}{Poblacion\ total\ a\ mitad\ de\ año}\right) x\ 100{,}000$$

4.2.9. R OpenAir Para El Análisis De Datos De Calidad Del Aire

OpenAir surgió como una iniciativa orientada a facilitar el análisis de datos de calidad del aire mediante herramientas de código abierto. Su funcionamiento se desarrolla dentro de R, un entorno de programación libre diseñado para el procesamiento estadístico y la representación gráfica de datos. A través de paquetes especializados, R puede adaptarse a diferentes áreas de análisis; entre ellos, OpenAir está orientado específicamente al estudio de variables relacionadas con la calidad del aire, estas herramientas permiten procesar datos meteorológicos y generar representaciones gráficas (Follos Pliego, 2012).

4.3. MARCO CONCEPTUAL

4.3.1. Calidad Del Aire

Estado de la atmósfera en función de la concentración y comportamiento de contaminantes presentes, el cual determina su impacto potencial sobre la salud, los ecosistemas y el entorno (IDEAM, 2020).

4.3.2. Contaminación Atmosférica

Modificación de la composición natural del aire como resultado de la incorporación de múltiples sustancias en diferentes estados físicos, tales como partículas, gases y vapores. En este contexto, se considera contaminante a toda sustancia que, al ser emitida a la atmósfera,

genera una alteración en sus condiciones originales y puede inducir efectos perjudiciales sobre la salud humana, la biota y los materiales (IDEAM, 2020)

4.3.3. Morbilidad

Se interpreta como un indicador epidemiológico que cuantifica la ocurrencia de enfermedades en una población, al establecer la relación entre el número de individuos afectados y el total de personas expuestas al riesgo, permitiendo así dimensionar la magnitud del proceso salud–enfermedad en un contexto determinado (Suescún Montoya, 2013)

4.3.4. Mortalidad

Se define como un indicador epidemiológico que cuantifica la ocurrencia del evento muerte en una población, al relacionar el número de defunciones con el total de individuos expuestos al riesgo, lo que permite evaluar la intensidad de la mortalidad en un contexto determinado (Suescún Montoya, 2013).

4.3.5. Rosa De Viento

Representa gráficamente las direcciones predominantes del viento, su frecuencia y velocidad durante un período determinado. La longitud de los vectores indica la frecuencia con que el viento proviene de cada dirección, mientras que los colores permiten identificar los diferentes rangos de velocidad (CARB, 2019).

4.3.6. Rosa De Contaminación

Relaciona los niveles de concentración de un contaminante con la dirección y frecuencia del viento. Su representación permite identificar las direcciones desde las cuales se presentan mayores concentraciones, aportando información para analizar el posible comportamiento y transporte de los contaminantes en el área de estudio (CARB, 2019).

4.4.MARCO CONTEXTUAL

En el departamento del Cesar, la zona de minera de Carbón a cielo abierto (ZMC), abarca una extensión que se aproxima a los 2.423 km^2 e incluye los municipios de Becerril, Chiriguaná, El Paso y La Jagua de Ibirico. Esta zona pertenece a la ecorregión de Valle del Río Cesar, considerada la más extensa del departamento y donde se concentra gran parte de la actividad económica y de la población. Su ubicación geográfica, entre la Sierra Nevada de

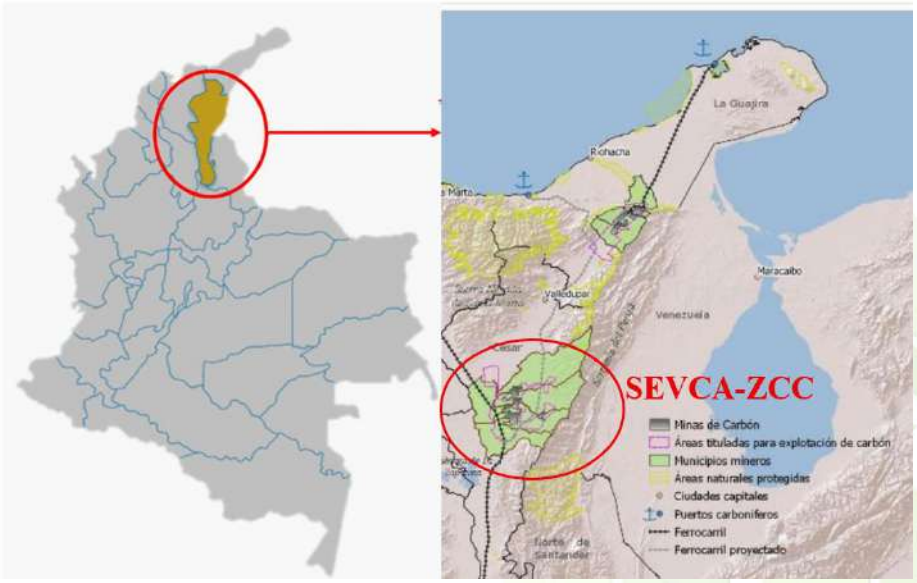
Santa Marta y la Serranía del Perijá, influye en la dinámica atmosférica y en la dispersión de contaminantes (ANLA, 2018).

Para el desarrollo del presente estudio, se emplean datos del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire del Cesar, específicamente de las estaciones que monitorean material particulado PM 2.5. Estas estaciones son: La Loma 2 (ZM3), Boquerón (ZM6), La Aurora (ZM5), Jagua Vía (ZM9), El Hatillo (ZM13) y Costa Hermosa (ZM20). Estas estaciones se encuentran georreferenciadas aproximadamente entre los -73.55° y 73.29° de longitud oeste, y entre los 9.36° y 9.82° de latitud norte, lo que permite cubrir espacialmente las principales áreas de influencia minera (CORPOCESAR, 2022).

De manera complementaria, se incorporaron los registros de las estaciones de monitoreo operadas en el marco de proyectos de explotación minera de carbón a cielo abierto presentes en el área de estudio. Específicamente, para el proyecto LAM 3199 se consideraron las estaciones Casino, Palmeras de Alamosa y Finca Los Matos; mientras que para el proyecto LAM 1862 se incluyeron Hatillo 1, Hatillo 2 y Hatillo 2A.

Figura 1.

Localización geográfica del área de estudio.



Nota: Tomado de Revista Bitácora Urbano Territorial, por los autores, (2022). Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Zona Carbonífera del Cesar - SEVCA-ZCC.

4.5. MARCO LEGAL

Tabla 2.

Normativa aplicable al contexto de la investigación.

NORMATIVA	DESCRIPCIÓN	APLICABILIDAD
Constitución Política de Colombia (1991)	Artículo 79 reconoce el derecho de todas las personas a disfrutar de un ambiente saludable.	Aplica a todas las actividades que puedan afectar el medio a mbiente, lo que puede incluir el manejo del asbesto (Superior De La Judicatura & Administrativa, 2015).
Decreto 948 de 1995	Establece el marco general para la prevención y control de la contaminación atmosférica en Colombia, regulando emisiones de fuentes fijas y móviles, así como los instrumentos de control ambiental (Ministerio del medio ambiente, 1995).	Este decreto se aplica al control de emisiones de material particulado generadas por actividades mineras, permitiendo evaluar el impacto del PM2.5 en la calidad del aire en el Cesar.
Decreto 1697 de 1997	Modifica parcialmente el Decreto 948 de 1995, fortaleciendo los mecanismos de regulación de emisiones contaminantes a la atmósfera (Función Pública, 1997).	Este decreto aplica como complemento normativo para el control de emisiones en actividades industriales y mineras que generan material particulado.

Decreto 979 de 2006	Establece disposiciones sobre la prevención y control de la contaminación del aire, incluyendo medidas para mejorar la calidad del aire (MAVDT, 2006).	Este decreto aplica en la formulación de estrategias para mitigar la contaminación por PM2.5 en zonas mineras del Cesar.
Resolución 610 de 2010	Define los niveles máximos permisibles de contaminantes en el aire, incluyendo por primera vez el PM2.5 (MAVDT, 2010).	Esta resolución se aplica en que permite comparar las concentraciones de PM2.5 en la zona de estudio con los límites legales nacionales.
Resolución 650 del 2010	Establece el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (MAVDT, 2010).	Aplica en la recolección y análisis de datos de PM2.5 en la zona minera, garantizando la validez de los resultados.
Resolución 2154 de 2010	Adopta instrumentos para la gestión de la calidad del aire, incluyendo lineamientos para la evaluación y su impacto (MAVDT, 2010).	Aplica en el análisis técnica del impacto del material particulado sobre la salud humana.
Resolución 2254 de 2017	Actualiza la norma de calidad del aire en Colombia, estableciendo nuevos límites para PM2.5 y el ICA para evaluar riesgos a la salud (MADS, 2017).	Aplica en el análisis de efectos para la salud humana asociado a la exposición a PM2.5.

Nota: Tomado y adaptado de MinAmbiente, MADVT, MADS y Función Pública, por los autores, 2026.

5. MARCO METODOLÓGICO

Dentro de esta sección es importante comprender aspectos claves para la investigación, tales como: la línea, la sublínea y el área temática, el enfoque, el alcance de la investigación, la población de estudio, la muestra poblacional, el diseño de la investigación y por último la estrategia metodológica donde se definen las fases y actividades para que lleve a cabo el cumplimiento de los objetivos propuestos.

5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

Según (El consejo de Facultad de Ingeniería y Tecnológicas, 2021), "lo estipulado en el Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021, se establecen las líneas de investigación para los programas de pregrado pertenecientes a la facultad de Ingeniería y Tecnológicas, aprobado por el Consejo de la facultad de la Universidad Popular del Cesar". Para el programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria se debe indicar:

Línea de investigación: Sostenibilidad y gestión ambiental.

Sublínea de investigación: Gestión integral de la calidad del aire.

Área temática: Métodos de evaluación, monitoreo y seguimientos a la calidad del aire.

5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo con el libro "Metodología de la investigación" (Roberto Hernández Sampieri et al., 2014), este proyecto de investigación cuenta con un enfoque cuantitativo, ya que se centra en un conjunto de procesos que siguen una secuencia y se basa en la recopilación de información mediante herramientas que permita obtener datos sobre las concentraciones de material particulado en el aire PM 2.5 y su relación con los efectos en la salud humana.

5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Según (Roberto Hernández Sampieri et al., 2014), dado que la relación entre la concentración de material particulado PM 2.5 en el aire y sus efectos sobre la salud pública en la zona minera del cesar, es un tema al que no se le ha realizado estudios, la presente investigación se plantea con un alcance exploratorio.

5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio se compone por los habitantes de la zona de minería de carbón a cielo abierto del departamento del Cesar, específicamente en los municipios Becerril, El Paso, Chiriguana, y La Jagua de Ibirico, debido a que en estos territorios se encuentran ubicadas las estaciones tomadas para el estudio.

Según la proyección del DANE para 2025 considerando como base el censo de 2018, Becerril presenta una población de 27.594 habitantes, El Paso de 46.484 habitantes, Chiriguana de 32.915 y La Jagua de Ibirico de 60.223 habitantes, para un total de 167.216 habitantes, lo que equivale aproximadamente al 11% de la población del departamento del Cesar (DANE, 2025).

5.5. MUESTRA POBLACIONAL

La población objeto de estudio corresponde a los habitantes mayores de 30 años de los cuatro municipios del área de influencia, para un total de 64.511 habitantes. La delimitación de este grupo poblacional se realizó de acuerdo con los parámetros establecidos por el software utilizado para la evaluación de impacto.

5.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Según (Roberto Hernández Sampieri et al., 2014), el diseño de la investigación es de tipo no experimental-longitudinal, más específicamente, de tendencia (trend), dado que se busca analizar las concentraciones de material particulado PM 2.5 registradas durante una ventana de observación de cinco años (2021-2025) en la zona minera del departamento del Cesar y de esta forma definir el periodo de tiempo que será utilizado en el estudio. Estos datos facilitan la identificación del comportamiento temporal del contaminante del área de estudio.

5.7. ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS

Fase 1: Análisis De La Variación Temporal Y Espacial De Las Concentraciones De PM2.5 En La Zona Minera Del Departamento Del Cesar, A Partir De Datos Del Sistema De Vigilancia De Calidad Del Aire

Actividad 1.1. Recolección y validación de datos en los municipios que presentan muestreo de PM 2.5 en la zona minera del departamento del Cesar.

Descripción: En esta actividad se llevó a cabo la identificación y localización de datos de calidad del aire en los municipios que contaban con estaciones de monitoreo en la zona minera del departamento del Cesar. Para ello, se realizó una visita técnica a las estaciones La Loma 2, Boquerón, La Jagua Vía, Costa Hermosa, El Hatillo, La Aurora, Hatillo 1, Hatillo 2, Hatillo 2A, Casino, Finca los Matos y Palmeras de Alamosa, con el propósito de verificar la disponibilidad, confiabilidad y condiciones de los datos registrados. Asimismo, se elaboró un mapa con la localización de las estaciones y la delimitación del área de estudio.

Para el desarrollo de esta actividad se contó con recursos logísticos como transporte, hospedaje y alimentación, necesarios para el desplazamiento y permanencia en la zona de estudio. En cuanto a los recursos materiales y equipos, se emplearon instrumentos de registro, equipos de cómputo y herramientas ofimáticas para la organización de la información. El recurso humano estuvo conformado por el investigador.

Actividad 1.2. Crear Una Base De Datos De Las Concentraciones De PM 2.5 A Partir Del Sistema De Vigilancia De Calidad Del Aire.

Descripción: Se realizó la recopilación y organización de datos de concentraciones de PM 2.5 registrados, que correspondían a una ventana de observación de 5 años (2021-2025), para las estaciones de monitoreo que fueron seleccionadas. Teniendo en cuenta, la disponibilidad de datos en el periodo de estudio, se calcularon los promedios de las concentraciones de PM2.5 con el propósito de determinar la estación de cada municipio que sería utilizada para los análisis posteriores.

Posteriormente, se organizó la base de datos en formatos compatibles con el software R y AirQ+ para la posterior evaluación del impacto en la salud. Como recursos humanos, se contó con los investigadores principales y en cuanto a recursos materiales, se utilizó equipos de cómputo y acceso a plataformas institucionales.

Actividad 1.3. Análisis estadístico de la variación temporal y espacial de las concentraciones de PM 2.5 en la zona minera del departamento de Cesar.

Descripción: Se desarrolló un análisis de las concentraciones de PM 2.5 registradas en las estaciones, con el fin de evaluar su comportamiento temporal y su relación con las condiciones meteorológicas. Inicialmente, se aplicaron análisis estadísticos y temporales de las concentraciones, complementados con rosas de vientos y gráficos polares.

Posteriormente, se realizó un análisis espacial, mediante la integración de las concentraciones, los patrones de vientos y la ubicación de posibles fuentes de emisión identificadas mediante imágenes satelitales. Como recursos humanos, se contó con los investigadores principales y en cuanto a recursos materiales, se utilizaron equipos de cómputo.

Fase 2: Estimación De La Mortalidad Atribuible A La Exposición A PM2.5, Utilizando La Herramienta AirQ+

Actividad 2.1. Ingreso De Datos En El Software AirQ+ Para La Evaluación de Impacto.

Descripción: En primer lugar, se realizó la configuración de los parámetros de entrada en el software, definiendo el contaminante de interés, el evento en salud, el periodo de análisis y los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

Posteriormente, se ingresaron los datos de concentración de PM2.5 y demás parámetros requeridos por el modelo, con el fin de generar la evaluación de impacto asociado a la exposición al material particulado PM2.5 en la zona minera del departamento del Cesar.

Finalmente, se dispuso como recurso humano de los investigadores, así como acceso a bases de datos oficiales y al software AirQ+, asegurando el desarrollo adecuado de la actividad.

Actividad 2.2. Análisis de los resultados de evaluación de impacto obtenidos mediante el software AirQ+.

Descripción: En primer lugar, se realizó la revisión de los resultados generados por el software AirQ+, teniendo en cuenta los indicadores de la evaluación de impacto, como el número de muertes atribuibles, el riesgo relativo y la fracción atribuible, con el propósito de identificar los resultados que estuvieran vinculados a la exposición a PM2.5.

Posteriormente, se llevó a cabo la interpretación de los resultados obtenidos, determinando el impacto estimado de la exposición a PM2.5 sobre la mortalidad por todas las causas naturales en adultos mayores de 30 años en la zona minera del departamento del Cesar.

Para el desarrollo de esta actividad, como recursos humanos, se contó con los investigadores principales y, en cuanto a recursos materiales, se utilizaron equipos de cómputo

Fase 3: Validación De Las Concentraciones Locales De PM2.5 Con Estándares Internacionales (OMS) Para Evaluar El Riesgo Potencial En La Salud De La Población Expuesta

Actividad 3.1. Aplicación Del Modelo AirQ+ Bajo Escenario De Normativa Local Y Estándares Internacionales De La OMS.

Descripción: Inicialmente, se identificaron los valores de referencia correspondientes a la normativa nacional vigente sobre calidad del aire, así como los valores guía establecidos por la OMS. Posteriormente, estos valores se utilizaron como concentraciones de entrada en el software AirQ+, configurando dos escenarios diferenciados que permitieron estimar el indicador de impacto en la salud, en este caso, la mortalidad atribuible.

En primer lugar, se configuró el escenario base utilizando el límite máximo permisible anual vigente de 25 µg/m³. Posteriormente, se evaluó un segundo escenario prospectivo adoptando el estándar de 15 µg/m³, el cual entrará en rigor nacional a partir del 1 de enero de 2030.

Finalmente, se hizo uso de equipos de cómputo junto con el software AirQ+, apoyado en herramientas ofimáticas para la organización de los datos. El recurso humano estuvo conformado por los investigadores, quienes adaptaron los parámetros del modelo a cada escenario normativo, permitiendo una comparación estructurada entre los niveles permitidos a nivel nacional y las recomendaciones internacionales.

Actividad 3.2. Evaluación De Resultados Y Formulación De Estrategias A Partir De Los Modelos Aplicados.

Descripción: En esta actividad se realizó la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo AirQ+ bajo los escenarios de normativa local y estándares internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación de los resultados de la comparación obtenida bajo los límites permisibles establecidos en la normativa local y aquellos derivados de los valores guía de la OMS, lo cual permitió evidenciar diferencias en los niveles de riesgo en salud. A partir de este análisis, se interpretaron los resultados desde un enfoque epidemiológico para establecer la magnitud del impacto en la salud pública.

Finalmente, con base en los hallazgos obtenidos, se formularon estrategias orientadas a la gestión y reducción del riesgo en salud. Para ello, se emplearon quipos de cómputo, contando con los investigadores como recurso humano principal, quienes aplicaron criterios técnicos para la interpretación de resultados y la propuesta de medidas ajustadas al contexto del área de estudio.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM2.5 EN LA ZONA MINERA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR, A PARTIR DE DATOS DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE

El desarrollo de esta fase metodológica aborda el diagnóstico integral de la calidad del aire por PM 2.5 en la zona minera del Cesar. Para ello, se inició con la recolección, caracterización y georreferenciación de las estaciones del área de estudio. Posteriormente, se consolidó la base de datos quinquenal (2021-2025), con el fin de seleccionar los puntos con mayores concentraciones y estructurar la información en formatos aptos para las plataformas R y AirQ+. Finalmente, se integraron análisis estadísticos, temporales y espaciales que vinculan las concentraciones observadas con factores meteorológicos y fuentes de emisión.

6.1.1. Recolección Y Validación De Datos En Los Municipios Que Presentan Muestreo De PM 2.5 En La Zona Minera Del Departamento Del Cesar

Para el desarrollo de esta actividad, se realizó la recolección, organización y consolidación de la información técnica correspondiente a la red de estaciones de monitoreo de material particulado PM 2.5 ubicadas en la zona minera del departamento del Cesar. Esta información permitió identificar los puntos de monitoreo disponibles y establecer las características básicas de las estaciones utilizadas para el seguimiento de la calidad del aire en los municipios objeto de análisis.

La recopilación de estos datos constituye un insumo necesario para el desarrollo de las actividades posteriores, debido a que permite reconocer la ubicación de las estaciones y los puntos donde se realiza la medición de las concentraciones de PM 2.5. De esta manera, se organizó la información asociada a cada estación, verificando los datos de identificación y localización disponibles para los puntos de medición considerados en el estudio.

A continuación, se presenta la caracterización de los puntos de medición distribuidos en los municipios de La Jagua de Ibirico, El Paso, Becerril y Chiriguaná. El cuadro contiene el nombre de la estación, el código de identificación y las coordenadas geográficas de latitud y longitud, información que permite establecer la ubicación de cada punto de monitoreo dentro

de la zona de estudio. Estos datos sirven como referencia para relacionar posteriormente las mediciones de PM 2.5 con el municipio y la estación en la que fueron obtenidas.

Tabla 3.

Distribución municipal y georreferenciación de la red de monitoreo de calidad del aire PM 2.5.

MUNICIPIO	ESTACIONES	ID	COORDENADAS	
			Latitud	Longitud
La Jagua de Ibirico	Boquerón	ZM06	9.631.166	-73.422.944
	La Jagua Vía	ZM09	9.565.527	-73.332.638
El Paso	Costa Hermosa	ZM20	9.623.667	-73.586.389
	El Hatillo	ZM13	9.648.744	-73.570.047
	La Loma 2	ZM03	9.615.18	-7.359.015
	Hatillo 1	LAM 1862	9.612.94	-73.591.307
	Hatillo 2	LAM 1862	9.647.438	-73.583.827
	Hatillo 2A	LAM 1862	9.646.306	-73.572
	Casino	LAM 3199	9.648.167	-73.521.556
Becerril	Finca los Matos	LAM 3199	966.735	-73.542.203
	Palmeras de Alamosa	LAM 3199	9.660.333	-73.559.928
Chiriguaná	La Aurora	ZM05	9.466.361	-73.550.777

Nota: Adaptado de Sistema de Información de Calidad del Aire (SISAIRE), por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Elaborado por los autores, 2026.

Posteriormente a la caracterización de las estaciones de monitoreo, se realizó la representación cartográfica de los puntos de medición sobre la zona de interés, con el propósito de visualizar su distribución espacial dentro del área de estudio. Esta representación permite complementar la información presentada en el cuadro anterior, facilitando la identificación de la ubicación de cada estación y su relación espacial con los municipios que hacen parte del análisis.

Para la elaboración del mapa se utilizó la plataforma Google Earth, mediante la cual se ubicaron los puntos correspondientes a las estaciones de monitoreo de PM 2.5 a partir de sus respectivas coordenadas geográficas. Asimismo, se delimitó el polígono correspondiente al área de estudio, comprendida por los municipios de La Jagua de Ibirico, El Paso, Becerril y

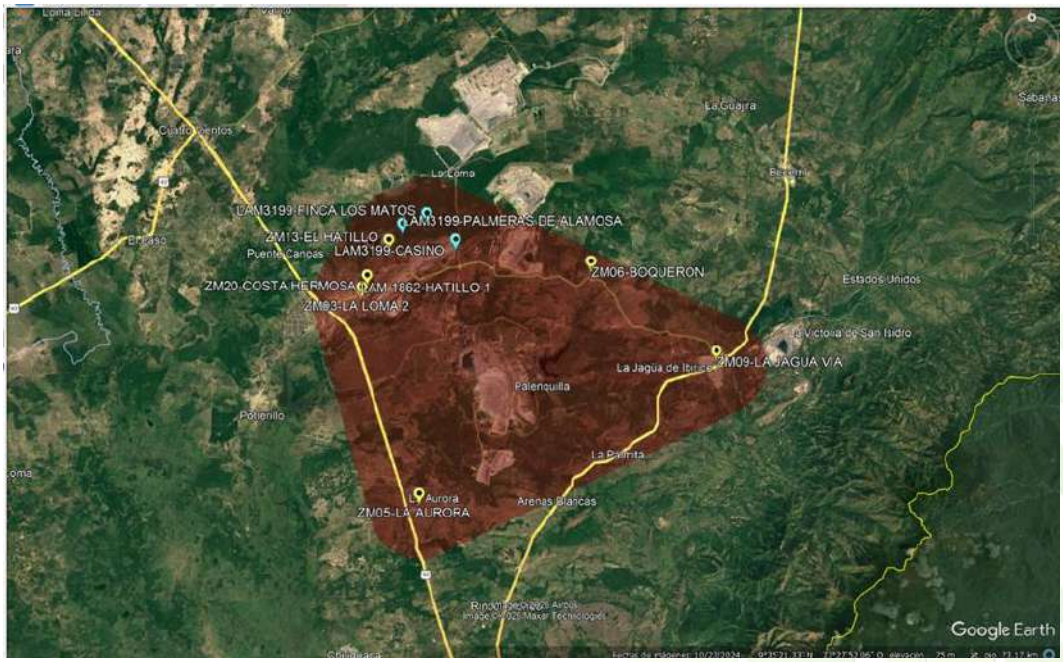
Chiriguaná, permitiendo representar de manera conjunta el territorio considerado para el desarrollo de la actividad.

La representación cartográfica permite observar la distribución geográfica de las estaciones de monitoreo y su ubicación dentro del área de influencia definida para el estudio. De igual manera, facilita la identificación de la relación espacial de estos puntos con las poblaciones cercanas, las explotaciones mineras a cielo abierto y las principales vías de la región, elementos que hacen parte del contexto territorial en el que se realizan las mediciones de calidad del aire.

De esta manera, el mapa constituye un complemento de la información técnica previamente recopilada, ya que permite pasar de una descripción individual de las estaciones a una visualización conjunta de su ubicación dentro del territorio estudiado. Esta representación espacial sirve como referencia para las etapas posteriores de análisis de los datos de concentración de PM 2.5 obtenidos en los diferentes puntos de monitoreo.

Figura 2.

Localización espacial de las estaciones de monitoreo de PM 2.5 en la zona minera del Cesar.



Nota: Delimitación del polígono de estudio y distribución espacial de las estaciones de monitoreo. Elaboración propia a través de Google Earth Pro, (2026).

6.1.2. Crear Base De Datos De Las Concentraciones De PM 2.5 A Partir Del Sistema De Vigilancia De Calidad Del Aire

Una vez recopilados y validados los datos, se realizó la siguiente tabla para detallar las estaciones, su disponibilidad y el número de registros durante una ventana de observación de cinco años (2021-2025).

Tabla 4.

Caracterización de las estaciones del SVCA.

SVCA	ESTACIÓN	VENTANA DE OBSERVACIÓN	DISPONIBILIDAD DE DATOS	NÚMERO DE REGISTROS
CORPOCESAR	LA LOMA 2	2021-2025	**Último monitoreo:** septiembre de 2024. **Datos faltantes:** julio y agosto de 2022.	611
	LA AURORA	2021-2025	**Último monitoreo:** agosto de 2024 **Datos faltantes:** julio y agosto de 2022, y noviembre de 2023.	608
	BOQUERÓN	2021-2025	**Último monitoreo:** septiembre de 2024.	617
	LA JAGUA VÍA	2021-2025	**Último monitoreo:** junio de 2025	858
	EL HATILLO	2021-2025	**Último monitoreo:** junio de 2025. **Datos faltantes:** enero y febrero de 2021.	647
	COSTA HERMOSA	2021-2025	Datos completos.	890
LAM1862 EXPLOTACIÓN MINERIA DE CARBON A CIELO ABIERTO	HATILLO 1	2021-2025	**Último monitoreo:** noviembre de 2025. **Datos faltantes:** enero, febrero, marzo, abril y mayo de 2021; abril, mayo, junio, julio y agosto de	1683
	HATILLO 2	2021-2025	**Último monitoreo:** octubre de 2024. **Datos faltantes:** enero, febrero, marzo, abril y mayo de 2021; abril, mayo, junio, julio de 2024.	1503
	HATILLO 2A	2021-2025	Solo existen datos entre noviembre de 2024 hasta noviembre de 2025.	423
LAM3199 PROYECTO DE EXTRACCIÓN DE CARBÓN A CIELO ABIERTO	CASINO	2021-2025	**Último monitoreo**: noviembre de 2025. **Datos faltantes:** no existen datos de 2021; enero de 2022; abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre de 2024.	1420
	FINCA LOS MATOS	2021-2025	**Último monitoreo:** diciembre de 2024. **Datos faltantes:** no existen datos de 2021; enero y febrero de 2022, mayo, junio,julio, agosto, septiembre, octubre de 2024.	923
	PALMERAS DE ALAMOSA	2021-2025	Solo existen datos entre noviembre de 2024 y noviembre de 2025.	425

Nota: Adoptado por los autores con base a datos de Servicio de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), (2026).

Posteriormente, se calculó el promedio de los datos disponibles durante la ventana de observación (2021-2025) para las doce estaciones con el fin de seleccionar aquellas que registraran la concentración más alta de PM2.5 para los siguientes municipios: La Jagua de Ibirico, El Paso, Becerril y Chiriguaná (Ver ANEXO 1).

Tabla 5.

Promedio de estaciones de SCVA.

MUNICIPIO	PROMEDIO	
LA JAGUA DE IBIRICO	BOQUERÓN	6,22
	JAGUA VIA	**14,17**
EL PASO	EL HATILLO	15,71
	COSTA HERMOSA	**16,13**
	LA LOMA 2	11,85
	HATILLO 1	11,71
	HATILLO 2	6,59
	HATILLO 2A	9,42
	CASINO	10,08
BECERRIL	FINCA LOS MATOS	5,94
	PALMERAS DE ALAMOSA	**9,36**
CHIRIGUANÁ	LA AURORA	**7,53**

Nota: Elaborado por los autores con datos provenientes del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), (2026).

Con base a los resultados presentados en la tabla 4, las estaciones seleccionadas para los análisis posteriores son las siguientes: La Jagua Vía, con un promedio de 14,17 para el municipio de La Jagua de Ibirico; Costa hermosa, con un promedio de 16,13 para El Paso; Palmeras de Alamosa, con un promedio de 9,36 para Becerril; y La Aurora, con un promedio de 7,53 para Chiriguaná.

Luego, se estructuraron las bases de datos necesarias para el análisis, las cuales se dividieron de dos formas:

- Base de datos para el software R: Se elaboraron de forma individual y por año para las estaciones con los promedios más altos de PM2.5 para cada municipio. Las bases de datos incluyen variables de fecha, PM2.5, velocidad del viento (WS) y dirección del viento (WD) (Ver ANEXO 2). Estás fueron utilizadas para la creación de rosas de vientos y gráficos polares (Polar Plots).

Figura 3.

Ejemplo de la estructura utilizada para la base de datos en software R.

DATE	WS	WD	PM2.5
2021-12-31	5,1	30	5
2021-12-28	4,4	203	4,95
2021-12-25	4,4	195	4,55
2021-12-22	4,3	228	2,87
2021-12-19	4,9	161	5,22
2021-12-16	4,5	210	5,71
2021-12-13	5,7	186	11,84
2021-12-10	6,6	19	5,54
2021-12-07	3,6	55	7,63
2021-12-04	3,7	219	5,55
2021-12-01	3,9	202	6,95
2021-11-28	3,9	297	2,94
2021-11-25	3,5	357	3,15
2021-11-22	5,1	211	5,19
2021-11-19	5,4	195	6,42
2021-11-16	3,9	191	9,5
2021-11-13	4,2	175	7,18

Nota: Capture de pantalla de la base de datos, adaptado por los autores, 2026.

- Base de datos para el software AirQ+: Se estructuraron individualmente y por año para las estaciones con mayor concentración de PM2.5. Incluye los datos de fecha y PM2.5, adaptadas al formato CSV (valores separados por coma) requerido por el software para la realizar la evaluación de impacto (Ver ANEXO 3).

Figura 4.

Ejemplo de la estructura de la base de datos para el software AirQ+.

DATE	PM2.5
31/12/2021	5
28/12/2021	4,95
25/12/2021	4,55
22/12/2021	2,87
19/12/2021	5,22
16/12/2021	5,71
13/12/2021	11,84
10/12/2021	5,54
7/12/2021	7,63
4/12/2021	5,55
1/12/2021	6,95
28/11/2021	2,94
25/11/2021	3,15
22/11/2021	5,19
19/11/2021	6,42
16/11/2021	9,5
13/11/2021	7,18
10/11/2021	11,48
7/11/2021	5,97

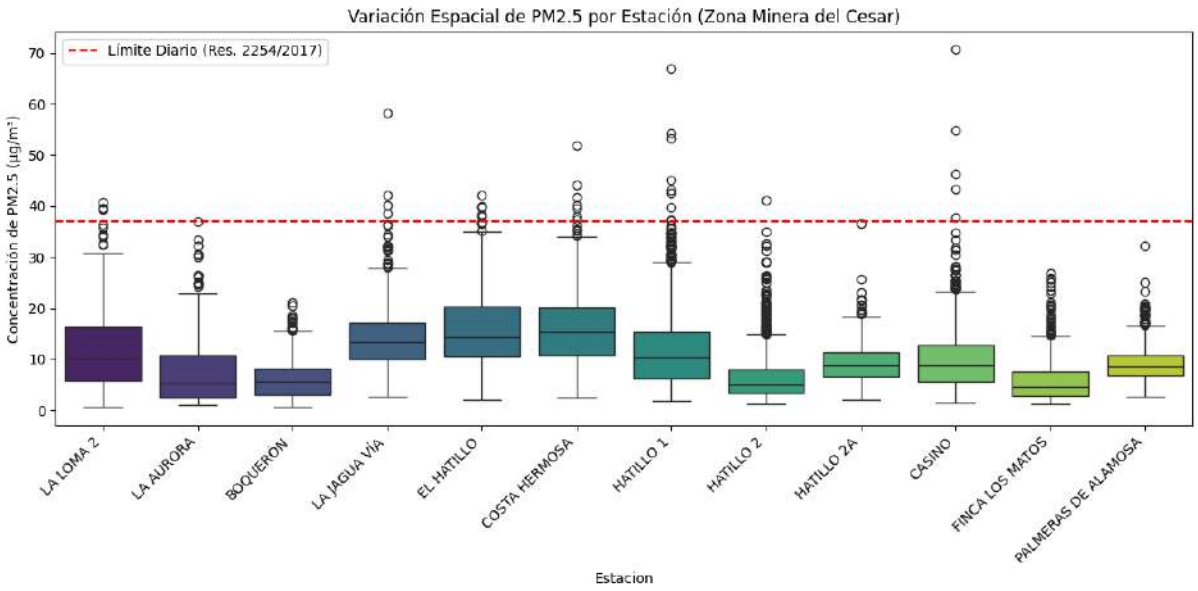
Nota: Capture de pantalla de la base de datos, adaptado por los autores, (2026).

6.1.3. Análisis Estadístico De La Variación Temporal Y Espacial De Las Concentraciones De PM 2.5 En La Zona Minera Del Departamento De Cesar

Para la elaboración de esta actividad, se realizó una gráfica de la variación espacial por estación (12 en total), luego se elaboraron los análisis temporal y espacial para las estaciones seleccionadas: La Jagua Vía, Costa Hermosa, La Aurora y Palmeras de Alamosa. Para ello, se tuvo en cuenta una ventana de observación de cinco años (2021 – 2025), sin embargo, debido a la disponibilidad de datos de cada estación, el análisis se desarrolló considerando únicamente los años que contaron con registros disponibles para cada una. Además, se utilizó como apoyo las rosas de vientos y gráficos polares (Polar Plots) creadas en el software R (Ver ANEXO 4), para relacionar las concentraciones de PM2.5 con el comportamiento del viento. Asimismo, se utilizaron imágenes satelitales con el fin de identificar posibles fuentes de emisión y las características del entorno.

Figura 5.

Distribución espacial y análisis de excedencias de material particulado fino (PM2.5) en la red de monitoreo de la zona minera del Cesar.



Nota: Elaborado por los autores con datos provenientes del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), (2026).

La distribución espacial de las concentraciones diarias de material particulado fino (PM2.5) en la red de vigilancia revela una marcada heterogeneidad en el corredor minero del departamento del Cesar (Véase Figura 5). A través del diagrama de cajas y bigotes (boxplot), se evaluó la tendencia central, la dispersión y la presencia de eventos críticos en las 12 estaciones de monitoreo durante el periodo de estudio.

6.1.3.1. Tendencia Central y Dispersión Acumulada.

El análisis de los rangos intercuartilicos (RIC) y las medianas permite dividir la red en dos dinámicas ambientales distintas. Por un lado, las estaciones Costa Hermosa, El Hatillo y La Jagua Via presentan las cajas más amplias y las medianas más elevadas (oscilando en tono a los 13-16 µg/m³), lo que indica una carga de contaminación continua y una mayor variabilidad diaria en la exposición crónica. Por el contrario, estaciones de control o periféricas como Boquerón, La Aurora y Finca Los Matos exhiben un comportamiento sumamente compacto,

con medianas bajas (menores a 6 µg/m³) y un 75% de sus datos (tercer cuartil) manteniéndose por debajo de los 10 µg/m³, operando como áreas de menor estrés ambiental o zonas de fondo.

6.1.3.2.Eventos Episódicos y Valores Atípicos (Outliers).

En este análisis se pude observar la presencia sistemática de valores atípicos superiores (representados por los círculos por encima de los bigotes superiores). Estos puntos evidencian eventos agudos de contaminación o picos de emisión por resuspensión de materia particulado PM 2.5 que escapan a la dinámica habitual de las estaciones. Este comportamiento episódico es especialmente significativo en la estación Casino, la cual, a pesar de tener una mediana moderada, registra la mayor dispersión de datos extremos de toda la red, alcanzando el valor máximo absoluto del periodo (aproximadamente 70.6 µg/m³). Una situación similar de picos agudos se observa en las estaciones Hatillo 1 (máx. 67.0 µg/m³) y La Jagua Vía (máx. 58.2 µg/m³).

6.1.3.3. Evaluación del Cumplimiento Normativo (Resolución 2254 de 2017).

Al contrastar la distribución estadística con el límite máximo permisible diario de 37 µg/m³ (establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la Resolución 2254 de 2017 e ilustrado con la línea roja discontinua), se constata que la mayor parte del tiempo las estaciones operan dentro del marco legal. Sin embargo, las colas superiores de la distribución confirman la ocurrencia de excedencias normativas.

Las violaciones al estándar diario de calidad del aire no se distribuyen de manera homogénea, sino que se focalizan espacialmente en los receptores ubicados en Hatillo 1, Costa Hermosa, Casino y El Hatillo. Estos picos de PM2.5, al estar compuestos por partículas con diámetro aerodinámico capaz de penetrar la barrera alveolar, configuran un factor de riesgo representativo tanto para la salud pública de las comunidades colindantes como para las condiciones de salud y seguridad en el trabajo (SST) del personal expuesto en el área de Influencia directa de la actividad minera.

6.1.3.4. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2021).

6.1.3.4.1. Análisis Temporal.

A partir de la extracción de datos y la interpretación de las gráficas polares, se evidencia una estacionalidad muy marcada en la concentración de PM2.5, intrínsecamente ligada al régimen de vientos.

Enero, marzo, y diciembre: Durante estos meses, los vientos predominantes provienen fuertemente del Este (E) y Este-Sureste (ESE), con velocidades altas (medias mensuales de 8 a 10 m/s y ráfagas de hasta 18 m/s). Es en este periodo donde se registran los mayores impactos en la calidad del aire. Marzo es el mes más crítico, con promedios superiores a 23 µg/m³ y picos máximos que alcanzan aproximadamente los 40 µg/m³.

A partir de abril, con una excepción anómala en julio y parte de noviembre, donde los vientos rotan nuevamente hacia el Este. No obstante, al presentarse con velocidades significativamente menores (aprox. 5 m/s), no generan los episodios críticos de resuspensión de PM2.5 observados a principios de año. Los vientos predominantes rotan hacia el Suroeste (SO) y Oeste-Suroeste (OSO), y la velocidad media del viento desciende significativamente (promediando 3.9 a 4.5 m/s). Durante este periodo, las concentraciones medias de PM2.5 caen a niveles de entre 8 y 12 µg/m³.

La gráfica anual muestra un pico de PM2.5 que supera los 20 µg/m³. Sin embargo, este valor anual enmascara severamente los picos críticos de febrero y marzo. Al observar el Polar Plot anual, la mancha roja hacia el Este parece diluida en comparación con los perfiles individuales de marzo; esto significa que el régimen de bajas concentraciones de mediados de año aplana la curva estadística, ocultando eventos agudos de exposición para las comunidades aledañas a la estación durante el primer trimestre.

6.1.3.4.2. Análisis Espacial.

Al relacionar las gráficas polares con el mapa satelital del área de estudio, considerando un radio de 4 km alrededor de la estación, se obtienen las siguientes conclusiones.

Las gráficas polares de febrero, marzo y el consolidado anual muestran que las concentraciones más altas de PM 2.5 se presentan principalmente cuando los vientos provienen del Este y alcanzan altas velocidades.

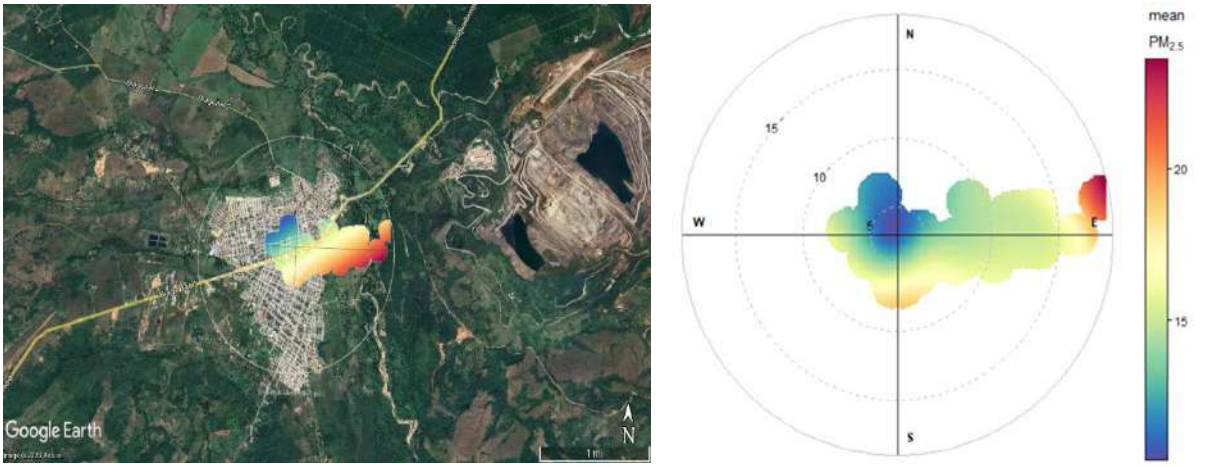
Al observar la dirección Este desde la estación "ZM09 La Jagua vía", a una distancia aproximada de 3 a 4,5 km, ubicada justo en el borde y por fuera de la delimitación, se identifica en el mapa el complejo minero a cielo abierto La Jagua. En esta zona se observan áreas con poca vegetación, botaderos de estéril y tajos mineros activos, los cuales pueden constituir una fuente importante de material particulado fino en el área de estudio.

En el gráfico Polar, especialmente en marzo, las mayores concentraciones de PM 2.5 no se presentan cerca del centro de la gráfica, sino hacia las zonas más alejadas, asociadas con velocidades del viento superiores a 10 m/s. Esto sugiere que las concentraciones registradas en la estación pueden estar relacionadas con fuentes ubicadas a cierta distancia. En estas condiciones, los vientos fuertes pueden transportar y mantener en suspensión el material particulado proveniente de los tajos de la Mina La Jagua, permitiendo que este recorra aproximadamente 3 a 4 km hasta llegar a la estación antes de dispersarse.

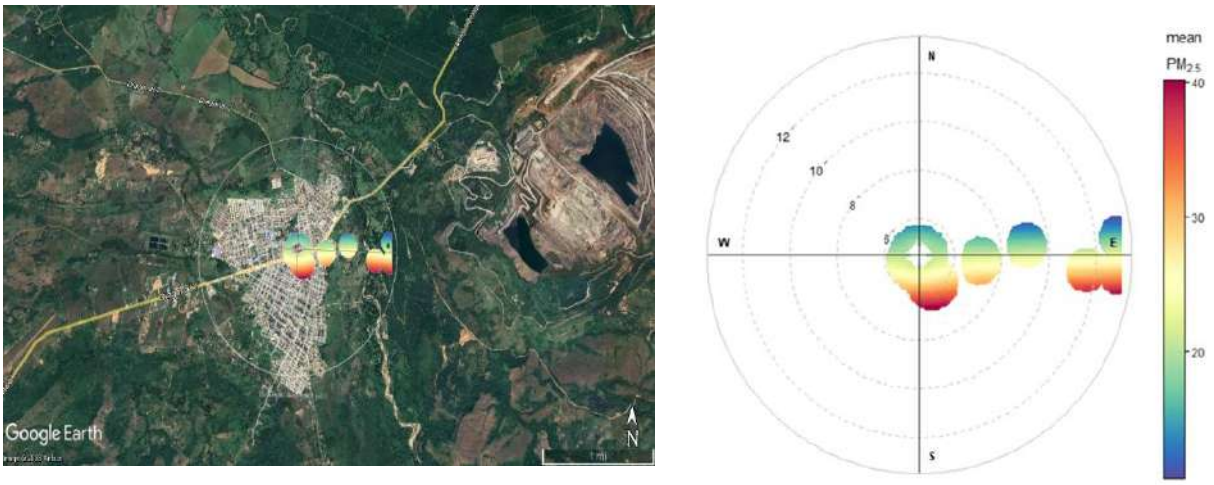
Entre junio y septiembre, cuando los vientos provienen principalmente del Suroeste (SO), los niveles de PM 2.5 disminuyen. El mapa satelital muestra que en esta dirección se encuentra el casco urbano de La Jagua de Ibirico. Por esta razón, los aportes durante este periodo pueden estar relacionados con la resuspensión de polvo por el tráfico urbano, las vías no pavimentadas y las emisiones vehiculares. Se trata de fuentes que pueden contribuir de manera continua a las concentraciones de PM 2.5 aunque con una intensidad menor en comparación con las asociadas a la actividad minera.

Figura 6.

Gráficos polares de concentración de P M 2.5 en la estación de monitoreo La Jagua Vía (2021).



(b) *Patrón y distribución anual acumulada durante el periodo 2021.*



(a) *Comportamiento y concentración espacial durante el mes de marzo de 2021.*

Nota: Estos gráficos explican la variación conjunta de la concentración media de PM 2.5 en función de la velocidad y la dirección del viento, lo que permite identificar la procedencia y la dinámica de transporte de los contaminantes hacia la estación. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.5.Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2022).

6.1.3.5.1. Análisis Temporal.

El análisis de las gráficas polares evidencia un comportamiento estacional marcado, en el que los cambios en la dirección y velocidad del viento se relacionan con las variaciones en las concentraciones de PM 2.5. Este comportamiento puede quedar parcialmente oculto al considerar únicamente el promedio anual.

Enero-marzo: representa el periodo más crítico del año. Durante estos meses predominan los vientos provenientes del Este (E), con velocidades que alcanzan entre 9 y 10 m/s. En este periodo se registran las mayores concentraciones de PM 2.5, especialmente en marzo, cuando el Polar Plot muestra picos superiores a 40 µg/m³.

Abril-septiembre: los vientos cambian principalmente hacia los sectores Suroeste (SO) y Sur (S), acompañados de una disminución en su velocidad media. Con este cambio en la dirección del viento, las concentraciones de PM 2.5 disminuyen considerablemente. Septiembre presenta los valores más bajos del año, con picos cercanos a 12 µg/m³.

Octubre-noviembre: predominan nuevamente los vientos provenientes del Oeste (O) y Suroeste (SO). Posteriormente, en diciembre, los vientos provenientes del Este (E) vuelven a predominar, coincidiendo con un aumento de las concentraciones de PM 2.5 que superan nuevamente los 22,5 µg/m³.

El Polar Plot anual muestra un pico global cercano a 30 µg/m³. Sin embargo, el análisis mensual permite observar que los episodios de mayor concentración, como los registrados en marzo, quedan menos representados al considerar el comportamiento anual. Por ello, el promedio anual puede ocultar periodos de exposición elevada que se presentan durante determinados meses, especialmente en el primer trimestre.

6.1.3.5.2. Análisis Espacial

Al relacionar las gráficas polares con la ubicación de las principales fuentes identificadas en el mapa satelital, dentro del radio de 4 km alrededor de la estación, se observan las siguientes relaciones:

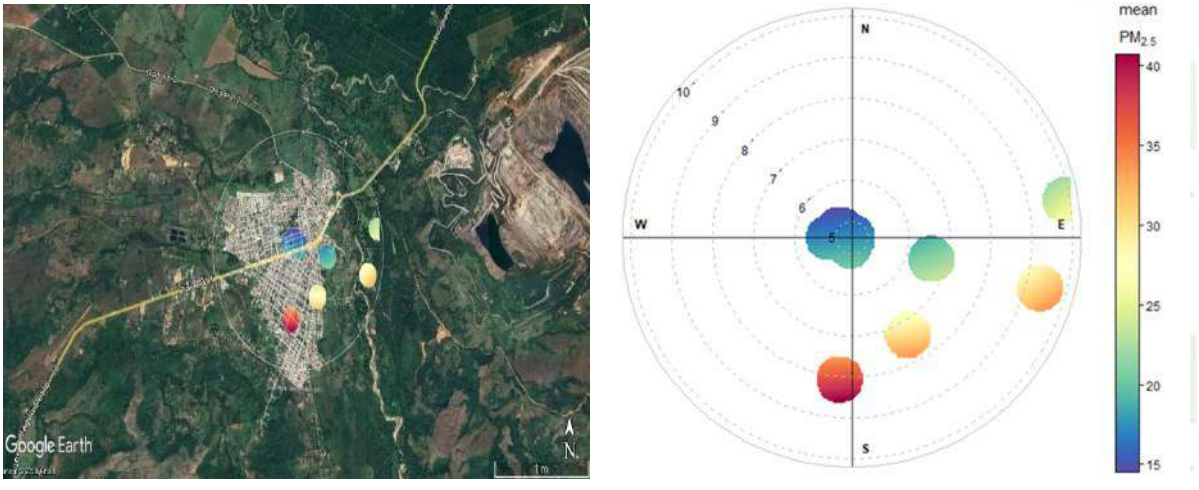
Los vientos provenientes del Este (E) y Noreste (NE) se relacionan con las mayores concentraciones de PM 2.5 registradas en la estación. Esta dirección coincide con la ubicación de las operaciones a cielo abierto de la mina La Jagua. En esta zona se observan áreas con poca cobertura vegetal y superficies expuestas producto de las actividades mineras, lo que puede favorecer la emisión y resuspensión de material particulado.

Por otro lado, cuando el viento proviene del Suroeste (SO), como ocurre en junio y julio, las concentraciones de PM 2.5 son significativamente menores. El mapa muestra que en esta dirección se encuentra el casco urbano de La Jagua de Ibirico. Los aportes asociados con este sector pueden estar relacionados con el tráfico vehicular, la resuspensión de polvo en las vías y otras actividades urbanas, aunque presentan una menor intensidad en comparación con los aportes asociados a la actividad minera.

La mina se encuentra aproximadamente a 2–3 km de la estación. Los Polar Plots de enero y febrero muestran que las mayores concentraciones de PM 2.5 se presentan asociadas con vientos de alta velocidad, superiores a 6 m/s. Estas condiciones favorecen el transporte de las partículas a mayores distancias y reducen su deposición durante el recorrido, permitiendo que el material particulado proveniente de la zona minera alcance la estación y el área poblada cercana.

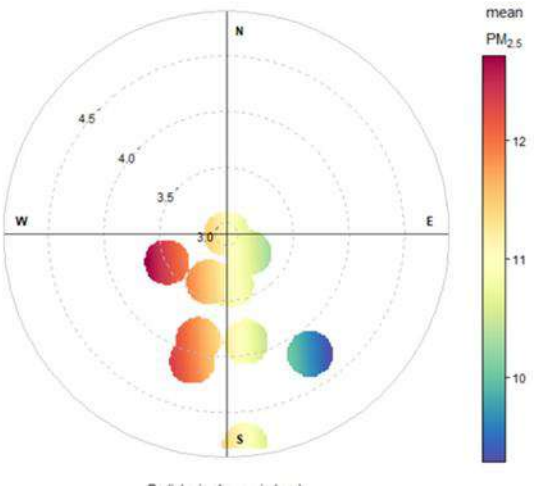
Figura 7.

Contraste temporal de la contaminación por PM2.5: el mes más crítico vs. el mes más limpio (2022).



(a) *Altos picos PM 2.5 durante el mes de marzo de 2022.*





(b) *Bajos picos de PM 2.5 durante el mes de septiembre de 2022.*

Nota: En la gráfica (a) se observa que cuando el viento sopla fuerte desde el Este y Sureste, trae mucha contaminación; en cambio, la gráfica (b) muestra cómo al cambiar el viento hacia el Sur/Suroeste, el aire se limpia casi por completo. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.6. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2023).

6.1.3.6.1. Análisis Temporal.

El análisis de las gráficas polares revela un comportamiento estacional fuertemente marcado, dividido en dos regímenes principales:

Enero - Marzo: Este periodo presenta las condiciones más adversas para la calidad del aire. Los vientos predominan casi de manera absoluta desde el Este (E), alcanzando altas velocidades medias (7.6 a 9.9 m/s). Las concentraciones de PM2.5 alcanzan sus máximos anuales, especialmente en febrero, donde el gráfico polar registra picos que rondan los 30 µg/m³.

Abril - Noviembre: A partir de abril, se observa una rotación de los vientos hacia el Suroeste (SW), volviéndose la dirección predominante entre junio y noviembre. Las velocidades del viento disminuyen considerablemente (medias de 3.9 a 4.8 m/s) y las concentraciones de PM2.5 caen drásticamente, con picos mensuales que rara vez superan los 18 µg/m³. Octubre se presenta como el mes con la mejor calidad del aire (picos cercanos a 14 µg/m³).

Diciembre: Se observa el inicio del retorno a la dinámica de principio de año. Los vientos del Este y Oeste comparten dominancia, elevando nuevamente los niveles de PM2.5 hacia los 19 µg/m³ en el vector Este.

El gráfico polar anual sugiere un máximo global cercano a los 22 µg/m³ ubicado hacia el Este. No obstante, la desagregación mensual demuestra que este promedio diluye eventos episódicos severos (como los 30 µg/m³ de febrero). Evaluar la zona basándose únicamente en promedios anuales subestima el riesgo de exposición aguda durante el primer trimestre.

6.1.3.6.2. Análisis Espacial.

Al relacionar las gráficas polares con la ubicación de las principales fuentes observadas en el mapa, considerando un radio de 4 km alrededor de la estación, se identifican las siguientes relaciones:

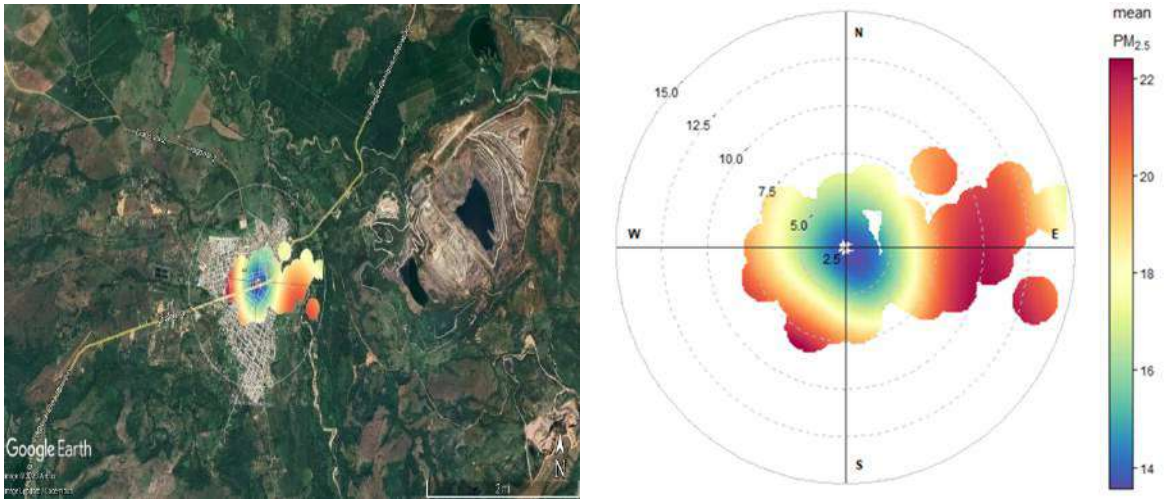
Los vientos provenientes del Este (E) se relacionan con las mayores concentraciones de PM2.5 registradas en la estación. Esta dirección coincide con la ubicación de las operaciones a cielo abierto de la mina La Jagua, claramente visible hacia el sector oriental del área de estudio. La presencia de superficies expuestas y áreas con poca cobertura vegetal en esta zona puede favorecer la emisión y resuspensión de material particulado.

Cuando el viento proviene del Suroeste (SO), dirección predominante durante buena parte del año, las concentraciones de PM2.5 son significativamente menores. El mapa muestra que en este sector se encuentra el casco urbano de La Jagua de Ibirico, por lo que los aportes pueden estar relacionados con la dinámica urbana, como el tráfico vehicular y la resuspensión de polvo en las vías, aunque presentan una menor magnitud en comparación con los asociados a la actividad minera.

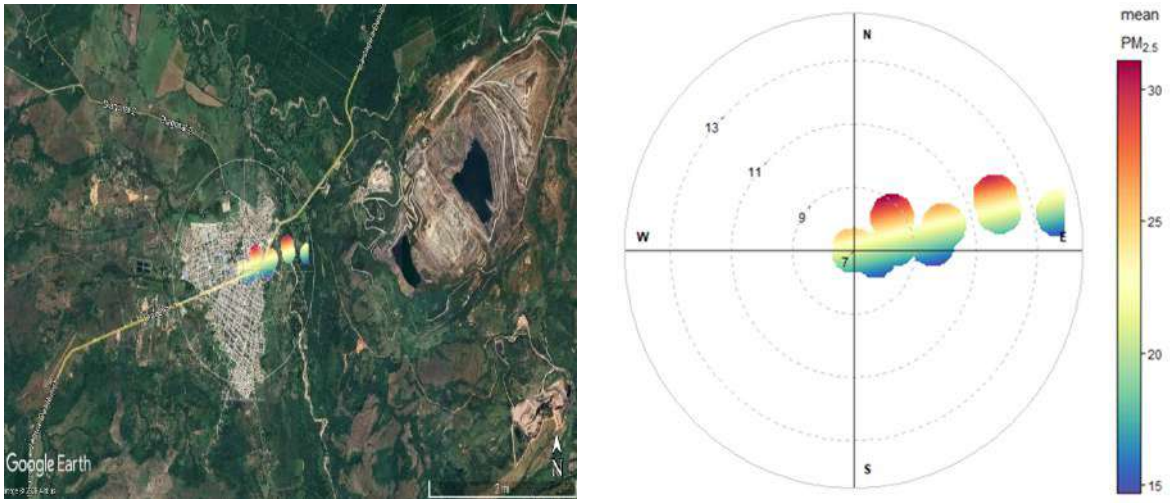
La mina se encuentra a menos de 4 km de la estación. Los gráficos correspondientes a enero, febrero y marzo muestran que las mayores concentraciones de PM2.5 se presentan asociadas con vientos de alta velocidad. Estas condiciones favorecen el transporte de las partículas y pueden reducir su deposición durante el recorrido, permitiendo que el material particulado proveniente de la zona minera alcance la estación y las comunidades ubicadas en la trayectoria del viento.

Figura 8.

Comparación de la contaminación por PM2.5 en La Jagua Vía: el promedio anual frente al mes más crítico (2023).



(a) *Comportamiento promedio durante el año 2023.*



(b) *Comportamiento del contaminante a Altos picos durante el mes de febrero de 2023.*

Nota: En la gráfica (a) se observa el comportamiento promedio del PM2.5 durante todo el año 2023, con mayores concentraciones hacia el Este y Sureste. En la gráfica (b) se muestran los niveles más altos de PM2.5 registrados durante febrero, donde las mayores concentraciones se concentran principalmente hacia el Este. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.7. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2024).

6.1.3.7.1. Análisis Temporal.

El análisis de las gráficas polares y las rosas de vientos evidencia un comportamiento estacional marcado durante el año 2024, determinado principalmente por los cambios en la dirección y velocidad de los vientos

Enero - Abril: Este periodo registra los niveles más alarmantes de contaminación. Los vientos predominan desde el cuadrante Este (E, NE, SE) con altas velocidades medias, variando entre 5.59 m/s y 7.35 m/s. Las concentraciones de PM2.5 experimentan un ascenso sostenido, alcanzando picos de aproximadamente 26 µg/m³ en febrero, 35 µg/m³ en marzo y un máximo anual cercano a los 40 µg/m³ en abril, siempre asociados a vientos provenientes del Este.

Mayo - Noviembre: A partir de mayo, se observa una rotación térmica y sinóptica de los vientos, los cuales pasan a dominar desde el Sur y Suroeste (S, SW). Las velocidades medias descienden a un rango de 3.53 a 4.39 m/s. Simultáneamente, las concentraciones de PM2.5 caen de forma notable, con picos que oscilan entre 7 y 22.5 µg/m³. Los meses de octubre y noviembre presentan la mejor calidad del aire del año, con máximos que no superan los 7 y 8 µg/m³ respectivamente.

El Polar Plot anual muestra una mancha de concentración máxima hacia el Este con valores que rondan los 30 a 35 µg/m³. Sin embargo, esta representación promediada enmascara eventos agudos y críticos, como el pico de 40 µg/m³ registrado en abril. El uso exclusivo del promedio anual diluye la severidad de la exposición durante el primer cuatrimestre del año.

6.1.3.7.2. Análisis Espacial.

Al relacionar el comportamiento de los contaminantes observado en las gráficas con las características del terreno dentro del radio de 4 km mostrado en la imagen satelital, se establecen las siguientes correlaciones:

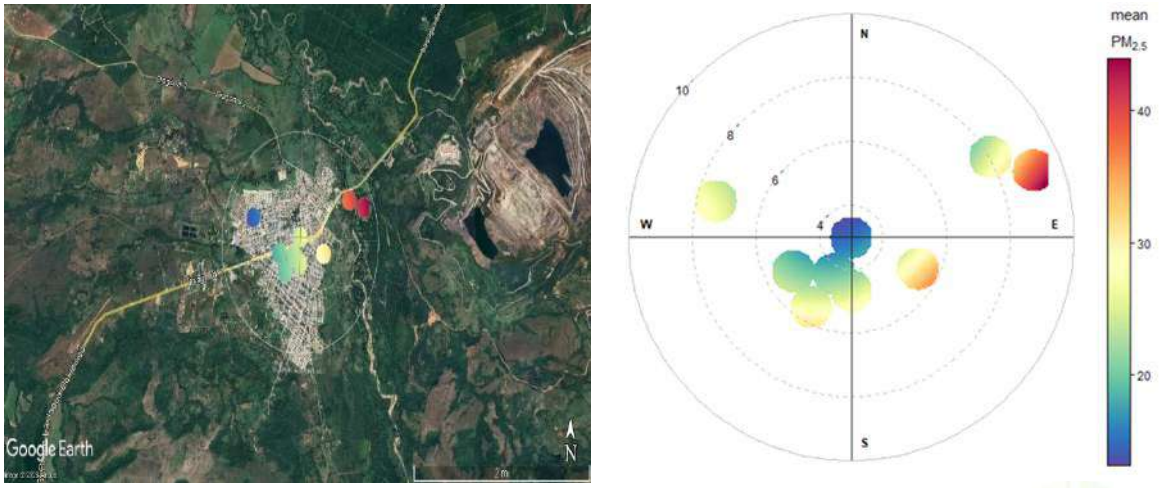
Los vientos provenientes del Este y Noreste se relacionan con las mayores concentraciones de PM2.5, registradas durante marzo y abril. Al proyectar estas direcciones sobre el mapa satelital, se observa que coinciden directamente con el complejo minero a cielo abierto. La gran extensión de las áreas sin vegetación y la presencia de tajos mineros activos permiten identificar este sector como la principal fuente de emisiones de polvo que puede estar

afectando a la estación. Por el contrario, durante la segunda mitad del año, cuando los vientos provienen principalmente del Suroeste, las concentraciones son significativamente menores, y los aportes asociados a esta dirección se relacionan con dinámicas urbanas.

Además, la mina La Jagua se encuentra a pocos kilómetros de la estación, dentro del radio de 4 km analizado. Las altas velocidades del viento registradas a principios de año, superiores a 6 y 7 m/s, favorecen el transporte del material particulado a mayores distancias. Estas condiciones dificultan que las partículas se depositen rápidamente, favoreciendo su desplazamiento hacia la zona de monitoreo y, posiblemente, hacia los asentamientos cercanos.

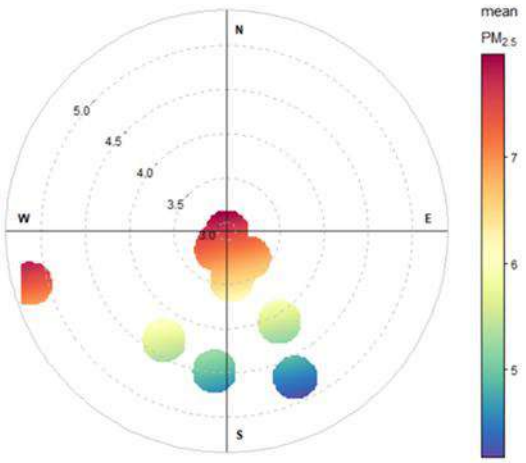
Figura 9.

Comparación estacional del impacto de los vientos en la calidad del aire (PM2.5) en la estación La Jagua Vía (2024).



(a) *Mes con mayor contaminación durante mes de abril 2024.*





(b) *Mes con menor contaminación durante el mes de octubre 2024.*

Nota: Estas dos gráficas comparan el momento de mayor y menor contaminación del año. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.8.Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Jagua Vía (2025).

6.1.3.8.1. Análisis Temporal.

El análisis de las gráficas evidencia un régimen de vientos marcadamente bimodal, que influye en el transporte de contaminantes a lo largo del año:

El año inicia, durante enero y febrero, con vientos alisios fuertes y predominantes del Este, con velocidades promedio de 6.25 y 7,1 m/s. A partir de marzo, se presenta una transición hacia el Suroeste (SW), régimen que se consolida entre abril y junio, con velocidades medias entre 4.1 y 5.4 m/s.

El promedio anual muestra un importante foco de PM2.5 proveniente del SW, junto con aportes moderados del Este. Sin embargo, este promedio puede ocultar la intensidad de episodios específicos, como las concentraciones máximas registradas en marzo (>19 µg/m³) provenientes del SW, así como el aporte exclusivo y directo del Este durante enero.

Los picos de concentración no se presentan en una sola dirección. En enero, el pico de PM2.5 (>13) ocurre con altas velocidades del viento, de hasta 11 m/s, provenientes del Este.

En contraste, los picos más críticos del semestre (>19) se registran en marzo desde el SW, con velocidades moderadas entre 4 y 7 m/s.

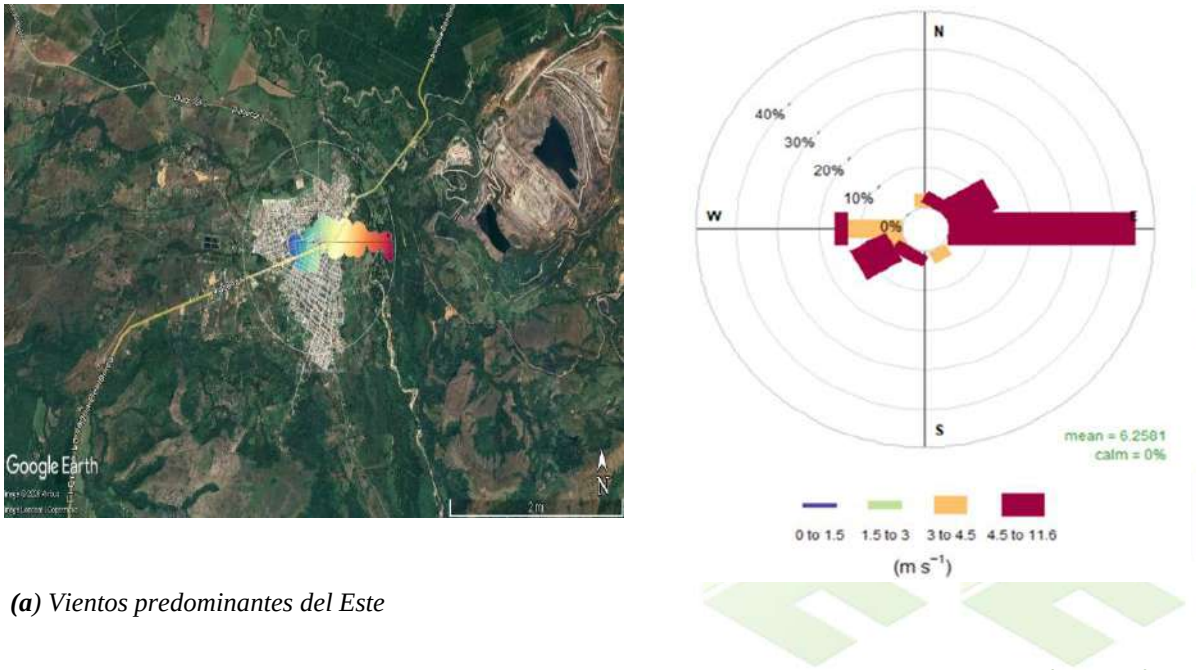
6.1.3.5.2. Análisis Espacial.

La superposición de los datos direccionales sobre el mapa satelital permite identificar posibles relaciones entre la dirección de los vientos y las fuentes de emisión presentes en el área de estudio:

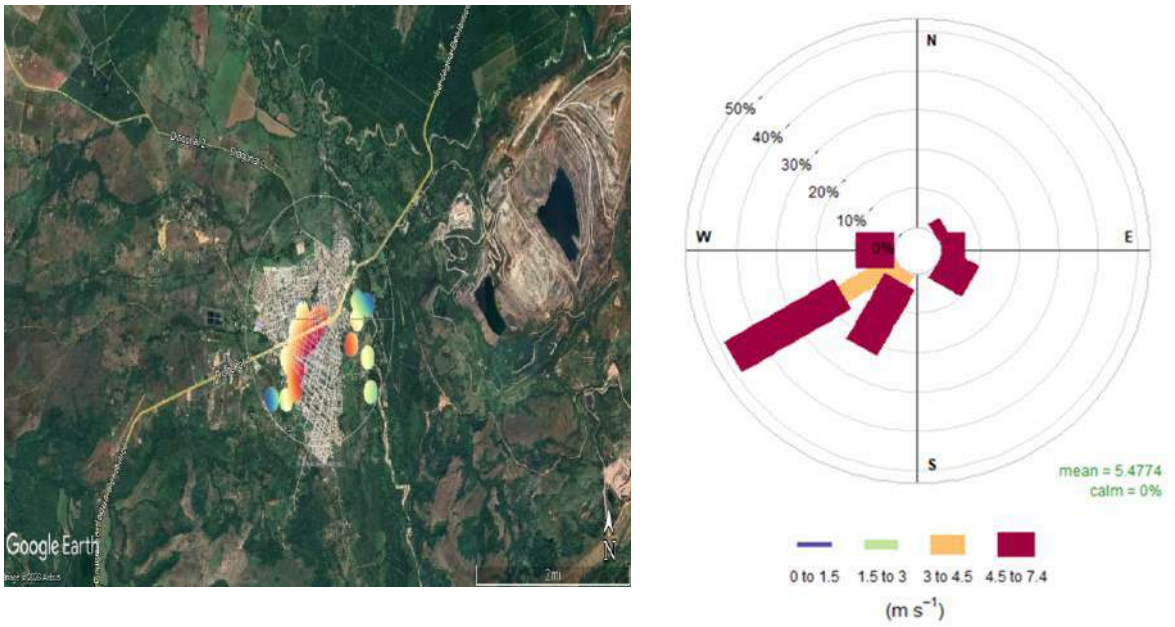
En el radio de 2 a 4 km hacia el Este y Noreste, se encuentra infraestructura de explotación a cielo abierto, correspondiente a la mina La Jagua. Las altas velocidades del viento registradas en enero y febrero (eje radial >6 m/s) favorecen el transporte del material particulado desde los tajos y botaderos directamente hacia la estación.

Al Sur y Suroeste se encuentra el casco urbano de La Jagua de Ibirico, junto con vías periféricas y zonas de uso agropecuario. Los altos niveles de PM2.5 registrados en marzo y abril sugieren posibles aportes asociados a la resuspensión de polvo urbano, el tráfico vehicular local y, potencialmente, a quemas agrícolas estacionales provenientes de las áreas rurales ubicadas hacia el SW.

Figura 10.
Comportamiento del viento durante enero y marzo de 2024



(a) *Vientos predominantes del Este*



(b) *Vientos predominantes del Suroeste*

Nota: La figura compara enero y marzo de 2024. En enero se observa el aporte de PM2.5 asociado principalmente a vientos del Este, mientras que en marzo los mayores niveles se relacionan con vientos del Suroeste. Esto permite comparar los dos periodos con mayor contraste en dirección del viento y concentración de PM2.5. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.9. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2021).

6.1.3.9.1. Análisis Temporal.

Al revisar las rosas de contaminación y gráficos polares se observó que para el primer trimestre del año los fuertes vientos predominaban por la dirección este-noreste, con velocidad altas en un intervalo entre 10.5 y 12.65 m/s. Este comportamiento se relaciona con los picos de PM2.5 que se encuentran por encima de los 25 µg/m³, como consecuencia de la resuspensión y el transporte de las partículas por la acción del viento.

En los siguientes meses los vientos comienzan a rotar, incluyendo vientos del norte, sur para abril y suroeste para mayo, siendo este último crítico, ya que registra el promedio de PM2.5 más alto del año (35 µg/m³) a pesar de que la velocidad del viento disminuyó a una

media de 5.34 m/s, lo que puede deberse a un estancamiento o aportes de fuentes secundarias que aumentan la concentración local.

Para junio y julio los picos van de 20 a 23 µg/m³, además de incluir viento del suroeste, y noroeste para julio. Sin embargo, se observa una disminución general de las concentraciones que oscila entre 3-17 µg/m³ para los meses entre agosto y octubre, con vientos que predominan a noreste, sureste y suroeste, a excepción de septiembre que los presenta al norte y noroeste, esta reducción del contaminante coincide con la temporada de lluvias de la región Caribe, donde se evita la resuspensión del polvo debido a causa de la precipitación. En el mes de noviembre se evidencia un pico máximo de 25,62 µg/m³ impulsador por flujos del noroeste y oeste, mientras que en diciembre el pico es más moderado (máximo de 16,61 µg/m³).

Es importante señalar que el Polar Plot anual indica una predominancia absoluta del este y noreste como las zonas de mayor aporte aproximadamente de 25 µg/m³, lo cual concuerda con el comportamiento general de los vientos alisios. Sin embargo, este promedio enmascara eventos críticos. Entre estos, se encuentra la influencia del viento en dirección suroeste en meses como mayo, junio, julio, así como el pico mayor a 30 µg/m³ en mayo proveniente del este y sureste.

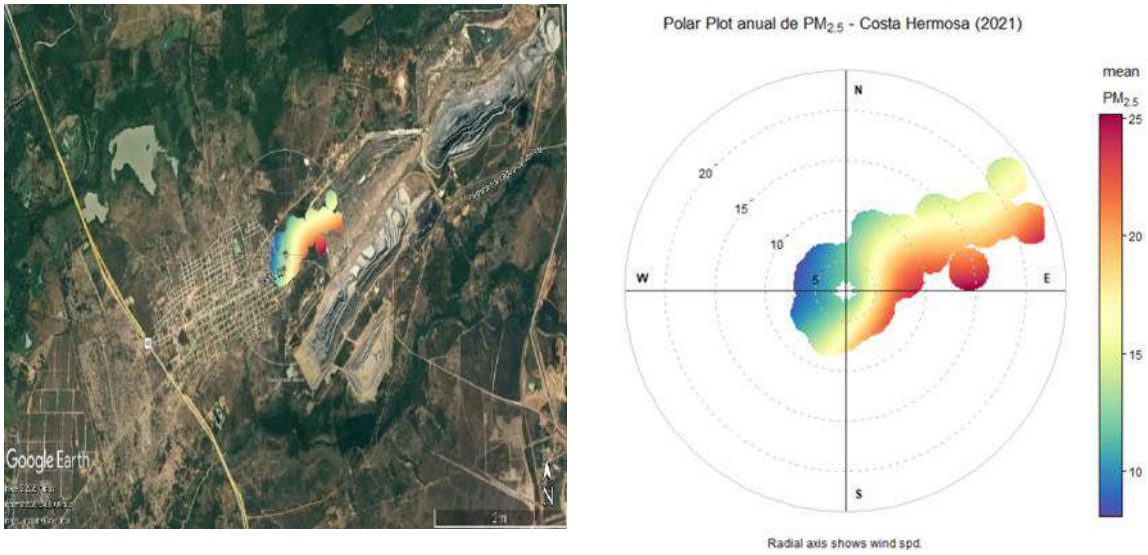
6.1.3.9.2. Análisis Espacial.

Al establecer la relación entre los Polar Plots y la imagen satelital dentro del radio de 4 km, se puede establecer que las altas concentraciones que provienen del E, NE Y ENE son emisiones directas del complejo de tajos mineros a cielo abierto y sus zonas de botaderos o vías de acarreo. En la imagen se observa una extensa área de suelo sin cobertura vegetal y excavación que cruza el límite de los 4km hacia el E, actuando con las principales emisiones de superficie expuestas y de rutas de tráfico pesado (maquinaria y vías no pavimentadas).

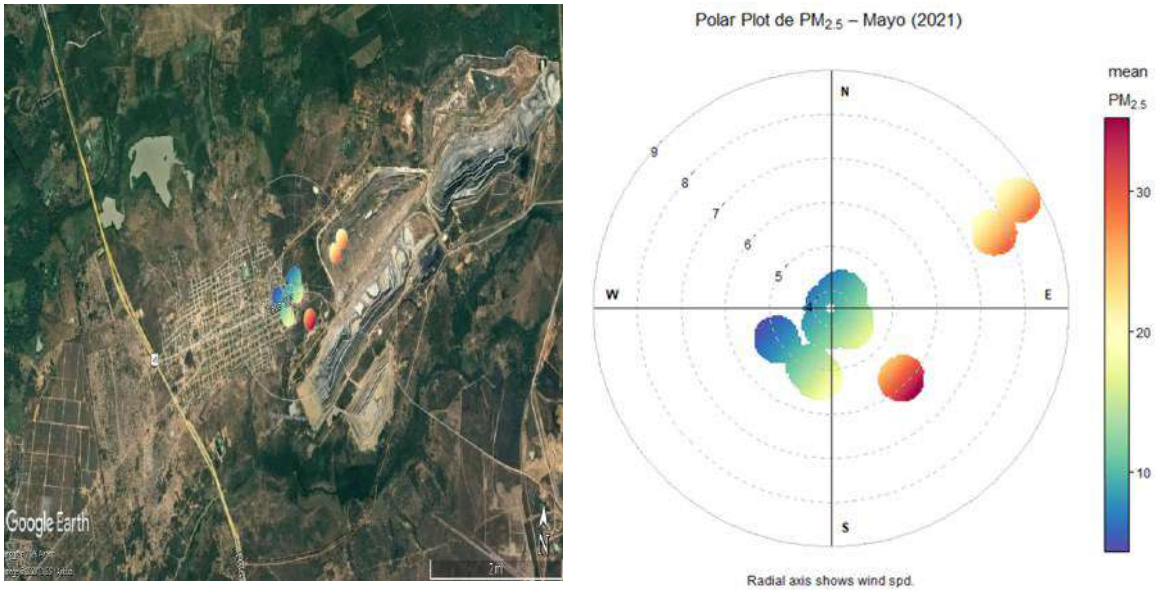
En los meses de junio, agosto y octubre donde domina el viento SW, las gráficas de PM2.5 registra sus concentraciones en esa misma dirección. Según el mapa, dentro de los 4km, al SW de la estación se encuentra el centro poblado de La Loma, es decir, que los aportes no son mineros sino posibles emisiones urbanas, ya sea resuspensión en vía no pavimentadas, tráfico vehicular, quema de residuos o actividad comercial.

Figura 11.

Dinámica espacial y temporal de PM2.5 en la estación Costa Hermosa (2021).



(a) *Polar Plot anual que muestra el predominio del vector E-NE con los mayores registros de PM2.5.*



(b) *Polar Plot de mayo, evidenciando el pico crítico.*

Nota: Las gráficas integran velocidad del viento (eje radial) y niveles de partículas (color). El análisis satelital atribuye los flujos del E-NE (a) al complejo minero y los aporte al SW en mayo a (b) centro poblado de La Loma. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.10. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2022).

6.1.3.10.1. Análisis Temporal.

A partir de las rosas de contaminación y los gráficos polares, se evidenció un patrón de vientos bimodal con una marcada variación estacional. En los meses de enero, febrero, marzo, abril e incluso diciembre, los vientos dominantes se encuentran en los cuadrante NE Y E con velocidades altas que alcanza los 12,7 m/s en febrero y marzo que cuenta el pico máximo de contaminación (40 µg/m³).

Para los meses de mayo hasta septiembre, el flujo del viento se invierte hacia el SW Y W, a excepción de julio que tiene predominantes hacia el NW, todos con velocidades más bajas, en un intervalo medio ente 2.7 y 6 m/s. En agosto y septiembre hay un descenso en los vientos llegando a ser menores de 5 m/s, permitiendo el estancamiento de las emisiones, que posiblemente influyó en la generación del segundo pico de contaminación más alto del año para septiembre (33.6 µg/m³).

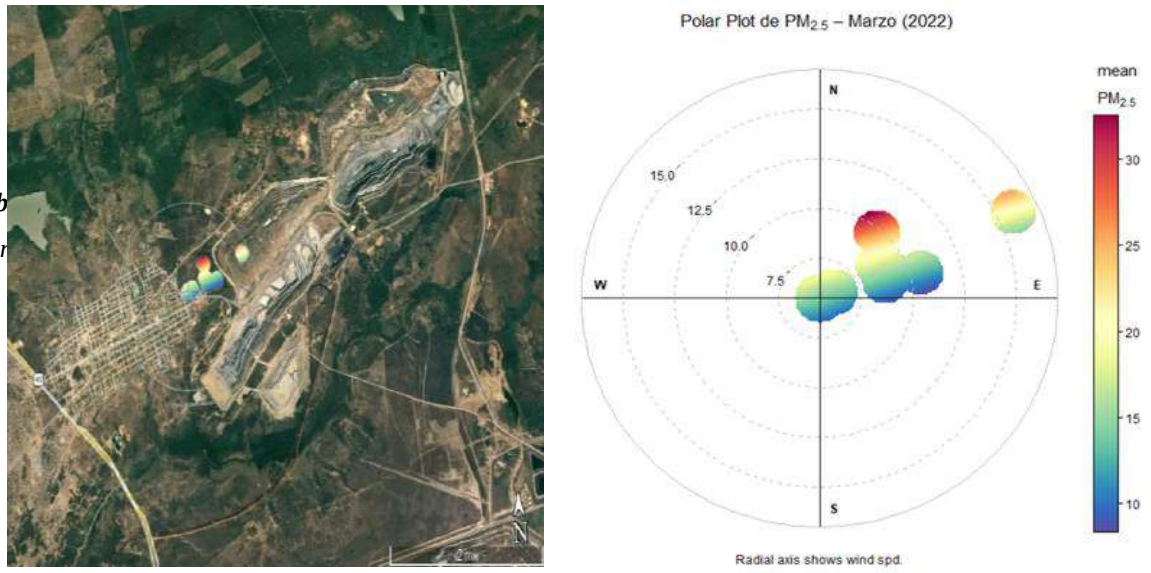
6.1.3.10.2. Análisis Espacial.

Al relacionar las gráficas polares y la imagen satelital en el radio de 4 km, se revelan extensas áreas sin cobertura vegetal que pertenecen ya sea a tajos mineros o botaderos en la dirección de NE y E. La velocidad del viento es mayor a 9 m/s en esta dirección pueden generar resuspensión de PM2.5.

Hacia el SW y W, en la imagen se observa el centro poblado de La Loma, junto al corredor vial (ruta 45). En los meses de mayo a septiembre lo vientos provienen de este sector incluyendo bajas velocidades de menos de 5 m/s, a excepción de julio, que el flujo rota hacia el NW, un sector que parece ser de cobertura rural, lo que sugiere que sea ingreso de material particulado de fondo o resuspensión vial. Hay que tener presente que la disminución del viento, influye en que se queden atrapadas las emisiones de combustión, ya sea por tráfico vehicular pesado o actividades urbanas, lo que puede generar picos anómalos como en septiembre (33.6 µg/m³).

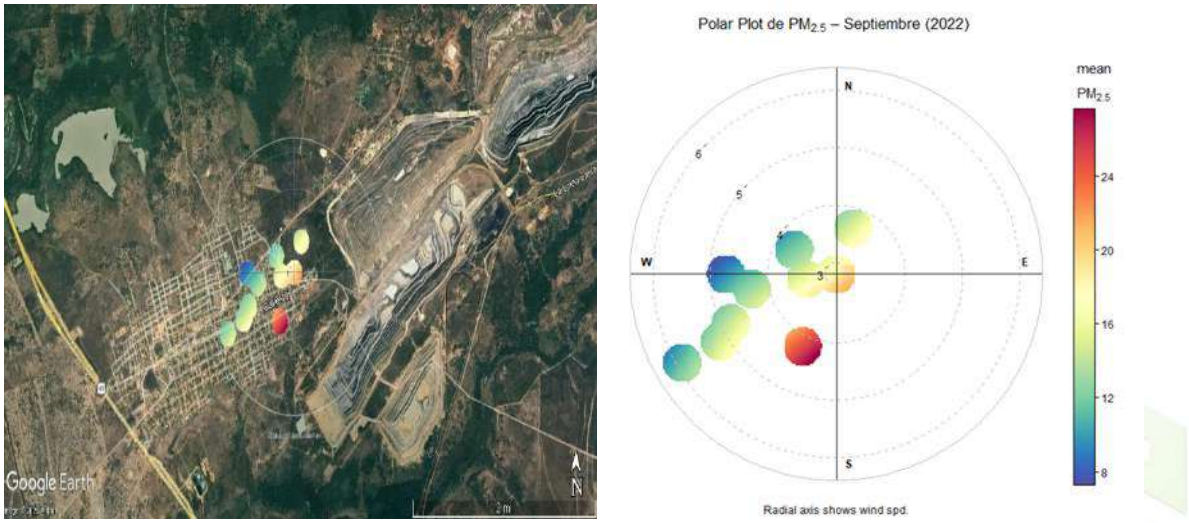
Figura 12.

Dinámica de dispersión espacial de PM2.5 en la estación Costa Hermosa (2022).



***(b**
ur

***(a**) Marzo: Escenario de impacto minero por arrastre de vientos (NE-E).*



***(b**) Septiembre: Escenario por impacto urbano-vial por acumulación (SW-W).*

Nota: Se contrastan dos patrones de contaminación: la gráfica (a) muestra la resuspensión del material minero impulsada por vientos, mientras que en la gráfica (b) evidencia la acumulación de emisiones locales del centro poblado y vía. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.11. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2023).

6.1.3.11.1. Análisis Temporal.

Al examinar las rosas de viento y los Polar Plots, se puede observar en los meses de enero, febrero, marzo, y diciembre, predominan vientos del NE Y ENE, con velocidades media mensuales que alcanzan los 7.43 m/s y 15.18 m /s, correspondientes al periodo seco y en el mes de abril se incorpora una predominancia de vientos hacia el S. En la temporada de transición y lluvias (mayo a noviembre), la intensidad del viento desciende notablemente, con promedios entre 4.28 y 5.29 m/s, donde mayo, agosto y septiembre tuvieron una rotación de los vientos hacía SW Y W, Julio hacia el E y SW, octubre hacia el N y noviembre hacia el SW.

Los registros máximos de PM2.5 se producen en dos escenarios meteorológicos completamente opuestos. En marzo se alcanza el pico máximo del año alcanzando los 34 µg/m³ arrastrados por vientos con un promedio mayor a 9 m/s. En el mes de mayo se registró un pico de 32.4 µg/m³ cuando los vientos rotaron al SW a pesar de que lo viento disminuyeron en promedio (4,69 m/s), esto podría deberse a acumulación por baja ventilación. De agosto a noviembre empiezan a bajar las concentraciones medias, este comportamiento puede estar asociado con la menor remoción de partículas asociada a las precipitaciones.

En la rosa de vientos anual se presenta un promedio de 6.67 m/s y en el gráfico polar se observa una media de PM2.5 entre 17.5 y 22.5 µg/m³. La representación de los datos mediante promedios anuales puede ocultar eventos de contaminación o no registrar direcciones de vientos, por lo que es importante analizar las gráficas mensuales.

6.1.3.11.2. Análisis Espacial.

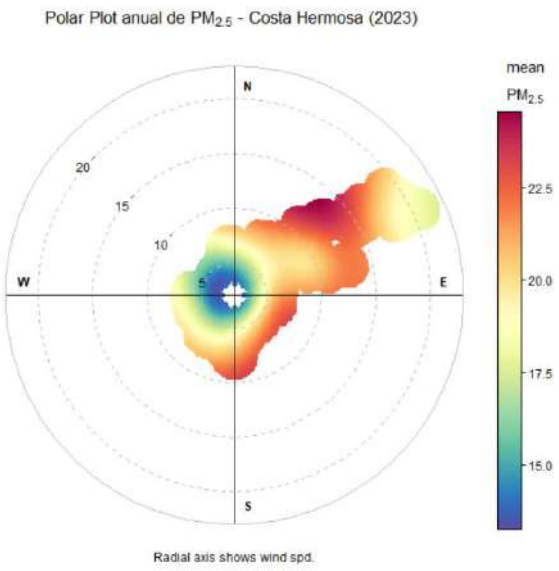
Con base en la relación entre la imagen satelital en el radio de 4km y los gráficos polares, se identificó que hacia las direcciones NE y E se encuentran diferentes elementos asociados a la actividad minera, entre ellos tajos mineros, botaderos y vías de acarreo. Los fuertes vientos pueden generar erosión sobre las áreas descubiertas y resuspensión de las partículas por el tránsito de la maquinaria pesada.

En los meses de mayo, agosto y septiembre se identificó un predominio en los vientos que provienen del SW y W, caracterizados por velocidades relativamente bajas. Esta condición puede favorecer que las partículas de PM2.5 permanezcan en el área de estudio y facilita su transporte desde sectores que se encuentran ubicados en esas direcciones. Estas concentraciones podrían relacionarse con el desplazamiento desde el casco urbano de La Loma y el corredor de tráfico pesado asociado a la ruta 45.

Figura 13.

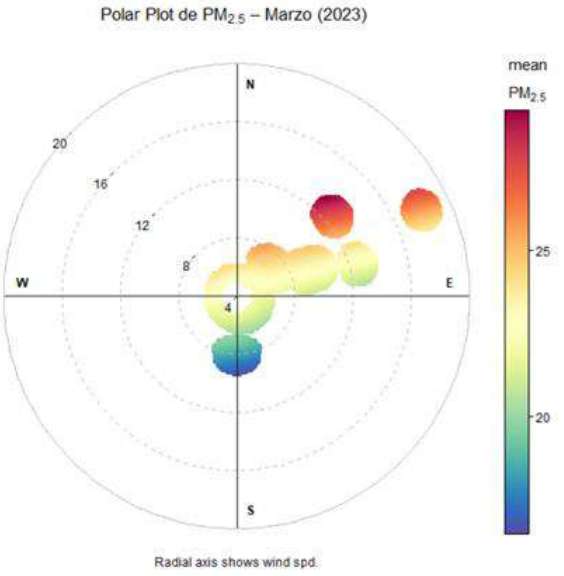
Comportamiento espacial de PM2.5 en la estación Costa Hermosa (2023).





(a) *Patrón anual.*





(b) *Pico máximo en marzo.*

Nota: La gráfica (a) muestra el comportamiento anual con transporte dominante desde las zonas mineras al NE-E y (b) identifica a marzo como el máximo riesgo anual, impulsado por resuspensión de vientos. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.12. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2024).

6.1.3.12.1. Análisis Temporal.

Al interpretar las rosas de contaminación y lo Polar Plots, se identificó que para el primer cuatrimestre de enero a abril está dominado por fuertes vientos provenientes de NE y E, con promedios relativamente constantes entre 7.7 y 10.3 m/s, siendo el mes de marzo donde se identifica el pico máximo de PM2.5 (41.8 µg/m³). A su vez, en el mes de mayo el sistema se desplaza hacia vientos mucho más lentos de 4.1 a 5.3 m/s que rotan hacia el S, SW Y NW. Entre los meses de junio a octubre se evidencia que lo vientos siguen siendo débiles, los cuales oscilan entre 4.18 y 4.98 m/s, sin embargo, presentan variabilidad en las direcciones del viento, el mes de junio con predominancia hacia el N, julio hacia el NE, agosto y septiembre hacia el SW y octubre hacia el W.

Es importante señalar que en las rosas de viento se pueden observar una caída muy marcada en noviembre con velocidad media de 0.4 m/s y en diciembre de 0.13 m/s, en contraste con los meses anteriores. Este comportamiento podría estar asociado a condiciones de baja circulación del viento durante esto meses, por lo que debe considerarse al momento de analizar la dispersión de PM2.5.

En el gráfico polar anual se promedia el viento a 5.5 m/s y registra las concentraciones hacia el NE y una concentración media que va desde 24 a 32 µg/m^3, esta integración oculta eventos críticos, ya sea mayo que presenta su pico hacia el SW, agosto hacia el NW, y diciembre hacia el S.

6.1.3.12.2. Análisis Espacial.

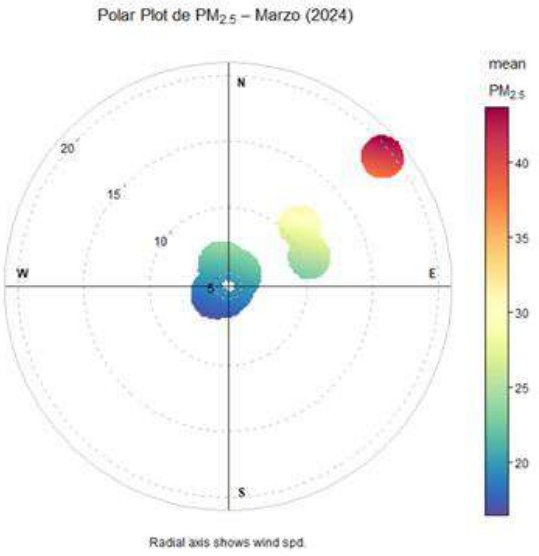
Al relacionar los Polar Plots con la imagen satelital se confirma que las direcciones de ciento NE y E impactan directamente desde los tajos mineros, botadero o vías de acarreo de las minas de Drummond, entre otras inactivas, que, al estar la superficie sin cobertura vegetal, lo vientos influyen en que exista una resuspensión de partículas en el aire. Por el contrario, la contaminación captada cuando el viento empieza a rotar hacia el SW Y W mapean exactamente sobre el centro urbano de La loma y el tráfico pesado de la Ruta 45.

El mes de marzo es el mes con el pico más alto (41,8 µg/m^3), donde la dirección es proveniente del NE, generando viento con una medida de 7.77 m/s, lo que indica un posible mayor impacto de las actividades mineras asociado al trasporte desde los tajos, botaderos y vías de acarreo. De la misma forma, en el mes de mayo que hay una rotación de los vientos hacia el sur se puede deducir que se debe a la resuspensión de partículas por las emisiones vehiculares provenientes de la ruta 45 y, hasta cierto punto del centro poblado de La Loma.

Figura 14.

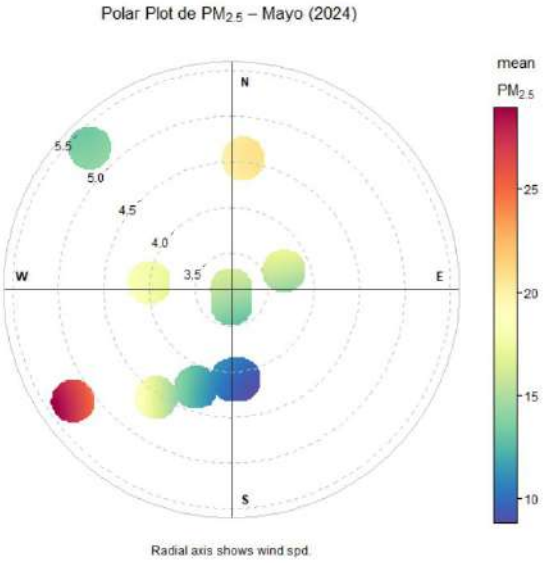
Patrones constantes de dispersión e impacto de PM2.5 en la estación Costa Hermosa (2024).





(a) *Marzo: Arrastre por vientos y máximo aporte minero desde el NE.*





(b) *Mayo: Estancamiento de emisiones urbanas del S y SW.*

Nota: Comparación de extremos atmosféricos de 2024: (a) pico crítico por arrastre por vientos desde las minas del NE y (b) acumulación de emisiones vehiculares y urbanas del S-SW por estancamiento y baja ventilación. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.13. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Costa Hermosa (2025).

6.1.3.13.1. Análisis Temporal.

El promedio anual de PM2.5 se ubica en 15.55 µg/m³. Este valor, que a simple vista podría indicar un comportamiento estable, puede ocultar los episodios de mayor contaminación registrados durante la temporada seca. En febrero se registra el valor más alto del año, con un pico de 51.9 µg/m³, seguido de enero (35.4 µg/m³) y marzo (31.8 µg/m³). Durante este periodo, la menor presencia de lluvias reduce la eliminación natural de las partículas del aire, favoreciendo su acumulación y resuspensión cerca de la estación.

A partir de junio, los valores máximos disminuyen por debajo de 20 µg/m³, alcanzando su nivel más bajo en octubre (11.4 µg/m³). Esta reducción puede relacionarse con el efecto de las lluvias, que ayudan a disminuir el polvo presente en el suelo y, por tanto, su presencia en el aire.

6.1.3.13.2. Análisis Espacial.

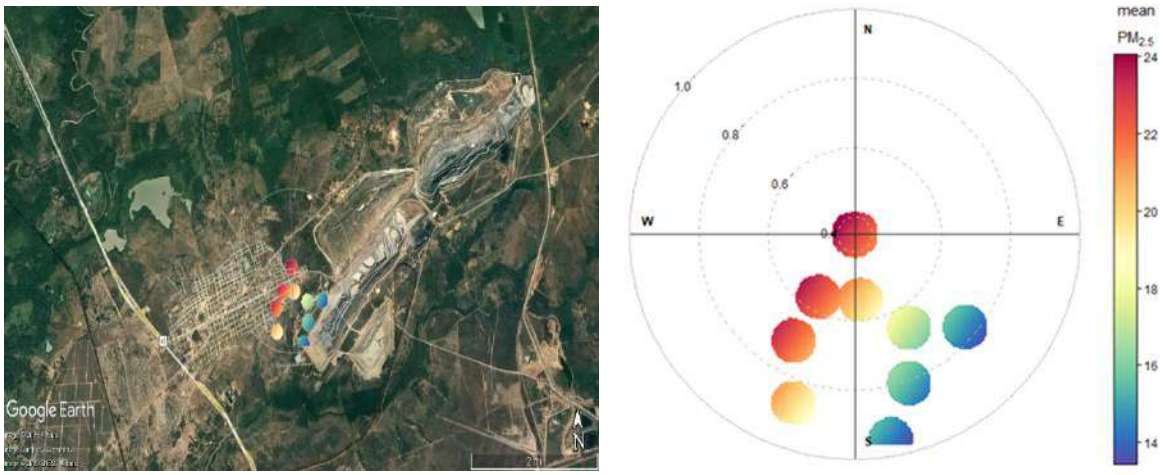
Debido a los valores muy bajos de velocidad del viento, la dirección se convierte en el principal elemento para realizar el cruce espacial con el mapa en el radio de 4 km.

La modelación muestra una predominancia marcada de los vientos provenientes del cuadrante Sureste. Al comparar esta dirección con el mapa, se observa que, a menos de 2 km, se encuentran las zonas de expansión de botaderos y los frentes de trabajo del sur de El Hatillo y Sabanas de Bautista. Los picos de PM2.5, entre 31 y 51.9 µg/m³, asociados a esta dirección, sugieren una posible relación con las áreas activas de remoción de material y las vías de acarreo, favoreciendo el transporte de partículas hacia La Loma.

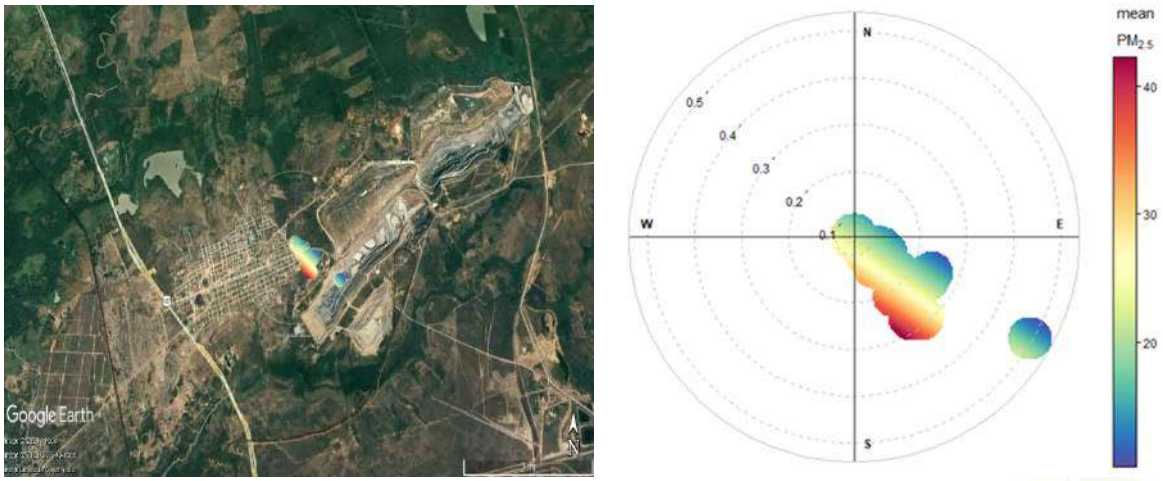
En los meses de enero y abril, la dirección del viento cambia de manera marcada hacia el Sur. En este sector de la imagen satelital se encuentra la zona urbana de La Loma, el Cruce de La Loma y la carretera Ruta 45. Las concentraciones de 27 a 35 µg/m³ asociadas a esta dirección pueden relacionarse con la resuspensión de polvo causada por el tráfico pesado y con las emisiones de combustión diésel asociadas al transporte, la actividad comercial y la circulación constante por esta vía.

Figura 15.

Distribución espacial de PM2.5 según la dirección del viento.



(a) *Mes de pico alto, enero.*



(b) *Mes de pico alto, febrero.*

Nota: Las gráficas muestran las concentraciones de PM2.5 según la dirección y velocidad del viento. En febrero se observa el mayor pico del año, de 51.9 µg/m³, mientras que en enero se registra un pico de 35.4 µg/m³. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.14. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Aurora (2021).

6.1.3.14.1. Análisis Temporal.

Al examinar las rosas de vientos y los Polar Plots, se identificó que para el primer trimestre de enero a marzo los vientos predominantes provienen del NE, atribuibles a los vientos alisios. A partir de abril el comportamiento del viento cambia de dirección hacia el SW, manteniéndose durante el último trimestre.

Asimismo, entre el mes de mayo a octubre, la estación se encuentra fuera de influencia directa de las principales emisiones de contaminantes. Aunque los vientos provienen de fuentes potenciales (ruta 45 al SW), podría haber estado influenciado por condiciones meteorológicas, reduciendo de esta manera la emisión de PM2.5 a una media de 1.63 µg/m3, provocando un periodo de mejor calidad del aire del año antes del aumento de las concentraciones en el mes de noviembre. En noviembre y diciembre se registra un aumento de las concentraciones, indicando picos de 11.48 µg/m3 para noviembre y 11.84 µg/m3 para diciembre.

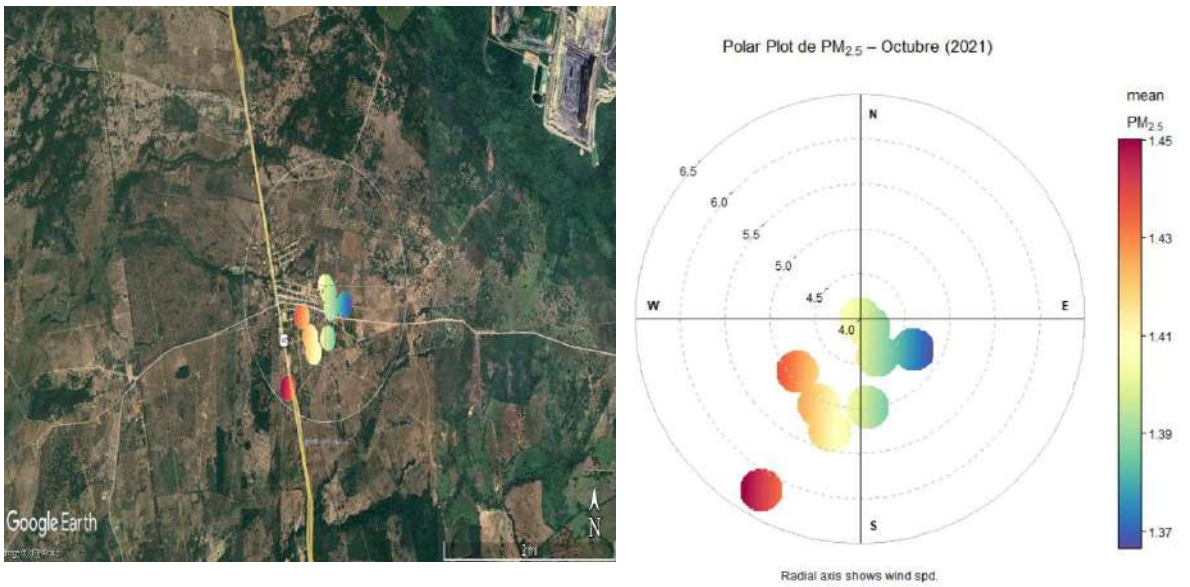
6.1.3.14.2. Análisis Espacial.

Al relacionar las gráficas polares con la imagen satelital, la evaluación revela que, aunque los grandes frentes mineros (Complejos mineros Drummond) se ubicar al N y NE, lo vientos que provienen de esta dirección generan un nivel de PM2.5 moderado. Al considerar las direcciones críticas de S y SW, la fuente principal que influye sobre la estación no parece corresponder al tajo minero, sino a la ruta 45. Esta vía cruza el radio de 4km en el cuadrante SW, lo que sugiere que las emisiones podrían atribuirse resuspensión vial por tráfico pesado vehicular.

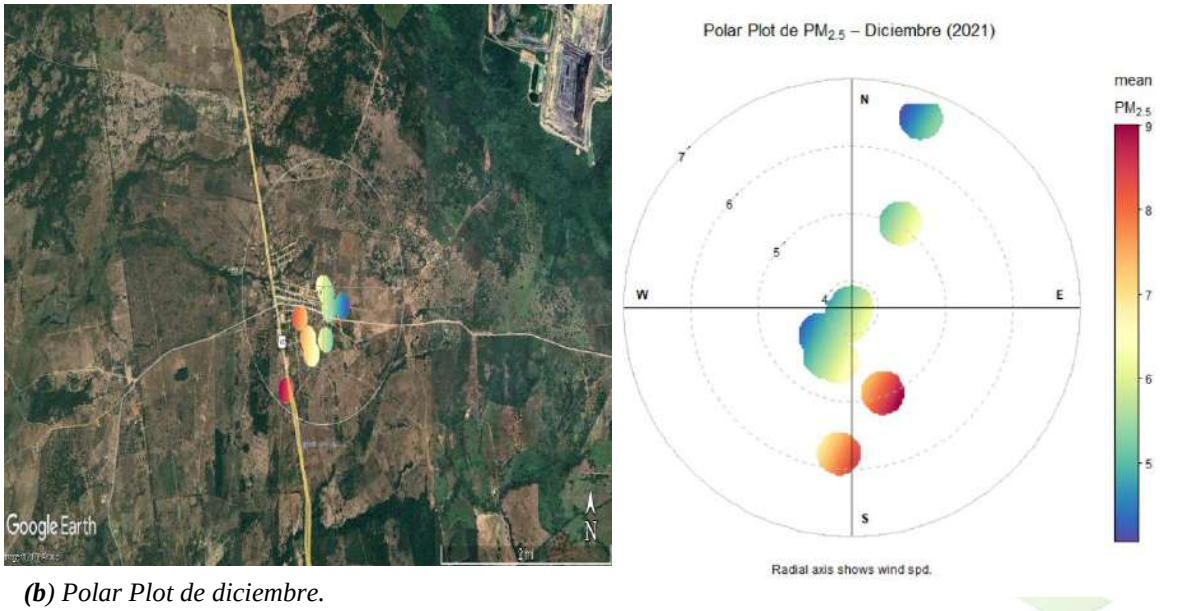
La distancia determina el grado de dispersión de las partículas, como la ruta 45 está dentro del radio de los 4 km y muy cerca de donde se encuentra la estación, sus emisiones impactan de forma directa y concentrada al no tener espacio para esparcirse en el aire, en cambio, los tajos mineros se encuentran a más de los 4 km, lo que permite que las emisiones se mezclen con el viento, diluyendo su concentración antes de llegar a la estación.

Figura 16.

Contraste espacial y temporal de las concentraciones de PM2.5 en la estación La Aurora (2021).



(a) *Polar Plot de octubre.*



(b) *Polar Plot de diciembre.*

Nota: Las gráficas muestran un contraste extremo de PM2.5. (a) muestra condiciones de pureza ambiental y (b) revela un pico de contaminación para el año 2021. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.15. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Aurora (2022).

6.1.3.15.1. Análisis Temporal.

El análisis de las rosas de viento y graficas polares revela que para primer semestre de enero a mayo se registraron periodos de mayor carga contaminante, con promedios mensuales más altos (entre 5.8 y 7.4 µg/m3), con un pico de 14.7 µg/m3 alcanzado en el mes de febrero que va en dirección hacia el NE. Por otra parte, el mes de mayo registro el máximo promedio del año (6.89 µg/m3) y la concentración más alta registrada del año (17.80 µg/m3) y, además, presenta una anomalía, ya que la gráfica polar muestra un núcleo de alta concentración de PM2.5 justo en el centro de la gráfica, esto podría indicar un estancamiento, donde la falta de dispersión generó una acumulación de las partículas.

Asimismo, entre los meses de junio y diciembre se muestra un descenso en los niveles de concentración registrados, el mes de junio tiene una caída a un promedio de 2.21 µg/m, octubre a 2.91 µg/m3 y noviembre a 3.32 µg/m3, es decir, que se mantienen en niveles bajos. Se destaca la ausencia de datos de PM2.5 en los meses de julio y agosto.

El promedio anual de PM2.5 es de 4.95 µg/m3, sin embargo, las gráficas ocultan eventos críticos de contaminación durante el primer semestre del año, tal como ocurre en enero con eventos crítico hacia el SE y marzo hacia el SW.

6.1.3.15.2. Análisis Espacial.

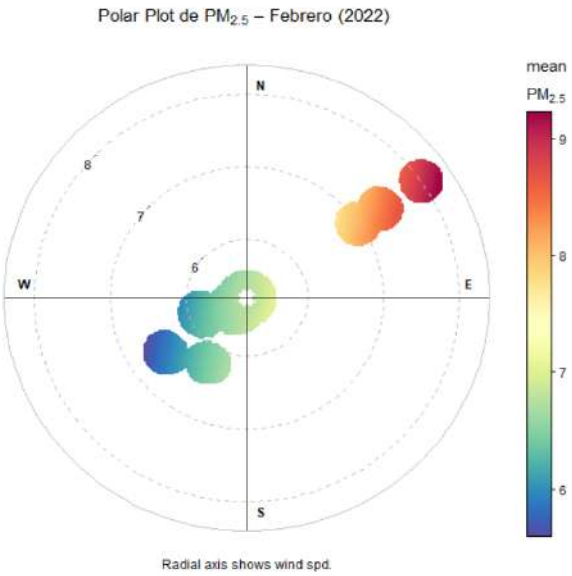
Al relacionar los Polar Plots con la imagen satelital con su respectivo radio de 4km se puedo establecer que las gráficas de febrero, abril y mayo confirman que los episodios de mayor concentración ocurren cuando el viento sopla desde el NE a velocidades que superan los 4 m/s. La imagen satelital ubica en esta dirección, fuera del radio de 4km, complejos mineros a cielo abierto (Drummond) y la velocidad del viento actúa como transporte de estas partículas hacia la estación.

La ruta 45 atraviesa la zona de influencia, lo que influye en la resuspensión de partículas debido al tránsito vehicular. Asimismo, lo viento proveniente del S y SW son altamente frecuentes durante gran parte del año, pero arrastran masas de aire con concentraciones bajas.

Figura 17.

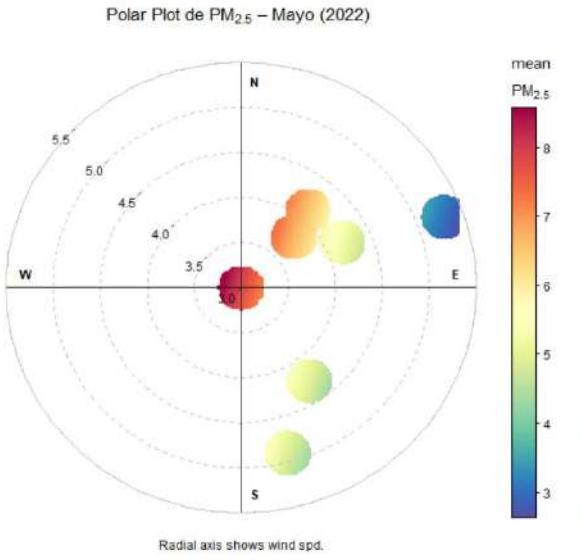
Patrones de dispersión de PM2.5 en la estación La Aurora (2022).





(a) *Febrero: Transporte por vientos fuerte del NE.*





(b) *Mayo: Acumulación por estancamiento atmosférico.*

Nota: Las gráficas polares evidencian que en (a) el transporte proviene desde frentes mineros del NE y (b) registra el pico máximo anual, además de mostrar estancamiento en el origen. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.16. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Aurora (2023).

6.1.3.16.1. Análisis Temporal.

Al analizar los gráficos polares y rosas de vientos, se puede observar en el primer trimestre de enero a febrero existe una fuerte predominancia de los vientos del NNE, en marzo rota hacia el S y NE, alcanzado una velocidad promedio de 7.3 m/s, siendo marzo el mes que alcanza la mayor concentración de año con 37 µg/m³, lo que indica un aporte de las fuentes ubicadas al norte.

Asimismo, entre los meses de abril y septiembre, el régimen de vientos rota hacia el S y SSW, manteniendo velocidades medias entre 4.67 y 5.74 m/s, las concentraciones empiezan a descender de manera progresiva desde agosto a septiembre en un promedio de 12, 8 a 6.82 µg/m³. Por otra parte, octubre presenta las concentraciones más bajas con un promedio de 5.56 µg/m³, mientras que en diciembre las concentraciones de PM2.5 empiezan a elevarse con picos de 18.5 µg/m³.

El grafico polar anual sugiere que las mayores concentraciones provienen del W y SW, sin embargo, en el mes a mes se presenta eventos críticos que ocurren en marzo hacia NE y SE con valores que superan los 30 µg/m³.

6.1.3.16.2. Análisis Espacial.

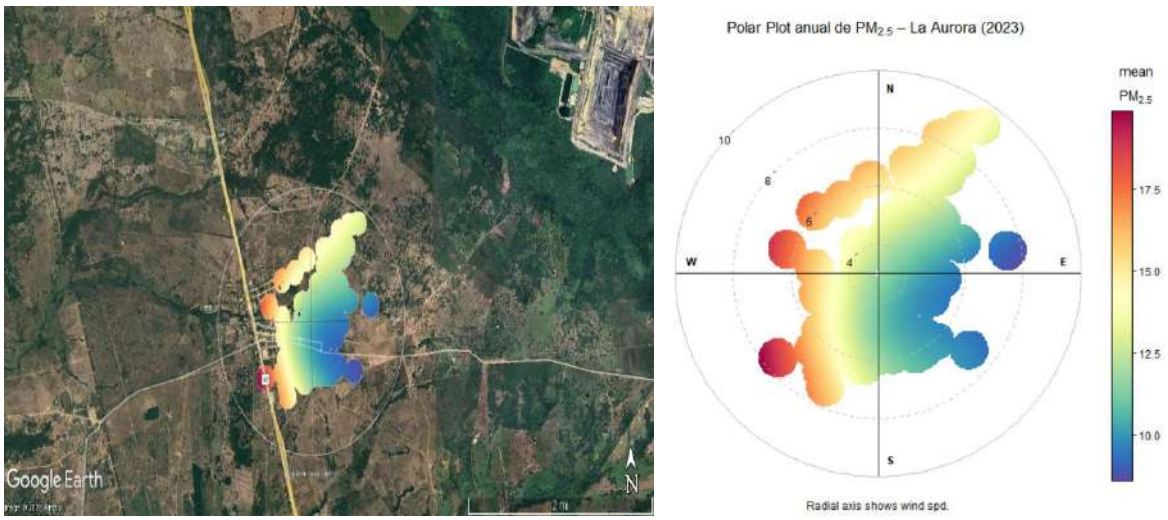
Al relacionar las gráficas polares con la imagen satelital con su respectivo radio de 4km, se evidencia que las dos gráficas para el mes de febrero presentan una dirección predominante casi del 100% hacia el NE con altas velocidad que promedian 7.3 m/s. En el mapa satelital se identifica que el complejo minero Drummond intercepta directamente con el límite de los 4km de radio. Las velocidades de vientos altas permiten que el material particulado de Drummond que estén por fuera de los 4 km, sea transportado hacia la estación.

Durante los meses de mayo y julio, las rosas de vientos rosan hacia el S y SSW y los gráficos polares evidencian que el PM2.5 se concentra en mayor medida cerca del centro de la gráfica o se alarga en el eje norte-sur. La imagen satelital muestra la presencia de una vía principal (ruta 45) que atraviesa la zona de influencia de la estación La Aurora. Cuando la velocidad del viento disminuye como en mayo con una media de 4.95 m/s, el tráfico pesado

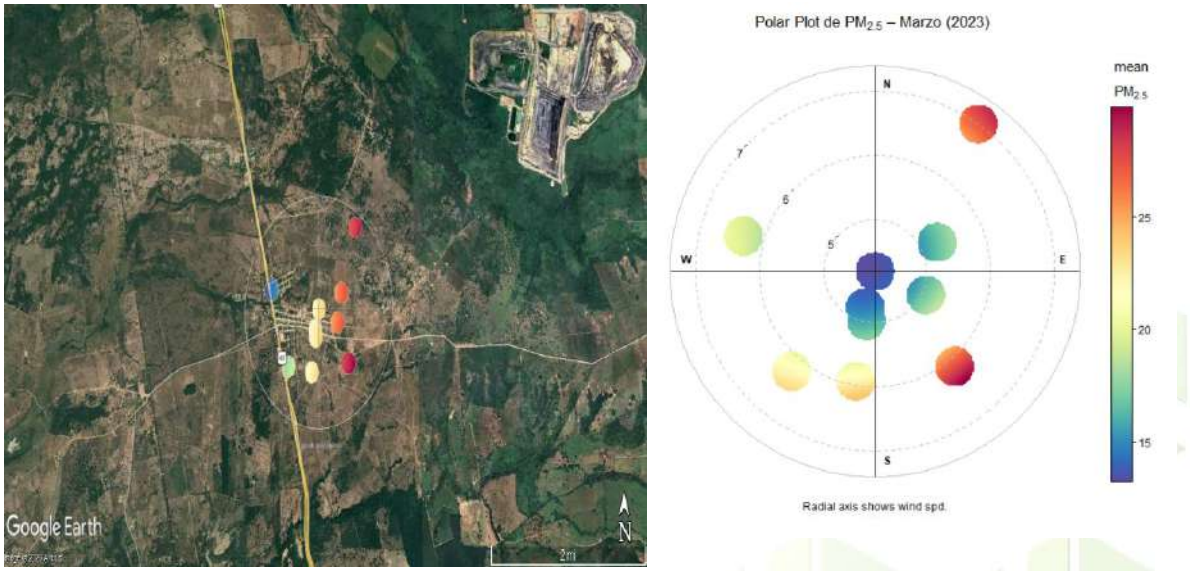
favorece la resuspensión de partículas, impactando de manera directa la estación sin necesidad de transporte a larga distancia.

Figura 18.

Patrones de dispersión de PM2.5 en la estación La Aurora (2023).



(a) *Polar Plot anual.*



(b) *marzo presentando el pico más alto.*

Nota: Las gráficas muestran que para (a) siendo la tendencia general, confirma a la zona minera (NE) como fuente principal y (b), presenta el episodio más crítico hacia el NE y SW. Elaborado

por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.17. Análisis Temporal y Espacial De La Estación La Aurora (2024).

6.1.3.17.1. Análisis Temporal.

Al interpretar las rosas de contaminación y los Polar Plots se registró que el mes de enero inicia con el mayor promedio de velocidad de viento en todo el año, alcanzando un promedio de 6.6 m/s y una dominancia hacia el E, sin embargo, las concentraciones se mantienen bajas en un promedio de 6.18 µg/m³.

Por otro lado, los meses de febrero a abril registran el periodo más crítico. En el mes de febrero, el viento cambia de dirección hacia el NE con velocidad promedio de 5.78 m/5. En el mes de marzo vuelve a cambiar la dirección predominante hacia el W y la concentración promedio de 13.15 µg/m³, luego de esto las concentraciones de PM2.5 escalan drásticamente con promedios mensuales de 15.71 µg/m³ en abril y picos de 30.1 µg/m³ con dirección dominante hacia SW.

A partir de mayo hasta agosto la velocidad media del viento disminuye, oscilando entre 4.67 y 4.98 m/s y la dirección del viento predomina hacia el S y SSW, a excepción de julio que predomina hacia el NE. Las concentraciones también descienden registrando promedios entre 4 a 7.8 µg/m³, este descenso podría asociarse a factores meteorológicos que reduce la resuspensión de partículas en el aire.

6.1.3.17.2. Análisis Espacial.

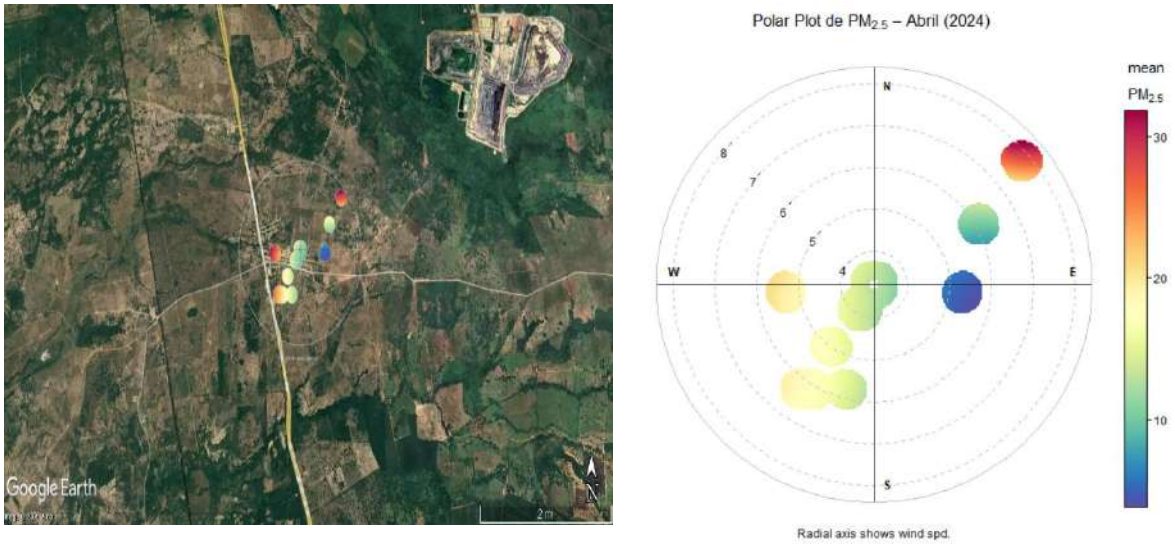
Al analizar y relacionar las gráficas polares con la imagen satelital y su respectivo radio de 4 km, se puede establecer que, en los meses de febrero y abril, se muestran las mayores concentraciones, donde predomina la dirección del viento hacia el NE, lo que puede determinar que el apunta hacia los complejos mineros (Drummond) fuera de los 4 km de radio. Esto refleja que las partículas suspendidas provenientes de los tajos mineros son arrastra de manera eficiente hacia la estación. Por otra parte, el mes de marzo al tener mayor frecuencia hacia el W, podría indicar que los vientos logran arrastrar emisiones provenientes de la ruta 45.

Durante los meses de mayo hasta agosto, los vientos son dominantes hacia el S y SSW, por lo que podría estar asociado con la ruta 45 que se atraviesa dentro de los 4 km hacia el S Y

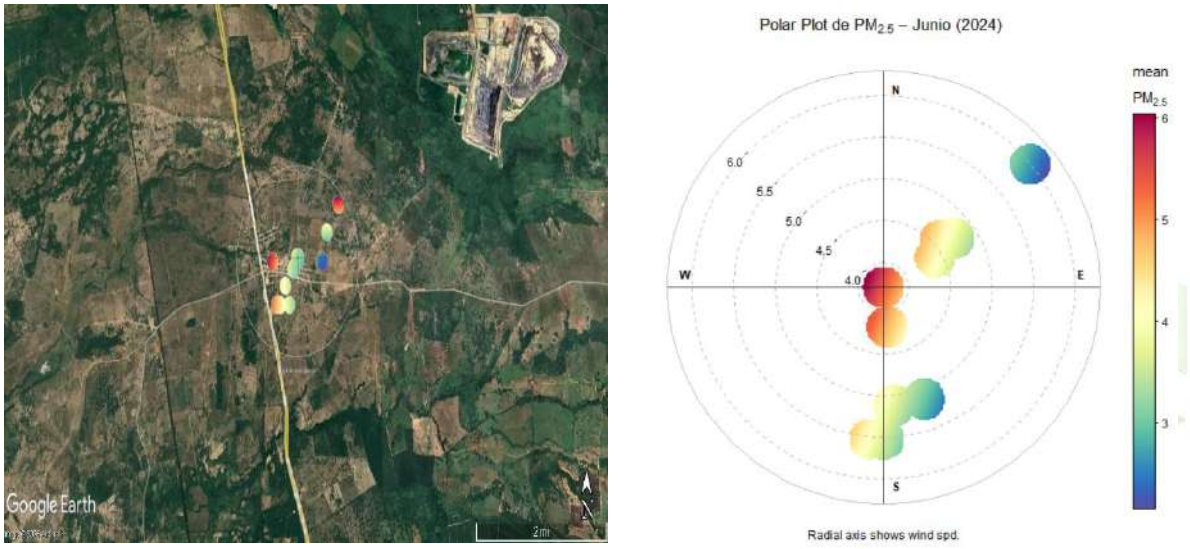
SW, desde donde se generan estas emisiones que corresponde a la resuspensión de polvo por tráfico pesado.

Figura 19.

Dispersión espacial de PM2.5 en la estación La Aurora (2024).



(a) *Polar Plot de abril.*



(b) *Polar Plot de junio.*

Nota: Las gráficas muestran una variabilidad atmosférica. En (a) los vientos fuertes transportan partículas de fuente minera y viales al NE y en (b) la disminución de emisiones

por posibles cambios meteorológicos. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.1.3.18. Análisis Temporal y Espacial De La Estación Palmeras de Alamosa (2025).

6.1.3.18.1. Análisis Temporal.

La evaluación de los perfiles mensuales y su comparación con el comportamiento anual permite identificar cambios importantes en la calidad del aire que pueden quedar ocultos al utilizar únicamente un promedio anual.

Durante el primer trimestre (enero-marzo), las concentraciones máximas se mantienen en un rango moderado, entre 10 y 14 µg/m³, con vientos predominantes del Sur y Suroeste. Sin embargo, en el segundo trimestre se observa un cambio importante. Mayo representa el periodo más crítico del año, con picos superiores a 30 µg/m³, que triplican las concentraciones base. Posteriormente, durante el segundo semestre (agosto-diciembre), se presenta una reducción progresiva, hasta alcanzar concentraciones muy bajas, entre 7 y 10 µg/m³, hacia el final del año. Además, se observa una mayor presencia de material particulado durante la transición entre el primer y segundo semestre (mayo-junio). Este comportamiento puede estar relacionado con las altas temperaturas y los cambios en la dirección de los vientos, condiciones que pueden favorecer la resuspensión de polvo antes del establecimiento de la temporada de lluvias.

La gráfica polar anual muestra un máximo de PM2.5 cercano a 25 µg/m³. Al compararlo con la gráfica de mayo, donde se registran picos superiores a 30 µg/m³, se evidencia que el promedio anual puede ocultar episodios puntuales de mayor contaminación. Las concentraciones bajas que se mantienen entre agosto y diciembre reducen el valor promedio anual y pueden disminuir la percepción de la intensidad del episodio ocurrido a mediados de año. Por esta razón, evaluar únicamente el comportamiento anual podría no reflejar adecuadamente los periodos de mayor contaminación.

6.1.3.15.1. Análisis Espacial.

La integración de las gráficas polares con el radio de 4 km permite correlacionar el transporte de masas de aire con la huella física de las actividades antrópicas.

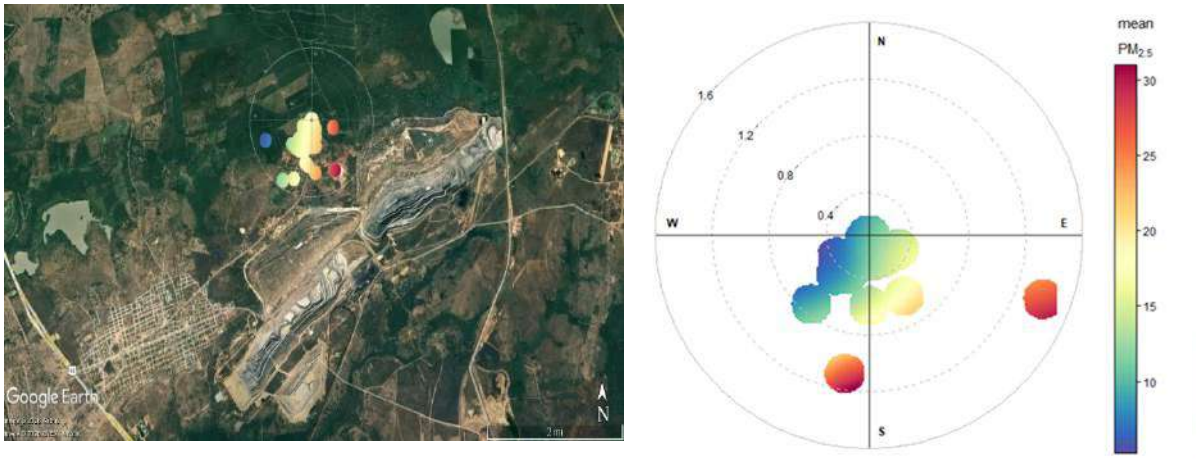
El mapa revela que el cuadrante Sur-Sureste (S-SE) dentro y justo en el límite de los 4 km está dominado por el complejo minero a cielo abierto "El Hatillo" y “La Francia”,

caracterizado por extensos tajos de excavación y suelo desnudo. Las gráficas polares de los meses más críticos (mayo, junio) y el consolidado anual muestran que las mayores concentraciones de PM2.5 provienen exactamente de las direcciones S, SE y E. Adicionalmente, el aporte desde el Suroeste (SW) en meses como agosto puede atribuirse a la resuspensión urbana y vías sin pavimentar del centro poblado La Loma/Hatillo, visible en esa dirección. El cuadrante Norte (N, NW) actúa como sumidero y zona limpia, correlacionándose perfectamente con la cobertura vegetal y cuerpos de agua (Centro América) visibles en el mapa.

Las gráficas polares indican que los picos de concentración desde el Este y Sureste ocurren frecuentemente a velocidades de viento más altas (eje radial > 1.0 m/s). Físicamente, esto indica que el material particulado no es local (resuspensión inmediata del suelo de la estación), sino que es arrastrado desde fuentes ubicadas a varios kilómetros de distancia, coincidiendo con la ubicación de las vías de acarreo y los frentes de trabajo activos de las minas ubicadas al este de la estación.

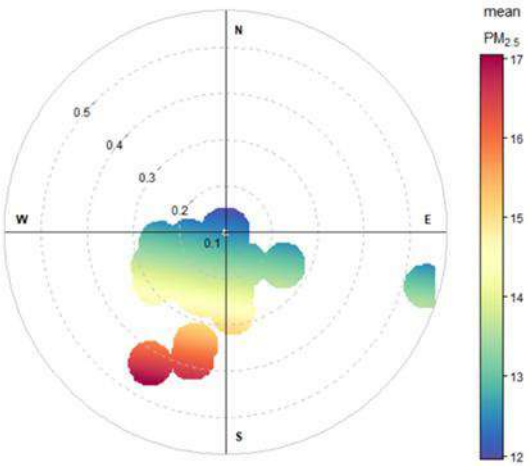
Figura 20.

Distribución de PM2.5 según la dirección del viento durante los meses más críticos



(a) *Mes de pico alto, marzo.*





(b) *Mes de pico alto, junio.*

Nota: Las gráficas muestran cómo cambian las concentraciones de PM2.5 según la dirección y velocidad del viento. Permiten identificar las direcciones que presentan los mayores niveles de contaminación. Elaborado por los autores (2026) a partir de los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), procesados en R.

6.2. ESTIMACIÓN DE LA MORTALIDAD ATRIBUIBLE A LA EXPOSICIÓN A PM2.5, UTILIZANDO LA HERRAMIENTA AIRQ+

Esta etapa metodológica se enfoca en estimar e interpretar cuantitativamente el impacto en salud por exposición a PM 2.5 en la zona minera del Cesar. Inicialmente, se describe la estructuración e ingreso de las concentraciones críticas y variables demográficas en el software AirQ+. Posteriormente, se consolidan y analizan los indicadores clave generados por el modelo tales como la fracción atribuible, los casos estimados y el riesgo relativo, permitiendo dimensionar el efecto real sobre la población analizada.

6.2.1. Ingreso De Datos En El Software AirQ+ Para La Evaluación de Impacto

Para el desarrollo de esta actividad, se ingresaron los datos de concentración de PM2.5 obtenidos del Sistema de Información de Calidad del Aire (SISAIRE). Respecto a la selección de las estaciones de monitoreo, se determinó incluir aquella que registrara la concentración promedio anual más alta en cada municipio, identificando a La Aurora ubicada en Chiriguaná, La Jagua Vía ubicada en La Jagua de Ibirico, Costa Hermosa ubicada en El Paso y Palmeras de Alamosa ubicada en Becerril.

Siguiendo los parámetros recomendados por los manuales del software AirQ+, la estimación del impacto en salud se realizó utilizando el evento de salud "Mortalidad, todas las causas (naturales), adultos de más de 30 años". Para los años analizados, se mantuvieron los parámetros epidemiológicos y metodológicos del modelo, incluyendo el método log-lineal, el riesgo relativo (con sus límites central, inferior y superior fijados en 1) y el valor de corte de 5 $\mu g/m^3$, correspondiente al valor guía anual de referencia de la OMS. Finalmente, los resultados generados por el software se presentan para cada periodo mediante la proporción atribuible, el número estimado de casos atribuibles y la tasa de casos por cada 100.000 habitantes en riesgo.

Las representaciones gráficas de los resultados ilustran la relación entre la exposición a PM2.5 y el impacto estimado en la mortalidad. En el gráfico de exceso de casos, la estimación central se ubicó en aproximadamente 9 casos, situándose entre los escenarios inferior y superior. Por su parte, la gráfica de riesgo relativo exhibió una tendencia ascendente a medida que aumentaba la concentración de PM2.5, lo que evidencia un incremento progresivo del riesgo ante mayores niveles de contaminación. En conjunto, ambas figuras respaldaron las estimaciones generadas por el software AirQ+ para el periodo analizado.

En la siguiente tabla se consolida la base de entrada para el modelo epidemiológico AirQ+. Se recopiló la información demográfica y la mortalidad por todas las causas naturales en adultos mayores de 30 años correspondiente al periodo 2021-2025. Dichos datos detallan los valores poblacionales tomados de proyecciones del DANE, el número de muertes anuales (Ver ANEXO 5), que mediante una formula integrada en el software calcula la tasa de incidencia por cada 100.000 habitantes en riesgo para los municipios de La Jagua de Ibirico, El Paso, Chiriguaná y Becerril.

Tabla 6.

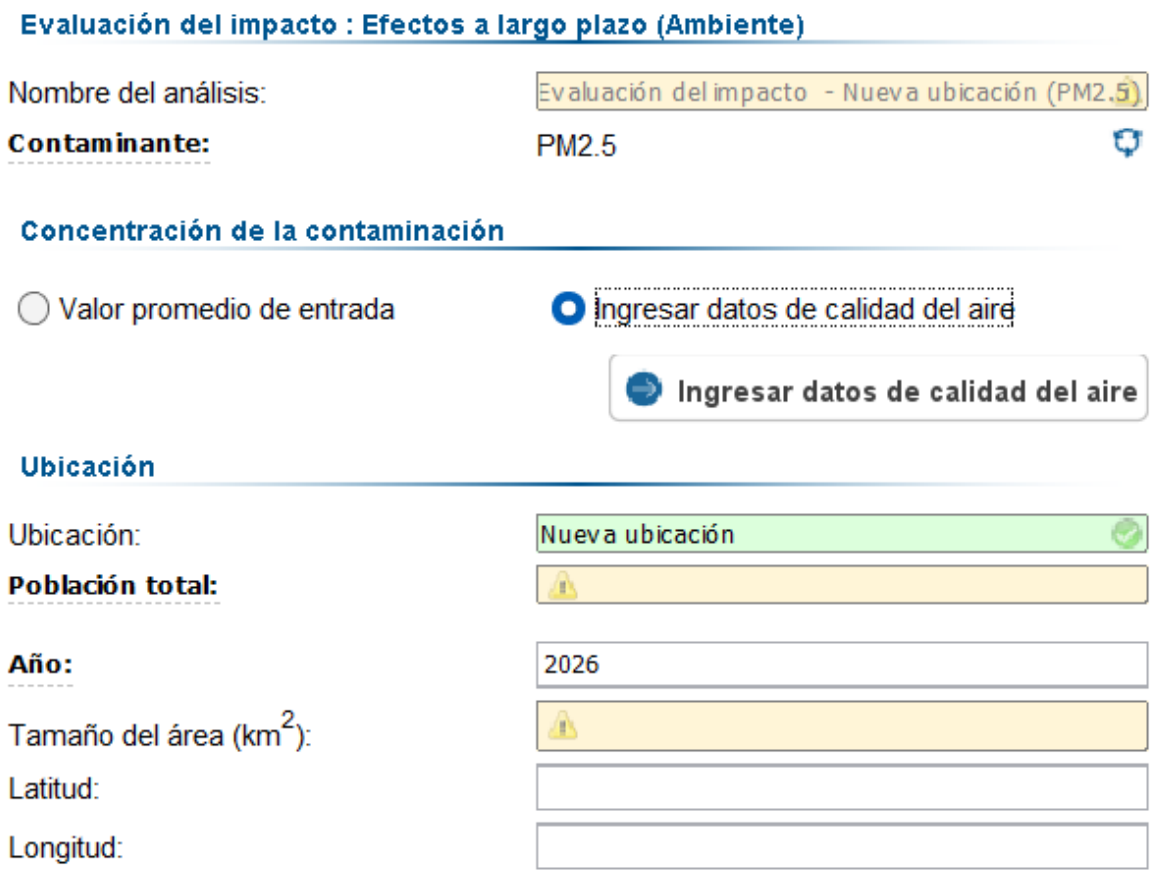
Parámetros demográficos y epidemiológicos de entrada para el software AirQ+ por municipio (2021-2025).

MUNICIPIO	AÑO	POBLACIÓN TOTAL	POBLACIÓN > 30 AÑOS	N° DE MUERTES	INCIDENCIA (POR 100.000 POBLACIÓN EN RIESGO POR AÑO)
LA JAGUA DE IBIRICO	2021	54496	20141	150	744,75
	2022	56130	20898	116	555,08
	2023	57606	21749	97	446,00
	2024	58996	22263	97	435,70
	2025	60223	23306	125	536,34
EL PASO	2021	42886	15101	128	847,63
	2022	43875	15606	87	557,48
	2023	44810	16133	73	452,49
	2024	45704	16678	107	641,56
	2025	46484	17181	97	564,58
CHIRIGUANÁ	2021	30725	12483	160	1281,74
	2022	31320	12749	129	1011,84
	2023	31880	13375	116	867,29
	2024	32424	13585	136	1001,10
BECERRIL	2025	27594	10439	67	641,82

Nota: Adaptado de las proyecciones poblacionales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), registros de mortalidad del Sistema de Integración de Información de la Protección Social (SISPRO) y cálculos generados por el software AirQ+, (2026).

Figura 21.

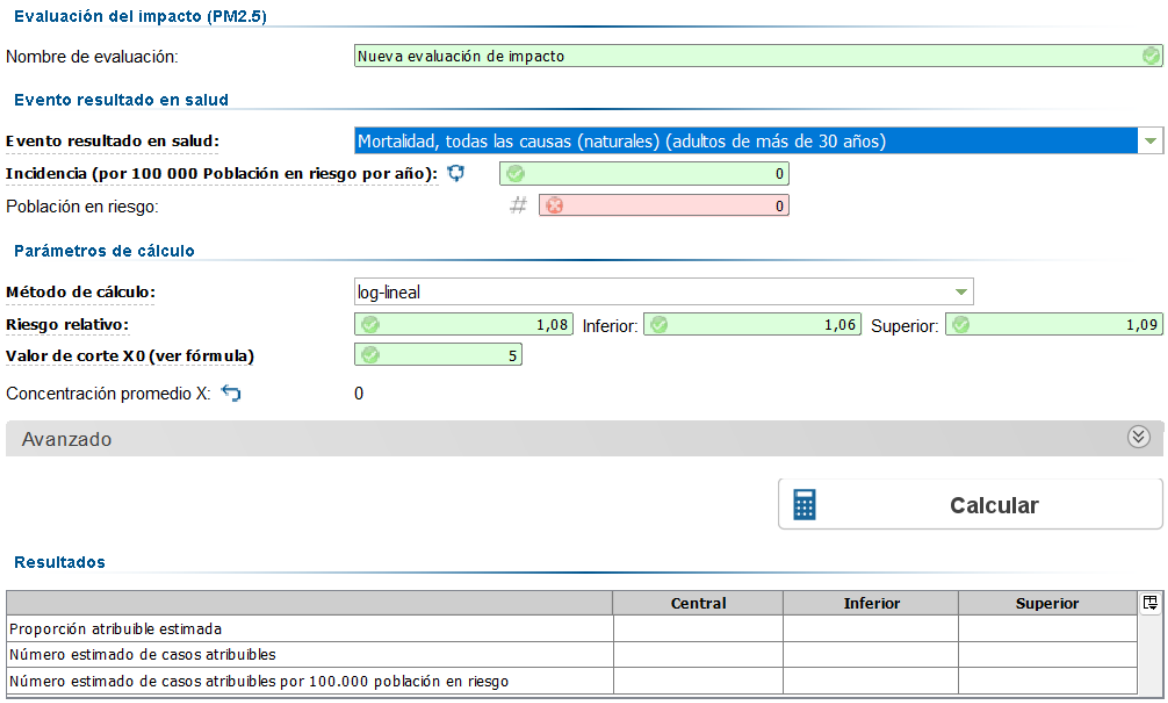
Datos de entrada en el software AirQ+.



Nota: Interfaz de usuario del software AirQ+ (Organización Mundial de la Salud) empleada para la parametrización e ingreso de datos. Captura de pantalla tomada por los autores, (2026).

Figura 22.

Parámetros requeridos del software AirQ+ y resultados



Nota: Módulo de configuración de parámetros epidemiológicos y de cálculo en el software AirQ+ (OMS). Captura tomada por los autores, (2026).

6.2.2. Análisis De Los Resultados De Evaluación De Impacto Obtenidos Mediante El Software AirQ+

Una vez ingresados los datos en el software, esta actividad se enfoca en la interpretación y análisis cuantitativo de los indicadores epidemiológicos obtenidos para el periodo evaluado de los siguientes municipios: La Jagua de Ibirico, El Paso, Chiriguaná y Becerril. El propósito fue examinar la variabilidad de las concentraciones de PM 2.5 registradas en la estación seleccionada y evaluar la magnitud del impacto en la salud pública sobre la población en riesgo. Para ello, los resultados derivados del modelo AirQ+ se desglosan en función del comportamiento del contaminante, la proporción atribuible, la estimación de casos de mortalidad y su correspondiente tasa por cada 100.000 habitantes (Ver ANEXO 6).

Tabla 7.

Resultados de la evaluación de impacto en salud mediante AirQ+.

MUNICIPIO	AÑO	Proporción atribuible estimada (%)	Casos atribuibles estimados	Casos atribuibles por 100.000 población en riesgo
LA JAGUA DE IBIRICO	2021	Central: 6,04 Inferior: 4,61 Superior: 6,74	Central: 9 Inferior: 7 Superior: 10	Central: 44,99 Inferior: 34,32 Superior: 50,19
	2022	Central: 7,84 Inferior: 6 Superior: 8,74	Central: 9 Inferior: 7 Superior: 10	Central: 43,53 Inferior: 33,28 Superior: 48,51
	2023	Central: 8,56 Inferior: 6,55 Superior: 9,53	Central: 8 Inferior: 6 Superior: 9	Central: 38,16 Inferior: 29,20 Superior: 42,50
	2024	Central: 6,67 Inferior: 5,09 Superior: 7,44	Central: 6 Inferior: 5 Superior: 7	Central: 29,06 Inferior: 22,19 Superior: 32, 41
	2025	Central: 5,86 Inferior: 4,47 Superior: 6,54	Central: 7 Inferior: 6 Superior: 8	Central: 31,43 Inferior: 23,97 Superior: 35,06
EL PASO	2021	Central: 7,33 Inferior: 5,6 Superior: 8,17	Central: 9 Inferior: 7 Superior: 10	Central: 62,14 Inferior: 47,48 Superior: 69,27
	2022	Central: 7,45 Inferior: 5,69 Superior: 8,3	Central: 6 Inferior: 5 Superior: 7	Central: 41,52 Inferior: 31,73 Superior: 46,28
	2023	Central: 9,16 Inferior: 7,01 Superior: 10,2	Central: 7 Inferior: 5 Superior: 7	Central: 41,43 Inferior: 31,73 Superior: 46,13
	2024	Central: 9,23 Inferior: 7,07 Superior: 10,27	Central: 10 Inferior: 8 Superior: 11	Central: 59,18 Inferior: 45,33 Superior: 65,90
	2025	Central: 7,8 Inferior: 5,96 Superior: 8,69	Central: 8 Inferior: 6 Superior: 8	Central: 44,02 Inferior: 33,65 Superior: 49,05
CHIRIGUANÁ	2023	Central: 6,47 Inferior: 4,94 Superior: 7,21	Central: 8 Inferior: 6 Superior: 8	Central: 56,09 Inferior: 42,81 Superior: 62,56
	2024	Central: 2,84 Inferior: 2,16 Superior: 3,18	Central: 4 Inferior: 3 Superior: 4	Central: 28,46 Inferior: 21,62 Superior: 31,81
BECERRIL	2025	Central: 3,26 Inferior: 2,48 Superior: 3,65	Central: 2 Inferior: 2 Superior: 2	Central: 20,95 Inferior: 15,93 Superior: 23,41

Nota: Elaboración propia con base en proyecciones de población del DANE, datos de mortalidad de SISPRO y resultados del software AirQ+ (2026).

6.2.2.1.Evaluación De Impacto Para El Municipio La Jagua De Ibirico.

6.2.2.1.1. Evaluación de impacto (2021).

En el periodo correspondiente a 2021, para el municipio de La Jagua de Ibirico, se obtuvo una concentración promedio de 13,10 µg/m³. Aunque este valor se encuentra dentro del límite anual establecido por la normativa colombiana, la concentración máxima alcanzó 58,25 µg/m³, superando el valor máximo permisible para un período de 24 horas de 37 µg/m³ establecido en la Resolución 2254 de 2017. Lo anterior evidencia la presencia de episodios puntuales de elevada concentración del contaminante, los cuales pueden representar una mayor exposición de la población y, por consiguiente, contribuir al riesgo de efectos adversos sobre la salud.

En cuanto al impacto estimado sobre la población de 20.141 habitantes mayores de 30 años, el software estimó una proporción atribuible de 6,04 % de la mortalidad por causas naturales asociada a la exposición a PM 2.5, lo que indica que aproximadamente seis de cada cien muertes por causas naturales en la población analizada podrían atribuirse a dicha exposición. Esto corresponde a 9 casos de mortalidad atribuibles, con un intervalo de 7 a 10 casos, y una tasa de 44,99 casos por cada 100.000 habitantes en riesgo.

6.2.2.1.2. Evaluación de impacto (2022).

Para el periodo evaluado en 2022, La Jagua de Ibirico presentó una concentración promedio de PM 2.5 de 15,61 µg/m³, superior a los 13,10 µg/m³ registrados en 2021. Aunque la concentración máxima disminuyó de 58,25 a 38,50 µg/m³, los niveles promedio muestran un incremento en la exposición al contaminante durante el periodo analizado. Este comportamiento evidencia que, pese a la reducción de los valores máximos, la población estuvo expuesta a una mayor concentración promedio de PM 2.5 respecto al año anterior.

Respecto al impacto en salud, el software consideró una población en riesgo de 20.898 habitantes mayores de 30 años y estimó que el 7,84 % de la mortalidad por causas naturales podría atribuirse a la exposición a PM 2.5 por encima del valor de referencia de 5 µg/m³. Este resultado representa 9 casos de mortalidad atribuibles y una tasa de 43,53 casos por cada 100.000 habitantes en riesgo, lo que evidencia una contribución de la exposición al material

particulado sobre la mortalidad natural de la población analizada. En comparación con 2021, la proporción atribuible aumentó, mientras que la cantidad de casos permaneció igual.

6.2.2.1.3. Evaluación de impacto (2023).

En el periodo evaluado de 2023, para el municipio de La Jagua de Ibirico, se obtuvo una concentración promedio de 16,62 µg/m³, superior a la registrada durante el año anterior. Asimismo, la concentración máxima alcanzó 42,10 µg/m³, superando el valor máximo permisible para un período de 24 horas de 37 µg/m³ establecido en la Resolución. Este comportamiento refleja una mayor presencia de concentraciones elevadas de PM 2.5 durante el periodo analizado, lo que podría representar una mayor exposición de la población al material particulado y, en consecuencia, contribuir al riesgo de efectos adversos sobre la salud.

En relación con el impacto en salud, el modelo consideró una población en riesgo de 21.749 habitantes mayores de 30 años y estimó que el 8,56 % de la mortalidad por causas naturales podría atribuirse a la exposición a PM 2.5 por encima del valor de referencia de 5 µg/m³. Esta proporción corresponde a 8 casos de mortalidad atribuibles y una tasa de 38,16 casos por cada 100.000 habitantes en riesgo, lo que evidencia la contribución que la exposición al contaminante puede representar sobre la mortalidad natural de la población analizada. En comparación con 2022, la proporción atribuible aumentó, mientras que los casos y la tasa disminuyeron, posiblemente debido a la interacción entre el incremento de la población en riesgo y las concentraciones registradas durante el periodo.

6.2.2.1.4. Evaluación de impacto (2024).

Para el municipio de La Jagua de Ibirico, durante el año 2024, se obtuvo una concentración promedio de 13,97 µg/m³, evidenciando una disminución respecto al año anterior. La concentración máxima alcanzó 36,30 µg/m³, valor que se encuentra por debajo del límite máximo permisible establecido en la Resolución Colombiana. Esto indica que, durante el periodo analizado, no se registraron concentraciones que superaran dicho límite, aunque el promedio evidencia la presencia de PM 2.5 por encima del valor de referencia de 5 µg/m³ utilizado por AirQ+, por lo que la exposición al contaminante continúa representando un posible riesgo para la salud.

En cuanto al impacto estimado sobre los 22.263 habitantes mayores de 30 años, AirQ+ determinó una proporción atribuible de 6,67 % de la mortalidad por causas naturales asociada a la exposición a PM 2.5. Este resultado corresponde a 6 casos de mortalidad atribuibles y una tasa de 29,06 casos por cada 100.000 habitantes en riesgo. En comparación con el año anterior, se observa una disminución tanto en la proporción atribuible como en los casos estimados, lo que podría estar relacionado con la reducción de la concentración promedio de PM 2.5 registrada en 2024.

6.2.2.1.5. Evaluación de impacto (2025).

Para el municipio de La Jagua de Ibirico, durante el año 2025, se obtuvo una concentración promedio de 12,84 µg/m³, presentando una ligera disminución respecto al año anterior. La concentración máxima alcanzó 24,36 µg/m³, manteniéndose por debajo del límite máximo permisible para un periodo de 24 horas de 37 µg/m³. La reducción tanto del promedio como del valor máximo refleja una disminución en los niveles de PM 2.5 durante el periodo analizado, aunque las concentraciones promedio continúan por encima del valor de referencia de 5 µg/m³ empleado por AirQ+.

En cuanto al impacto estimado sobre los 23.306 habitantes mayores de 30 años, AirQ+ determinó una proporción atribuible de 5,86 % de la mortalidad por causas naturales asociada a la exposición a $PM_{2.5}$. Este resultado representa 7 casos de mortalidad atribuibles y una tasa de 31,43 casos por cada 100.000 habitantes en riesgo. Frente a 2024, la proporción atribuible disminuyó, mientras que los casos estimados aumentaron ligeramente, lo que podría estar relacionado con el crecimiento de la población en riesgo y la interacción de este factor con las demás variables consideradas por el modelo.

6.2.2.1.6. Análisis De La Jagua de Ibirico (2021- 2025)

Al analizar el comportamiento de La Jagua de Ibirico entre 2021 y 2025, presentó variaciones en las concentraciones de PM 2.5 y en su impacto estimado sobre la mortalidad natural. El 2023 se destacó por registrar la mayor concentración promedio (16,62 µg/m³) y la mayor proporción atribuible (8,56 %), mientras que el valor máximo de concentración se presentó en 2021 (58,25 µg/m³), superando el límite permisible para 24 horas. A partir de 2024 se observa una reducción de las concentraciones y de la proporción atribuible, alcanzando en 2025 sus valores más bajos del periodo. En cuanto a los casos estimados, estos variaron entre

6 y 9 por año, evidenciando que la exposición a PM 2.5 pudo contribuir a la mortalidad natural de la población analizada, aunque con una tendencia general de disminución en los últimos años.

6.2.2.2. Evaluación De Impacto Para El Municipio De El Paso.

6.2.2.2.1. Evaluación De Impacto (2021).

Durante el año 2021, en el municipio de El Paso, registró una concentración promedio de 14,89 µg/m³. A pesar de que el promedio anual cumple con los límites de la normativa, al analizar los datos se observó variaciones significativas, con picos máximos de 37,92 µg/m³, lo que se excede de valor límite máximo permisible para 24 horas (37 µg/m³), según la resolución 2254 de 2017. Esta variabilidad puede provocar un aumento en el riesgo en la salud, debido a estos episodios de alta contaminación.

Para analizar el impacto sobre la población en riesgo que corresponde a 15.101 adultos de más de 30 años, el modelo expresa un impacto significativo en la salud pública con respecto al contaminante. Los resultados obtenidos evidencian que el 7,33% de la mortalidad por causas naturales es atribuible a la exposición al PM2.5 que se presenta en el aire. Del mismo modo, este riesgo se traduce en pérdidas de vida, es decir, la exposición a estas concentraciones se le atribuyen 9 muertes y, además, el número de casos atribuibles por 100.000 población en riesgo fue de 62,14 casos.

6.2.2.2.2. Evaluación De Impacto (2022).

Para el municipio de El Paso, durante el año 2022, se contó con una concentración promedio de 15,06 µg/m³, lo que evidencia un mínimo aumento con respecto al año anterior. Como se puede observaren los datos existen variaciones significativas, con picos máximos que presentaron valores de 40,24 µg/m³, donde se hace aún más evidente que supera el límite máximo permisible para 24 horas según la normativa. Este comportamiento refleja que la población no está expuesta a un ambiente con concentraciones de PM2.5 estables, sino que al experimentar episodios de mayor contaminación influye directamente en un incremento del riesgo en la salud.

Al evaluar cómo esta exposición tuvo efectos sobre la población riesgo que corresponde a 15.606 adultos de más de 30 años, AirQ+ indica un impacto importante en la salud pública.

Dentro del resultado se puede observar que a la mortalidad por causas naturales fue 7,45% atribuibles a la exposición del contaminante de estudio. Asimismo, el número de casos atribuibles son 6 muertes evitables, y el número estimado de casos atribuibles por 100.000 habitantes es de 41,52. Por otro lado, aunque para el año 2022 hubo un aumento en el promedio y en el pico máximo, el número de muertes y demás disminuyó, esto puede deberse a que en 2021 la mortalidad en la población fue más alta por factores externos de salud (como secuelas de la pandemia).

6.2.2.2.3. Evaluación De Impacto (2023).

Durante el año 2023, en el municipio de Becerril, se registró una concentración anual promedio de 17,48 µg/m³, lo que indica un amento en comparación con el año 2022. En el análisis de los datos se observan variaciones evidentes, con picos máximos que registran valores de 34 µg/m³. Se considera este comportamiento como una advertencia de que la población se encuentra experimentando diferentes episodios que influyen de manera directa en el riesgo en la salud de los habitantes.

Para analizar de qué manera la exposición de PM2.5 afectó en la población en riesgo (16.133 adultos de más de 30 años), el software presenta un impacto en la salud pública en términos de mortalidad. Los resultados obtenidos demuestran que el 9,16% de las muertes por causas naturales es atribuible a la exposición del material particulado (PM2.) que se encuentra en el aire. Del mismo modo, la exposición a estas concentraciones se le atribuyen 7 muertes evitables, lo cual es un riesgo que se representa en pérdida de vida y, además el número de casos estimado atribuibles por 100.000 población en riesgo es de 41,43 casos. Por lo tanto, se manifiesta un aumento en el número estimado de casos al compararlo con el año anterior en concordancia con el incremento observado del promedio anual.

6.2.2.2.4. Evaluación De Impacto (2024).

Para el municipio de El Paso, durante el año 2024, se identificó una concentración promedio de 17,58 µg/m³. A pesar de que el promedio anual no aumentó de manera significativa con respecto al año anterior, dentro de las variaciones registradas en la estación, se presentó un pico máximo de 41,80 µg/m³, un incremento relevante frente al año 2024 que excede valor límite máximo permisible para 24 horas de la normativa colombiana. De esta manera, se tiene en cuenta que la fluctuación de estas concentraciones permite determinar que

la población no está expuesta a un ambiente estable, por lo que influye en el incremento de riesgo en la salud de la población.

Al examinar la relación de esta exposición con impacto sobre la población de adultos de más de 30 años (16.678, el modela expresa un impacto importante en la salud. En los datos calculados se observa que el 9,23% de las muertes por causas naturales se le atribuyen a la exposición al PM2.5. Asimismo, la exposición a estas concentraciones se le atribuyen 10 muertes evitables, lo que representa una tasa de 59,18 casos por cada 100.000 población en riesgo. En este sentido, para el año 2024 se observó un incremento en el número de casos estimados en contraste con el año anterior.

6.2.2.2.5. Evaluación De Impacto (2025).

Durante el año 2025, para el municipio de El Paso se registró una concentración promedio de 15,55 µg/m³, lo que evidencia un mínimo aumento con respecto al año anterior. Al evaluar los datos se presentan variaciones muy significativas, con picos máximos que presentaron valores de 51,90 µg/m³, lo que indica un incremento apreciable frente al año anterior, excediendo de manera considerable con el límite máximo permisible para 24 horas (37 µg/m³). Lo anterior sugiere que el municipio experimenta episodios de mayor contaminación que incrementan el riesgo en la salud.

Al analizarlos efectos sobre la población riesgo que corresponde a 17.181 adultos de más de 30 años relacionados con la exposición de PM2.5, el modelo AirQ+ evidencian un impacto significativo en la salud pública. Los resultados obtenidos indican que el 7,8% de las muertes por causas naturales es atribuible a la exposición al material particulado (PM2.5). Del mismo modo, el número de casos atribuibles es de 8 muertes evitables para esta exposición y además, el número de casos atribuibles por cada 100.000 habitantes población en riesgo es de 44,02. De acuerdo con lo anterior, El número de casos y proporción atribuible disminuyó frente al año anterior, lo cual podría deberse al descenso del promedio anual con respecto al anterior.

6.2.2.2.6. Análisis de El Paso (2021-2025)

Al evaluar los datos entre 2021 y 2025, las muertes que se le atribuyen por exposición de PM2.5 fueron entre 6 y 10 casos cada año en el municipio. El año con la concentración más alta en general fue 2024, donde el promedio anual fue de 17,58 µg/m, al que se le atribuye 1º

muertes evitables. Sin embargo, el pico más alto fue en el año 2025 alcanzando los 51,90 µg/m³, este valor excede significativamente el límite máximo permisible para las 24 horas según la normativa colombiana, a pesar de que el promedio anual disminuyó respecto al año anterior. En pocas palabras, la variabilidad en los datos pone en evidencia el riesgo al cual está sometido la salud de la población.

6.2.2.3. Evaluación De Impacto Para El Municipio de Chiriguaná.

6.2.2.3.1. Evaluación De Impacto (2023).

Para el periodo correspondiente a 2023, el municipio de Chiriguaná presentó una concentración promedio de PM 2.5 de 13,68 µg/m³. La concentración máxima alcanzó 36,90 µg/m³, valor que se encuentra por debajo del límite máximo permisible para un periodo de 24 horas de 37 µg/m³, establecido en la Resolución 2254 de 2017. Aunque no se presentó una superación de este límite, el promedio anual registrado se encuentra por encima del valor de referencia de 5 µg/m³ utilizado por AirQ+, lo que evidencia una exposición al contaminante que puede contribuir al riesgo de efectos adversos sobre la salud.

En cuanto al impacto estimado sobre los 13.375 habitantes mayores de 30 años, AirQ+ determinó una proporción atribuible de 6,47 % de la mortalidad por causas naturales asociada a la exposición a PM 2.5 por encima del valor de referencia. Esto corresponde a 8 casos de mortalidad atribuibles y una tasa de 56,09 casos por cada 100.000 habitantes en riesgo. Estos resultados indican que, bajo los supuestos y parámetros empleados por el modelo, la exposición a PM 2.5 podría representar una contribución relevante a la mortalidad natural de la población analizada.

6.2.2.3.2. Evaluación De Impacto (2024).

Para el municipio de Chiriguaná, durante el año 2024, se obtuvo una concentración promedio de PM 2.5 de 8,74 µg/m³, evidenciando un incremento respecto al año anterior. La concentración máxima alcanzó 30,10 µg/m³, valor que se encuentra por debajo del límite máximo permisible. Aunque no se registraron concentraciones superiores a este límite, el promedio anual continúa por encima del valor de referencia de 5 µg/m³ utilizado por AirQ+, por lo que la exposición al contaminante puede representar un posible riesgo para la salud.

En cuanto al impacto estimado sobre los 13.585 habitantes mayores de 30 años, AirQ+ determinó una proporción atribuible de 2,84 % de la mortalidad por causas naturales asociada a la exposición a PM 2.5 por encima del valor de referencia. Este resultado corresponde a 4 casos de mortalidad atribuibles y una tasa de 28,46 casos por cada 100.000 habitantes en riesgo. En comparación con 2023, se observa una disminución en la proporción atribuible, los casos estimados y la tasa de mortalidad.

6.2.2.3.3. Análisis de Chiriguaná (2021- 2024)

Al analizar el comportamiento de La Jagua de Ibirico entre 2021 y 2024, Chiriguaná presentó un incremento progresivo en las concentraciones promedio de PM 2.5, pasando de 2,70 µg/m³ en 2021 a 13,68 µg/m³ en 2023. Durante 2021 y 2022, las concentraciones se mantuvieron por debajo del valor de referencia de 5 µg/m³, por lo que AirQ+ no estimó casos de mortalidad atribuibles. A partir de 2023, las concentraciones superaron dicho valor, lo que se reflejó en la estimación de mortalidad atribuible. El 2023 presentó la mayor proporción atribuible (6,47 %) y el mayor número de casos estimados (8), mientras que, en 2024, estos indicadores disminuyeron a 2,84 % y 4 casos, respectivamente.

En términos generales, los resultados evidencian un cambio en el comportamiento del impacto estimado a partir de 2023, cuando las concentraciones promedio superaron el valor de referencia utilizado por AirQ+. Aunque las concentraciones máximas registradas en 2023 y 2024 permanecieron por debajo del límite de 37 µg/m³ para 24 horas, los promedios anuales estuvieron por encima del nivel de referencia de AirQ+, manteniéndose una exposición que podría contribuir a la mortalidad natural de la población mayor de 30 años.

6.2.2.4. Evaluación De Impacto Para El Municipio de Becerril.

6.2.2.4.1. Evaluación De Impacto (2025).

Para el municipio de Becerril, durante el año 2025, se registró una concentración promedio de 9,31 µg/m³. A pesar de que el promedio anual podría considerarse moderado, el análisis de los datos presenta variaciones importantes, con picos máximos que presentaron valores de 32,19 µg/m³. Este comportamiento sugiere que la población no está expuesta a un ambiente estable, sino que experimenta episodios de mayor contaminación que incrementan el riesgo en la salud.

Al evaluar cómo esta exposición tuvo efectos sobre la población riesgo que corresponde a 10.439 adultos de más de 30 años, el software manifiesta un impacto evidente en la salud pública. Los resultados obtenidos demuestran que el 3,26% de la mortalidad por causas naturales es atribuible a la exposición al PM2.5 presente en el aire. Asimismo, este riesgo se representa en pérdida de vida, es decir, a la exposición a estas concentraciones se le atribuyen 2 muertes evitables, lo que representa una tasa de 20,95 casos por cada 100.000 población en riesgo.

6.3. VALIDACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES LOCALES DE PM2.5 CON ESTÁNDARES INTERNACIONALES (OMS) PARA EVALUAR EL RIESGO POTENCIAL EN LA SALUD DE LA POBLACIÓN EXPUESTA

Esta fase metodológica evalúa el comportamiento del impacto epidemiológico bajo marcos normativos prospectivos y la posterior formulación de medidas de mitigación. En primer lugar, se parametrizó el modelo AirQ+ para simular las concentraciones de PM 2.5 con base en los umbrales de la Resolución 2254 de 2017: el estándar actual de 25 µg/m³ y la meta reglamentaria para el año 2030 fijada en 15 µg/m³. Seguidamente, los resultados de ambas proyecciones se contrastaron de manera comparativa frente al valor guía global de la OMS (5 µg/m³).

6.3.1. Aplicación Del Modelo AirQ+ Bajo Escenario De Normativa Local Y Estándares Internacionales De La OMS

Para el desarrollo de esta actividad, se realizó la configuración e ingreso de los parámetros requeridos y recomendados por el software AirQ+. Posteriormente, se establecieron dos escenarios de exposición a PM2.5, tomando como referencia los valores establecidos para la concentración anual en la normativa colombiana: La vigente (25 µg/m³) y la futura a 2030 (15 µg/m³). Estos escenarios fueron aplicados a los municipios de La Jagua de Ibirico, Becerril, El Paso y Chiriguaná, con el propósito de realizar las respectivas simulaciones y estimaciones mediante el software y analizar el comportamiento del impacto que tengan en la salud considerando diferentes niveles de exposición.

En primer lugar, se empleó el mismo procedimiento de configuración y procesamiento utilizado en la evaluación de impacto del objetivo anterior, manteniendo los parámetros recomendados por el software AirQ+. De este modo, se conservaron las condiciones que están

relacionadas con la población en riesgo, el periodo de análisis el evento de salud y demás parámetros que tiene como requisito el software.

Sin embargo, se modificó el parámetro que corresponde a la concentración de PM2.5. En lugar de utilizar las concentraciones registradas en cada municipio por el sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA), se ingresaron valores para dos escenarios de simulación, correspondientes a 25 µg/m³ y 15 µg/m³. En este sentido, se tuvo como propósito estimar el impacto en salud que se podría presentar bajo cada uno de esos escenarios.

Para el ingreso de los parámetros requeridos por el software, se seleccionó el año 2025 como año de estudio para cada uno de los municipios y para los dos escenarios simulados. Esta elección permitió el uso de un mismo periodo de referencia para realizar las respectivas estimaciones.

Tabla 8.

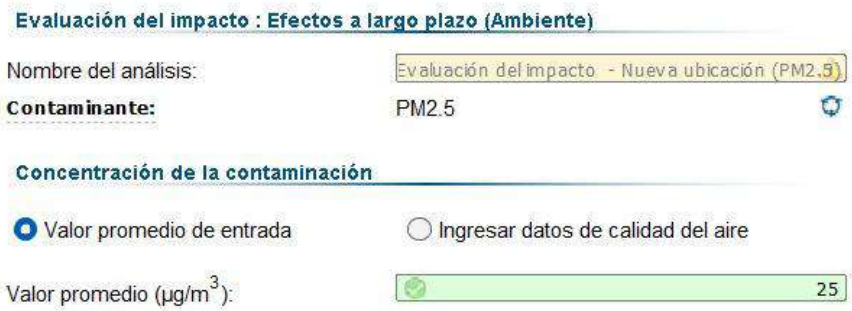
Parámetros de entrada en el software AirQ+.

MUNICIPIO	AÑO	VALOR PROMEDIO (µg/m³)	POBLACIÓN TOTAL	POBLACIÓN > 30 AÑOS	N° DE MUERTES	INCIDENCIA (POR 100.000 POBLACIÓN EN RIESGO POR AÑO)
LA JAGUA DE IBIRICO	2025	25	60223	23306	125	536,34
		15				
EL PASO	2025	25	46484	17181	97	564,58
		15				
CHIRIGUANÁ	2025	25	32915	13963	116	830,77
		15				
BECERRIL	2025	25	27594	10439	67	641,82
		15				

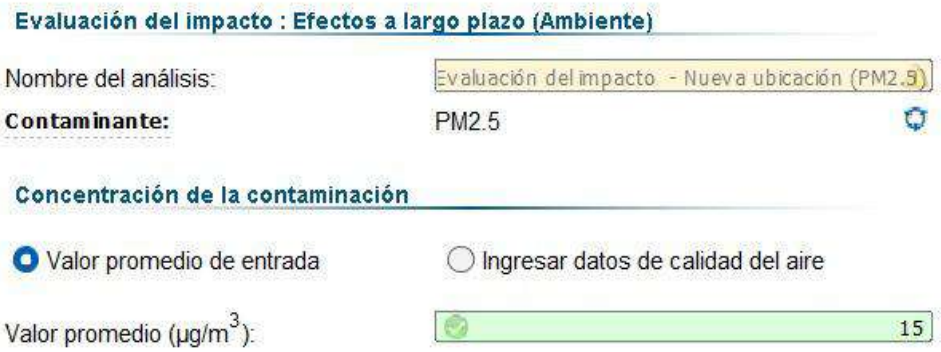
Nota: Adaptado de las proyecciones poblacionales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), registros de mortalidad del Sistema de Integración de Información de la Protección Social (SISPRO) y cálculos generados por el software AirQ+, (2026).

Figura 23.

Datos de entrada en el software AirQ+ - concentración de la contaminación.



(a) *Valor promedio en 25 µg/m³.*



(b) *Valor promedio en 15 µg/m³.*

Nota: Configuración del valor promedio de entrada en el software AirQ+ (OMS) (a) para el escenario bajo la norma vigente de 25 µg/m³ y (b) el escenario normativo proyectado al 2030 de 15 µg/m³. Capturas tomadas por los autores, (2026).

6.3.2. Evaluación De Resultados Y Formulación De Estrategias A Partir De Los Modelos Aplicados

Una vez que se han ejecutado las simulaciones en el software, esta actividad se centró en el análisis e interpretación epidemiológica de los resultados alcanzados. El propósito fue evaluar la magnitud del impacto en la salud pública, teniendo en cuenta los dos escenarios simulados. Para esto, los datos obtenidos (Ver ANEXO 7) se contrastaron con el valor guía

recomendado por la OMS que corresponde a 5 µg/m, lo que permitió determinar el riesgo en la salud de la población y así poder formular estrategias para la reducción del mismo.

Tabla 9.

Resultados obtenidos mediante AirQ+ para dos escenarios simulados.

MUNICIPIO	AÑO	Escenario de PM2.5 (µg/m³)	Proporción atribuible estimada (%)	Número estimado de casos atribuibles	Casos atribuibles por 100.000 habitantes en riesgo
LA JAGUA DE IBIRICO	2025	25	Central: 14,27 Inferior: 11 Superior: 15,83	Central: 18 Inferior: 14 Superior: 20	Central: 76,51 Inferior: 59 Superior: 84,91
LA JAGUA DE IBIRICO	2025	15	Central: 7,41 Inferior: 5,66 Superior: 8,26	Central: 9 Inferior: 7 Superior: 10	Central: 39,73 Inferior: 30,36 Superior: 44,28
ELPASO	2025	25	Central: 14,27 Inferior: 11 Superior: 15,83	Central: 14 Inferior: 11 Superior:15	Central: 80,54 Inferior: 62,11 Superior: 89,38
ELPASO	2025	15	Central: 7,41 Inferior: 5,66 Superior: 8,26	Central: 7 Inferior: 5 Superior: 8	Central: 41,82 Inferior: 31,96 Superior:46,62
CHIRIGUANÁ	2025	25	Central: 14,27 Inferior: 11 Superior: 15,83	Central: 17 Inferior: 13 Superior: 18	Central: 118,52 Inferior: 91,39 Superior: 131,53
CHIRIGUANÁ	2025	15	Central: 7,41 Inferior: 5,66 Superior: 8,26	Central: 9 Inferior: 7 Superior: 10	Central: 61,54 Inferior: 47,02 Superior: 68,60
BECERRIL	2025	25	Central: 14,27 Inferior: 11 Superior: 15,83	Central: 10 Inferior: 7 Superior: 11	Central: 91,56 Inferior: 70,60 Superior: 101,61
BECERRIL	2025	15	Central: 7,41 Inferior: 5,66 Superior: 8,26	Central: 5 Inferior: 4 Superior: 6	Central: 47,54 Inferior: 36,33 Superior: 52,99

Nota: Elaboración propia con base en proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), registros de mortalidad del Sistema de Integración de Información de la Protección Social (SISPRO) y resultados del software AirQ+ (2026).

6.3.2.1. Evaluación De Impacto En La Salud - Municipio De La Jagua de Ibirico (2025).

6.3.2.1.1. Escenario de normativa colombiana vigente (25 µg/m³).

Al analizar los resultados de la evaluación de impacto en la salud en el municipio de La Jagua de Ibirico, se puede inferir que, si la población de más de 30 años estuviera expuesta de manera sostenida al límite legal de 25 µg/m³, la proporción atribuible estimada de mortalidad sería del 14,27 %, con un intervalo entre 11 % y 15,83 %.

En términos prácticos, esto se traduce en un exceso de casos de 18 muertes atribuibles al año con rangos de 14 a 20 casos. Asimismo, la tasa estimada de casos atribuibles por cada 100.000 habitantes en riesgo se sitúa en 76,51 casos con un rango entre 59,00 y 84,91 casos. Estos resultados evidencian un impacto significativo en la salud pública incluso cumpliendo con el límite permisible de la legislación nacional vigente.

6.3.2.1.2. Escenario de normativa colombiana 2030 (15 µg/m³).

Los resultados proporcionados por el software AirQ+ indican que, si la población estuviera expuesta de manera sostenida a este futuro límite legal de 15 µg/m³, la proporción atribuible estimada de mortalidad se reduciría al 7,41 % con un intervalo entre 5,6 % y 8,26 %.

A su vez, se observa un exceso de 9 muertes atribuibles con rangos de 7 a 10 casos. La tasa estimada de casos atribuibles por cada 100.000 habitantes en riesgo descendería a 39,73 casos con un intervalo entre 30,36 y 44,28 casos. Estos resultados evidencian que, si bien alcanzar la meta normativa del 2030 disminuiría a la mitad la mortalidad atribuible en comparación con el límite actual, aún persistiría un riesgo, dado que las concentraciones seguirían estando por encima del valor guía recomendado por la OMS.

6.3.2.2. Evaluación De Impacto En La Salud - Municipio: El Paso (2025).

6.3.2.2.1. Escenario de normativa colombiana vigente (25 µg/m³).

Los resultados obtenidos evidencian que, si la población de El Paso, específicamente los mayores de 30 años, se mantuvieran expuestos de forma continua al límite máximo permisible de 25 µg/m³, la proporción atribuible estimada de mortalidad sería del 14,27 %, con un rango entre 11% inferior y 15,83 % superior.

Al analizar las cifras totales, se observa un exceso de casos de 14 muertes atribuibles, con un rango de 11 inferior y 15 para superior. Del mismo modo, la tasa estimada de casos atribuibles por cada 100.000 habitantes en riesgo. Estos resultados permiten observar el impacto significativo en la salud pública aun cuando cumple con el límite permisible de la normativa vigente.

6.3.2.2.2. Escenario de normativa colombiana 2030 (15 µg/m³).

Los valores obtenidos del Software indican que, si la población de estudio se mantuviera expuesta de manera sostenida a este futuro límite máximo permisible de 15 µg/m³, la proporción atribuible estimada de mortalidad se reduciría al 7,41 %, con un rango entre 5,66 inferior y 8,26 % superior.

Por otra parte, se manifiesta un exceso de 7 muertos atribuibles al año con un intervalo entre 5 a 8 casos. La tasa estimada de casos atribuibles por cada 100.000 habitantes en riesgo disminuiría a 41,82 casos. Como se puede observar, estos resultados demuestran que, si bien alcanzar la meta normativa de 15 µg/m³ para 2030 descendería a la mitad la mortalidad atribuible en comparación con el límite actual vigente, seguiría presente un riesgo para la población, considerando que las concentraciones continuarían estando por encima del valor guía recomendado por la OMS.

6.3.2.3. Evaluación De Impacto En La Salud - Municipio: Chiriguaná (2025).

6.3.2.3.1. Escenario de normativa colombiana vigente (25 µg/m³).

Los resultados indican que, si la población de Chiriguaná estuviera expuesta de manera sostenida al límite legal de 25 µg/m³, la proporción atribuible estimada de mortalidad sería del 14,27 % con un intervalo entre 11 % y 15,83 %.

A nivel poblacional, esta estimación refleja un exceso de 17 muertes atribuibles al año rango de 13 a 18 casos. Por su parte, la tasa estimada de casos atribuibles por cada 100.000 habitantes en riesgo se ubica en 118,52 casos con un rango entre 91,39 y 131,53 casos. Estos resultados muestran un impacto considerable en la salud pública, incluso cumpliendo con el límite permitido por la norma nacional actual.

6.3.2.3.2. Escenario de normativa colombiana 2030 (15 µg/m³).

Los resultados de AirQ+ indican que, si la población estuviera expuesta de manera sostenida a este futuro límite legal de 15 µg/m³, la proporción atribuible estimada de mortalidad bajaría al 7,41 % con un intervalo entre 5,66 % y 8,26 %.

Esta reducción significa un exceso estimado de 9 muertes atribuibles al año con un rango de 7 a 10 casos. La tasa estimada de casos atribuibles por cada 100.000 habitantes en riesgo disminuiría a 61,54 casos con un intervalo de 47,02 y 68,60. Estos datos demuestran que, aunque cumplir la meta del 2030 reduciría casi a la mitad los fallecimientos asociados en comparación con el límite actual, seguiría existiendo un riesgo evitable para la población al no alcanzar el valor guía de la OMS.

6.3.2.4. Evaluación De Impacto En La Salud - Municipio: Becerril (2025).

6.3.2.4.1. Escenario de normativa colombiana vigente (25 µg/m³).

Al analizar la evaluación de impacto en la salud en el municipio de El Paso, se puede observar que, si la población, específicamente los adultos de más de 30 años se mantuvieran expuestas de forma continua al límite máximo legal actual vigente 25 µg/m³, la proporción atribuible estimada de mortalidad sería de 14,27 %, con un intervalo entre 11% y 15,83%.

Del mismo modo, se hace evidente un exceso de 10 muertes atribuibles, con rangos estimados entre 7 a 11 casos. Además, los casos atribuibles por cada 100.000 habitantes que se encuentran en riesgo se sitúan en 91, 56 casos. Estos datos proporcionados manifiestan un impacto significativo en la salud humana del municipio, aun cuando cumple con valor máximo permisible de la normativa vigente.

6.3.2.4.2. Escenario de normativa colombiana 2030 (15 µg/m³).

Inicialmente, los resultados obtenidos de AirQ+, señalan que, si la población se mantuviera expuesta de manera sostenida a este futuro límite máximo legal de 15 µg/m³, la proporción atribuible estimada de mortalidad se reduciría al 7,41 %, con un rango entre 5,66% inferior y 8,26 % superior.

Cabe señalar que, dentro del resultado se presentan 5 muertes atribuibles al año con un intervalo que va entre 4 y 6 casos. Además, la tasa estimada atribuible por cada 100.000 habitantes en riesgo tuvo una disminución a 47,54 casos. Por lo tanto, se puede observar que

alcanzar la meta normativa del 2030 disminuye a la mitad el número de muertes atribuibles en Becerril en comparación con el valor de la normativa actual vigente, por lo que persistiría un riesgo residual frente a lo recomendado por la OMS.

6.3.2.5. Formulación De Estrategias Orientadas A La Gestión Del Riesgo Asociado A La Exposición A PM2.5

De acuerdo con resultados obtenidos empleando el software AirQ+, se formularon estrategias orientadas a la gestión del riesgo en salud asociado a la exposición a PM2.5 en la zona minera del departamento del Cesar.

6.3.2.5.1. Sistema Local De Alerta Temprana Meteorológica.

Proponer un protocolo de alerta temprana de salud pública para los cuatro municipios estudiados (La Jagua de Ibirico, El Paso, Chiriguaná y Becerril) enfocados a la identificación de condiciones meteorológicas que puedan contribuir a el transporte y dispersión de PM2.5 hacia áreas con población expuesta. El protocolo tomaría en cuenta como periodo de atención prioritaria a los primeros meses del año de enero a abril y consideraría la generación de alertas en situaciones en las que se presenten condiciones de viento mayores a 6 m/s relacionadas con las trayectorias críticas identificadas en el presente estudio, particularmente aquellos que provienen del Este-Noreste que estarían relacionadas con los complejos mineros. Ante la ocurrencia de estas condiciones, el sistema emitiría alertas para que las autoridades activen acciones preventivas de información a la población y seguimiento de las concentraciones de material particulado PM2.5.

6.3.2.5.2. Intervención Operativa Estacional En Fuentes de Emisión.

Proponer un modelo de gestión basado en la variación estacional de las emisiones de PM2.5 en el intervalo comprendido entre enero y abril, con la implementación de mejoras en las actividades de reducción y control de polvo en fuentes relacionadas con la actividad minera, principalmente en botaderos y vías de acarreo determinados como áreas que podrían contribuir a los eventos de incremento de PM2.5. Esta estrategia buscaría reforzar las medidas de prevención a lo largo del periodo en el que los resultados de las variables meteorológicas y de dispersión indicaron condiciones favorables para el transporte del material particulado hacia las zonas pobladas.

6.3.2.5.3. Optimización Técnica Y Focalización Del SVCA Basada En Trayectorias Críticas Hallados En Los Gráficos Polares.

Proponer consideraciones técnicas para la optimización y focalización del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), teniendo en cuenta las trayectorias de viento y las áreas en los que se identificaron condiciones relacionadas con niveles de concentraciones de PM2.5 más elevados. Se contempla la evaluación para incorporar puntos de monitoreo complementarios en sectores estratégicos, específicamente en sitios como el corredor relacionado con el tráfico pesado de la ruta 45 y en zonas que queden cercanas al centro urbano de La Loma que tengan influencia en las trayectorias criticas identificadas. Del mismo modo, se plantea tener en cuenta sistemas de monitoreo que contengan mayor resolución temporal, de preferencia que presente una frecuencia de registro horaria, que facilite la identificación de eventos en donde se incrementen las partículas de PM2.5 asociados con cambios en la dirección y velocidad del viento, como complemento de la información obtenida a partir de promedios calculados para periodos más extensos.

7. CONCLUSIÓN

La presente investigación tuvo como propósito evaluar el impacto en la salud humana asociado a la alta concentración de material particulado PM2.5 en la zona minera del departamento del Cesar. Para abordar el desarrollo de este estudio, se implementó un diseño de investigación cuantitativo, exploratorio y no experimental-longitudinal, considerando como muestra poblacional 175.097 habitantes mayores de 30 años residentes en los municipios de influencia directa: Becerril, El Paso, Chiriguaná y La Jagua de Ibirico.

En relación con el primer objetivo específico, orientado en analizar la variación temporal y espacial de las concentraciones de PM2.5 a partir de datos proporcionados por el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SEVCA), se buscó comprender el comportamiento de dispersión atmosférica del contaminante e identificar las zonas de mayor riesgo. Para ello, se recopiló y procesó una base de datos correspondiente al periodo (2021-2025), obtenidas de catorce estaciones de monitoreo, de las cuales se seleccionaron aquellas que registraron los mayores promedios históricos en cada municipio: Costa Hermosa para El Paso (16,13 µg/m³), La Jagua Vía para La Jagua de Ibirico (14,17 µg/m³), Palmeras de Alamosa para Becerril (9,36 µg/m³) y La Aurora para Chiriguaná (7,53 µg/m³).

El análisis de estos datos mediante el software R, permitió representar el comportamiento de las variables en rosas de viento y gráficos polares, evidenciando que las concentraciones de PM2.5 en la zona no es homogéneo, sino que está regido por una marcada estacionalidad y variabilidad meteorológica. En la estación La Jagua Vía, se identificó que los periodos con mayores concentraciones se presentaron principalmente durante el primer cuatrimestre del año (enero-abril). Duranta estos meses, predominaron los vientos provenientes del Este y Noreste, con velocidades medias que alcanzaron hasta 10 m/s, coincidiendo con la dirección de las áreas con ausencias de vegetación, los tajos activos y los botaderos de estéril de los complejos mineros, ubicados aproximadamente entre 3 y 4 km de la estación. Estas condiciones favorecieron el transporte del material particulado hacia el área de monitoreo y se asocian con picos máximos de concentración que superaron los 40 µg/m³.

En cuanto al segundo objetivo específico, orientado a estimar la mortalidad asociada a la exposición a PM2.5 mediante la herramienta AirQ+, se buscó convertir las concentraciones

ambientales obtenidas en indicadores epidemiológicos cuantificables que permitieran demostrar el impacto de este contaminante sobre la población. Para su desarrollo, se organizaron las bases de datos en formato CSV y se incorporaron al software los parámetros demográficos y los registros de mortalidad correspondientes a los cuatro municipios. El análisis se centró en la población adulta mayor de 30 años, aplicando el método log-lineal y estableciendo como concentración de referencia el valor guía de 5 µg/m³ recomendado por la OMS.

Los resultados obtenidos muestran que la exposición al material particulado tiene una contribución constante y cuantificable en la mortalidad por causas naturales dentro de la zona minera. La magnitud de este efecto varía en función de los niveles máximos de concentración registrados durante cada año. En este sentido, El Paso presentó en 2024 el mayor porcentaje de mortalidad atribuible de los municipios analizados, alcanzando un 9,23 %, equivalente a una estimación de 10 muertes potencialmente evitables durante dicho periodo. En La Jagua de Ibirico, el mayor impacto se presentó en 2023, con una proporción atribuible del 8,56 % y un estimado de 8 casos de mortalidad relacionados. Asimismo, Chiriguaná y Becerril presentaron efectos asociados a la exposición, con valores máximos de mortalidad atribuible de 6,47 % en 2023 y 3,26 % en 2025, respectivamente.

Estos resultados permiten establecer que los periodos con elevadas concentraciones de PM2.5, asociados tanto a las condiciones de viento como a las fuentes de emisión identificadas previamente, se relacionan directamente con un incremento del riesgo para las poblaciones expuestas. A partir de la información obtenida, se considera que el segundo objetivo fue cumplido en su totalidad, al permitir cuantificar de manera matemática el riesgo en salud a escala territorial. No obstante, la evaluación presenta ciertas limitaciones e incertidumbres inherentes al análisis, especialmente debido a los vacíos temporales generados por la intermitencia de los registros de algunas estaciones del SVCA. Esta situación influyó en la consolidación de los promedios anuales utilizados como datos de entrada en el modelo.

En relación con el tercer objetivo específico, dirigido a contrastar las concentraciones locales de PM2.5 con estándares internacionales con el propósito de valorar el riesgo potencial para la salud, se buscó determinar el límite permisible que proporcionan tanto la normativa vigente como las metas regulatorias proyectadas. Para este análisis, mediante AirQ+ se

plantearon dos escenarios normativos prospectivos tomando como referencia el año 2025: el primero consideró una exposición permanente al límite nacional actualmente permitido de 25 µg/m³, mientras que el segundo contempló la meta proyectada para 2030 de 15 µg/m³. Los resultados obtenidos evidencian diferencias importantes en el impacto potencial sobre la salud. Bajo una exposición constante al límite legal vigente de 25 µg/m³, la mortalidad atribuible alcanzaría el 14,27 % en los cuatro municipios, lo que representaría un exceso estimado de 18 muertes en La Jagua de Ibirico, 17 en Chiriguaná, 14 en El Paso y 10 en Becerril. Por otra parte, al simular el escenario correspondiente a la meta de 15 µg/m³ para 2030, la proporción de mortalidad atribuible disminuiría al 7,41 %, reduciendo aproximadamente a la mitad los casos estimados: 9 en La Jagua de Ibirico y Chiriguaná, 7 en El Paso y 5 en Becerril. Estos resultados permiten evidenciar la importancia de fortalecer las medidas de gestión y control de la exposición, particularmente mediante tres estrategias puntuales: la implementación de un protocolo de alerta de salud pública durante los periodos críticos de enero a abril; el fortalecimiento estacional de las acciones de supresión de polvo en botaderos y vías de acarreo de los complejos mineros; y la optimización técnica del SEVCA mediante sensores complementarios de monitoreo horario ubicados en las trayectorias de viento críticas, especialmente en el corredor de la Ruta 45 y el área de influencia directa sobre el centro urbano de La Loma.

8. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se presentan a continuación se derivan del análisis integral de los resultados obtenidos durante el desarrollo de los objetivos específicos de la investigación, considerando además los aspectos técnicos y metodológicos relacionados con la evaluación del impacto en la salud asociado a las concentraciones de PM2.5 en la zona minera del Cesar. Su formulación busca proponer acciones de mejora y orientar futuras intervenciones encaminadas a fortalecer el monitoreo de la calidad del aire y la protección de las poblaciones potencialmente vulnerables dentro del área de influencia minera.

Desde el punto de vista metodológico, teniendo en cuenta las dificultades identificadas para disponer de registros continuos de PM2.5 a través del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), se recomienda fortalecer y ampliar la base de datos atmosféricos mediante registros más completos, continuos y representativos de las condiciones de calidad del aire de la zona de estudio. Como se observó en los resultados correspondientes al primer objetivo de la investigación, se presentaron periodos sin información debido a interrupciones en las mediciones de algunas estaciones, lo que dificultó la obtención de promedios anuales continuos. Ante esta situación, se recomienda desarrollar campañas de monitoreo complementarias utilizando equipos de bajo costo previamente validados o sensores portátiles que permitan realizar mediciones continuas durante los periodos de mayor criticidad, particularmente durante el primer trimestre del año.

Respecto al comportamiento espacial y meteorológico identificado mediante el análisis de las gráficas polares de la Fase 1, se recomienda que futuras investigaciones incorporen variables meteorológicas complementarias, entre ellas la precipitación y la humedad relativa. Esta recomendación surge de la disminución observada en las concentraciones de PM2.5 durante el periodo intermedio del año, comportamiento que podría estar relacionado con un efecto de lavado atmosférico producido por las precipitaciones. La comprobación estadística de esta relación permitiría mejorar la comprensión de la variabilidad estacional del contaminante y contribuir a la identificación anticipada de posibles periodos de mayor concentración.

De igual manera, para profundizar en el comportamiento de los contaminantes en sectores como La Loma y el área urbana de La Jagua de Ibirico, se recomienda considerar con mayor detalle las fuentes móviles de emisión. Los resultados mostraron variaciones en las concentraciones que podrían estar relacionadas con las actividades urbanas y con la resuspensión de material particulado asociada al tránsito vehicular sobre la Ruta 45, particularmente durante periodos caracterizados por menores velocidades del viento.

En cuanto a la gestión del riesgo para la salud pública, a partir de los resultados obtenidos mediante el modelo AirQ+, se considera necesario complementar la evaluación basada únicamente en los promedios anuales con mecanismos de seguimiento que permitan identificar y atender oportunamente los episodios de mayor concentración de PM2.5.

Los resultados del estudio permitieron identificar que el uso exclusivo de promedios anuales puede ocultar la ocurrencia de episodios puntuales de alta concentración, durante los cuales los niveles de PM2.5 superaron de manera recurrente los 37 µg/m³ establecidos para periodos de 24 horas en la Resolución 2254 de 2017. Por esta razón, se recomienda que las autoridades ambientales regionales evalúen la implementación de un sistema de alertas tempranas de carácter escalonado, basado en el seguimiento de promedios diarios móviles o de preferencia por horas. Este mecanismo permitiría generar avisos preventivos dirigidos a la población expuesta cuando se presenten episodios de incremento significativo de las concentraciones del contaminante.

Por otra parte, la comparación prospectiva desarrollada durante la Fase 3 mostró que, aun bajo el cumplimiento del límite permisible de 25 µg/m³ de la normativa colombiana, podría mantenerse una carga evitable de mortalidad por causas naturales asociada a la exposición a PM2.5. En este sentido, los resultados de la simulación pueden constituir un insumo técnico para los espacios de diálogo y concertación entre las autoridades gubernamentales y los actores del sector productivo de la región, con el propósito de avanzar progresivamente hacia la meta normativa establecida para 2030 de 15 µg/m³. Asimismo, debido a que incluso este escenario proyectado mantiene niveles superiores al valor guía de 5 µg/m³ recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se recomienda fortalecer y mantener de manera

permanente las acciones de prevención y mitigación de las emisiones de PM2.5 en la zona carbonífera del Cesar.

Desde la perspectiva de la gestión del conocimiento y el fortalecimiento institucional, los resultados de esta investigación presentan posibilidades de ampliación mediante el respaldo de entidades públicas, autoridades ambientales y organizaciones académicas. La disponibilidad de apoyo técnico y financiero permitiría extender el área de estudio, incorporar estaciones que actualmente se encuentran inactivas y desarrollar modelos de dispersión atmosférica con mayor nivel de detalle, orientados a determinar la contribución específica de las distintas actividades desarrolladas en las operaciones mineras a cielo abierto ubicadas a menos de 4 kilómetros de los centros poblados. De igual manera, el acompañamiento institucional podría favorecer el desarrollo de investigaciones epidemiológicas directas que complementen la estimación teórica log-lineal realizada mediante AirQ+, incorporando información proveniente de registros clínicos y bases de datos consolidadas de mortalidad de las poblaciones estudiadas. Esto permitiría mejorar la caracterización y precisión de los riesgos relativos asociados a la exposición al contaminante.

Finalmente, este estudio representa un referente técnico inicial para la evaluación y cuantificación de los riesgos asociados a la contaminación atmosférica en zonas mineras de Colombia. En este sentido, sus resultados pueden servir como base para futuras investigaciones desarrolladas por estudiantes, grupos académicos y profesionales especialistas en disciplinas relacionadas. Se espera que los antecedentes, resultados y limitaciones identificados en este trabajo sean considerados en nuevos estudios orientados a profundizar en los efectos de las exposiciones agudas al material particulado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANLA. (2018). *Reporte Sobre la Zona Minera del Centro del Cesar. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.*

Arregocés, H. A., Rojano, R., & Restrepo, G. (2023). Health risk assessment for particulate matter: application of AirQ+ model in the northern Caribbean region of Colombia. *Air Quality, Atmosphere and Health*, *16*(5), 897–912. https://doi.org/10.1007/s11869-023-01304-5

Brito, V. F. (2022). *EFECTOS SOBRE LA SALUD*.

CORPOCESAR. (2022). *Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire de Corpocesar, ubicados en la Zona Centro del Cesar y Valledupar. (Incluyendo Sistema de Alertas Tempranas SAT). Corporación Autonoma Regional del Cesar.*

DANE. (2022). *Años de esperanza de vida perdidos 2017 - 2019*.

El consejo de Facultad de Ingeniería y Tecnológicas. (2021). *UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR FORMATO DE ACUERDO "POR MEDIO DEL CUAL SE ADOPTAN LAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE PREGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS SEDE VALLEDUPAR, Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES."*

Función Pública. (1997). *Decreto_1697_de_1997*.

Grisales, H., Piñeros, J., Nieto, E., Porras, S., Montealegre, N., González, D., & Ospina, D. (2021). Local attributable burden disease to PM2.5 ambient air pollution in Medellín, Colombia, 2010–2016. F1000Research. *F1000Research*, *10*, 428. https://doi.org/10.12688/f1000research.52025.1

IDEAM. (2020). *Producción técnica*.

MADS. (2017). *Resolucion-2254-de-2017*.

Mardoñez, V., Rojas, N. Y., Pineda, A., Puliafito, E., Cazorla, M., Nogueira, T., & Wikuats, C. (2025). Health impacts of air pollution in South America: Recent advances and research gaps. ScienceDirect. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 45). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100627

Marín, D., Herrera, V., Piñeros-Jiménez, J. G., Rojas-Sánchez, O. A., Mangones, S. C., Rojas, Y., Cáceres, J., Agudelo-Castañeda, D. M., Rojas, N. Y., Belalcazar-Ceron, L. C., Ochoa-Villegas, J., Montes-Mejía, M. L., Lopera-Velasquez, V. M., Castillo-Navarro, S. M., Torres-Prieto, A., Baumgartner, J., & Rodríguez-Villamizar, L. A. (2025). Long-term exposure to PM2.5 and cardiorespiratory mortality: an ecological small-area study in five cities in Colombia. *Cadernos de Saude Publica*, *41*(4). https://doi.org/10.1590/0102-311XEN071024

Martínez, L. (2023). Impacto de la materia particulada fina (PM2.5) en la morbilidad y mortalidad respiratoria. Kompass Neumol. *Kompass Neumología*, *5*(1), 16–18. https://doi.org/10.1159/000529131

MAVDT. (2006). *MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL*.

MAVDT. (2010a). *MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL*.

MAVDT. (2010b). *MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL "Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006."*

MINAMBIENTE. (1995). *Decreto 948 de 1995*.

MINAMBIENTE. (2020). *DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE Proyecto de Resolución*.

Moreno, Andrea., Gindri, C., & Olivero, J. (2026). Toxicological effects of particulate matter (PM2.5) from an industrial city of the Colombian Caribbean on Caenorhabditis elegans. *Atmospheric Pollution Research*, *17*(1). https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102713

Naghan, D. J., Neisi, A., Goudarzi, G., Dastoorpoor, M., Fadaei, A., & Angali, K. A. (2022). Estimation of the effects PM2.5, NO2, O3 pollutants on the health of Shahrekord residents

based on AirQ+ software during (2012–2018). In *Toxicology Reports* (Vol. 9, pp. 842–847). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.03.045

Negrete, R., Orduz, L., Bernal, C., Ruiz, J., & Sanabria, J. (2024). *INFORME DEL ESTADO DE LOS RECURSOS NATURALES: ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LOS SVCA FIJOS EN EL ÁREA DE LA ESTRATEGIA DE LA ZONA MINERA DEL CENTRO DEL CESAR (2018-2023) Aplicación de la Fase IV de la estrategia de monitoreo: análisis de información*.

OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire. Materia particulada (MP2,5 y MP10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Organización Mundial de la Salud.*

Peñaranda, A., & Rodriguez, A. (2024). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE (PM10, PM2.5) ANTES, DURANTE Y DESPUES DE LA PANDEMIA DEL COVID-19, SEGÚN REPORTES DE DATOS OBTENIDOS DE DOS ESTACIONES DE MUESTREO DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE, EN VALLEDUPAR, CESAR.* www.unicesar.edu.co

Penchala, A., Patra, A. K., Santra, S., Dubey, R., Mishra, N., Nazneen, & Pradhan, D. S. (2025). Assessment of vertical transport of PM in a surface iron ore mine due to in-pit mining operations. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *240*. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115580

Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado, & María del pilar Baptista Lucio. (2014). *Metodología de la investigación.*

Rodríguez Hinojosa, R. M. (2020). *Contaminación por partículas PM 2.5*. www.freepik.com

Rodríguez, J. (2024). *Influencia de la dinámica de los vientos atmosféricos sobre las concentraciones de PM 10 y PM 2.5 de la zona de minería de carbón a cielo abierto del departamento del Cesar*.

Rojano, R., Angulo, L., & Restrepo, G. (2015). *A MINERÍA A CIELO ABIERTO: CASO CERREJÓN COLOMBIA CONCENTRATION AND RATIO PST, PM 10 AND PM 2.5 IN TOWNS NEAR OPEN PIT MINING: CASE CERREJÓN COLOMBIA* (Vol. 30).

Sangkham, S., Phairuang, W., Sherchan, S. P., Pansakun, N., Munkong, N., Sarndhong, K., Islam, M. A., & Sakunkoo, P. (2024). An update on adverse health effects from exposure to PM2.5. In *Environmental Advances* (Vol. 18). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100603

Suescún Montoya, O. E. (2013). *Lectura 1. Conceptos e indicadores básicos de la epidemiología aplicados a la inspección, vigilancia y control sanitario de alimentos, bebidas y productos farmacéuticos*. http://www.rcm.upr.edu/publichealth/Documentos/Modulo

Superior De La Judicatura, C., & Administrativa, S. (2015). *Constitución Política de Colombia Edición especial preparada por la Corte Constitucional*.

WHO. (2020). *Evaluación de impacto en salud de la contaminación del aire: Manual de introducción a AirQ+*. *World Health Organization.* iv–25.

CARB. (2019). *Programa de Protección del Aire en la Comunidad*. https://www.arb.ca.gov/lispub/comm/bclist.php

Follos Pliego, F. (2012). *MANUAL BÁSICO para el tratamiento de datos de*. http://www.R-project.org/

Minambiente. (2020). *DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE Proyecto de Resolución*.

WHO. (2020a). *Evaluación de impacto en salud de la contaminación del aire: Manual de introducción a AirQ+*. *World Health Organization.* iv–25.

WHO. (2020b). *Manual AirQ+ de tablas de vida*.

WHO. (2022a). *AirQ+: Datos de mortalidad*. www.nyc.gov

WHO. (2022b). *GLOSARIO AIRQ+ (versión diciembre 2022) Contenidos*.

ANEXOS

Los documentos correspondientes a los siguientes anexos se encuentran disponibles en el enlace que se presenta a continuación, organizados en sus respectivas carpetas:

https://drive.google.com/drive/folders/1banzXp0hET3n3Gh4kUqZALL-jPrzNTsh?usp=sharing

ANEXO 1. PROMEDIOS DE LAS ESTACIONES.

**documento en formato Excel con los registros disponibles de las estaciones durante el periodo de observación (2021-2025), utilizado para definir los promedios totales y selección de estaciones. Los registros de PM2.5 provienen del sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA).*

ANEXO 2. BASE DE DATOS PARA EL SOTFWARE R.

**documentos en formato Excel con registros disponibles de PM2.5, velocidad del viento (WS) y dirección del viento (WD) como parámetro de entrada para el software R de las estaciones: La Jagua Vía, Costa Hermosa, La Aurora y Palmeras de Alamosa.*

ANEXO 3. BASE DE DATOS PARA EL SOFTWARE AIRQ+.

**documentos en formato Excel con registros disponibles de PM2.5 como parámetro de entrada para el software AirQ de las estaciones: La Jagua Vía, Costa Hermosa, La Aurora y Palmeras de Alamosa.*

ANEXO 4. GRÁFICAS GENERADAS POR EL SOFTWARE R.

**documentos en formato Word con las gráficas de rosas de vientos y Polar Plots para el análisis temporal-espacial de las estaciones: La Jagua Vía, Costa Hermosa, La Aurora y Palmeras de Alamosa.*

ANEXO 5. CASOS DE MORTALIDAD.

**documentos en formato Excel con los registros disponibles de casos de mortalidad de los municipios: La Jagua de Ibirico, El Paso, Chiriguaná y Becerril. Los datos de mortalidad provienen del sistema de integración de información de la protección social (SISPRO).*

ANEXO 6. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL SOFTWARE AIRQ+ PARA LA FASE 2.

**documentos en formato de Word con los resultados obtenidos en la actividad 2.2 de la fase 2, mediante el Software AirQ+ para los municipios: La Jagua de Ibirico, El Paso, Chiriguaná y Becerril.*

ANEXO 7. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL SOFTWARE AIRQ+ PARA LA FASE 3 (ACTIVIDAD 3.2.)

**documentos en formato de Word con los resultados obtenidos en la actividad 3.2 de la fase 3, mediante el Software AirQ+ para los municipios: La Jagua de Ibirico, El Paso, Chiriguaná y Becerril.*