

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 30-09-2024	Fecha C
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO	Pág. 1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Alvaro Javier Rios Rodriguez		
FACULTAD	Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente		
PLAN DE ESTUDIOS	Especialización en sistemas de gestión integral HSEQ		
DIRECTOR	Alexander Armesto Arenas		
CODIRECTOR (si aplica)	No aplica		
TÍTULO DE LA TESIS	Diseño del plan de gestión de calidad del aire para el control de material particulado en el marco del proyecto de infraestructura vial rural 2023 en becerril, cesar. Marbal ingeniería s.a.s		
TITULO EN INGLES	Design of the air quality management plan for particulate matter control within the framework of the 2023 rural road infrastructure project in Becerril, Cesar. Marbal Ingeniería S.A.S.		
RESUMEN (70 palabras)			
Se diseñó un plan de gestión de la calidad del aire para controlar el material particulado generado en el proyecto de infraestructura vial rural 2023 en becerril, cesar. se realizó inventario de emisiones, análisis meteorológico y modelación de dispersión de pm10 y pm2.5. se evaluaron impactos en salud y ecosistemas, estableciendo medidas de prevención, mitigación y monitoreo conforme a la normatividad ambiental vigente, fortaleciendo la sostenibilidad del proyecto.			
RESUMEN EN INGLES			
An air quality management plan was designed to control particulate matter generated in the 2023 rural road infrastructure project in Becerril, Cesar. An emission inventory, meteorological analysis, and dispersion modeling of PM10 and PM2.5 were conducted. Impacts on public health and ecosystems were assessed, establishing prevention, mitigation, and monitoring measures in accordance with current environmental regulations, strengthening the project's sustainability.			
PALABRAS CLAVES	Gestión de la calidad del aire, material particulado, control de emisiones, sostenibilidad ambiental		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Air quality management, particulate matter, emission control, environmental sustainability		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 82 paginas	PLANOS: No aplica	ILUSTRACIONES: 14 figuras y 1 fotografía.	CD-ROM: No aplica

**Diseño del Plan de Gestión de Calidad del Aire para el control de material particulado en el
marco del Proyecto de Infraestructura vial rural 2023 en Becerril, Cesar. Marbal
Ingeniería S.A.S**

Alvaro Javier Rios Rodríguez

**Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Universidad Francisco de Paula Santander
Ocaña**

Especialización en Sistemas de Gestión Integral HSEQ

Mgrt. Alexander Armesto Arenas

19 de Diciembre del 2025

Índice

Introducción	8
1. Diseño Del Plan De Gestión De Calidad Del Aire Para El Control De Material Particulado En El Marco Del Proyecto De Infraestructura Vial Rural 2023 En Becerril, Cesar.....	9
1.1 Descripción Breve De La Empresa	9
1.1.1 Misión.....	10
1.1.2 Visión.....	10
1.1.3 Objetivos de la empresa.....	10
1.1.4 Descripción de la dependencia y/o proyecto al que fue asignado.....	11
1.2 Diagnóstico Inicial De La Dependencia Asignada.....	11
1.2.1 Planteamiento Del Problema	14
1.3 Objetivos de la pasantía.....	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 Descripción De Las Actividades A Desarrollar En La Misma	18
2. Enfoques Referenciales.....	21
2.1 Enfoque Conceptual	21
2.2 Enfoque Legal	24
3. Informe De Cumplimiento De Trabajo	29
3.1 Presentación De Resultados	29

3.1.1 Evaluar La Calidad Del Aire Del Tramo Vial Que Abarca El Proyecto De Infraestructura Vial Rural 2023 En Becerril, Cesar, Mediante Modelos De Emisión Y Concentración De Material Particulado.	29
3.1.2 Evaluación de los impactos potenciales de las emisiones atmosféricas sobre la salud pública y el entorno ecológico de las comunidades rurales adyacentes a la zona de intervención.	55
3.1.3 Establecimiento de medidas de prevención, mitigación y control de emisiones atmosféricas generadas durante las distintas fases del proyecto vial, en concordancia con la normatividad ambiental vigente.	64
4. Conclusiones.....	72
5. Recomendaciones	73
Referencias.....	74

Lista de tablas

Tabla 1. Matriz DOFA	11
Tabla 2. Descripción de actividades.....	18
Tabla 3. Marco legal	24
Tabla 4. Condiciones metereológicos de la zona	36
Tabla 5. Fuentes de emisión.....	38
Tabla 6. Inventario de emisiones consolidado	43
Tabla 7. Valoración de impactos	50
Tabla 8. Valoración del nivel de significancia de los impactos sobre la salud pública y el entorno ecológico.	58
Tabla 9. Clasificación de los impactos atmosféricos por fase del proyecto.....	62
Tabla 10. Programa 1	67
Tabla 11. Programa 2	68
Tabla 12. Programa 3	69
Tabla 13. Programa 4	70
Tabla 14. Matriz de impacto cruzado.....	78

Lista de figuras

Figura 1. Temperatura media mensual – Municipio de Becerril (Cesar).....	30
Figura 2. Precipitación media mensual	31
Figura 3. Ubicación del proyecto.....	33
Figura 4. Gráfica de velocidad del viento	35
Figura 5. Área de estudio	47
Figura 6. Ubicación de los receptores sensibles	56
Figura 7. Fotografía capacitación.	71
Figura 8. Definición de variables Vester	77
Figura 9. Fotografías del proyecto vial.	82

Lista de apéndices

Apéndice A. Matriz Vester	77
---------------------------------	----

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo diseñar un Plan de Gestión de la Calidad del Aire para el Proyecto de Infraestructura Vial Rural 2023 en Becerril, Cesar, Colombia. El plan integra criterios técnicos, sociales y ambientales para garantizar la sostenibilidad del proyecto y minimizar las emisiones atmosféricas. Se evaluaron las concentraciones de partículas PM10 y PM2.5 y otros contaminantes gaseosos mediante modelos de dispersión, y se analizaron los impactos potenciales sobre la salud de la población y los ecosistemas locales. Las medidas de mitigación se establecieron en concordancia con la normatividad ambiental vigente, incluyendo la Resolución 2254 de 2017. Este estudio proporciona un marco para la implementación efectiva, el monitoreo continuo y la participación de las partes interesadas, fortaleciendo la sostenibilidad ambiental y la capacidad institucional de Marbal Ingeniería S.A.S.

Palabras clave: Gestión de la calidad del aire, Control de emisiones, Infraestructura vial rural, Sostenibilidad ambiental, Colombia

Introducción

La calidad del aire constituye un componente crítico para la salud pública y el equilibrio ambiental, especialmente en zonas rurales donde la expansión de la infraestructura vial puede generar emisiones significativas de material particulado y gases contaminantes (WHO, 2021). La construcción y operación de vías rurales conlleva la generación de PM10, PM2.5, óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO), los cuales pueden afectar tanto a la población como a los ecosistemas circundantes (Cecinato et al., 2020). Por ello, la planificación de proyectos de infraestructura requiere la integración de criterios técnicos, sociales y ambientales para garantizar su sostenibilidad y minimizar los impactos negativos.

El presente estudio tiene como objetivo diseñar un Plan de Gestión de la Calidad del Aire que permita identificar, controlar y mitigar las emisiones atmosféricas generadas durante las distintas fases del proyecto vial en Becerril, Cesar. Para ello, se evaluaron los niveles de contaminación mediante modelos de dispersión atmosférica, se analizaron los impactos sobre la salud y el entorno ecológico, y se establecieron medidas de prevención y control alineadas con la normativa ambiental vigente, incluyendo la Resolución 2254 de 2017 y los lineamientos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2019). La integración de estas estrategias busca no solo cumplir con los estándares legales, sino también fortalecer la capacidad institucional y operativa de Marbal Ingeniería S.A.S. en la gestión ambiental de proyectos de infraestructura.

1. Diseño Del Plan De Gestión De Calidad Del Aire Para El Control De Material Particulado En El Marco Del Proyecto De Infraestructura Vial Rural 2023 En Becerril, Cesar.

1.1 Descripción Breve De La Empresa

Marbal Ingenierías S.A.S. es una empresa del sector de la construcción y consultoría técnica, con experiencia en la ejecución de proyectos de infraestructura pública y privada. Su actividad económica se encuentra clasificada en diversas líneas de servicio, tales como: construcción de edificios residenciales (CIIU 4111), construcción de carreteras y vías de ferrocarril (CIIU 4210), construcción de proyectos de servicio público (CIIU 4220) y actividades de arquitectura e ingeniería, así como otras actividades conexas de consultoría técnica (CIIU 7110) (Marbal S.A.S, 2023).

La organización se caracteriza por ofrecer soluciones integrales en diseño, construcción y asesoría técnica, garantizando altos estándares de calidad, cumplimiento normativo y responsabilidad ambiental. Gracias a un equipo multidisciplinario de profesionales, Marbal Ingenierías S.A.S. contribuye activamente al desarrollo regional, mediante obras que promueven el bienestar social, la conectividad y la sostenibilidad (Marbal S.A.S, 2023).

1.1.1 Misión

Desarrollar proyectos de construcción basados en principios empresariales de alta responsabilidad social con un capital humano calificado, que siempre busque la satisfacción de los clientes, el crecimiento económico y el mejoramiento de la sociedad (Marbal S.A.S, 2023).

1.1.2 Visión

Consolidarnos como una empresa líder a nivel nacional en el sector de la construcción con proyectos que cumplen con los tiempos establecidos, con alta calidad y con total respeto al medio ambiente, logrando así exportar nuestra experiencia a países latinoamericanos (Marbal S.A.S, 2023).

1.1.3 Objetivos de la empresa

- Prestar servicios integrales de ingeniería que satisfagan las necesidades técnicas y operativas de sus clientes, con altos estándares de calidad, eficiencia y seguridad (Marbal S.A.S, 2023).
- Garantizar el cumplimiento normativo y contractual en cada uno de sus proyectos, asegurando la entrega oportuna de soluciones técnicas innovadoras (Marbal S.A.S, 2023).
- Fortalecer la sostenibilidad organizacional, promoviendo prácticas responsables con el medio ambiente y la comunidad, orientadas a la mejora continua de los procesos (Marbal S.A.S, 2023).
- Consolidarse en el mercado regional y nacional como una empresa líder en ingeniería, comprometida con la excelencia, la responsabilidad social y el desarrollo sostenible (Marbal S.A.S, 2023).
- Fomentar el crecimiento profesional y personal de sus colaboradores, impulsando un

entorno laboral seguro, ético y participativo (Marbal S.A.S, 2023).

1.1.4 Descripción de la dependencia y/o proyecto al que fue asignado

El proyecto fue asignado a la dependencia administrativa de la empresa MARBAL S.A.S., la cual tiene a su cargo la coordinación y seguimiento de los aspectos legales, logísticos y técnicos que garantizan el cumplimiento de los requerimientos normativos establecidos por las autoridades ambientales competentes.

Esta dependencia actúa como enlace estratégico entre las áreas técnicas (ingeniería, operación y supervisión de obra) y los lineamientos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental que orientan la ejecución del proyecto, asegurando la implementación de acciones preventivas y correctivas relacionadas con la calidad del aire durante las distintas fases constructivas. Además, se encarga de la gestión documental, la elaboración de informes, la articulación con consultores externos, y el cumplimiento del marco legal ambiental vigente, como parte de los compromisos adquiridos en la ejecución del contrato.

1.2 Diagnóstico Inicial De La Dependencia Asignada

A continuación, se presenta la matriz DOFA como diagnóstico inicial de la dependencia asignada.

Tabla 1.

Matriz DOFA

FORTALEZAS (F)	OPORTUNIDADES (O)
Experiencia técnica en ejecución de obras civiles de infraestructura vial.	Mayor disposición institucional y social para incluir criterios de sostenibilidad ambiental en la planificación y

FORTALEZAS (F)	OPORTUNIDADES (O)
	ejecución de obras de infraestructura vial, lo que facilita la aceptación del proyecto.
Cuenta con maquinaria propia y personal calificado para ejecutar obras en zonas rurales.	Acceso a metodologías internacionalmente reconocidas como la AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), útil para cuantificar emisiones de fuentes móviles y de superficie.
Capacidad de adaptación operativa a diferentes exigencias ambientales.	Marco normativo claro y actualizado que proporciona directrices técnicas para el diseño e implementación de planes de gestión de emisiones atmosféricas.
Disposición para adoptar buenas prácticas ambientales y sostenibilidad en los proyectos.	Potencial para establecer convenios de cooperación con las autoridades ambientales regionales (como Corpocesar) y con actores comunitarios, promoviendo la participación activa en la vigilancia y control ambiental del proyecto.
Limitada experiencia previa en la formulación específica de planes de calidad del aire.	Aumento potencial en los niveles de material particulado (MP10 y MP2.5) debido al uso intensivo de maquinaria pesada y tránsito constante de vehículos sobre vías sin pavimentar.
Dependencia de proveedores externos para la medición y monitoreo especializado de contaminantes atmosféricos.	Generación de conflictos socioambientales derivados de la percepción negativa por parte de las comunidades rurales ante impactos visibles, como el levantamiento de polvo o el deterioro de la calidad del aire.

FORTALEZAS (F)	OPORTUNIDADES (O)
Débil integración interdepartamental (técnico – ambiental – logístico) en etapas iniciales del proyecto.	Posibilidad de sanciones legales, multas o suspensión de actividades por incumplimiento de la normatividad ambiental vigente (Decreto 1076 de 2015, Resolución 2254 de 2017, entre otras).
Falta de formación especializada del personal en técnicas de control de emisiones atmosféricas.	Factores climáticos adversos (como sequías prolongadas o vientos fuertes) que podrían intensificar la dispersión del material particulado y dificultar las acciones de mitigación durante la fase de ejecución del proyecto.

Nota: Tabla elaborada por el autor, 2025

A partir de la matriz DOFA se realiza el cruce para generar las líneas estratégicas:

FO (Fortalezas + Oportunidades): Estrategias ofensivas

Aprovechar fortalezas internas para potenciar las oportunidades del entorno.

- Aprovechar la experiencia técnica y la maquinaria disponible para implementar rápidamente metodologías reconocidas (como AP-42) para el cálculo de emisiones.
- Utilizar la disposición institucional y social hacia la sostenibilidad para proponer un plan participativo de calidad del aire que involucre a Corpocesar y comunidades.
- Apoyarse en el marco normativo vigente para liderar buenas prácticas en gestión de emisiones y convertirse en un referente regional en planes ambientales.

FA (Fortalezas + Amenazas): Estrategias defensivas

Usar fortalezas para minimizar amenazas externas.

- Usar la capacidad de adaptación operativa para responder a condiciones climáticas adversas que aumenten la dispersión del material particulado.

- Implementar desde el inicio buenas prácticas ambientales y protocolos operativos para evitar sanciones legales por incumplimiento normativo.
- Usar personal calificado para mejorar la percepción social del proyecto mediante acciones visibles de control de polvo y monitoreo.

DO (Debilidades + Oportunidades): Estrategias adaptativas

Superar debilidades aprovechando oportunidades del entorno.

- Fortalecer capacidades técnicas internas en formulación de planes de calidad del aire mediante capacitaciones, aprovechando la disponibilidad de metodologías internacionales.
- Gestionar alianzas con instituciones (Corpocesar, universidades) para acceder a apoyo técnico en medición y monitoreo especializado de contaminantes.
- Fomentar la integración interdepartamental usando el marco normativo como eje transversal para armonizar lo técnico, lo ambiental y lo logístico.

DA (Debilidades + Amenazas): Estrategias de contingencia

Minimizar debilidades y prevenir amenazas.

- Crear un plan de capacitación interna en técnicas de control de emisiones para reducir la dependencia de terceros y evitar errores en la ejecución.
- Diseñar una estrategia comunicacional con enfoque social para prevenir conflictos comunitarios derivados de la percepción de contaminación.
- Desarrollar un protocolo de respuesta ante eventos climáticos extremos que puedan intensificar la contaminación aérea durante el proyecto.

1.2.1 Planteamiento Del Problema

La contaminación atmosférica es uno de los principales desafíos ambientales que enfrenta la humanidad, y representa una amenaza directa para la salud pública, los ecosistemas y el

desarrollo sostenible. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que la exposición prolongada a altos niveles de contaminantes atmosféricos, especialmente material particulado (PM10 y PM2.5), ocasiona aproximadamente 7 millones de muertes prematuras al año a nivel global (OMS, 2021). Estos contaminantes, provenientes en gran medida de fuentes móviles, procesos de combustión y actividades de construcción, no solo afectan las grandes ciudades, sino también zonas rurales que están expuestas a condiciones ambientales críticas durante obras de infraestructura.

En el ámbito de América Latina y el Caribe, la calidad del aire ha sido reconocida como una problemática prioritaria por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2019), quien advierte que el polvo generado por actividades como la construcción de carreteras rurales puede representar hasta el 40% de las emisiones totales de PM10 en algunas regiones.

En Colombia, el desarrollo de infraestructura vial es fundamental para cerrar brechas territoriales, mejorar la competitividad y garantizar el acceso a bienes y servicios esenciales en las zonas rurales. Sin embargo, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2018), las actividades de construcción de vías rurales suelen tener una gestión ambiental deficiente en términos de control de emisiones atmosféricas, especialmente en cuanto al levantamiento de material particulado durante el uso de maquinaria pesada y tránsito sobre vías sin pavimentar.

El municipio de Becerril, en el departamento del Cesar, ha priorizado el mejoramiento de su red vial rural como parte de su estrategia de desarrollo local. En el año 2023 se dio inicio al Proyecto de Mejoramiento de Vías Rurales, ejecutado por Marbal Ingeniería S.A.S., con el objetivo de optimizar la conectividad de corregimientos y veredas. No obstante, estas obras han generado preocupación por los posibles impactos ambientales negativos asociados al incremento

de emisiones atmosféricas, en especial de material particulado, afectando potencialmente la salud de las comunidades rurales y la calidad ambiental del entorno.

En este contexto, la empresa ejecutora presenta fortalezas clave como su experiencia técnica en obras civiles y su capacidad operativa para adaptarse a exigencias ambientales; sin embargo, también enfrenta debilidades relevantes como la limitada experiencia en la formulación específica de planes de calidad del aire y la dependencia de proveedores externos para el monitoreo de contaminantes. A esto se suman amenazas como el aumento de partículas en suspensión (PM10 y PM2.5) debido al tránsito constante de maquinaria pesada, así como la posibilidad de conflictos socioambientales derivados de la percepción negativa de la comunidad ante los impactos visibles del proyecto.

Actualmente, el proyecto carece de un Plan de Gestión de la Calidad del Aire que permita establecer medidas de prevención, mitigación y monitoreo de las emisiones generadas en cada fase de ejecución. Esta omisión representa un riesgo tanto para el cumplimiento de la normatividad ambiental como para la protección de la salud pública y la integridad ecológica de las zonas intervenidas.

Frente a esta problemática, se hace imperativo diseñar e implementar un Plan de Gestión de la Calidad del Aire que se articule con el marco normativo vigente, responda a las particularidades del entorno rural y fortalezca las capacidades de Marbal Ingeniería S.A.S. en materia de sostenibilidad ambiental. Para identificar las variables más influyentes sobre la calidad del aire en el área de intervención, se aplicó la Matriz Vester, cuyo resultado se encuentra en el Anexo 1.

1.3 Objetivos de la pasantía

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un Plan de Gestión de la Calidad del Aire que integre criterios técnicos, sociales y ambientales, promueva la sostenibilidad del proyecto y potencie las capacidades institucionales y operativas de Marbal Ingeniería S.A.S., asegurando su implementación efectiva en el marco del proyecto de infraestructura vial rural 2023 en Becerril, Cesar.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la calidad del aire del tramo vial que abarca el proyecto de infraestructura vial rural 2023 en Becerril, Cesar, mediante modelos de emisión y concentración de material particulado
- Evaluar los impactos potenciales de las emisiones atmosféricas sobre la salud pública y el entorno ecológico de las comunidades rurales adyacentes a la zona de intervención.
- Establecer medidas de prevención, mitigación y control de emisiones atmosféricas generadas durante las distintas fases del proyecto vial, en concordancia con la normatividad ambiental vigente.

1.4 Descripción De Las Actividades A Desarrollar En La Misma

Tabla 2.

Descripción de actividades.

Objetivo general	Objetivos Específicos	Actividades a desarrollar en la empresa
Diseñar un Plan de Gestión de la Calidad del Aire que, a través de la integración de criterios técnicos, sociales y ambientales, promueva la sostenibilidad del proyecto y potencie las capacidades institucionales y operativas de Marbal Ingeniería S.A.S., asegurando su	Evaluar la calidad del aire del tramo vial que abarca el proyecto de infraestructura vial rural 2023 en Becerril, Cesar, mediante modelos de emisión y concentración de material particulado	-Hacer un inventario de emisiones de tal manera que se cuantifiquen las fuentes de emisión y las emisiones. Estas últimas implementando modelos de emisión. -Analizar la condición meteorología de la zona de estudio. -Hacer una modelación de la Calidad del Aire con el fin de conocer la distribución de concentración de material particulado y su relación con la norma y de igual forma identificar espacialmente las partes más vulnerables. -Valorar los impactos ambientales relacionados con la condición de calidad del aire en la zona de estudio.

Objetivo general	Objetivos Específicos	Actividades a desarrollar en la empresa
implementación efectiva en el marco del proyecto de infraestructura vial rural 2023 en Becerril, Cesar.	Evaluar los impactos potenciales de las emisiones atmosféricas sobre la salud pública y el entorno ecológico de las comunidades rurales adyacentes a la zona de intervención.	-Identificar los receptores sensibles y posibles vías de exposición: Localizar viviendas, instituciones educativas, centros de salud, cultivos y cuerpos de agua cercanos a la zona de intervención. -Estimar riesgos de afectaciones respiratorias, cardiovasculares y dérmicas en población vulnerable (niños, adultos mayores) mediante la identificación de impactos ambientales - Aplicar matrices de evaluación (ej. Leopold o Conesa) para determinar la importancia de cada impacto.
	Establecer medidas de prevención, mitigación y control de emisiones atmosféricas generadas durante las distintas fases del proyecto	-Determinar objetivos y metas relacionados con las partes interesadas, el compromiso de la empresa, los controles de los niveles de emisión, concentración de contaminantes atmosféricos e impactos ambientales identificados en la zona de estudio.
	vial, en concordancia con la	-Establecer los programas con pasos específicos que expliquen estrategias representadas con actividades, recursos y responsabilidades requeridos para que la empresa alcance los

Objetivo general	Objetivos Específicos	Actividades a desarrollar en la empresa
normatividad vigente.	ambiental	objetivos ambientales relacionados con los objetivos los planteados -Determinar requisitos normativos a cumplir con el control de los impactos ambientales relacionados con la calidad del aire.

Nota: Tabla elaborada por el autor, 2025

2. Enfoques Referenciales

2.1 Enfoque Conceptual

Calidad del Aire: La calidad del aire se refiere al estado de composición atmosférica en un lugar determinado y su relación con los efectos que puede generar sobre la salud humana, el ambiente y los bienes materiales (Díaz y Moreno, 2020). Su evaluación implica medir contaminantes como material particulado, gases y compuestos tóxicos, comparándolos con estándares establecidos por organismos internacionales y autoridades ambientales nacionales (OMS, 2021).

Contaminación Atmosférica: La contaminación atmosférica se entiende como la presencia de sustancias o formas de energía en la atmósfera en concentraciones que pueden causar afectaciones adversas a la salud, al bienestar humano y a los ecosistemas (OMS, 2021). Según Seinfeld y Pandis (2016), pueden ser de origen natural o antropogénico, siendo las actividades productivas e industriales una de las principales fuentes en zonas rurales y urbanas.

Control de Emisiones: El control de emisiones comprende el conjunto de tecnologías y prácticas orientadas a minimizar la liberación de contaminantes al aire, incluyendo filtros, buenas prácticas de operación, manejo de materiales y uso de maquinaria eficiente (Nieuwenhuis y Wells, 2017).

Ecosistemas Rurales: Los ecosistemas rurales son sistemas ecológicos que integran biodiversidad, recursos naturales y actividades humanas como agricultura y ganadería (Díaz y Moreno, 2020). Por su parte, la contaminación del aire puede alterar procesos biológicos esenciales, afectar especies sensibles y degradar servicios ecosistémicos fundamentales para las comunidades locales (Primack, 2019).

Emisiones Atmosféricas: Las emisiones atmosféricas son descargas de contaminantes que se liberan al aire desde fuentes móviles, fijas o de área, y comprenden sustancias como partículas, gases y compuestos químicos (Jacobson, 2012)

Gestión Ambiental: La gestión ambiental comprende el conjunto de políticas, estrategias y acciones orientadas a prevenir, mitigar, corregir o compensar los efectos negativos de actividades humanas sobre el entorno, lo que garantiza el cumplimiento normativo y la sostenibilidad del desarrollo (Sánchez, 2015).

Impacto Ambiental: El impacto ambiental se define como cualquier alteración significativa, positiva o negativa, del ambiente como consecuencia de actividades humanas (Díaz y Moreno, 2020). En obras viales rurales, los impactos pueden manifestarse en el aire, el suelo, los ecosistemas y la calidad de vida de las comunidades, por lo que deben ser caracterizados y gestionados adecuadamente (Conesa, 2010).

Infraestructura Vial Rural: La infraestructura vial rural comprende carreteras, vías terciarias, puentes y obras de soporte que facilitan la movilización y conexión de comunidades rurales (Díaz y Moreno, 2020).

Material Particulado (PM10 y PM2.5): El material particulado es una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, clasificadas según su diámetro aerodinámico, donde las fracciones PM10 y PM2.5 son las más relevantes por su capacidad de penetrar en el sistema respiratorio (OMS, 2021). Estas partículas son generadas principalmente por procesos de combustión, actividades de construcción y resuspensión de polvo, representando un riesgo para la salud respiratoria y cardiovascular (Pope Y Dockery, 2006).

Mitigación Ambiental: La mitigación ambiental consiste en implementar acciones técnicas y operativas destinadas a reducir la magnitud, duración o intensidad de los impactos ambientales generados por una actividad (Díaz y Moreno, 2020). En obras viales, las medidas de mitigación suelen enfocarse en el control del polvo, mantenimiento preventivo de maquinaria y planificación de rutas (Brennan y Withgott, 2018).

Modelos De Dispersión Atmosférica: Los modelos de dispersión atmosférica son herramientas matemáticas y computacionales que simulan el comportamiento de contaminantes en la atmósfera, considerando factores como la topografía, meteorología y características de las emisiones (Zannetti, 2013).

Prevención De Impactos: La prevención de impactos implica anticipar los posibles efectos ambientales adversos antes de que ocurran y diseñar estrategias para evitarlos desde la fase de planificación (Glasson et al., 2012).

Salud Pública Ambiental: La salud pública ambiental estudia la relación entre la exposición a factores ambientales, como la contaminación atmosférica, y el bienestar físico, mental y social de la población (OMS, 2021). La inhalación de partículas y gases tóxicos puede desencadenar enfermedades respiratorias, cardiovasculares y sistémicas, especialmente en poblaciones vulnerables (Friis, 2020).

2.2 Enfoque Legal

A continuación, se presenta la matriz legal que rige el informe de prácticas

Tabla 3.

Marco legal

Norma / Instrumento	Año	Ámbito	Contenido relevante para el estudio	Aplicación específica al proyecto
Constitución Política de Colombia – Art. 79 y 80	1991	Nacional	Reconoce el derecho a un ambiente sano y el deber del Estado de planificar el manejo ambiental.	Fundamenta la obligación de proteger la calidad del aire y prevenir la contaminación en el desarrollo de obras viales.
Ley 99 de 1993	1993	Nacional	Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y asigna competencias sobre control de la contaminación atmosférica.	Sustento jurídico para la gestión ambiental del proyecto y la intervención de la autoridad ambiental regional.

Norma / Instrumento	Año	Ámbito	Contenido relevante para el estudio	Aplicación específica al proyecto
Ley 1523 de 2012 – Sistema Nacional de Gestión del Riesgo	2012	Nacional	Establece la gestión del riesgo como política pública, incluyendo riesgos asociados a factores ambientales.	Permite considerar riesgos derivados de la mala calidad del aire para trabajadores y comunidades cercanas.
Ley 1672 de 2013 – Política de producción limpia	2013	Nacional	Promueve la reducción de impactos ambientales y el uso eficiente de recursos.	Dirige estrategias de minimización de emisiones y buenas prácticas en obra.
Decreto 1076 de 2015 – Decreto Único Ambiental	2015	Nacional	Compila la normatividad ambiental en materia de licencias, control de contaminación y calidad del aire.	Regula permisos, exigencias y obligaciones ambientales durante la obra vial.
Resolución 2254 de 2017 – Estándares de Calidad del Aire	2017	Nacional	Establece valores máximos permisibles de PM10, PM2.5, SO ₂ , NO ₂ , O ₃ y CO.	Base para comparar los resultados del modelamiento de emisiones y definir medidas de control.

Norma / Instrumento	Año	Ámbito	Contenido relevante para el estudio	Aplicación específica al proyecto
Resolución 2253 de 2017 – Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SISAIRE)	2017	Nacional	Define lineamientos para monitoreo y reporte de calidad del aire.	Permite estructurar el plan de seguimiento y monitoreo en la obra.
Resolución 909 de 2008 – Límites de emisiones para fuentes fijas	2008	Nacional	Regula límites de emisión para equipos de combustión y procesos industriales.	Afecta maquinaria estacionaria y plantas de producción utilizadas en obra.
Resolución 1207 de 2014 – Gestión de material particulado en construcción	2014	Nacional	Establece medidas obligatorias para control de polvo en actividades constructivas.	Directriz clave para manejo de PM10 y PM2.5 durante excavación, cargue y transporte de materiales.

Norma / Instrumento	Año	Ámbito	Contenido relevante para el estudio	Aplicación específica al proyecto
Resolución 1609 de 2002 – Transporte de materiales peligrosos	2002	Nacional	Regula condiciones de transporte y operación segura para sustancias peligrosas.	Aplica si se manejan combustibles, solventes o insumos en obra vial.
Guía de Manejo Ambiental para Obras de Infraestructura del Sector Transporte – MinTransporte	2018	Sectorial	Proporciona lineamientos para prevención y mitigación de impactos en aire, agua y suelo.	Orienta la formulación de medidas ambientales específicas para el proyecto vial rural.
Plan Nacional de Calidad del Aire – PNCA	2020	Nacional	Define estrategias de gestión de calidad del aire a nivel país.	Aporta criterios para estructurar el Plan de Gestión de la Calidad del Aire del proyecto.

Norma / Instrumento	Año	Ámbito	Contenido relevante para el estudio	Aplicación específica al proyecto
Código de Recursos Naturales (Decreto 2811)	1974	Nacional	Regula el uso y protección de los recursos naturales, incluida la atmósfera.	Refuerza la obligación de minimizar emisiones y proteger el ambiente en obras viales.
Normas internacionales de referencia – OMS Guías de Calidad del Aire	2021	Internacional	Establece límites recomendados para exposición humana a contaminantes atmosféricos.	Sirve como sostenimiento técnico para justificar medidas de protección de la salud.
Normatividad de la autoridad ambiental regional (Corpocesar)	Variable	Regional	Reglamentos, permisos y requisitos específicos en el departamento del Cesar.	Define condiciones particulares para intervenir en Becerril y establece obligaciones del proyecto.

Nota: Elaboración propia

3. Informe De Cumplimiento De Trabajo

3.1 Presentación De Resultados

3.1.1 Evaluar La Calidad Del Aire Del Tramo Vial Que Abarca El Proyecto De Infraestructura Vial Rural 2023 En Becerril, Cesar, Mediante Modelos De Emisión Y Concentración De Material Particulado.

3.1.1.1 Análisis De La Condición Meteorología De La Zona De Estudio. El Proyecto de Infraestructura Vial Rural 2023 se desarrolla en el municipio de Becerril, departamento del Cesar, y corresponde a la intervención de un tramo vial rural localizado en la vereda Sabanas de Nibal, al norte del casco urbano municipal. El corredor vial objeto de estudio cumple funciones de conectividad local entre áreas rurales, zonas productivas agropecuarias y vías secundarias de acceso al municipio, presentando actualmente condiciones de superficie mayoritariamente sin pavimentar y tránsito frecuente de vehículos livianos, motocicletas y, de manera ocasional, vehículos de carga asociados a actividades agrícolas y mineras de la región.

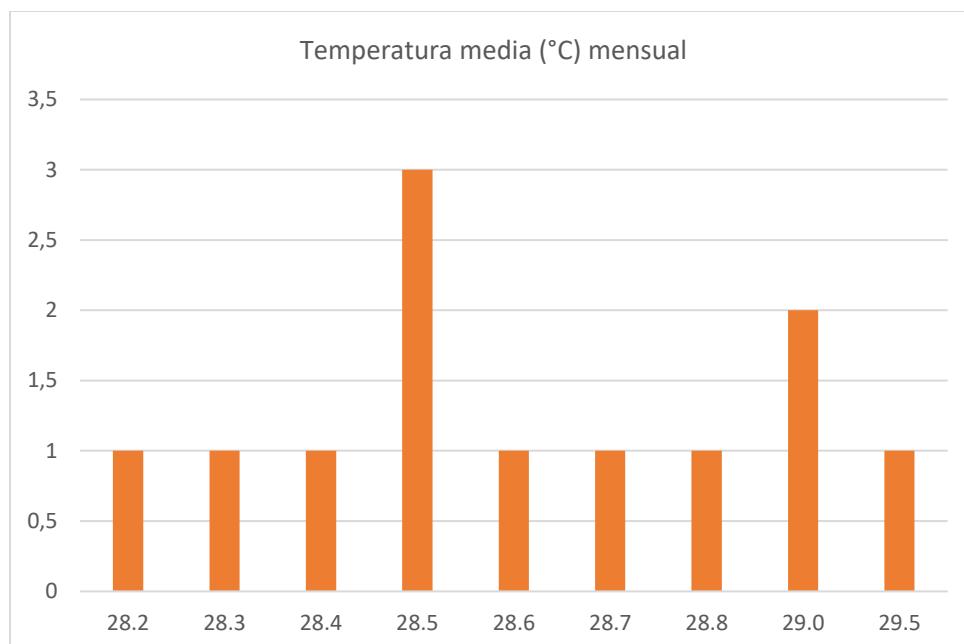
El municipio de Becerril se localiza en el centro-occidente del departamento del Cesar, en la región Caribe colombiana, dentro de la cuenca media del río Cesar y en el piedemonte de la Serranía del Perijá. Su territorio presenta una topografía predominantemente plana a suavemente ondulada, con elevaciones que oscilan entre los 100 y 200 m s. n. m., lo cual favorece la circulación de masas de aire y la dispersión horizontal de contaminantes atmosféricos, especialmente en zonas rurales abiertas (IGAC, 2019).

Desde el punto de vista climático, Becerril se caracteriza por un clima cálido tropical, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 27 y 30 °C, baja amplitud térmica y una marcada influencia de los vientos alisios provenientes del noreste, típicos de la región Caribe. Estas condiciones favorecen procesos de mezcla atmosférica durante el día, aunque en horas nocturnas

pueden presentarse condiciones de estabilidad que limitan la dispersión vertical de contaminantes, incrementando concentraciones locales de material particulado fino y grueso (IDEAM, 2021; Arya, 2021).

Figura 1.

Temperatura media mensual – Municipio de Becerril (Cesar)



Nota: Elaboración propia

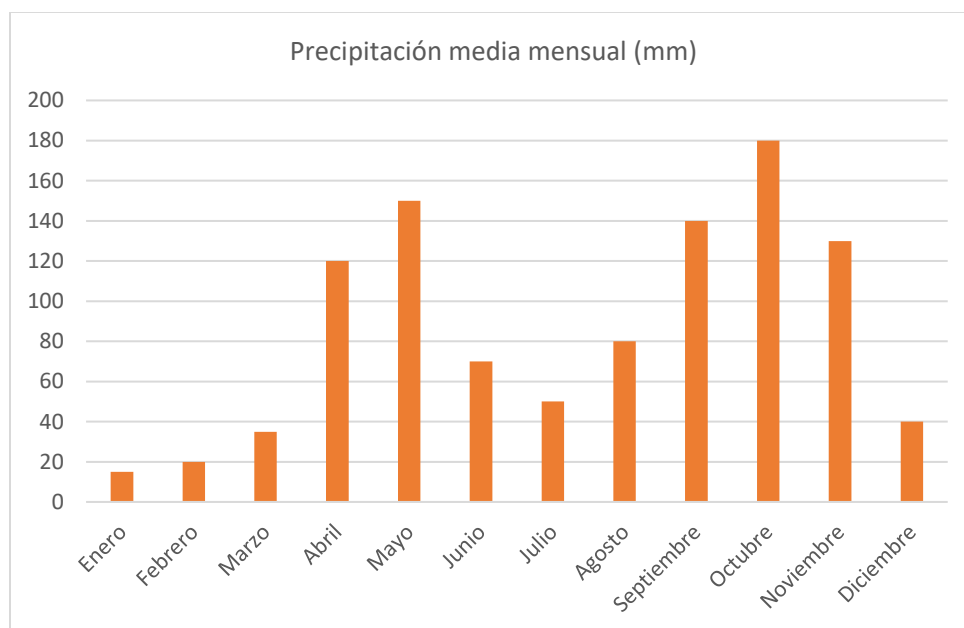
La temperatura del aire influye de manera significativa en los procesos de dispersión y dilución de contaminantes atmosféricos al controlar la estabilidad térmica de la atmósfera y la altura de la capa de mezcla. En climas cálidos tropicales como el del municipio de Becerril, las altas temperaturas diurnas favorecen la convección térmica y la turbulencia atmosférica, promoviendo una mayor dispersión vertical de los contaminantes emitidos por fuentes móviles y de área. No obstante, durante las horas nocturnas o en periodos de menor radiación solar, pueden presentarse condiciones de estabilidad atmosférica que limitan la mezcla vertical del aire,

propiciando la acumulación local de material particulado fino y grueso cerca de las fuentes de emisión.

El régimen de precipitaciones en el municipio es de tipo bimodal, con periodos lluviosos concentrados entre los meses de abril–mayo y septiembre–noviembre, y una temporada seca predominante entre diciembre y marzo. Durante los meses secos, la disminución de la humedad del suelo y la escasa precipitación favorecen la resuspensión de polvo, particularmente en vías sin pavimentar y áreas intervenidas por actividades agrícolas y mineras, lo cual se refleja en aumentos temporales de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente (IDEAM, 2022).

Figura 2.

Precipitación media mensual



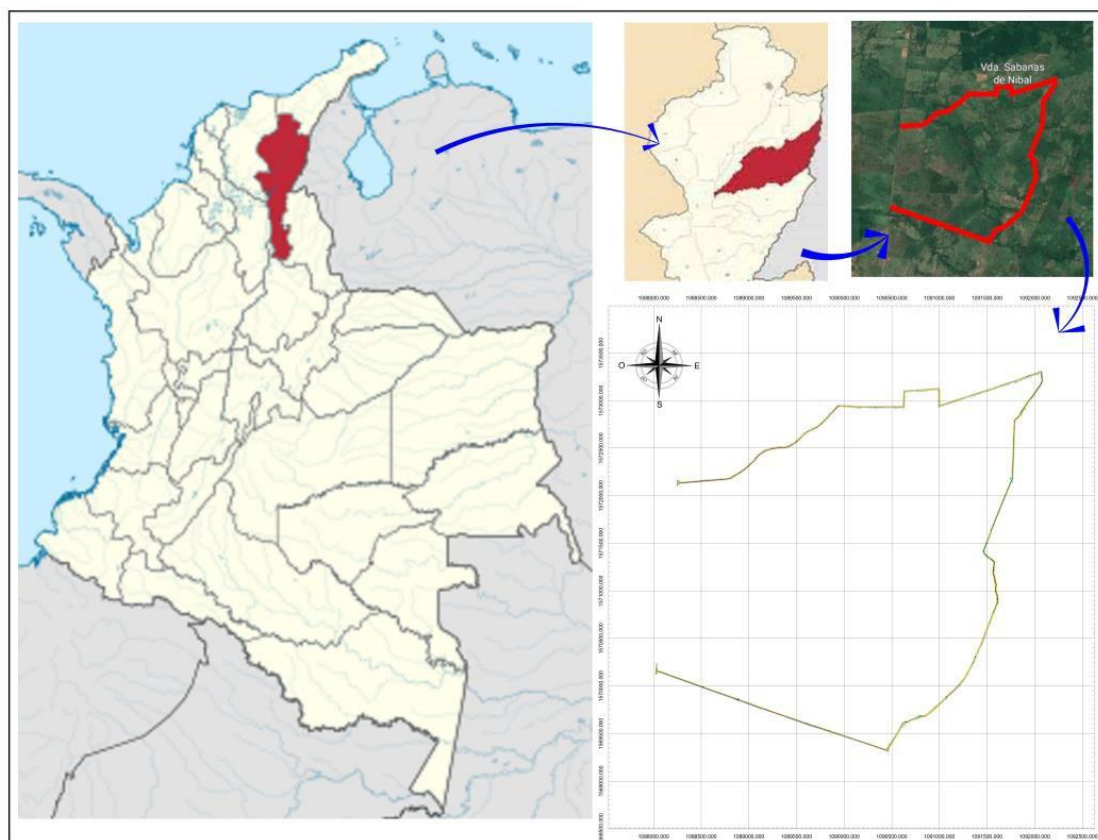
Nota: Elaboración propia

La precipitación constituye una variable meteorológica determinante en la dinámica de los contaminantes atmosféricos, especialmente del material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, debido a su capacidad para remover partículas en suspensión mediante procesos de lavado atmosférico (*wet deposition*). Durante los periodos lluviosos, las gotas de lluvia capturan y arrastran partículas hacia

la superficie, reduciendo temporalmente las concentraciones en el aire ambiente y limitando su transporte a largas distancias. En contraste, durante las temporadas secas, la ausencia de precipitaciones favorece la acumulación de material particulado en la atmósfera y la resuspensión de polvo en vías sin pavimentar y áreas intervenidas, incrementando el riesgo de deterioro de la calidad del aire en zonas cercanas al proyecto vial.

En términos de dinámica atmosférica, el municipio presenta velocidades promedio del viento entre 2 y 4 m/s, con direcciones predominantes del noreste y este, lo que contribuye a una dispersión moderada de contaminantes. No obstante, estas mismas condiciones pueden facilitar el transporte de material particulado desde corredores viales, frentes de obra y zonas de explotación minera hacia áreas rurales habitadas, dependiendo de la ubicación de las fuentes y la orientación del viento dominante (NOAA, 2020; Seinfeld y Pandis, 2016).

Adicionalmente, la radiación solar en la zona es elevada durante la mayor parte del año, con valores promedio superiores a 5 kWh/m²/día, lo que induce condiciones de inestabilidad atmosférica diurna y favorece la dilución de contaminantes. Sin embargo, en combinación con superficies descubiertas y suelos secos, esta radiación incrementa los procesos de generación de polvo, reforzando la importancia de implementar medidas de manejo ambiental en proyectos de infraestructura vial ubicados en el municipio (UPME, 2020)

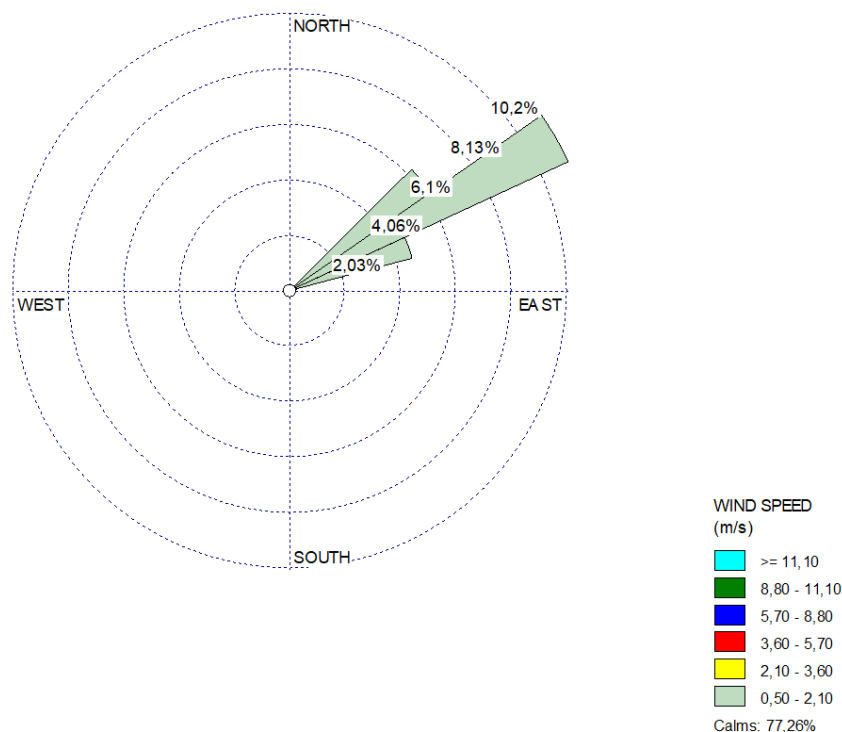
Figura 3.*Ubicación del proyecto**Nota:* Elaboración propia

La figura presenta la localización del municipio dentro del contexto nacional, seguida de su posición dentro del departamento y, finalmente, el trazado del corredor vial propuesto, delimitado en color rojo sobre un fondo de cobertura vegetal y áreas agrícolas. La zona es característicamente rural, con predominio de terrenos agrícolas y pastizales, y constituye un área de tránsito estratégico para la conectividad entre veredas y núcleos urbanos cercanos. El área de influencia del proyecto se definió considerando la extensión del tramo vial, la distribución de viviendas rurales dispersas, áreas productivas adyacentes y las condiciones topográficas y meteorológicas locales que influyen en la dispersión de contaminantes atmosféricos. Dada la

cercanía de receptores sensibles, como viviendas rurales y zonas de permanencia humana, la evaluación de la calidad del aire resulta fundamental para identificar posibles incrementos en las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, particularmente durante periodos secos y de mayor actividad constructiva y vehicular.

Por otro lado, la caracterización meteorológica permite comprender la dispersión, transporte y deposición de los contaminantes generados por las fuentes móviles, de área y lineales previamente identificadas. En primer lugar, las condiciones del clima regional están determinadas por la influencia de la región Caribe, caracterizada por temperaturas elevadas, baja variabilidad térmica y un régimen de vientos dominado por los alisios del noreste (IDEAM, 2022). Además, el área presenta una temperatura media anual entre 27–30 °C, humedad relativa entre 60–75 % y un régimen bimodal de precipitación con picos en abril–mayo y septiembre–noviembre, lo que influye directamente en los niveles de resuspensión de polvo, reducidos en épocas lluviosas y acentuados en las temporadas secas (IDEAM, 2021).

Respecto al comportamiento del viento, predominan direcciones entre el noreste y este, con velocidades promedio de 2–4 m/s, favorables para la dispersión moderada de contaminantes, pero también para arrastrar material particulado generado por la maquinaria y las vías sin pavimentar (NOAA, 2020). Por su parte, la estabilidad atmosférica en la zona suele ser neutral a ligeramente inestable durante el día por la alta radiación solar, lo cual aumenta la mezcla vertical y favorece la dilución de emisiones; mientras que en la noche se presentan condiciones más estables que limitan la dispersión y pueden incrementar concentraciones locales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ cerca del área intervenida (Arya, 2021).

Figura 4.*Gráfica de velocidad del viento**Nota:* Elaboración propia mediante WRPLOT

La dirección del viento es un factor meteorológico clave en la distribución espacial de los contaminantes atmosféricos, ya que determina el sentido preferente de transporte de las emisiones desde las fuentes hacia las áreas receptoras. En el municipio de Becerril, donde predominan vientos provenientes del noreste y este, las emisiones generadas en corredores viales, frentes de obra y zonas intervenidas tienden a desplazarse en la misma dirección del flujo dominante, pudiendo afectar áreas rurales habitadas ubicadas a sotavento del proyecto. Esta condición resulta especialmente relevante para el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, cuyas partículas pueden permanecer en suspensión durante periodos prolongados y ser transportadas a distancias considerables, dependiendo de la intensidad y persistencia del viento, lo que refuerza la necesidad

de considerar la orientación del trazado vial y la ubicación de las fuentes emisoras en la evaluación de impactos sobre la calidad del aire.

A continuación, en la matriz se consolidan las condiciones metereológicas de la zona:

Tabla 4.

Condiciones metereológicas de la zona

Parámetro	Valor típico / Rango	Unidad	Fuente de datos	Observaciones
Temperatura media anual	27–30	°C	IDEAM (2021)	Influye en estabilidad atmosférica y reacciones químicas.
Temperatura máxima promedio	32–35	°C	IDEAM (2022)	Aumenta turbulencia diurna y mezcla vertical.
Humedad relativa	60–75	%	IDEAM (2021)	Relacionada con formación de partículas higroscópicas y deposición húmeda.
Precipitación total anual	1300–1600	mm/año	IDEAM (2022)	Controla resuspensión de polvo; reduce PM en temporada lluviosa.

Parámetro	Valor típico / Rango	Unidad	Fuente de datos	Observaciones
Temporadas climáticas	Seca: dic-mar; transiciones: abr– may, sept–nov	–	IDEAM (2021)	Determina periodos de mayor generación de PM.
Velocidad del viento promedio	2–4	m/s	NOAA (2020)	Define capacidad de dispersión horizontal de contaminantes.
Dirección predominante del viento	NE–E	–	NOAA (2020)	Indica posibles rutas de transporte de contaminantes.
Radiación solar promedio	Alta (5–6 kWh/m ² /día)	–	UPME (2020)	Contribuye a inestabilidad atmosférica diurna.
Estabilidad atmosférica	Neutral a inestable (día); estable (noche)	–	Arya (2021)	Afecta dispersión vertical y acumulación nocturna de contaminantes.
Altura de capa de mezcla	500–1200 (día); <200 (noche)	m	Seinfeld y Pandis (2016)	Determina volumen disponible para dilución de emisiones.

Nota: Elaboración propia

Con base en estos parámetros, la meteorología local representa un factor determinante en el comportamiento de las emisiones generadas por el proyecto, especialmente por la influencia del viento en la resuspensión del polvo y la capacidad de la atmósfera para diluir o concentrar los contaminantes.

3.1.1.2 Inventario de emisiones. El inventario de emisiones constituye un proceso. Sistemático mediante el cual se identifican, clasifican y cuantifican las fuentes de emisión atmosférica presentes en un proyecto. Su propósito fue determinar la carga contaminante generada en cada fase de la obra y soportar la modelación posterior de la calidad del aire, lo que además es fundamental para obras viales, donde la maquinaria pesada, el movimiento de tierras y el transporte de materiales generan emisiones significativas de material particulado y gases criterio (USEPA, 2020).

Identificación de fuentes de emisión

A continuación, se listan las fuentes de emisión identificadas en la zona producto de las actividades asociadas:

Tabla 5.

Fuentes de emisión

Tipo de fuente	Actividades asociadas / Equipos	Contaminantes principales	Descripción	Referencia
Fuentes móviles	Retroexcavadoras, motoniveladoras, bulldozers, tractocamiones,	PM10	Equipos y vehículos que dependen de combustión diésel y operan en el área del proyecto, generando	(IPCC, 2019)

Modelo general de cuantificación

La cuantificación se realizó siguiendo metodologías estandarizadas recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, AP-42) para inventarios de emisiones en obras civiles, el cual es el estándar internacional más utilizado en Latinoamérica para estudios de infraestructura (USEPA, 2020).

Fórmula general:

$$E = EF * A$$

Donde:

- E = emisiones (kg/día o t/año)
- EF = factor de emisión (kg/unidad de actividad)
- A = nivel de actividad (horas de operación, km recorridos, toneladas movidas)
- **Cuantificación por tipo de fuente**

a) Maquinaria pesada (fuentes móviles)

Modelo empleado: AP-42, Sección 3.3 y 3.4 – Motores diésel.

Fórmula:

$$E = (HP * LF * HR * EF)$$

Donde:

- **HP** = potencia del motor (caballos de fuerza)
- **LF** = factor de carga (0.3 a 0.8 según equipo)

- **HR** = horas de operación
- **EF** = factor de emisión por contaminante

b) Emisiones por movimiento de tierra (fuentes de área)

Modelo empleado: AP-42, Capítulo 11.2 – Dust Sources.

Excavación y cargue

$$E = K * (0.0016) * \frac{(S/12)^{1.2}}{(M/12)^{1.2}}$$

Donde:

- **k** = constante (0.74 para PM10, 0.35 para PM2.5)
- **s** = contenido de finos del suelo (%)
- **M** = humedad del material (%)

c) Resuspensión de polvo en vías sin pavimentar (fuentes lineales)

Modelo empleado: AP-42, Sección 13.2.2 – Unpaved Roads.

$$E = K * S^a * W^b$$

Donde:

- **k** = 4.9 (PM10)
- **s** = porcentaje de finos (%)
- **W** = peso del vehículo (ton)
- **a** = 0.7

- **b** = 0.45

Por ende, se consolida el inventario de emisiones así:

Tabla 6.*Inventario de emisiones consolidado*

Tipo de fuente	Fuente / Actividad	Modelo AP-42	Parámetros asumidos	Unidad de actividad	Contaminante	Factor de emisión (EF)	Emisión estimada (E)	Referencia
Móvil	Retroexcavadora	Sección 3.4 – Motores diésel	HP=150; LF=0.5; HR=8 h/día	h/día	PM _{2.5}	0.00015 kg/HP·h	0.09 kg/día	USEPA (2020)
Móvil	Retroexcavadora	Sección 3.4 – Motores diésel	HP=150; LF=0.5; HR=8 h/día	h/día	PM ₁₀	0.00030 kg/HP·h	0.18 kg/día	USEPA (2020)
Móvil	Volqueta 14 t	Vehículos diésel pesados	Recorrido: 50 km/día	km/día	PM ₁₀	1.2 g/km	0.06 kg/día	USEPA (2017)

Móvil	Volqueta 14 t	Vehículos diésel pesados	Recorrido: 50 km/día	km/día	PM _{2.5}	0.4 g/km	0.02 kg/día	USEPA (2017)
Lineal	Rodadura en vía sin pavimentar	Sección 13.2.2	s=8%; W=14 t; 30 km/día	km/día	PM ₁₀	45 g/km	1.35 kg/día	USEPA (2017)
Lineal	Rodadura en vía sin pavimentar	Sección 13.2.2	s=8%; W=14 t; 30 km/día	km/día	PM _{2.5}	10 g/km	0.30 kg/día	USEPA (2017)
Área	Excavación material	de Cap. 11.2 – Dust Sources	s=8%; M=4%; 200 ton/día	ton/día	PM ₁₀	0.0004 kg/ton	0.08 kg/día	USEPA (2017)
Área	Excavación material	de Cap. 11.2 – Dust Sources	s=8%; M=4%; 200 ton/día	ton/día	PM _{2.5}	0.00018 kg/ton	0.036 kg/día	USEPA (2017)
Área	Cargue descargue	y Cap. 11.2	150 ton/día	ton/día	PM ₁₀	0.00035 kg/ton	0.053 kg/día	USEPA (2020)

Área	Cargue y descargue	Cap. 11.2	150 ton/día	ton/día	PM _{2.5}	0.00015 kg/ton	0.023 kg/día	USEPA (2020)
Área	Acopios temporales	Erosión eólica	Área: 1,000 m ²	m ² ·día	PM ₁₀	0.00005 kg/m ² ·día	0.05 kg/día	USEPA (2017)

Nota: Elaboración propia

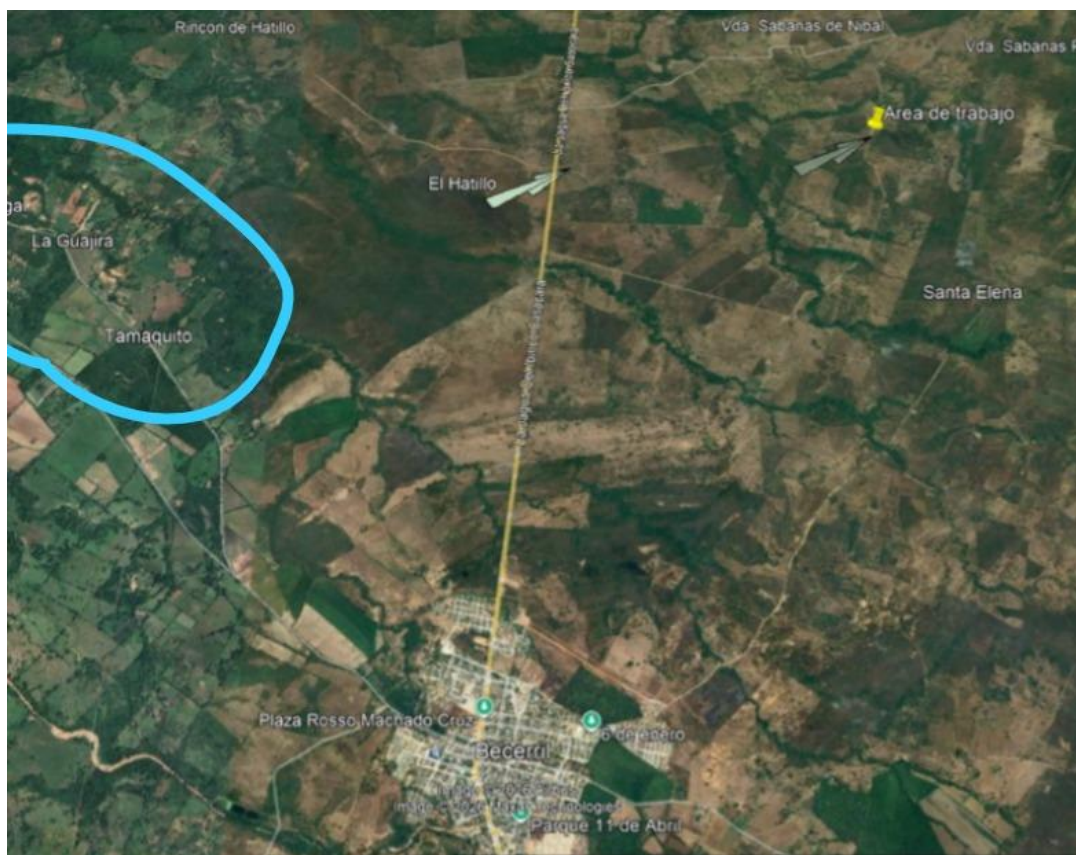
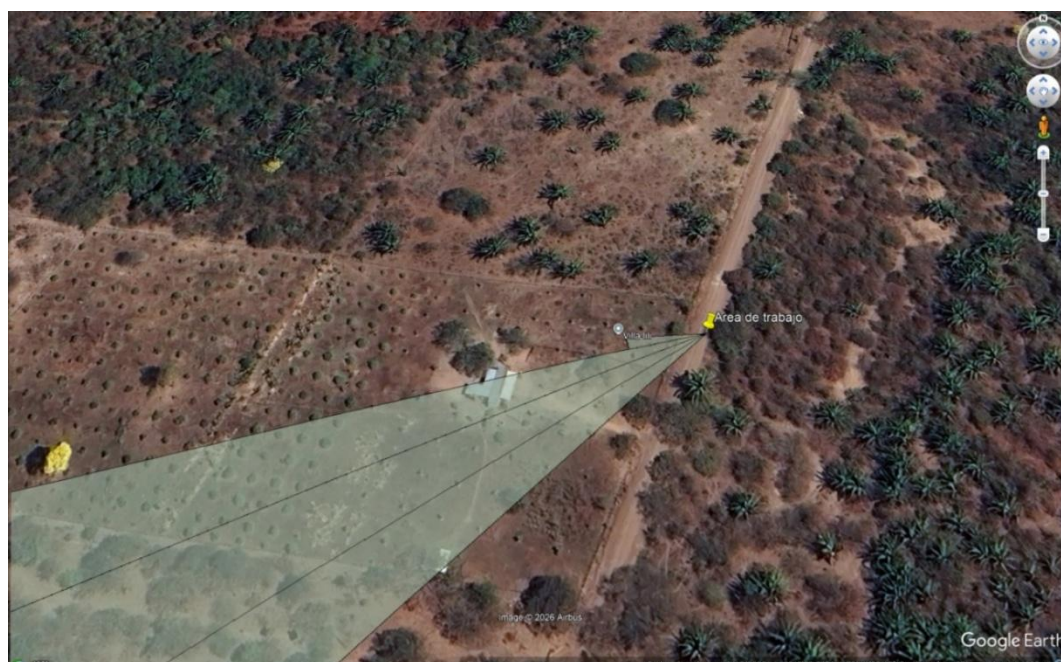
El inventario de emisiones elaborado para el proyecto de infraestructura vial rural en Becerril, Cesar, permitió identificar de manera detallada las fuentes móviles, de área y lineales que contribuyen a la generación de material particulado y contaminantes criterio durante las actividades constructivas. La aplicación de metodologías estandarizadas, como los factores de emisión AP-42 de la USEPA y las recomendaciones del IPCC, aseguró la cuantificación coherente y técnicamente sustentada de las cargas contaminantes asociadas a la operación de maquinaria, movimiento de tierras y tránsito vehicular sobre superficies sin pavimentar, lo que constituye una base sólida para la formulación de medidas de control, la modelación de dispersión atmosférica y el diseño del Plan de Gestión de la Calidad del Aire, garantizando decisiones informadas orientadas a la prevención, mitigación y gestión efectiva de los impactos atmosféricos del proyecto.

3.1.1.3 Modelación de la Calidad del Aire en la zona de estudio. La modelación de la calidad del aire permite comprender el comportamiento espacial y temporal del material particulado (PM10 y PM2.5) en el área de influencia del tramo vial en Becerril (Cesar), evaluando la posible afectación a la población y la comparabilidad con los límites establecidos en la Resolución 2254 de 2017. Aunque el proyecto no cuenta con una red propia de monitoreo continuo, el análisis se sustenta en el comportamiento histórico reportado por el Sistema de Evaluación y Vigilancia de la Calidad del Aire (SEVCA) y la información oficial suministrada por la ANLA para el periodo 2007–2022.

A continuación, se presenta el área de estudio:

Figura 5.

Área de estudio



Nota: Elaboración propia

De acuerdo con la modelación de la dinámica del viento realizada mediante el software WRPLOT, se identificó que la dirección predominante del flujo atmosférico en el área de estudio corresponde a los cuadrantes noreste y este, lo cual condiciona el patrón de dispersión del material particulado generado durante las actividades del proyecto vial. Los resultados indican que las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ tienden a desplazarse en la misma dirección del viento dominante, favoreciendo su transporte fuera del casco urbano del municipio de Becerril.

En este sentido, la modelación evidencia que el casco urbano del municipio de Becerril no se encuentra directamente expuesto a concentraciones significativas de material particulado asociadas al proyecto, debido a su ubicación a barlovento respecto a las fuentes de emisión. No obstante, se identifica una potencial afectación sobre corregimientos y sectores rurales localizados a sotavento, particularmente aquellos señalados en el análisis cartográfico, los cuales se encuentran en la trayectoria preferencial de dispersión del contaminante. Esta condición resalta la importancia de focalizar las medidas de manejo ambiental y los programas de seguimiento de la calidad del aire en las áreas receptoras identificadas por la modelación.

3.1.1.4 Valoración de los impactos ambientales relacionados con la condición de calidad del aire en la zona de estudio. La valoración de los impactos ambientales asociados a la calidad del aire se realizó mediante el método propuesto por Conesa (2010), ampliamente utilizado en estudios de impacto ambiental por su capacidad para integrar atributos como intensidad, extensión, duración, reversibilidad y naturaleza del impacto. Esta metodología permitió analizar de manera estructurada las diferentes actividades constructivas del proyecto vial y su relación con la generación de contaminantes atmosféricos, especialmente material particulado (PM10 y PM2.5). La matriz resultante sintetiza la magnitud e importancia de cada afectación potencial, facilitando la identificación de los impactos críticos y sirviendo como base para definir las medidas de manejo, mitigación y seguimiento necesarias para asegurar la protección de la calidad del aire en el área de influencia.

Tabla 7.*Valoración de impactos*

Actividad del proyecto	Impacto identificado	Naturalidad	Intensidad	Extensión	Duración	Reversibilidad	Magnitud	Importancia	Valoración final
Excavación y cortes de terreno	Incremento localizado de PM ₁₀ por remoción y resuspensión de suelos	Negativo	3 (media)	2 (local)	2 (corta)	3 (reversible)	10	-10	Impacto moderado
Cargue y descargue de materiales	Emisión puntual de material particulado	Negativo	2 (baja)	2 (local)	2 (corta)	3 (reversible)	9	-9	Impacto moderado -bajo

grueso									
(PM ₁₀)									
Tránsito de maquinaria pesada	Emisiones								
	controlable								
	s de PM _{2.5} y PM ₁₀	Negativo	3 (media)	2 (local)	2 (corta)	3 (reversible)	10	-10	Impacto moderado
Resuspensi									
Transporte en vía destapada rodadura vehicular	ón de polvo								
	por	Negativo	3 (media)	2 (local)	2 (corta)	3 (reversible)	10	-10	Impacto moderado
Operación de volquetas y tractocamiones	Emisión de								Impacto
	PM _{2.5}	Negativo	2 (baja)	2 (local)	2 (corta)	3 (reversible)	9	-9	moderado
	asociada a								-bajo

		combustión									
		diésel									
		Dispersión									
Manejo	de	limitada de									
acopios		partículas	Negativo	2 (baja)	1	2 (corta)	3 (reversible)	8	−8	Impacto	
temporales		por acción			(puntual)					bajo	
		del viento									
		Emisión									
Compactación y nivelación		puntual de									
		partículas	Negativo	2 (baja)	1	2 (corta)	3 (reversible)	8	−8	Impacto	
		finas			(puntual)					bajo	
		Incremento									
Actividades simultáneas en época seca		temporal del riesgo de	Negativo	3 (media)	2 (local)	2 (corta)	3 (reversible)	10	−10	Impacto moderado	

	resuspensión de PM ₁₀									
Implementación de medidas de riesgo y control	Reducción efectiva de PM ₁₀ en frentes de obra	Positivo	3 (media)	2 (local)	3 (media a)	4 (altamente reversible/efectivo)	12	+12	Impacto positivo moderado	
Mantenimiento preventivo de maquinaria	Disminución de PM _{2.5} y emisiones asociadas	Positivo	2 (baja)	2 (local)	3 (media a)	4 (efectivo)	11	+11	Impacto positivo moderado	

Nota: Elaboración propia

Las actividades asociadas a la fase constructiva del proyecto de infraestructura vial rural generan emisiones atmosféricas principalmente en forma de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, derivadas de la remoción y manipulación de suelos, el tránsito de maquinaria pesada y la circulación de vehículos sobre vías sin pavimentar. No obstante, el análisis integrado del inventario de emisiones, las condiciones meteorológicas locales y los patrones de dispersión atmosférica indica que dichos impactos se manifiestan de manera localizada, temporal y de carácter reversible, concentrándose principalmente en el área de influencia directa del corredor vial y en los frentes de obra.

Las actividades de excavación, cortes de terreno, cargue y descargue de materiales y compactación del suelo generan incrementos puntuales de PM_{10} asociados a la resuspensión de partículas, especialmente durante periodos secos. Sin embargo, la intensidad de estos impactos se mantiene en niveles bajos a moderados, debido a la limitada extensión espacial de las actividades, su corta duración y la dispersión favorecida por las condiciones de viento predominantes en la zona. De manera similar, el tránsito de maquinaria pesada y el transporte de materiales sobre vías destapadas producen emisiones controlables de material particulado fino y grueso, las cuales se restringen al entorno inmediato de las fuentes y no alcanzan concentraciones persistentes en áreas pobladas cercanas.

El análisis de la dinámica atmosférica evidencia que las direcciones dominantes del viento facilitan el transporte de las emisiones fuera del casco urbano del municipio, reduciendo la probabilidad de afectaciones directas sobre la población de Becerril. En este contexto, los posibles efectos sobre la calidad del aire se concentran en sectores rurales ubicados a sotavento del corredor vial, donde la presencia humana es dispersa y de baja densidad. Adicionalmente, la ocurrencia de episodios de mayor resuspensión de polvo durante la temporada seca se considera de carácter

ocasional, sin generar impactos acumulativos significativos, siempre que se mantengan las prácticas operativas previstas en el proyecto.

Por su parte, la implementación permanente de medidas de manejo ambiental, tales como el riego de vías y frentes de obra, el control de velocidades, la cobertura de materiales y el mantenimiento preventivo de la maquinaria, contribuye de manera efectiva a la reducción de las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$. Estas acciones permiten minimizar la intensidad de los impactos negativos identificados y consolidar efectos positivos de carácter local sobre la calidad del aire, reforzando el carácter controlable y mitigable de los impactos asociados al proyecto.

3.1.2 Evaluación de los impactos potenciales de las emisiones atmosféricas sobre la salud pública y el entorno ecológico de las comunidades rurales adyacentes a la zona de intervención.

3.1.2.1 Identificación de los receptores sensibles y posibles vías de exposición. En el corredor rural intervenido por el Proyecto de Infraestructura Vial Rural 2023 en Becerril, Cesar, se identifican comunidades y ecosistemas que presentan condiciones de vulnerabilidad frente a incrementos de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y gases asociados a la operación de maquinaria pesada, tránsito de volquetas y actividades de movimiento de suelos. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), los grupos más susceptibles a los efectos de la contaminación atmosférica son niños, adultos mayores, gestantes y personas con enfermedades respiratorias preexistentes, los cuales requieren especial consideración en el análisis de riesgo.

En el área del proyecto se localizaron tres tipos principales de receptores sensibles:

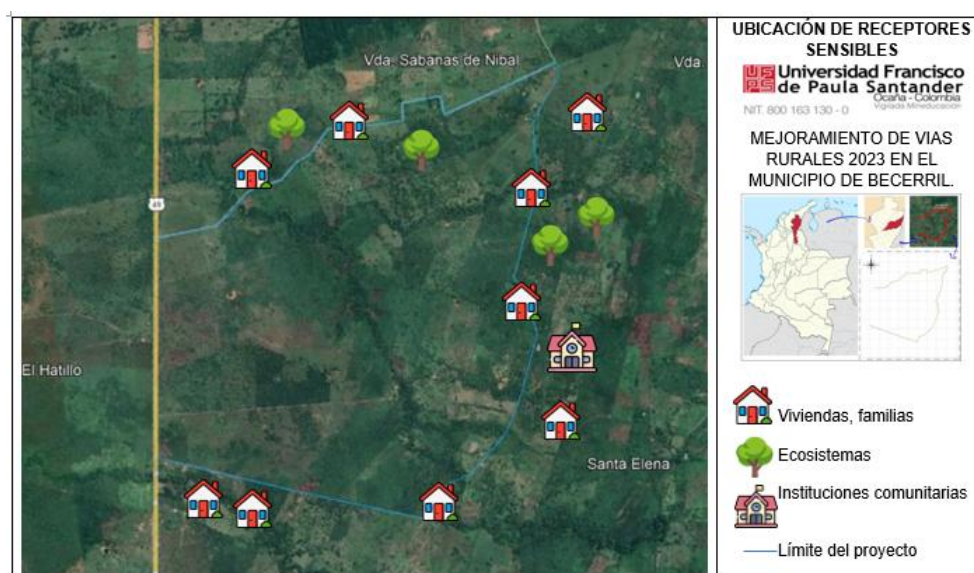
1. Población rural residente ubicada en caseríos, veredas y viviendas dispersas cercanas al corredor vial, especialmente aquellas situadas a menos de 500 metros de los frentes de obra, los cuales pueden experimentar exposición directa a material particulado a través de

la inhalación, lo cual incrementa el riesgo de irritación respiratoria, exacerbación de asma y afectaciones cardiovasculares.

2. Instituciones comunitarias como escuelas rurales, centros comunitarios, puntos de encuentro y centros de salud de primer nivel, cuya población usuaria incluye grupos vulnerables. Las actividades cotidianas en estos espacios podrían verse afectadas por la dispersión de polvo y por los episodios críticos estacionales identificados en la zona (enero–marzo), donde los niveles de PM10 tienden a incrementarse.
3. Ecosistemas y elementos bióticos presentes en el área, incluyendo cobertura vegetal secundaria, suelos agrícolas y cuerpos de agua menores, los cuales pueden verse afectados por la deposición de partículas, que puede alterar procesos fotosintéticos, calidad del suelo y dinámica de microorganismos, tal como lo han documentado autores como Zhao et al. (2019).

Figura 6.

Ubicación de los receptores sensibles



Nota: Elaboración propia

En cuanto a las posibles vías de exposición, se identifican tres rutas principales:

- Inhalación directa, considerada la vía más relevante, debido al tamaño reducido de las partículas PM10 y PM2.5, que pueden ingresar al tracto respiratorio y llegar hasta los alvéolos pulmonares en el caso de las partículas finas.
- Deposición en superficies (suelo, agua, vegetación), que puede generar afectación ecológica indirecta y exposición secundaria por contacto o reingreso de partículas al aire mediante resuspensión.
- Exposición dérmica y ocular, especialmente para trabajadores y pobladores que desarrollan actividades al aire libre en cercanía al proyecto.

3.1.2.2 Valoración de la significancia de los impactos atmosféricos sobre la salud pública y el entorno ecológico. Una vez identificados los receptores sensibles y las principales vías de exposición, se procedió a la valoración de la significancia de los impactos potenciales generados por las emisiones atmosféricas asociadas al Proyecto de Infraestructura Vial Rural 2023 en el municipio de Becerril, Cesar. Para ello, se utilizó una matriz de evaluación de impactos ambientales, adaptada a las condiciones del entorno rural y al tipo de proyecto, con énfasis en emisiones de material particulado (PM10 y PM2.5).

La valoración se realizó considerando los siguientes criterios técnicos:

- **Magnitud del impacto:** nivel de alteración generado sobre la calidad del aire y los receptores expuestos.
- **Duración:** tiempo durante el cual se manifiesta el impacto (temporal o permanente).
- **Frecuencia:** periodicidad con la que ocurre el impacto durante las fases del proyecto.

- **Reversibilidad:** capacidad del medio afectado para retornar a sus condiciones iniciales una vez cesa la fuente emisora.
- **Población o componente afectado:** número y vulnerabilidad de los receptores expuestos (población humana y ecosistemas).

Con base en la combinación de estos criterios, los impactos fueron clasificados en niveles de significancia alta, media o baja, permitiendo identificar aquellos que requieren medidas prioritarias de manejo ambiental. La asignación del nivel de significancia se realizó a partir de la combinación cualitativa de los criterios de magnitud, duración, frecuencia y reversibilidad del impacto, así como de la vulnerabilidad de los receptores sensibles identificados en el área de influencia del proyecto.

Tabla 8.

Valoración del nivel de significancia de los impactos sobre la salud pública y el entorno ecológico.

Actividad generadora	Componente afectado	Tipo de impacto	Magnitud	Duración	Frecuencia	Reversibilidad	Receptor sensible	Nivel de significancia
Movimiento de suelos y nivelación del terreno	Calidad del aire	Negativo	Alta	Temporal	Alta	Reversible	Población rural cercana (<500 m)	Alta

Actividad generadora	Componente afectado	Tipo de impacto	Magnitud	Duración	Frecuencia	Reversibilidad	Receptor sensible	Nivel de significancia
Movimiento de suelos y nivelación del terreno	Salud humana	Negativo	Alta	Temporal	Alta	Reversible	Niños, adultos mayores y personas con afecciones respiratorias	Alta
Tránsito de maquinaria pesada y volquetas	Calidad del aire	Negativo	Alta	Temporal	Alta	Reversible	Viviendas rurales e instituciones comunitarias	Alta
Tránsito de maquinaria pesada y volquetas	Salud humana	Negativo	Media–Alta	Temporal	Media–Alta	Reversible	Población usuaria de escuelas y centros comunitarios	Media–Alta

Actividad generadora	Componente afectado	Tipo de impacto	Magnitud	Duración	Frecuencia	Reversibilidad	Receptor sensible	Nivel de significancia
Transporte y acopio de materiales	Calidad del aire	Negativo	Media	Temporal	Media	Reversible	Población rural dispersa	Media
Transporte y acopio de materiales	Ecosistemas (vegetación y suelos)	Negativo	Media	Temporal	Media	Reversible	Cobertura vegetal secundaria y suelos agrícolas	Media
Emisión de partículas por resuspensión	Ecosistemas	Negativo	Media	Temporal	Media	Reversible	Vegetación y cuerpos de agua menores	Media
Uso de la vía (fase de operación)	Calidad del aire	Negativo	Baja–Media	Permanente	Baja	Reversible	Comunidades aledañas	Baja–Media

Nota: Elaboración propia

Los resultados de la matriz de evaluación indican que:

- Durante la fase de construcción, las emisiones de material particulado generadas por el movimiento de suelos, el tránsito continuo de maquinaria pesada y el transporte de materiales presentan un impacto de significancia alta sobre la calidad del aire y la salud de la población rural ubicada en cercanías al corredor vial, especialmente en viviendas situadas a menos de 500 metros de los frentes de obra. Este impacto se considera temporal, pero frecuente, y con potencial de afectación directa a grupos vulnerables como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias.
- En relación con las instituciones comunitarias (escuelas rurales y centros de encuentro), el impacto se clasifica como de significancia media a alta, dependiendo de la proximidad al área intervenida y de las condiciones climáticas, particularmente durante la temporada seca (enero–marzo), cuando se incrementa la resuspensión de partículas.
- Para los ecosistemas y componentes bióticos, la deposición de partículas sobre la vegetación, los suelos agrícolas y los cuerpos de agua menores genera un impacto de significancia media, dado que, aunque es reversible en el mediano plazo, puede afectar procesos ecológicos como la fotosíntesis, la calidad del suelo y la dinámica microbiana si no se implementan medidas de control adecuadas.
- En la fase de operación del proyecto, asociada al uso de la vía mejorada, los impactos por resuspensión de material particulado se estiman de significancia baja a media, debido a una menor intensidad de las actividades generadoras y a la posibilidad de aplicar medidas de mantenimiento y control.

Dado lo anterior, la valoración de la significancia de los impactos atmosféricos evidencia que las emisiones de material particulado durante la fase de construcción constituyen el principal

impacto ambiental del proyecto, lo que justifica la necesidad de diseñar e implementar un Plan de Gestión de la Calidad del Aire con medidas específicas de prevención, mitigación, control y monitoreo, orientadas a proteger la salud pública y el entorno ecológico de las comunidades rurales de Becerril.

3.1.2.3 Clasificación de los impactos atmosféricos por fase del proyecto. Con el propósito de consolidar la evaluación de los impactos potenciales asociados a las emisiones atmosféricas del Proyecto de Infraestructura Vial Rural 2023 en Becerril, Cesar, se realizó la clasificación de los impactos por fase del proyecto, considerando las actividades desarrolladas en cada etapa, el tipo de emisiones generadas, los receptores sensibles expuestos y el nivel de significancia previamente establecido.

Tabla 9.

Clasificación de los impactos atmosféricos por fase del proyecto

Fase del proyecto	Actividad generadora	Tipo de emisión	Receptor afectado	Impacto identificado	Nivel de significancia
Preparación	Adecuación del terreno y alistamiento de frentes de obra	PM10 (polvo por remoción de suelos)	Población rural cercana	Deterioro temporal de la calidad del aire	Media
Preparación	Movimiento inicial de suelos	PM10	Ecosistemas (vegetación y suelos)	Deposición de partículas sobre cobertura vegetal	Media

Fase del proyecto	Actividad generadora	Tipo de emisión	Receptor afectado	Impacto identificado	Nivel de significancia
Construcción	Tránsito constante de maquinaria pesada y volquetas	PM10 y PM2.5	Población rural y grupos vulnerables	Incremento del riesgo respiratorio	Alta
Construcción	Transporte y acopio de materiales	PM10	Instituciones comunitarias	Afectación a actividades cotidianas	Media–Alta
Construcción	Operación continua de maquinaria	PM2.5 y gases asociados	Ecosistemas	Alteración temporal de procesos ecológicos	Media
Operación	Tránsito vehicular sobre la vía mejorada	PM10 (resuspensión)	Comunidades aledañas	Deterioro leve de la calidad del aire	Baja–Media
Operación	Uso continuo de la infraestructura vial	PM10	Ecosistemas	Deposición de partículas en suelos y vegetación	Baja

Nota: Elaboración propia

La matriz de clasificación evidencia que la fase de construcción concentra los impactos atmosféricos de mayor significancia, debido a la intensidad y frecuencia de las actividades generadoras de emisiones, así como a la exposición directa de receptores sensibles, en particular la población rural y las instituciones comunitarias cercanas al corredor vial. En contraste, la fase

de preparación presenta impactos de significancia media, mientras que la fase de operación se caracteriza por impactos de significancia baja a media, asociados principalmente a la resuspensión de material particulado.

En este sentido, la clasificación por fases permite concluir que la gestión ambiental del proyecto debe priorizar la fase de construcción, mediante la implementación de medidas específicas de prevención, mitigación y control de emisiones atmosféricas, integradas en el Plan de Gestión de la Calidad del Aire, con el fin de reducir los riesgos sobre la salud pública y el entorno ecológico de las comunidades rurales del municipio de Becerril.

3.1.3 Establecimiento de medidas de prevención, mitigación y control de emisiones atmosféricas generadas durante las distintas fases del proyecto vial, en concordancia con la normatividad ambiental vigente.

3.1.3.1 Objetivos y metas relacionados con las partes interesadas, el compromiso de la empresa, los controles de los niveles de emisión, concentración de contaminantes atmosféricos e impactos ambientales identificados en la zona de estudio. El objetivo principal de esta sección es establecer un marco estratégico para la gestión de emisiones atmosféricas generadas durante las distintas fases del Proyecto de Infraestructura Vial Rural 2023 en Becerril, Cesar, asegurando que las acciones de la empresa y de las partes interesadas contribuyan a mantener la calidad del aire dentro de los límites normativos y a minimizar los impactos ambientales y de salud identificados en la zona de estudio. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos y metas asociadas:

Objetivo 1: Compromiso institucional y gestión con las partes interesadas

- Meta 1.1: Realizar al menos dos (2) talleres informativos semestrales con comunidades rurales adyacentes al corredor vial, alcanzando una participación mínima del 70 % de los líderes comunitarios convocados, durante toda la fase de construcción del proyecto.
- Meta 1.2: Implementar y socializar un Plan de Gestión de Emisiones Atmosféricas aprobado por la autoridad ambiental competente, asegurando que el 100 % del personal operativo y administrativo reciba capacitación ambiental antes del inicio de actividades y refuerzos anuales durante la ejecución del proyecto.

Objetivo 2: Prevención y control de emisiones

- Meta 2.1: Mantener las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ por debajo del 80 % de los valores límite establecidos en la Resolución 2254 de 2017, mediante la aplicación de riegos de vías al menos dos (2) veces por día en época seca y el control de velocidades de maquinaria a máximo 30 km/h en frentes de obra, durante toda la fase constructiva.
- Meta 2.2: Realizar inspecciones técnicas mensuales al 100 % de la maquinaria pesada y vehículos diésel, verificando el estado de filtros, sistemas de escape y mantenimiento preventivo, con el fin de reducir en al menos un 20 % las emisiones de material particulado fino y gases de combustión durante la ejecución del proyecto.

Objetivo 3: Mitigación de impactos ambientales identificados

- Meta 3.1: Implementar medidas de protección en el 100 % de los frentes de obra activos, mediante barreras físicas temporales y señalización preventiva, y efectuar monitoreos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con frecuencia trimestral, priorizando zonas cercanas a población vulnerable, durante toda la fase de construcción.
- Meta 3.2: Cubrir el 100 % de los acopios temporales de materiales finos y aplicar riego preventivo diario en superficies descubiertas durante la temporada seca, con el fin de

reducir en al menos un 30 % la deposición de polvo sedimentable en áreas agrícolas y cuerpos de agua adyacentes.

- Meta 3.3: Establecer un sistema de seguimiento ambiental con reportes trimestrales, integrando indicadores de emisiones y cumplimiento normativo, de manera que el 100 % de las desviaciones detectadas cuente con acciones correctivas implementadas en un plazo no mayor a 15 días.

Objetivo 4: Evaluación y mejora continua

- Meta 4.1: Evaluar de manera trimestral la efectividad de las medidas de prevención, mitigación y control, utilizando indicadores de desempeño ambiental, y ajustar los procedimientos operativos cuando se identifiquen desviaciones superiores al 10 % respecto a los valores objetivo establecidos.
- Meta 4.2: Documentar e incorporar al menos tres (3) buenas prácticas ambientales y lecciones aprendidas al cierre del proyecto, integrándolas en los lineamientos internos de la empresa para su aplicación en futuros proyectos viales rurales.

Lo anterior permite que la gestión de emisiones atmosféricas sea integral, considerando la participación de las partes interesadas, el compromiso institucional, el control de niveles de emisión y concentración de contaminantes, y la mitigación efectiva de los impactos identificados, cumpliendo con los lineamientos de la normatividad ambiental vigente en Colombia (ANLA, Resolución 2254 de 2017; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

3.1.3.2 Programas requeridos para que la empresa alcance los objetivos ambientales.

Programa 1: Participación y sensibilización de las partes interesadas

Objetivo relacionado: Objetivo 1 – Compromiso institucional y gestión con las partes interesadas.

Tabla 10.**Programa 1**

Estrategia	Actividades	Recursos	Responsables
Sensibilización comunitaria	Realizar talleres informativos sobre impactos de emisiones y medidas de mitigación.	Material didáctico, sala de talleres, folletos informativos.	Coordinador ambiental, equipo de comunicación, líderes comunitarios.
Comunicación permanente	Implementar canales de comunicación (línea directa, WhatsApp, reuniones periódicas).	Teléfonos, grupos de mensajería, registro de asistencia.	Coordinador de proyectos, encargado de relaciones comunitarias.
Difusión interna del plan	Capacitar al personal de obra sobre el plan de gestión de emisiones y procedimientos.	Presentaciones, manuales internos, capacitaciones.	Jefe de obra, coordinador ambiental, supervisores de área.

Nota: Elaboración propia

Programa 2: Prevención y control de emisiones

Objetivo relacionado: Objetivo 2 – Prevención y control de emisiones

Tabla 11.*Programa 2*

Estrategia	Actividades	Recursos	Responsables
Control de polvo	Riego periódico de vías, instalación de barreras temporales en frentes críticos, reducción de velocidad de maquinaria.	Camiones cisterna, barreras físicas, señalización vial.	Encargado de obra, operador de maquinaria, coordinador ambiental.
Control de emisiones de maquinaria	Revisión periódica de filtros, sistemas de escape y lubricación de maquinaria pesada y motores diésel.	Herramientas de mantenimiento, lubricantes, repuestos.	Jefe de mantenimiento, operadores de maquinaria, coordinador ambiental.
Monitoreo de aire	Medición continua de PM10, PM2.5, NOx, CO y SO ₂ en puntos críticos de obra.	Equipos de monitoreo de aire, software de registro de datos.	Coordinador ambiental, técnico en monitoreo, analista de datos.

Nota: Elaboración propia

Programa 3: Mitigación de impactos ambientales

Objetivo relacionado: Objetivo 3 – Mitigación de impactos ambientales identificados.

Tabla 12.

Programa 3

Estrategia	Actividades	Recursos	Responsables
Protección de salud	Instalación de barreras físicas, señalización de tránsito y control de acceso a zonas de riesgo.	Señalización, barreras, elementos de protección.	Jefe de obra, coordinador de seguridad, coordinador ambiental.
Protección de suelos y cuerpos de agua	Cobertura de acopios de materiales, riego de materiales sueltos, manejo adecuado de almacenamiento de finos.	Mallas, lonas, camiones cisterna, personal de obra.	Encargado de obra, operador de maquinaria, coordinador ambiental.
Seguimiento y reporte	Generación de informes periódicos sobre niveles de emisión y acciones correctivas.	Software de gestión ambiental, plantillas de reporte, equipos de monitoreo.	Coordinador ambiental, analista de datos, jefe de obra.

Nota: Elaboración propia

Programa 4: Evaluación y mejora continua

Objetivo relacionado: Objetivo 4 – Evaluación y mejora continua.

Tabla 13.

Programa 4

Estrategia	Actividades	Recursos	Responsables
Evaluación trimestral	Revisar la efectividad de las medidas implementadas y ajustar procedimientos.	Informes de monitoreo, reuniones de análisis, registro de acciones correctivas.	Coordinador ambiental, equipo de obra, líderes comunitarios.
Incorporación de buenas prácticas	Integrar lecciones aprendidas y de recomendaciones en proyectos futuros.	Manuales, documentos y de lecciones aprendidas, capacitaciones.	Coordinador ambiental, gerencia de proyectos, equipo de supervisión.

Nota: Elaboración propia

El diseño de los programas descritos permite que el Proyecto de Infraestructura Vial Rural 2023 en Becerril, Cesar, cuente con un marco estratégico integral para la gestión de emisiones atmosféricas. Cada programa establece acciones concretas, recursos y responsabilidades, asegurando que tanto la empresa como las comunidades y demás partes interesadas participen activamente en la prevención, control y mitigación de los impactos ambientales y de salud relacionados con la ejecución de la obra. Esta participación y compromiso conjunto favorece la sostenibilidad del proyecto y el cumplimiento de los límites normativos establecidos para la calidad del aire.

Figura 7.

Fotografía capacitación.



Nota: Fotografía tomada por el autor

Adicionalmente, los programas contemplan mecanismos de seguimiento y evaluación continua que permiten ajustar las medidas de control y mejorar los procedimientos de manera oportuna, lo que garantiza que las lecciones aprendidas y las buenas prácticas se incorporen en futuros proyectos, fortaleciendo la cultura de gestión ambiental de la empresa y contribuyendo al desarrollo sostenible del territorio.

4. Conclusiones

La evaluación realizada permitió identificar los niveles de PM10 y PM2.5 en el tramo vial del proyecto, determinando los puntos críticos donde es probable que se concentren mayores emisiones. Los resultados obtenidos, basados en modelos de dispersión atmosférica, proporcionan información clave para priorizar medidas preventivas y de control, asegurando que las fases de construcción se ejecuten con un impacto mínimo sobre la calidad del aire.

El análisis de los impactos potenciales evidenció que la exposición a material particulado y gases contaminantes podría afectar especialmente a la población vulnerable y a los ecosistemas circundantes. Esta evaluación permitió establecer prioridades en la mitigación de riesgos y sustenta la necesidad de implementar estrategias de control de emisiones que protejan tanto la salud humana como la integridad ambiental de la zona de influencia.

Se definieron medidas concretas de prevención, control y mitigación de emisiones, incluyendo riego de vías, control de maquinaria, barreras físicas y monitoreo continuo. Estas medidas, alineadas con la normatividad ambiental colombiana, aseguran una gestión integral de la calidad del aire, fomentan la participación de la comunidad y fortalecen el compromiso institucional de Marbal Ingeniería S.A.S. con la sostenibilidad ambiental.

5. Recomendaciones

Se realizan las siguientes recomendaciones:

Implementar un sistema de monitoreo continuo de la calidad del aire durante todas las fases del proyecto, con indicadores claros que permitan ajustes oportunos.

Mantener la sensibilización y participación de la comunidad, garantizando canales de comunicación abiertos y la divulgación de resultados de monitoreo.

Fortalecer la gestión de maquinaria y transporte mediante controles de mantenimiento preventivo y reducción de emisiones de motores diésel.

Aplicar las buenas prácticas ambientales identificadas en este proyecto en futuras obras, incorporando lecciones aprendidas y mejoras continuas en los procedimientos de gestión ambiental.

Establecer un programa de seguimiento y reporte periódico que documente las acciones correctivas y garantice la trazabilidad de las medidas adoptadas, asegurando el cumplimiento normativo y la sostenibilidad del proyecto.

Referencias

- Barbieri, J., & Silva, D. (2011). Desenvolvimento sustentável e sustentabilidade ambiental. Atlas.
- Brennan, S., & Withgott, J. (2018). Environment: The Science Behind the Stories. Pearson.
- Cecinato, A., Di Filippo, P., & Mazzoli, C. (2020). *Air quality assessment in rural construction zones: particulate matter and gaseous pollutants*. Environmental Monitoring and Assessment, 192(5), 305.
- Conesa, F. (2010). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Mundi-Prensa.
- Conesa, V. (2010). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Mundi-Prensa.
- Díaz, M., & Moreno, F. (2020). Evaluación de impactos ambientales generados por proyectos de infraestructura en zonas rurales de Colombia. Revista Ambiente y Desarrollo, 12(3), 45–56.
- EPA. (2017). Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42). U.S. Environmental Protection Agency.
- Friis, R. (2020). Essentials of Environmental Health. Jones & Bartlett.
- Glasson, J., Therivel, R., & Chadwick, A. (2012). Introduction to Environmental Impact Assessment. Routledge.
- García, M., López, R., & Torres, J. (2022). *Sustainable management of air quality in road infrastructure projects*. Journal of Environmental Engineering, 48(2), 115-127.
- González, L., & Pérez, A. (2022). Impacto de las obras civiles sobre la calidad del aire en entornos rurales. Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental, 18(1), 27–40.

- IPCC. (2019). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jacobson, M. (2012). Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions. Cambridge University Press.
- Martins, V., et al. (2020). Road dust emissions in rural unpaved roads: A review. *Atmospheric Pollution Research*, 11(4), 1–12.
- Minambiente. (2017). Resolución 2254 de 2017. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Minambiente. (2017). Resolución 2254 de 2017. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2018). Guía para la gestión del componente aire en proyectos de infraestructura vial. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2019). *Guía para la gestión de la calidad del aire en proyectos de infraestructura vial*. Bogotá, Colombia.
- Nieuwenhuis, P., & Wells, P. (2017). The Automotive Industry and the Environment. Woodhead Publishing.
- NASA. (2023). *POWER Data Access Viewer*. National Aeronautics and Space Administration. <https://power.larc.nasa.gov>
- OMS. (2021). Air Quality Guidelines. World Health Organization.
- OMS. (2021). *Air Quality Guidelines: Global Update 2021*. Organización Mundial de la Salud.
- Zhao, X., Zhang, X., Xu, X., & Shen, H. (2019). Ecological effects of particulate matter deposition in terrestrial systems. *Environmental Pollution*, 250, 933–945.

- Organización Mundial de la Salud – OMS. (2021). Air pollution. <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>
- Ortúzar, J., & Willumsen, L. (2014). *Modelling Transport*. Wiley.
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742.
- Primack, R. (2019). *Essentials of Conservation Biology*. Sinauer.
- Sánchez, L. (2015). *Gestión ambiental: conceptos y aplicaciones*. Ecoe Ediciones.
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics*. Wiley.
- Torres, S., & Cárdenas, J. (2021). Buenas prácticas ambientales en proyectos de construcción: calidad del aire y control de emisiones. *Revista Ingeniería y Medio Ambiente*, 15(2), 78–89.
- USEPA. (2020). *Emission Factors for Equipment and Engines*. U.S. Environmental Protection Agency.
- World Health Organization (WHO). (2021). *Air quality guidelines: global update 2021*. Geneva: WHO.
- Zannetti, P. (2013). *Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software*. Springer.

ANEXOS

Apéndice A.

Matriz Vester

1. Variables

Figura 8.

Definición de variables Vester

Nº	Variable
V1	Tipo y cantidad de maquinaria utilizada
V2	Tipo de material particulado (PM10, PM2.5)
V3	Velocidad del viento
V4	Humedad del suelo
V5	Densidad del tránsito vehicular en obra
V6	Distancia a zonas pobladas
V7	Nivel de vegetación en la zona
V8	Frecuencia de actividades de riego
V9	Plan de manejo ambiental implementado
V10	Concientización del personal operario

2. Matriz de impacto cruzado

Puntaje de influencia:

- 0 = Sin relación
- 1 = Baja influencia
- 2 = Mediana influencia
- 3 = Alta influencia

Tabla 14.

Matriz de impacto cruzado

→	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	Σ Influencia
V1	0	3	1	2	3	2	1	2	3	2	19
V2	1	0	2	2	2	2	1	2	1	1	14
V3	1	2	0	2	1	1	1	0	1	0	9
V4	2	2	2	0	1	1	2	2	1	0	13
V5	3	3	1	2	0	3	2	1	2	1	18
V6	2	1	0	1	2	0	1	0	1	1	9
V7	1	1	0	2	2	2	0	1	1	1	11
V8	2	2	1	2	2	1	2	0	2	1	13
V9	3	2	1	1	2	2	1	2	0	3	17

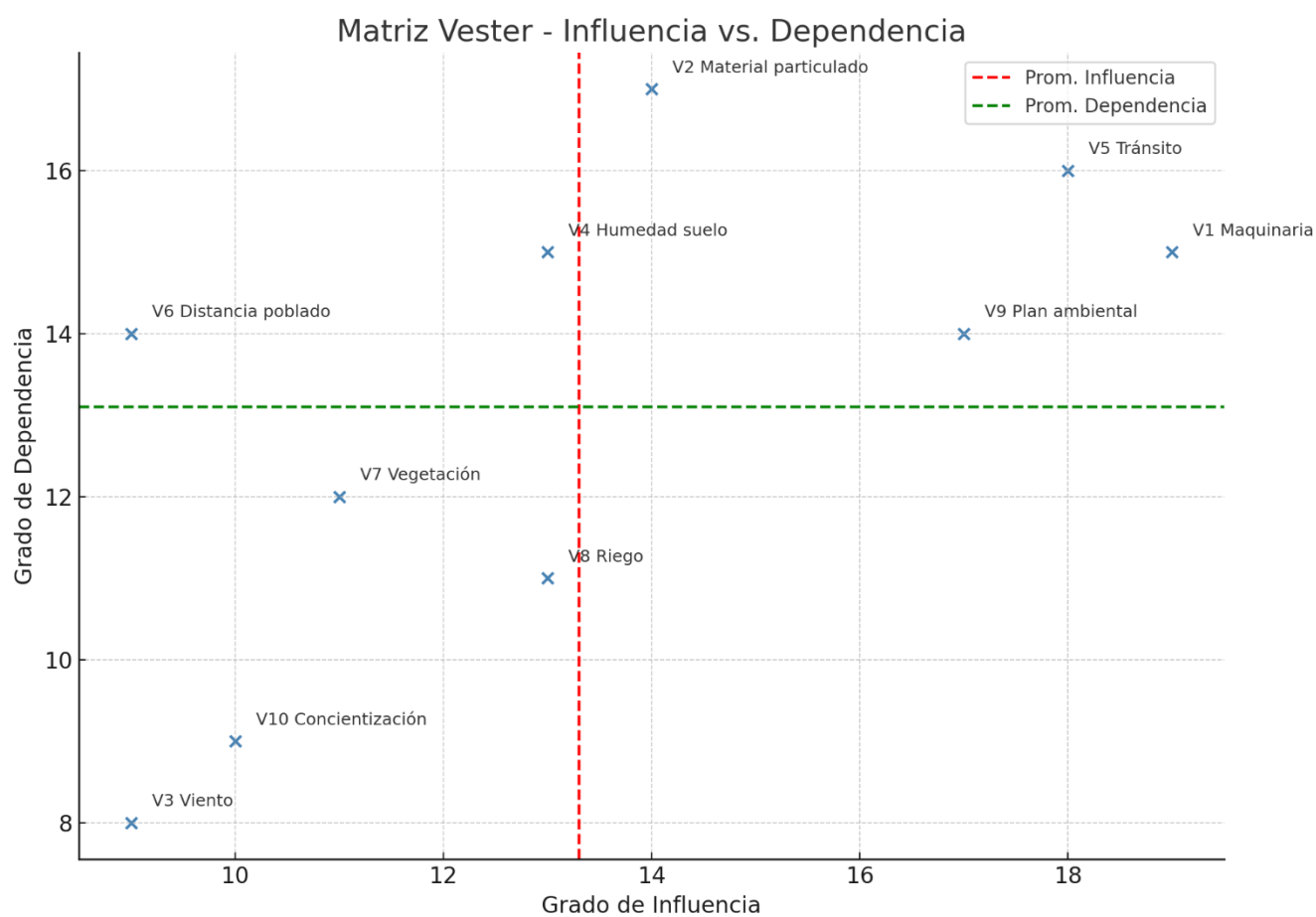
V10	2	1	0	1	1	1	1	1	2	0	10
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Dado lo anterior se determina:

Variables más influyentes:

- V1 (maquinaria): 19
- V5 (tráfico vehicular): 18
- V9 (plan de manejo): 17

3. Diagrama Vester



La Matriz Vester permitió identificar y clasificar las variables clave del sistema según su nivel de influencia y dependencia, facilitando la toma de decisiones estratégicas para el diseño del plan de gestión de calidad del aire. A partir del gráfico generado, las variables se distribuyeron en cuatro cuadrantes fundamentales:

1. Variables clave o motoras (Alta influencia / Baja dependencia)

Estas variables son altamente influyentes y relativamente autónomas. Cualquier cambio en ellas afecta considerablemente al sistema en general. En nuestro análisis se destacan:

- Condiciones meteorológicas
- Planificación del cronograma de obras
- Control de maquinaria y equipos

Estas variables deben ser gestionadas con prioridad, ya que tienen el potencial de activar dinámicas positivas o negativas en el resto del sistema. Por tanto, deben considerarse como ejes estratégicos en la formulación de medidas preventivas y correctivas.

2. Variables críticas o inestables (Alta influencia / Alta dependencia)

Se trata de variables que reciben influencia y, a su vez, influyen de manera significativa. Son volátiles y sensibles a cambios en el sistema, por lo que requieren seguimiento continuo. En este grupo aparecen:

- Calidad del aire local
- Percepción comunitaria del impacto ambiental

Estas variables actúan como termómetros del sistema. Un desajuste en ellas puede desestabilizar el proyecto. Por tanto, se recomienda aplicar medidas de monitoreo ambiental participativo y retroalimentación con la comunidad.

3. Variables dependientes (Baja influencia / Alta dependencia)

Estas variables tienen poco impacto sobre el resto del sistema, pero son muy sensibles a los cambios. Representan resultados o efectos que deben ser protegidos. Se destacan:

- Salud pública
- Cumplimiento normativo

Estas variables reflejan el éxito o fracaso del plan. Aunque no se controlan directamente, su estado sirve como indicador de desempeño del proyecto y deben ser monitoreadas rigurosamente.

4. Variables reguladoras o autónomas (Baja influencia / Baja dependencia)

Poseen escasa capacidad de influir y no dependen directamente del sistema. Su papel es secundario, aunque no irrelevante. Aquí puede ubicarse:

- Capacidad institucional local

Aunque no determinante, esta variable puede cobrar relevancia en fases posteriores del proyecto, especialmente en procesos de seguimiento o sostenibilidad.

Figura 9.

Fotografías del proyecto vial.

