



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Escuela de Posgrado

Evaluación del riesgo ambiental por emisiones atmosféricas generadas en
la extracción de minerales en una planta minera, 2025

Tesis

Para optar el Grado Académico de Maestro en Ecología y Gestión Ambiental

Autor

Luis Miguel Santiago Palomino

Asesor

Dr. Angel Hugo Campos Diaz



Dr. ANGEL HUGO CAMPOS DIAZ
ASESOR

Huacho – Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. No Comercial: No puede utilizar el material con fines comerciales. Sin Derivadas: Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. Sin restricciones adicionales: No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL
JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2026-SU/NEDEA/CD de fecha 17/01/2026)

Escuela de Posgrado

DATOS DEL AUTOR (ES):		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Santiago Palomino Luis Miguel	72478236	25 DE AGOSTO DEL 2026
DATOS DEL ASESOR:		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	CÓDIGO ORCID
Campos Diaz Angel Hugo	15619145	https://orcid.org/0000-0003-3306-6412
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	CÓDIGO ORCID
Castañeda Chirre Elvira Teofila	15744138	https://orcid.org/0000-0002-1953-8869
Lomparte Ramos Fanny del Pilar	15845882	https://orcid.org/0000-0003-4221-5627
Velez Chang Yasmin Jesus	41943603	https://orcid.org/0000-0003-0333-8173

LUIS MIGUEL SANTIAGO PALOMINO (2026-062594)

EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR EMISIONES ATMOSFÉRICAS GENERADAS EN LA EXTRACCIÓN DE MINER...

 DGI-POSGRADO 2026
 Dirección de Gestión de la Investigación-VRI 2026
 DIRECCION DE GESTION DE LA INVESTIGACION

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3629511979

Fecha de entrega

18 ago 2026, 3:03 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

18 ago 2026, 3:07 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

INFORME_LUIS_SANTIAGO_1.pdf

Tamaño del archivo

1005.6 KB

95 páginas

16.689 palabras

96.692 caracteres



Página 2 de 104 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::1:3629511979

20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 11%  Publicaciones
- 15%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

**EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR EMISIONES
ATMOSFÉRICAS GENERADAS EN LA EXTRACCIÓN DE MINERALES EN UNA
PLANTA MINERA, 2025**

Luis Miguel Santiago Palomino

TESIS DE MAESTRÍA

ASESOR: Dr. Angel Hugo Campos Diaz

**UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL**

HUACHO

2026

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios, por brindarme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para alcanzar esta meta.

A mis padres, por su amor incondicional, sus consejos y el apoyo constante que me han brindado en cada etapa de mi formación, siendo el pilar fundamental en mi desarrollo personal y profesional.

A mi familia, por su comprensión, motivación y por estar siempre presentes en los momentos más importantes de este camino.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso y me impulsaron a no rendirme.

AGRADECIMIENTO

A mis docentes y asesores de la Maestría en Ecología y Gestión Ambiental, por su guía, conocimientos y acompañamiento constante durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, a todas las personas e instituciones que contribuyeron de manera directa o indirecta en la realización de este trabajo.

índice

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2.1 <i>Problema General</i>	3
1.2.2 <i>Problemas Específicos</i>	3
1.3 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	4
1.5 DELIMITACIONES DEL ESTUDIO	5
1.6 VIABILIDAD DEL ESTUDIO	6
2.1 ANTECEDENTE DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
2.1.1 <i>Antecedentes internacionales</i>	8
2.1.2 <i>Antecedentes nacionales</i>	9
2.2 BASES TEÓRICAS.....	12
2.3 DEFINICIONES BÁSICAS.....	20
3.1 DISEÑO METODOLÓGICO.....	24
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA	24
3.2.1 <i>Población</i>	24
3.2.2 <i>Muestra</i>	25
3.3 TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	26
3.4 TÉCNICAS PARA EL PROCEDIMIENTO DE LA INFORMACIÓN	28

4.1 RESULTADOS	42
5.1 DISCUSIÓN	67
6.1 CONCLUSIONES.....	70
6.2 RECOMENDACIONES	71
7.1 FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	73
ANEXOS	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla1 Operacionalización de variables	23
Tabla2 Parámetros y equipos de muestreo.....	27
Tabla3 Identificación de fuentes de peligros	32
Tabla4 Estimación de la probabilidad.....	33
Tabla5 Estimación de la gravedad de las consecuencias	34
Tabla6 Rangos de los límites de los entornos	35
Tabla7 Valoración de consecuencias entorno humano	36
Tabla8 Valoración de consecuencias entorno natural.....	37
Tabla9 Valoración de consecuencias entorno socioeconómico	38
Tabla10 Rango de estimación de consecuencias	39
Tabla11 Resultados de las concentraciones emisiones atmosféricas	42
Tabla12 Emisiones atmosféricas con los ECA- Aire.....	51
Tabla13 Emisiones atmosféricas metales pesados en PM ₁₀	52
Tabla14 Identificación de peligros.....	54
Tabla 15 Análisis de escenarios de riesgo	55
Tabla 16. Estimación de la probabilidad.....	56
Tabla17 Estimación de la probabilidad.....	56
Tabla18 Determinación de las consecuencias entorno humano.....	58
Tabla19 Determinación de las consecuencias entorno natural.	59
Tabla20 Determinación de las consecuencias entorno socioeconómico.....	60
Tabla21 Nivel de riesgo entorno Humano	61
Tabla22 Nivel de riesgo entorno natural.....	63
Tabla23 Nivel de riesgo entorno socioeconómico	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura1	Flujo del proceso extracción de minerales	30
Figura2	Metodología evaluación de riesgos	31
Figura 3	Rango de estimación del riesgo ambiental	39
Figura4	Estimador del riesgo ambiental	40
Figura5	Estimador del porcentaje de riesgo ambiental.....	40
Figura 6	Material particulado(PM ₁₀).....	43
Figura7	Emisiones Atmosféricas NO ₂	44
Figura8	Emisiones atmosféricas SO ₂	45
Figura9	Emisiones Atmosféricas CO.....	46
Figura10	PM ₁₀ : Plomo (Pb)	47
Figura11	PM ₁₀ : Arsénico(As).....	48
Figura12	PM ₁₀ : Cadmio(Cd)	49
Figura13	PM ₁₀ : Cromo(Cr)	50
Figura14	Emisiones atmosféricas con los ECA- Aire	51
Figura15	Emisiones atmosféricas metales pesados en PM ₁₀	53
Figura16	Porcentaje de riesgo entorno humano	62
Figura17	Nivel del % riesgo entorno natural.....	64
Figura 18	Riesgo ambiental entorno socioeconómico	65

RESUMEN

Este estudio evaluó las emisiones atmosféricas generadas por las actividades mineras en 2025, centrando el análisis en PM₁₀, gases contaminantes (SO₂, NO₂, CO) y metales pesados. Los resultados mostraron que las concentraciones de PM₁₀ se mantuvieron dentro de los ECA-Aire, aunque el valor máximo se acercó al límite anual de 50 µg/m³, destacando la necesidad de controlar el polvo, especialmente en chancado y transporte en vías no pavimentadas. Las concentraciones de SO₂, NO₂ y CO fueron bajas, cumpliendo con los estándares, mientras que los metales pesados fueron bajos pero relevantes por su toxicidad. El análisis de riesgo ambiental reveló que las actividades de procesamiento de mineral y transporte en vías no pavimentadas son las principales fuentes de PM₁₀, representando un riesgo significativo para la salud pública. Aunque se cumplen los ECA-Aire, el estudio subraya la importancia de mantener un monitoreo continuo y mejorar las medidas de control de emisiones para reducir los impactos ambientales y proteger la salud humana.

Palabras claves: Emisiones atmosféricas, PM₁₀ y Gases contaminantes (SO₂, NO₂, CO)

ABSTRACT

This study assessed atmospheric emissions generated by mining activities in 2025, focusing the analysis on PM10, polluting gases (SO₂, NO₂, CO), and heavy metals. The results showed that PM10 concentrations remained within the Air Quality Standards (ECA-Aire), although the maximum value approached the annual limit of 50 µg/m³, highlighting the need to control dust, especially during crushing and transport on unpaved roads. SO₂, NO₂, and CO concentrations were low, complying with standards, while heavy metals were low but relevant due to their toxicity. The environmental risk analysis revealed that mineral processing and transport activities on unpaved roads are the main sources of PM10, representing a significant risk to public health. Although the Air Quality Standards (ECA-Aire) are being met, the study underscores the importance of maintaining continuous monitoring and improving emissions control measures to reduce environmental impacts and protect human health.

Keywords: Atmospheric emissions, PM10 and Pollutant gases (SO₂, NO₂, CO)

INTRODUCCIÓN

La extracción de minerales es una actividad industrial de gran importancia para el desarrollo económico, sin embargo, también es una fuente significativa de contaminación atmosférica. Las emisiones atmosféricas generadas por esta actividad, tales como PM₁₀, gases contaminantes (como SO₂, NO₂, CO) y metales pesados, tienen el potencial de afectar tanto la salud humana como el medio ambiente natural. En este contexto, la evaluación del riesgo ambiental se vuelve esencial para identificar, medir y mitigar los impactos negativos asociados a la minería, particularmente en lo que respecta a la calidad del aire y los efectos en las comunidades cercanas a las operaciones mineras.

Este estudio tiene como objetivo evaluar el riesgo ambiental derivado de las emisiones atmosféricas generadas en la planta minera durante el año 2025. Para ello, se analizan las concentraciones de PM₁₀, los gases contaminantes y los metales pesados presentes en el aire, y se comparan con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA-Aire) establecidos. El análisis de estos parámetros permite identificar los niveles de contaminación generados, así como los posibles riesgos para la salud pública y el entorno natural.

El estudio se desarrolló en varios pasos: en primer lugar, se realizó el muestreo de aire en distintas ubicaciones de la planta minera, con el objetivo de obtener una visión representativa de las emisiones durante el año 2025. Posteriormente, se analizaron las concentraciones de contaminantes en los laboratorios correspondientes y se compararon con los límites establecidos por los ECA-Aire. Finalmente, se aplicó una evaluación del riesgo ambiental para determinar los escenarios más críticos de emisión, identificando las actividades responsables de los niveles más altos de contaminación y los posibles impactos en las comunidades cercanas.

Los resultados obtenidos permitirán recomendar acciones de mitigación y control para reducir los riesgos ambientales y proteger la salud humana y el entorno natural. Además, este estudio subraya la importancia de mantener un monitoreo continuo de las emisiones atmosféricas y de aplicar medidas de gestión ambiental eficientes en la industria minera.

Esta investigación busca proporcionar una base sólida para la toma de decisiones informadas en la gestión de la calidad del aire en las zonas afectadas por la actividad minera, contribuyendo al desarrollo de políticas públicas que promuevan un equilibrio entre la producción minera y la sostenibilidad ambiental

1. CAPITULO

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

La actividad de extracción de minerales genera emisiones atmosféricas originadas por voladuras, transporte de material, trituración, molienda, manejo de pilas y vías sin pavimentar; estas emisiones contienen material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}), metales pesados y gases asociados a maquinaria (NO_x, SO₂, CO). En zonas cercanas a operaciones mineras existe incertidumbre sobre la magnitud de las concentraciones ambientales y los riesgos potenciales para la salud humana y los ecosistemas. Sin una evaluación de riesgo ambiental cuantitativa que combine monitoreo, modelación y análisis de exposición, las medidas de mitigación pueden ser insuficientes o mal direccionadas.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2022) advierte que la industria minera contribuye indirectamente a los procesos de calentamiento global a través de emisiones de maquinaria pesada y polvo mineral que afecta la calidad del aire y la salud humana. Países con alta actividad extractiva como China, Australia y Canadá han implementado estrictos programas de monitoreo ambiental y evaluaciones de riesgo para controlar los impactos, lo que evidencia la importancia del tema a nivel internacional.

Países como Chile, México y Brasil enfrentan preocupaciones crecientes por la exposición a material particulado y metales pesados provenientes de operaciones mineras, especialmente en zonas desérticas o de alta montaña donde la dispersión atmosférica es limitada. Estudios recientes han reportado incremento de patologías respiratorias crónicas

en comunidades cercanas a faenas extractivas (OMS, 2021), así como conflictos socioambientales derivados de la percepción de riesgo y falta de control adecuado.

En Perú, país altamente minero, la actividad extractiva representa cerca del 10% del PBI y más del 60% de las exportaciones (MINEM, 2024). Sin embargo, también constituye una de las principales fuentes de emisión de partículas y gases en zonas altoandinas y rurales, donde existen comunidades vulnerables.

El Ministerio del Ambiente ha establecido los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (D.S. N° 003-2017-MINAM), pero informes del OEFA (2023) señalan reiteradas superaciones de límites permisibles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en zonas mineras de regiones como Cajamarca, La Libertad, Áncash y Arequipa. Además, diversos estudios han identificado presencia de metales pesados en aire respirable y polvo sedimentado, vinculándose a riesgos respiratorios y enfermedades crónicas en poblaciones cercanas (MINSA, 2022).

En el área de estudio, la actividad de extracción minera constituye una fuente constante de material particulado y gases derivados de voladuras, trituración de minerales, movimiento de tierras y tránsito continuo de maquinaria pesada. La proximidad de zonas residenciales o comunidades rurales incrementa la preocupación sobre el impacto en la calidad del aire y los posibles efectos en la salud de la población, especialmente grupos vulnerables como niños, adultos mayores y personas con afecciones respiratorias preexistentes.

En este contexto, se evidencia la necesidad urgente de desarrollar evaluaciones integrales de riesgo ambiental basadas en mediciones, modelación y análisis de exposición en zonas donde se realiza extracción de minerales, con el fin de identificar niveles de riesgo, proteger la salud pública y asegurar la sostenibilidad ambiental y social de la actividad minera.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cuáles son los riesgos ambientales derivado de las emisiones atmosféricas, producidas por la actividad de extracción de minerales en una planta minera en el año 2025?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las concentraciones de las emisiones atmosféricas, producidas por la actividad de extracción de minerales en una planta minera en el año 2025?
- ¿En qué medida, las concentraciones de emisiones atmosféricas cumplen con los límites máximos permisibles establecido por la normativa ambiental?
- ¿Cuáles son los resultados de la evaluación de riesgos ambiental de las emisiones atmosféricas, producidas por la actividad de extracción de minerales en una planta minera en el año 2025?

1.3 Objetivo de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el riesgo ambiental derivado de las emisiones atmosféricas producidas por la actividad de extracción de minerales en una planta minera durante el año 2025.

1.3.2 Objetivos específicos

- Medir las concentraciones de las emisiones atmosféricas, producidas por la actividad de extracción de minerales en una planta minera en el año 2025
- Comparar las concentraciones de las emisiones atmosféricas con los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente.

- Determinar la evaluación de riesgos ambiental de las emisiones atmosféricas, producidas por la actividad de extracción de minerales en una planta minera en el año 2025.

1.4 Justificación de la investigación

Justificación Teórica

La presente investigación contribuirá a fortalecer el conocimiento académico sobre la evaluación de riesgos ambientales asociados a emisiones atmosféricas en operaciones mineras, un campo que requiere mayor desarrollo en el contexto latinoamericano y peruano. Si bien existen lineamientos internacionales promovidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la aplicación de estas metodologías a sistemas mineros de altura y zonas rurales sudamericanas aún es limitada.

El estudio permitirá integrar criterios de calidad del aire, toxicidad de partículas finas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y gases contaminantes (NO_x , SO_2), así evaluación de riesgo ambiental, generando un marco teórico actualizado que favorecerá futuras investigaciones y constituirá una referencia técnica para estudios similares en la industria minera.

Justificación Práctica

Esta investigación presenta un aporte directo para la gestión ambiental en operaciones mineras, ya que permitirá identificar y cuantificar las concentraciones reales de contaminantes atmosféricos generados por la actividad extractiva, así como estimar su riesgo asociado. Los resultados facilitarán la toma de decisiones por parte de la empresa

minera, autoridades ambientales y actores locales, promoviendo la implementación de medidas de mitigación y control más eficientes y específicas.

Asimismo, el estudio permitirá establecer recomendaciones para la optimización de prácticas operativas, como el manejo de voladuras, sistemas de humectación, control de tránsito vehicular y monitoreo continuo del aire, lo cual puede contribuir a reducir impactos negativos, mejorar el desempeño ambiental y fortalecer la sostenibilidad del proyecto minero.

Justificación social

La evaluación del riesgo ambiental asociado a las emisiones atmosféricas generadas por la minería resulta fundamental para la protección de la salud pública, especialmente en comunidades cercanas a zonas de operación minera que podrían estar expuestas a niveles elevados de material particulado y gases contaminantes.

Este estudio busca aportar evidencia técnica que permita prevenir enfermedades respiratorias y otros efectos negativos en la población, promoviendo mejores condiciones de calidad de vida y fortaleciendo la relación entre las empresas mineras y las comunidades vecinas.

Al contribuir con información transparente y verificable, la investigación también favorece la construcción de confianza social, la participación comunitaria en la gestión ambiental y la consolidación de una minería responsable y sostenible en el país.

1.5 Delimitaciones del estudio

Delimitación espacial

El estudio se desarrollará en una planta minera ubicada en la región Lima provincia, distrito de Ámbar, donde se llevan a cabo operaciones de extracción y procesamiento inicial de minerales

Delimitación temporal:

El análisis abarcará el periodo correspondiente al año 2025, considerando los datos de emisiones atmosféricas y condiciones ambientales registradas durante dicho año.

Delimitación temática:

El estudio se centrará exclusivamente en la evaluación del riesgo ambiental asociado a las emisiones atmosféricas generadas durante las actividades de extracción de minerales. Se analizarán específicamente los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x y SO₂, así como las medidas de mitigación implementadas o propuestas.

Delimitación poblacional:

La población de estudio estará constituida por los registros de monitoreo ambiental y reportes técnicos emitidos por la planta minera durante el año 2025. Asimismo, se considerarán mediciones in situ y datos secundarios provenientes de organismos ambientales competentes y normativas vigentes.

1.6 Viabilidad del estudio**Viabilidad técnica**

El estudio es técnicamente viable, ya que se cuenta con acceso a información documental, registros ambientales y reportes de monitoreo atmosférico de la planta minera. Asimismo, existen metodologías científicas validadas para la evaluación de emisiones atmosféricas y análisis de riesgo ambiental, así como software especializado para la interpretación de datos ambientales (por ejemplo, Excel, SPSS o softwares ambientales aplicados). La infraestructura disponible y los recursos tecnológicos son suficientes para el desarrollo adecuado de la investigación.

Viabilidad económica

La investigación no requiere de grandes inversiones económicas, ya que se utilizarán principalmente datos secundarios proporcionados por la operación minera y organismos reguladores. Los costos asociados al estudio estarán relacionados con la recopilación y procesamiento de información, impresión de documentos, acceso a bases de datos y, de ser necesario, visitas de campo. Estos recursos pueden ser cubiertos por el investigador, lo que garantiza la viabilidad económica del estudio.

Viabilidad institucional

La investigación se realizará con autorización para acceder a información institucional de la planta minera, asegurando el cumplimiento de políticas de confidencialidad, ética y transparencia establecidas por las normativas ambientales nacionales.

Viabilidad metodológica

La investigación es metodológicamente viable, dado que se emplearán técnicas e instrumentos de análisis reconocidos en el campo ambiental, tales como análisis de calidad del aire, evaluación de concentraciones de contaminantes, y matrices de riesgo ambiental. Además, existen referentes teóricos, normativos y empíricos suficientes para sustentar la investigación, lo cual facilita el desarrollo de una metodología rigurosa, sistemática y reproducible.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 Antecedente de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

El estudio de Duarte (2022) tuvo como propósito identificar en qué condiciones se produce la exposición ocupacional al polvo en actividades mineras y en operaciones de movimiento de tierras. El análisis buscó reconocer los factores laborales, técnicos y ambientales que influyen en los niveles de exposición. Se evidenció que la exposición al polvo mineral en minería depende de múltiples factores combinados: las labores específicas del trabajador, las características de la maquinaria, la distancia de operación y las condiciones meteorológicas. La principal conclusión no estuvo centrada en las circunstancias de exposición, sino en la falta de estandarización en los procedimientos de medición y recolección de datos sobre polvo mineral.

Freitas, et al (2021). Desarrollaron la primera evaluación integral del material particulado en una ciudad donde se ubica el mayor complejo minero a cielo abierto del mundo. Su objetivo fue caracterizar las partículas presentes en el aire y determinar la representatividad de las estaciones locales de monitoreo, especialmente ante la ausencia de mediciones de $PM_{2.5}$. Mediante muestreos de alto volumen, un muestreador dicotómico, análisis de trayectorias de masas de aire y técnicas químicas como fluorescencia de rayos X y componentes principales, los autores identificaron que la mayor parte del transporte de aerosoles se originó desde el noreste. Los resultados mostraron correlaciones negativas entre PM_{10} y casi todas las variables meteorológicas, así como la presencia predominante de hierro y azufre asociados a actividades mineras, emisiones industriales, tráfico vehicular, quema de biomasa y fuentes biogénicas. El estudio concluye que las estaciones de monitoreo solo reflejan adecuadamente la calidad

del aire en zonas cercanas a las minas, subrayando la necesidad de ampliar la red e incluir mediciones de PM_{2.5} para una evaluación más completa.

La Rotta & Torres (2017). Analizan cómo, dentro del contexto del modelo capitalista global, la actividad minera se relaciona con impactos ambientales y efectos en la salud humana. Su investigación se centra en la extracción de materiales de construcción en Bogotá y se desarrolla bajo un enfoque descriptivo y cualitativo, utilizando como fuentes la revisión bibliográfica, la observación directa y las percepciones de los habitantes del área. Los resultados revelan afectaciones en la salud física y mental de la población, deterioro social y daños ambientales significativos. Estos hallazgos cuestionan el modelo de desarrollo vigente al evidenciar que la minería puede comprometer la supervivencia humana y generar conflictos ambientales, resaltando la estrecha conexión entre el ambiente, la salud y las dinámicas socioculturales.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Vilcas (2024) Analizó el incremento de la actividad minera en la sierra peruana y su relación con la generación de riesgos ambientales que afectan la calidad de vida de las poblaciones cercanas. El objetivo fue evaluar los riesgos ambientales producidos por las operaciones mineras. El estudio fue descriptivo, con un diseño no experimental. Se evaluaron los factores ambientales: agua, suelo, aire, niveles de ruido y presencia de metales en relaves. Para determinar el nivel de riesgo se aplicó el método RIAM (Rapid Impact Assessment Matrix). Se complementó con una encuesta de percepción ambiental aplicada a 55 pobladores. Los niveles de riesgo hallados fueron: Entorno natural: 57,33% Entorno humano: 74,67 Entorno socioeconómico: 40,0% El promedio general indicó un riesgo ambiental MODERADO. El estudio determinó que la actividad minera genera riesgos ambientales considerables, siendo necesario establecer planes de mitigación para proteger el ambiente y reducir los efectos sobre la salud de la población.

Híjar (2024) presenta un informe sobre la experiencia profesional del autor como asesor y especialista en calidad ambiental en la consultora Geo Ambientales Ingenieros S.A.C., donde participó en la coordinación de proyectos, elaboración de instrumentos de gestión ambiental y reportes de seguimiento. Asimismo, describe el monitoreo de calidad de aire y ruido ambiental realizado en la Unidad Minera La Estrella durante los cuatro trimestres de 2022, considerando cinco estaciones de aire y cuatro de ruido. En el caso del aire, se evaluaron material particulado, gases contaminantes y metales pesados; mientras que, para ruido, se analizaron los niveles equivalentes, máximos y mínimos en horarios diurno y nocturno. Finalmente, los resultados obtenidos fueron analizados y comparados con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental.

Julca (2018). Llevó a cabo un estudio para evaluar los impactos ambientales generados por la planta complementaria de beneficio de minerales oxidados. El estudio utilizó un enfoque descriptivo dividido en dos fases: Identificación de actividades de la empresa que generan impactos ambientales, diagnóstico y evaluación de dichos impactos mediante la Matriz de Leopold. Los factores ambientales evaluados incluyeron: Calidad de aire, suelos, paisaje, agua. Los resultados determinaron que las actividades diarias de la planta en especial el movimiento y transporte de mineral generan material particulado que es dispersado por los vientos hacia las zonas aledañas, afectando a la población y al ambiente circundante. Los factores ambientales evaluados mostraron impactos negativos de alta magnitud. En conclusión, las operaciones de la planta generan impactos ambientales significativos y negativos, especialmente relacionados con la emisión de partículas, alteración de la topografía, degradación del paisaje y afectación de la calidad del aire, suelo y agua

Licla (2021). Desarrolló una investigación cuyo propósito fue evaluar la calidad del aire en el Proyecto de Explotación Cantera Camucha, ubicado en el distrito de

Morococha, provincia de Yauli, región Junín. Para la medición de la concentración de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), el estudio aplicó el método gravimétrico descrito en el *Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de Aire* (SINIA, 2019), considerando puntos de muestreo tanto a barlovento como a sotavento del área de explotación. Los resultados obtenidos evidenciaron que las concentraciones de material particulado se mantienen dentro de los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire. Por lo tanto, se concluye que la calidad del aire en la zona no representa riesgo significativo para la salud de los trabajadores ni para el medio ambiente.

Justo (2021). El estudio tuvo como finalidad evaluar la calidad del aire en la ciudad de Juliaca, analizando las concentraciones de cuatro contaminantes criterios establecidos por el MINAM: SO_2 , NO_2 , CO y O_3 . La investigación adoptó un enfoque cuantitativo con un diseño no experimental aplicó la metodología del Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad del Aire (D.S. N.º 010-2019-MINAM). Para clasificar la calidad del aire, se utilizaron los valores de referencia de la OMS y el Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA) según la R.M. N.º 181-2016-MINAM. Resultados Los valores promedio registrados entre enero y marzo fueron: SO_2 : 20.523 $\mu g/m^3$. NO_2 : 36.690 $\mu g/m^3$ CO: 2459.157 $\mu g/m^3$ O_3 : 2.953 $\mu g/m$, Según la clasificación del INCA: NO_2 , CO y O_3 se ubicaron en el rango 0–50 (buena calidad del aire). SO_2 , en cambio, se clasificó en el intervalo 101–625 (mala calidad), indicando una condición desfavorable. En Conclusión, la calidad del aire en Juliaca es aceptable y segura respecto a los contaminantes NO_2 , CO y O_3 .

García y Rodríguez (2023) llevaron a cabo un estudio en el distrito de Morococha (La Oroya, Junín) con el fin de determinar la calidad del aire en la zona. La investigación fue de tipo aplicada, con nivel descriptivo-comparativo y un diseño no experimental de corte transversal. Se evaluó un área total de 415 hectáreas, de las cuales se tomó una

muestra representativa de 177 hectáreas. En esta área se identificaron cuatro puntos de monitoreo, donde se realizaron mediciones trimestrales entre diciembre de 2017 y septiembre de 2018. En cuanto a la calidad del aire, se obtuvieron concentraciones de PM_{2.5} de 94.6 µg/m³ y PM₁₀ de 120.5 µg/m³, además de valores bajos de arsénico, plomo, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, El estudio concluye que, aunque el material particulado fino (PM_{2.5} y PM₁₀) es el principal contaminante asociado a las actividades mineras, sus niveles al igual que los de los gases monitoreados se encuentran por debajo de los límites establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), por lo que no representan un riesgo significativo para la salud de la población.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 La minería

La minería en el Perú es una de las actividades económicas más relevantes, caracterizada por su fuerte orientación hacia la exportación de minerales metálicos, especialmente el cobre, el oro y la plata. De Echave (2016)

La actividad minera consiste en obtener del subsuelo distintos tipos de minerales y rocas que no se regeneran, entre ellos metales como cobre, oro o plata, y recursos no metálicos como caliza, arcillas industriales, áridos y rocas decorativas. Estos materiales se ubican en yacimientos donde su concentración permite una extracción económicamente viable. Dentro de un yacimiento, la mena es el grupo de minerales útiles de los cuales se pueden recuperar metales, mientras que la ganga representa los minerales sin valor económico que son removidos y descartados durante el proceso de separación.

2.2.2 Riesgos ambientales

El riesgo ambiental se define como la probabilidad de que un evento o sustancia genere efectos negativos sobre el ambiente o la salud, considerando tanto la magnitud del peligro como el nivel de exposición. Según Suter (2016), el riesgo se evalúa mediante la relación:

$$\textbf{Riesgo = Peligro} \times \textbf{Exposición.}$$

En el caso de la contaminación atmosférica, el peligro se asocia a los contaminantes emitidos y la exposición corresponde al tiempo y nivel en que personas, especies y ecosistemas entran en contacto con ellos.

Evaluación del riesgo ambiental es el proceso mediante el cual se determina si existe un peligro y/o aspecto ambiental potencial que comprometa la calidad del agua, aire o suelo, poniendo en peligro la salud del ser humano como consecuencia de la exposición a todos los productos tóxicos presentes en un sitio, incluyendo aquellos compuestos tóxicos presentes que son producto de actividades industriales ajenas al sitio o cualquier otra fuente de contaminación, y define un rango o magnitud para el riesgo ambiental. (MINAM, 2010).

2.2.2.1 Riesgo ambiental natural. Riesgo ambiental natural se define como la probabilidad de que un fenómeno natural (amenaza) ocurra y produzca consecuencias adversas sobre la vida humana, bienes, servicios eco sistémicos e infraestructura, considerando la exposición y la vulnerabilidad de los receptores (Cardona, 2010). No es solo la ocurrencia del fenómeno, sino la interacción entre:

- **Amenaza (Hazard):** fenómeno natural con potencial dañino (p. ej., vientos extremos, lluvias intensas, sismos, inundaciones).
- **Exposición (Exposure):** presencia de personas, bienes, infraestructura o procesos (p. ej., plantas mineras, comunidades) en zonas afectables por la amenaza.
- **Vulnerabilidad (Vulnerability):** grado en que los elementos expuestos son susceptibles a sufrir daño (carencias estructurales, pobreza, fragilidad ecológica).

La relación clásica y operativa es:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad}$$

2.2.2.2 Riesgo ambiental humano. En el contexto de la minería, el riesgo ambiental humano está estrechamente relacionado con la exposición a material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y metales pesados dispersos en el aire. La inhalación prolongada de estos contaminantes ha sido asociada con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y deterioro del bienestar comunitario (OMS, 2021).

Asimismo, Pérez y Delgado (2020) señalan que la percepción del riesgo ambiental humano incrementa cuando la población se encuentra cerca de actividades extractivas,

debido a la presencia visible de polvo, ruidos, vibraciones y cambios en la calidad del aire, lo que aumenta el estrés ambiental y la sensación de inseguridad sanitaria.

2.2.2.3 Riesgo ambiental socioeconómico. Son los impactos negativos que afecta al medio ambiente, provocadas por actividades humanas o naturales, producen sobre las condiciones económicas, sociales y culturales de una población. Este riesgo no solo afecta los ecosistemas, sino también el bienestar humano, la seguridad económica y la estabilidad comunitaria (Sanhueza, 2017).

Este tipo de el riesgo socioeconómico altera la productividad, accesos a los recursos, la calidad de vida del entorno y la sociedad, en las zonas dependientes de actividades extractivas. Esto incluye impactos sobre la salud, pérdida de productividad, reducción del turismo, conflictos sociales y mayores costos en atención médica. (Martínez y Aguilar 2019),

En la actividad minera el riesgo ambiental socioeconómico se destaca por la generación contaminantes atmosféricos, que daña:

- La salud pública (aumentando enfermedades respiratorias, costos de tratamiento y ausentismo laboral)
- La economía de la zona (afectación a actividades agrícolas, ganaderas y comerciales)
- Las relaciones comunitarias (conflictos sociales por percepción de contaminación.
- Calidad de vida (ruido, polvo, degradación del paisaje).

Las emisiones atmosféricas influyen directamente en la pérdida de valor económico de los territorios. Un área con altos niveles de material particulado o gases tóxicos presenta menor inversión, reduce la valorización de viviendas y genera migración de familias hacia zonas más seguras (Pizarro 2021)

En este sentido, el riesgo socioeconómico no solo evalúa el daño al ambiente, sino cómo ese daño transforma las estructuras sociales y económicas, afectando especialmente a poblaciones vulnerables como niños, adultos mayores, comunidades campesinas y pueblos ubicados en zonas de influencia minera.

2.2.3 Emisiones atmosféricas en actividades mineras

Las emisiones atmosféricas en minería comprenden la liberación de partículas sólidas y gases provenientes de operaciones como perforación, voladura, chancado, molienda, manipulación de materiales, acarreo y transporte de mineral. Estas fuentes contribuyen a la dispersión de contaminantes que pueden afectar la calidad del aire y generar impactos en la salud y el ambiente (Freitas et al., 2021).

El MINAM (2017) establece que las emisiones atmosféricas es la expulsión de compuestos químicos, partículas o gases a la atmósfera, los cuales pueden provenir de fuentes fijas, móviles o difusas, afectando el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental.

Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2019), las fuentes mineras pueden clasificarse en:

- Fuentes de combustión móvil (camiones, retroexcavadoras, perforadoras).
- Fuentes estacionarias (generadores, calderas, plantas de procesamiento).
- Fuentes fugitivas (polvo de caminos, voladuras, almacenamiento de material).

2.2.4 Contaminantes atmosféricos asociados a la minería

2.2.4.1 Material particulado (PM₁₀). EPA (2020) define el material particulado como una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas suspendidas en el aire, clasificadas en PM₁₀ (diámetro $\leq 10 \mu\text{m}$) . Estas fracciones pueden penetrar en el sistema respiratorio, provocando daños a la salud humana y deterioro ambiental.

La OMS (2021) establece que la exposición prolongada a PM₁₀ está asociada a enfermedades respiratorias, cardiovasculares y mortalidad prematura, especialmente cuando el material particulado contiene metales pesados típicos de zonas mineras (arsénico, cadmio, plomo). Freitas et al. (2021) señalan que las minas metálicas generan partículas ricas en minerales ferrosos, sílice y sulfuros, que pueden ser transportadas a largas distancias.

- **Efectos ambientales.**

El material particulado (PM), especialmente las fracciones PM₁₀ (partículas $\leq 10 \mu\text{m}$), genera una serie de impactos ambientales que afectan la calidad del aire, los ecosistemas, el clima y los recursos naturales. Debido a su pequeño tamaño y composición química que puede incluir metales pesados, compuestos orgánicos, sulfatos, nitratos y carbono negro, estas partículas permanecen por largos periodos en la atmósfera, se transportan a grandes distancias y se depositan en suelos, aguas y vegetación.

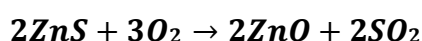
2.2.4.2 Gases contaminantes Dióxido de azufre (SO₂). El dióxido de azufre (SO₂) es uno de los principales gases contaminantes generados por la actividad minera, especialmente durante los procesos de procesamiento y fundición de minerales sulfurados como cobre, plomo o zinc. Este gas se produce cuando el azufre presente en los minerales se oxida al ser calentado o procesado.

Caracteriza el dióxido de azufre como un gas irritante que proviene fundamentalmente de la quema de combustibles fósiles y de procesos metalúrgicos, usado como referencia para establecer estándares de calidad del aire EPA (2020).

- **Fuentes de generación dióxido de azufre (SO₂)**

a) **Fundición de minerales sulfurados:** Es la principal fuente de emisiones de SO₂ en minería. Durante la fundición, minerales como calcopirita (CuFeS₂), galena (PbS) o esfalerita (ZnS) liberan azufre. El azufre se combina con oxígeno formando dióxido de azufre (SO₂).

Reacción química simplificada:



b) **Procesos de tostación (roasting).** Se calientan los minerales sulfurados para eliminar el azufre antes de la fundición. En este proceso se libera una gran cantidad de SO₂ hacia la atmósfera si no existen sistemas de control.

c) **Combustión de combustibles fósiles en operaciones mineras.** Las minas utilizan combustibles en: maquinaria pesada, generadores eléctricos, plantas de procesamiento. Si el combustible contiene azufre, su combustión produce SO₂

Procesos de refinación metalúrgica. Durante la refinación del cobre, plomo y otros

metales, las reacciones químicas pueden generar gases ricos en SO₂, especialmente en: los convertidores, hornos metalúrgicos y refinerías.

2.2.4.4 NO_x / NO₂ (Óxidos de Nitrógeno). Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son un grupo de gases contaminantes formados principalmente por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). En la minería se generan principalmente por explosiones, combustión de combustibles en maquinaria pesada y procesos térmicos.

- **Fuentes de generación en la minería**

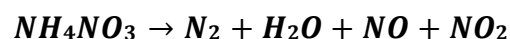
a) Voladuras con explosivos: Es la principal fuente de NO_x en operaciones mineras.

Durante la detonación de explosivos como: ANFO (Nitrato de amonio + fuel oil), emulsiones explosivas, nitrato de amonio que producen gases como:

Los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂).

Estos gases suelen observarse como nubes de color naranja o rojizo después de la explosión.

Ejemplo de reacción simplificada:



b) Motores diésel de maquinaria minera: La combustión del diésel a altas temperaturas produce óxidos de nitrógeno. Esto ocurre porque el nitrógeno del aire reacciona con el oxígeno durante la combustión. Las operaciones mineras utilizan maquinaria pesada como:

- camiones de acarreo
- cargadores frontales
- perforadoras
- excavadoras

- generadores eléctricos

2.2.4.5 Metales pesados en aire (Pb, As, Cd y Cr). Los metales pesados como el plomo (Pb), arsénico (As) y cadmio (Cd) son elementos tóxicos que pueden emitirse al aire en forma de partículas finas o compuestos volátiles durante las actividades mineras, especialmente en zonas de procesamiento, trituración, fundición o manejo de relaves.

2.2.5 Estándar de Calidad Ambiental para aire

- MS (2021): Directrices globales de calidad del aire para PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂.
- EPA (2019): Guía AERMOD para evaluación de dispersión atmosférica.

Normativa nacional (Perú)

- ECA Aire – D.S. N.º 011-2023-MINAM: límites para PM₁₀, PM_{2.5}, arsénico, cadmio y cromo en aire.
- LMP minero en Declaraciones Ambientales y Estudios de Impacto Ambiental.
- OEFA: normativa sobre monitoreo atmosférico y fiscalización ambiental.

Estas normas establecen criterios para proteger la salud humana y ecológica en zonas influenciadas por actividades extractivas.

2.3 Definiciones básicas

Emisiones atmosféricas: Son las descargas al aire de partículas, gases o vapores provenientes de procesos naturales o actividades humanas como la minería (EPA, 2022).

Material Particulado PM₁₀ y PM_{2.5}: El material particulado es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. El PM₁₀ tiene un diámetro menor a 10 micras, mientras que el PM_{2.5} está compuesto por partículas finas menores a 2.5 micras, altamente dañinas para la salud (OMS, 2021).

Dióxido de Azufre (SO₂): Gas contaminante generado principalmente por la combustión de combustibles fósiles con contenido de azufre. Es irritante respiratorio y precursor de lluvia ácida

Óxidos de Nitrógeno (NO_x / NO₂): Grupo de gases emitidos por procesos de combustión y explosiones industriales. El NO₂ contribuye a la formación de ozono troposférico y afecta la función pulmonar

Metales pesados en aire (Pb, As, Cd): Elementos tóxicos emitidos durante procesos metalúrgicos y manipulación de minerales, asociados a efectos carcinogénicos y neurotóxicos.

Riesgo ambiental: Es la probabilidad de que un contaminante genere efectos adversos sobre la salud humana o ecosistemas, considerando su peligrosidad y exposición.

Riesgo ambiental natural: Amenazas derivadas de factores climáticos o geológicos (vientos, lluvias, sismos) que pueden influir en la dispersión de contaminantes atmosféricos

Riesgo ambiental humano: Peligros asociados a la exposición directa de personas a contaminantes provenientes de actividades industriales como la minería (Foster et al., 2020).

Riesgo socioeconómico: Consecuencias económicas y sociales que surgen por impactos ambientales, incluyendo costos en salud, pérdida de productividad y conflictos sociales (Kasperson & Kasperson, 2005).

Calidad del aire: Estado de la atmósfera medido por la concentración de contaminantes en relación con estándares establecidos por entidades regulatorias (MINAM, 2017).

Estándar de Calidad Ambiental (ECA): Límites máximos de concentraciones de contaminantes establecidos para proteger la salud y el ambiente (MINAM, 2017).

Fuente emisora: Cualquier instalación, máquina o proceso que libera contaminantes al aire, como perforadoras, voladuras o plantas de chancado (EPA, 2020).

Exposición: Contacto de un organismo o persona con un contaminante durante un periodo específico (WHO, 2016).

Monitoreo ambiental: Proceso sistemático de medición de parámetros ambientales para evaluar la calidad del aire en un área determinada (MINAM, 2018).

Tabla1
Operacionalización de variables

VARIABLE	DEF. CONCEPTUAL	DEF. OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD MEDIDA	INSTRUMENTOS
Evaluación de riesgo ambiental por emisiones atmosféricas	La evaluación de riesgo ambiental por emisiones atmosféricas es un proceso sistemático que permite identificar, analizar y estimar la probabilidad y severidad de los impactos que los contaminantes liberados al aire como material particulado, gases tóxicos o compuestos derivados de actividades minera.	Procedimientos mediante los cuales se miden, registran, analizan y comparan los niveles de contaminantes emitidos al aire (PM ₁₀ , NO _x , SO ₂ , metales pesados) con estándares nacionales e internacionales.	Riesgo ambiental natural	Índice de vientos extremos	m/s	Anemómetros
			Riesgo ambiental Humano	Precipitaciones	km/h	Pluviómetros
				velocidad del viento	Nudos	Anemómetros
				Concentración de PM ₁₀	µg/m ³	Muestreo de alta y baja volumetría (EPA 201A).
				CO	µg/m ³	Analizadores UV fluorescentes.
				SO ₂ (Dióxido de Azufre)	µg/m ³	Analizadores UV fluorescentes.
				NO _x / NO ₂ (Óxidos de Nitrógeno)	µg/m ³	Analizadores por quimioluminiscencia.
				Metales pesados en aire (Pb, As, Cd)	µg/m ³	Muestreo en filtros + análisis ICP-MS.
				Asociados a la actividad económico y enfermedades respiratorias	S/ año	Ficha de registro sanitarios
			Riesgo ambiental socioeconómico	Conflictos asociados a contaminación	Nº casos/año	Registro de conflictos socioambientales

CAPITULO III: METODOLOGIA

3.1 Diseño metodológico

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, dado que se basa en la medición numérica de contaminantes atmosféricos para analizar su variación espacial y temporal, siguiendo el planteamiento de Hernández et al. (2014), quienes señalan que este enfoque permite describir fenómenos ambientales con objetividad y comparabilidad.

El diseño no experimental, transversal y de tipo descriptivo. Según Sampieri (2014), los estudios no experimentales permiten observar fenómenos en su contexto sin manipular variables, característica adecuada para investigaciones ambientales. Asimismo, el carácter transversal se justifica porque los datos se recolectan en un solo periodo representativo de la actividad minera.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), la población es el conjunto total de elementos que poseen las características de interés para una investigación. En este estudio, la población estuvo conformada por:

- El área total de influencia de la unidad minera, incluyendo zonas operativas (frentes de extracción, chancado, acarreo, botaderos) y zonas externas expuestas a emisiones atmosféricas.
- Los receptores sensibles ubicados dentro del área (viviendas, escuelas, áreas de tránsito peatonal).

- Las estaciones potenciales de monitoreo atmosférico dentro del dominio de dispersión.

La población ambiental se define como todos los puntos geográficos donde se podrían percibir los efectos de las emisiones atmosféricas generadas por las actividades mineras.

3.2.2 Muestra

En estudios ambientales, la muestra corresponde al conjunto reducido de puntos de evaluación seleccionados para representar el comportamiento real de los contaminantes en el área de estudio (Otzen & Manterola, 2017).

Para este estudio, la muestra fue seleccionada mediante muestreo no probabilístico por criterios, recomendado para investigaciones donde se evalúan áreas específicas con mayor exposición o sensibilidad. La muestra estuvo conformada por:

1. Puntos de Monitoreo de Calidad de Aire

Se seleccionaron cuatro a seis puntos estratégicos, determinados según:

- Dirección del viento (barlovento y sotavento).
- Cercanía a fuentes emisoras (trituration, acarreo, palas, perforación).
- Presencia de población o infraestructura vulnerable.
- Accesibilidad para la instalación del equipo.

La selección se basó en los criterios técnicos del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire (MINAM, 2019) y los lineamientos de la EPA (2018).

2. Equipos y parámetros incluidos en la muestra

En cada punto se midieron los contaminantes: PM₁₀, SO₂, NO₂ y CO Además, se registraron variables meteorológicas: temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento.

Los estudios de calidad de aire no requieren un tamaño muestral numeroso, sino representativo, enfocado en puntos donde las emisiones atmosféricas muestran mayor variabilidad. EPA (2018). La selección de puntos estratégicos permite obtener datos suficientes para:

- Caracterizar la dispersión de contaminantes.
- Comparar resultados con los Estándares de Calidad Ambiental.
- Evaluar el riesgo ambiental para la salud y el ambiente.

3.3 Técnica de recolección de datos

Para este estudio se emplearon técnicas de recolección de datos orientadas a obtener información cuantitativa y cualitativa sobre las emisiones atmosféricas generadas por la actividad de extracción de minerales en el área de estudio. La selección de las técnicas se fundamenta en los lineamientos metodológicos establecidos por Hernández, Fernández y Baptista (2014), quienes indican que los métodos de medición deben responder al tipo de variable y al propósito de análisis.

a) Monitoreo directo de contaminantes atmosféricos

Se aplicó la técnica de medición instrumental, recomendada por el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire (MINAM, 2019) y por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2018). Esta técnica permite cuantificar de manera precisa los niveles de concentración de los principales contaminantes emitidos por la actividad minera.

Los equipos utilizados registraron los siguientes parámetros:

Tabla2

Parámetros y equipos de muestreo

PARAMETROS	EQUIPOS MONITOREO	DE	TÉCNICAS MUESTREO	DE
PARTICULAS				
Partículas en suspensión menores a 10micras (PM ₁₀)	Muestreador de partículas TCR		Colección de muestra en filtros de fibra de vidrio de 47 micras, en 24 horas de exposición	
Plomo				
Arsénico				
Cadmio				
Cromo				
GASES				
Óxido nitroso(NO ₂)	Tren de muestreo método dinámico compuesto por una bomba de succión de aire.		Captación de la muestra en solución de arsenito de sodio, en 01 hora de exposición. Captación de la muestra en solución de parasoanilina, en 24 hora de exposición. Captación de muestra en solución ácido parasulfamino benzoico en 24 horas de exposición	
Dióxido de azufre(SO ₂)				
Monóxido de carbono(CO)				

Las mediciones se realizaron en los puntos de muestreo seleccionados en función de criterios de exposición, dispersión y presencia de receptores sensibles.

b) Revisión documental

Se utilizó la técnica de análisis documental, que consiste en recopilar y examinar información preliminar relevante (Arias, 2012). Se analizaron:

- Informes ambientales previos.
- Reportes de calidad de aire y monitoreos históricos.
- Instrumentos de gestión ambiental de la unidad minera.

- Legislación y estándares aplicables (ECA Aire, OMS, protocolos MINAM).

Esta revisión permitió contextualizar los resultados y contrastarlos con valores normativos.

c) Observación de campo

Se aplicó la observación directa que permite registrar fenómenos tal como ocurren en su entorno natural. La observación se centró en:

- Identificación de focos emisores (perforación, voladura, acarreo, chancado)
- Actividades operativas que generan polvo y gases.
- Condiciones ambientales del área (topografía, vegetación, vías, distancia a poblaciones).

La observación permitió complementar la información instrumental, evidenciando comportamientos no registrados por los equipos de monitoreo.

3.4 Técnicas para el procedimiento de la información

El procedimiento de la información comprende el conjunto de métodos utilizados para organizar, procesar y analizar los datos obtenidos durante la recolección. Para este estudio se aplicaron técnicas cuantitativas y cualitativas que permitieron evaluar de manera integral los riesgos ambientales asociados a las emisiones atmosféricas generadas por la actividad minera. Estas técnicas se fundamentan en criterios metodológicos planteados por Hernández, Fernández y Baptista (2014), quienes señalan que el análisis debe ser coherente con los objetivos, tipo y naturaleza de la investigación

a) Procesamiento estadístico de datos ambientales

Los datos obtenidos del monitoreo de PM₁₀, SO₂, NO₂ y CO fueron organizados en matrices de registro y procesados mediante:

- Estadística descriptiva:

Cálculo de promedios, máximos, mínimos, desviación estándar y valores percentiles para identificar tendencias de concentración.

- Comparación con estándares normativos:

Los resultados fueron contrastados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y con las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Esta técnica permite determinar si los niveles registrados representan riesgo para la salud o el ambiente.

- Análisis temporal y espacial:

Se evaluaron variaciones de concentración entre estaciones de muestreo y entre diferentes periodos, siguiendo criterios recomendados por la EPA (2018).

b) Metodología para el análisis de riesgo

Se aplicará la Guía para Evaluación de Riesgos Ambientales Ministerio del Ambiente - MINAM (2011) a áreas determinadas, afectadas o propensas a daños de origen antrópico o natural; para situaciones definidas y acorde a su naturaleza.

c) Procesamiento cualitativo de observaciones y registros de campo

La información obtenida mediante observación directa se organizó empleando:

- Matrices de observación, donde se documentaron focos emisores, condiciones meteorológicas, actividades operacionales y comportamientos del polvo.
- Codificación temática, que permitió identificar patrones como fuentes recurrentes de emisión, fallas en controles ambientales y prácticas operativas de riesgo.

d) Su flujo del proceso de extracción de minerales

Figura1

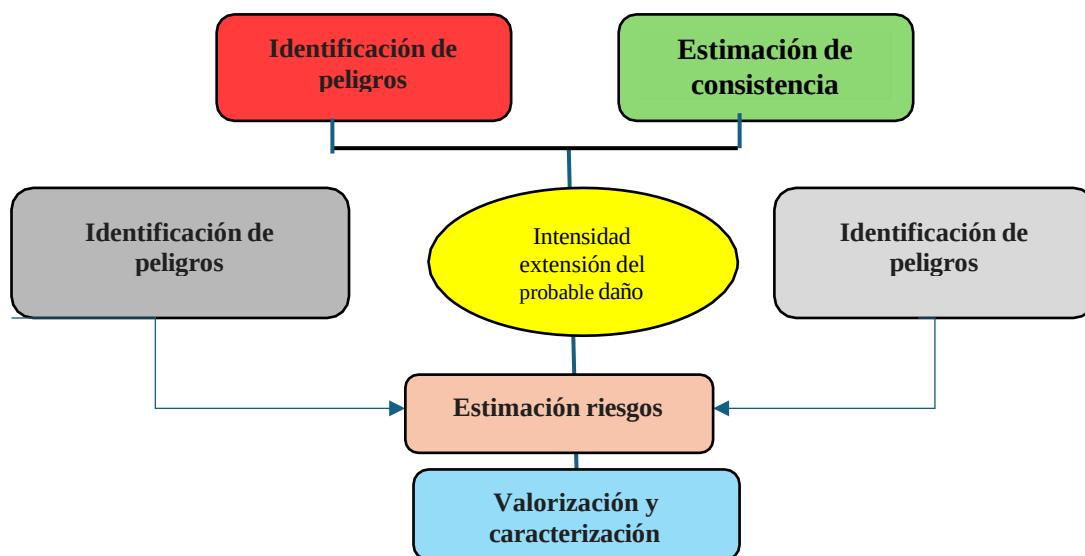
Flujo del proceso extracción de minerales



3.5 Metodología análisis y evaluación de riesgos ambientales

La guía de evaluación de riesgos ambientales MINAN (2011), propone un modelo estandarizado para la identificación, análisis y evaluación de los riesgos ambientales que generan las actividades mineras en un área geográfica, así como la consecuencia de los peligros naturales.

Figura2
Metodología evaluación de riesgos



Nota: De la Guía para Evaluación de Riesgos Ambientales Ministerio del Ambiente - MINAM (2011).

El procedimiento descrito en esta guía es de aplicación para evaluar el nivel de riesgo que pudiese generar daño al ecosistema a los aspectos sociales y económicos de la población en una zona determinada. MINAN (2011).

3.5.1. Análisis de riesgos ambientales

Los lineamientos y criterios para definirse son prioritarios, ya que permiten establecer las bases técnicas, denotar los límites de la evaluación, determinar el tipo de información, así como otorgar con claridad que criterios y/o decisiones para evaluar MINAN (2011).

Tabla3
Identificación de fuentes de peligros

CAUSA		
HUMANO	NATURAL	SOCIOECONOMICO
Ámbito organizativo: - Error humano - Sistema de gestión - Condiciones ambientales - Capacitación personal.	- Tala indiscriminada de forestales - Movimiento continuo de masa de tierra - Alteración de paisaje natural - Manejo inapropiado de los recursos agua - Uso de sustancias a base de flúor	- Bajo nivel de ingresos que cubre las necesidades - Baja oferta laboral - Deficiente nivel organizacional - Baja participación de la población en trabajos comunales
Instalaciones y actividad - Manipulación de materia prima - Manipulación de combustibles - Generación de diversos productos intermedios - Generación de residuos sólidos - Generación de efluentes - Generaciones de emisiones atmosféricas, - Operación de equipos y maquinarias pesadas - Deficiente medidas de seguridad - Diversas condiciones de proceso - Deficiente gestión de mantenimiento - Elevada traza de ruidos y vibraciones - Deficiente calidad en el tratamiento de agua	- Sobreexplotación de los recursos naturales - Intensificación del uso de maquinarias - Uso excesivo de plaguicidas a base de Arsénico y otros - Uso excesivo de sustancias contaminantes - Uso excesivo de detonantes en minería - Incremento de la tasa turística en zona reservada	- Escasa área urbano pa habitabilidad, tienden a expandirse en zonas de riesgo, posteriormente esto representa un alto costo - Proceso migratorio a zonas rurales

CAUSA		
HUMANO	NATURAL	SOCIOECONOMICO
Deficiente calidad de tratamiento de emisiones atmosféricas		
Instalaciones y actividades: Escaso conocimiento sobre ocurrencia de desastres naturales	- Incremento de especies forestales - Incremento de fauna nociva (langosta migratoria) - Incremento de precipitaciones pluviométricas	- Aprovechamiento de bandadas de arena en zonas ribereñas - Aprovechamiento de los recursos naturales indiscriminadamente - Extracción continuada de material de acarreo de zonas ribereñas.
- Falta de actitud frente a la ocurrencia de desastres naturales - Construcción de viviendas cercanas a zonas ribereñas		

Nota: De la Guía para Evaluación de Riesgos Ambientales Ministerio del Ambiente - MINAM (2011)

3.5.2 Estimación de la probabilidad

En la evaluación se asigna a cada escenario una probabilidad de ocurrencia en función a los valores de cada escala.

Tabla4
Estimación de la probabilidad

Valor	Probabilidad
5 Muy probable	< una vez a la semana
4 Altamente probable	> una vez a la semana y < una vez al mes
3 Probable	> una vez al mes y < una vez al año
2 Posible	> una vez al año y < una vez cada 5 años
1 Poco posible	> una vez cada 05 años

Nota: En base a la norma UNE 150008-2008 Evaluación de riesgos ambientales.

3.5.3 Estimación de la gravedad

La evaluación de la severidad de los impactos se lleva a cabo de manera distinta para el medio natural, el ser humano y el ámbito socioeconómico.

Tabla5
Estimación de la gravedad de las consecuencias

Gravedad	Límite del entorno	Vulnerabilidad
Entorno natural	= cantidad+2 peligrosidad+ extensión	+ Calidad del medio
Entorno humano	= cantidad+2 peligrosidad+ extensión	+ Población afectada
Entorno socioeconómico	= cantidad+2 peligrosidad+ extensión	+ Patrimonio y capital productivo

Nota: En base a la Guía del MINAM (2013).

Donde:

- **Cantidad:** Es probable volumen de sustancia vertida al entorno
- **Peligrosidad:** Es la característica intrínseca de una sustancia que le permite generar efectos adversos, considerando su toxicidad, capacidad de acumulación y bioacumulación, entre otros parámetros.
- **Extensión:** Es el espacio de influencia del impacto en el entorno;
- **Calidad del medio:** Se considera el impacto y su posible reversibilidad;
- **Población afectada:** Número estimado de personas afectadas;
- **Patrimonio y capital productivo:** Se refiere a la valoración del patrimonio económico y social (patrimonio histórico, infraestructura, actividad agraria, instalaciones industriales, espacios naturales protegidos, zonas residenciales y de servicios).

Tabla6*Rangos de los límites de los entornos*

Entorno Humano				
Valor	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Población afectada
4	Muy alta	Muy peligrosa	Muy extenso	Muy alto
3	Alta	Peligrosa	Extenso	Alto
2	Poca	Poco peligrosa	Poco extenso	Bajo
1	Muy Poca	No peligroso	Puntual	Muy bajo
Entorno natural				
Valor	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Población afectada
4	Muy alta	Muy peligrosa	Muy extenso	Muy elevado
3	Alta	Peligrosa	Extenso	Elevado
2	Poca	Poco peligrosa	Poco extenso	Media
1	Muy Poca	No peligroso	Puntual	Baja
Entorno socioeconómico				
Valor	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Población afectada
4	Muy alta	Muy peligrosa	Muy extenso	Muy alto
3	Alta	Peligrosa	Extenso	Alto
2	Poca	Poco peligrosa	Poco extenso	Bajo
1	Muy Poca	No peligroso	Puntual	Muy bajo

Nota: En base a la Guía del MINAM (2013).

Tabla7*Valoración de consecuencias entorno humano*

Entorno Humano					
Cantidad (según ERA) (Tn)			Peligrosidad (característica)		
4	Muy alta	Mayor a 500	4	Muy peligroso	• Muy inflamable • Muy toxica • Causa efectos irreversibles
3	Alta	50-500	3	Peligroso	• Explosiva • Inflamable • Corrosiva
2	Muy poca	5 - 49	2	Poco peligrosa	• Combustible
1	Poca	Menor a 5	1	No peligrosa	• Daños leves y reversible
Extensión(km)			Población afectada(personas)		
4	Muy extenso	Radio mayor a 1km	4	Muy alto	Más 100
3	Extenso	Radio hasta 1km	3	Alto	Entre 30 y 100
2	Poco extenso	Radio <0.5km	2	Bajo	Entre 5 y 50
1	Puntual	Area afectada	1	Muy bajo	< 5 personas

Nota: En base a la Guía del MINAM (2013).

Tabla8*Valoración de consecuencias entorno natural*

Entorno Natural					
Cantidad (según ERA) (Tn)			Peligrosidad (característica)		
4	Muy alta	Mayor a 500	4	Muy peligroso	• Muy inflamable • Muy toxica • Causa efectos irreversibles
3	Alta	50-500	3	Peligroso	• Explosiva • Inflamable • Corrosiva
2	Muy poca	5 - 49	2	Poco peligrosa	• Combustible
1	Poca	Menor a 5	1	No peligrosa	• Daños leves y reversible
Extensión(m)			Calidad del medio		
4	Muy extenso	Radio mayor a 1km	4	Muy elevado	• Daño muy alto: Explotación indiscriminada de los RRNN Y nivel de contaminación alto
3	Extenso	Radio hasta 1km	3	elevada	• Daño alto: Alto nivel de explotación de RRNN, y existe un nivel de contaminación moderada
2	Poco extenso	Radio <0.5km	2	Media	• Daño moderado: nivel moderado de explotación de RRNN, y existe un nivel de contaminación leve
1	Puntual	Area afectada	1	baja	• Daño leve: conservación de los RRNN, y no existe contaminación.

Nota: En base a la Guía del MINAM (2013).

Tabla9*Valoración de consecuencias entorno socioeconómico*

Entorno socioeconómico					
Cantidad (según ERA) (Tn)			Peligrosidad (característica)		
4	Muy alta	Mayor a 500	4	Muy peligroso	• Muy inflamable • Muy toxica • Causa efectos irreversibles
3	Alta	50-500	3	Peligroso	• Explosiva • Inflamable • Corrosiva • Combustible
2	Muy poca	5 - 49	2	Poco peligrosa	
1	Poca	Menor a 5	1	No peligrosa	• Daños leves y reversible
Extensión(m)			Patrimonio y capital productivo		
4	Muy extenso	Radio mayor a 1km	4	Muy alto	• Letal: pérdida del 100% del cuerpo receptor
3	Extenso	Radio hasta 1km	3	Alto	• Agudo: pérdida del 50% del cuerpo receptor
2	Poco extenso	Radio <0.5km	2	Bajo	• Crónico: Pérdida entre 10% y 20% del cuerpo receptor los efectos a largo plazo impiden pérdidas de funciones.
1	Puntual	Área afectada	1	Muy bajo	• Pérdida entre 1% y 2% del cuerpo receptor los efectos a largo plazo impiden pérdidas de funciones.

Nota: En base a la Guía del MINAM (2013)..

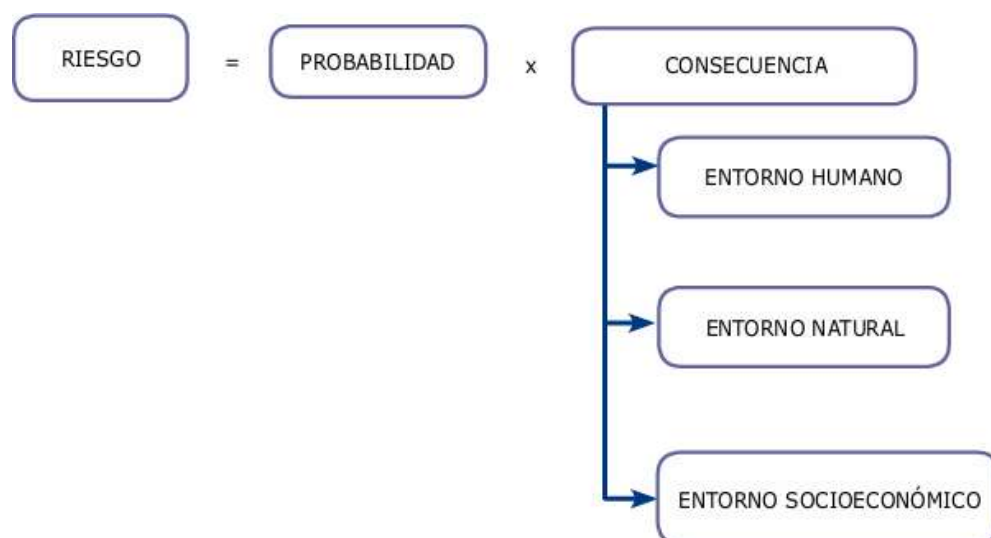
Tabla10*Rango de estimación de consecuencias*

VALOR	VALORACIÓN	VALOR ASIGNADO
Critico	20 - 18	5
Grave	17 - 15	4
Moderado	14 - 11	3
Leve	10 - 8	2
No relevante	7 - 5	1

Nota: En base a la Guía del MINAM (2013).

3.5.4 Estimación del riesgo ambiental

El producto de la probabilidad y la gravedad de las consecuencias anteriormente estimada, permiten la estimación del riesgo ambiental. Este se determina en los tres entornos, natural, humano y socioeconómica según la figura

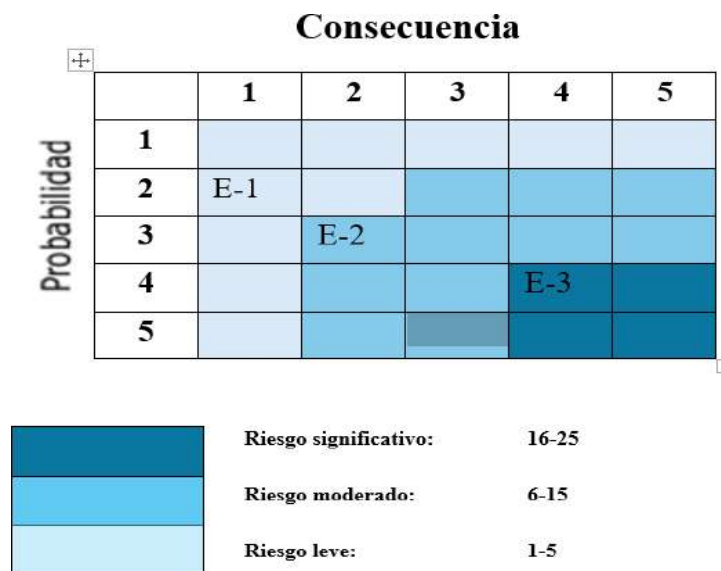
Figura 3*Rango de estimación del riesgo ambiental*

Nota: En base a la Guía del MINAM (2013).

Para la evaluación final del riesgo ambiental se prepara tres tablas de doble entrada. Una para cada entorno (Natural, Humano y Socioeconómico), donde gráficamente aparecen cada escenario teniendo en cuenta su probabilidad y consecuencia.

Figura4

Estimador del riesgo ambiental



Nota: En base a la norma UNE 150008-2008 Evaluación de riesgos ambientales

Figura5

Estimador del porcentaje de riesgo ambiental

		Valor Matricial	Equivalencia (%)	Promedio (%)	
	Riesgo significativo:	16 - 25	64 - 100	82	Riesgo alto 
	Riesgo moderado:	6 - 15	24 - 60	42	
	Riesgo leve:	1 - 5	1 - 20	10.50	

Nota: En base a la norma UNE 150008-2008 Evaluación de riesgos ambientales

Tabla de Valoración del porcentaje de riesgo

Valoración del porcentaje de riesgo			
Valor	Riesgo Leve (1–5→1% 20%)	Riesgo Moderado (6–15→ 24%–60%)	Riesgo Significativo (16–25→64%–100%)
1	1%		
2	5.75%		
3	10.5%		
4	15.25%		
5	20%		
6		24%	
7		28%	
8		32%	
9		36%	
10		40%	
11		44%	
12		48%	
13		52%	
14		56%	
15		60%	
16			64%
17			68%
18			72%
19			76%
20			80%
21			84%
22			88%
23			92%
24			96%
25			100%

CAPITULO IV:

RESULTADO

4.1 Resultados

- **Concentraciones de las emisiones atmosféricas, producidas por la actividad de extracción de minerales en una planta minera en el año 2025.**

El monitoreo de la calidad del aire realizado por la empresa minera corresponde a los periodos 2025-I y 2025-II. Para ello, se efectuaron mediciones en tres estaciones de monitoreo, las cuales han sido establecidas en el Programa de Monitoreo.

Tabla11

Resultados de las concentraciones emisiones atmosféricas

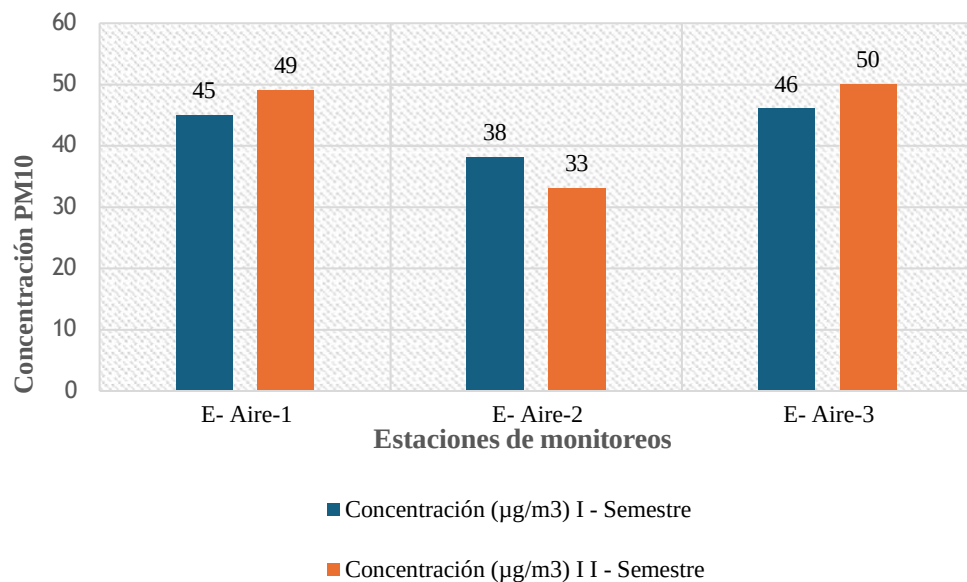
Parámetros	Unidad	I – Semestre 2025			I – Semestre 2025		
		Punto de monitoreo			Punto de monitoreo		
		Estación Aire-1	Estación Aire-1	Estación Aire-1	Estación Aire-1	Estación Aire-1	Estación Aire-1
Material particulado PM10	(µg/m3)	45	38	46	49	33	50
NO ₂	(µg/m3)	9	6	14	8	9	11
SO ₂	(µg/m3)	13	13	13	13	13	13
CO	(µg/m3)	782	762	789	732	782	749
Plomo(Pb) en PM	(µg/m3)	0.0275	0.0092	0.0133	0.0255	0.0142	0.0101
Arsénico(As) en PM	(µg/m3)	0.0019	0.0022	0.0016	0.0133	0.0133	0.0133
Cadmio(Cd) en PM	(µg/m3)	0.0007	0.0007	0.0007	0.0023	0.0023	0.0023
Cromo(Cr) en PM	(µg/m3)	0.0006	0.0006	0.0006	0.0055	0.0055	0.0055

Nota: Información reporte monitoreo Laboratorio GREENLAB

- **Calidad de aire: Material particulado PM_{10}**

Figura 6

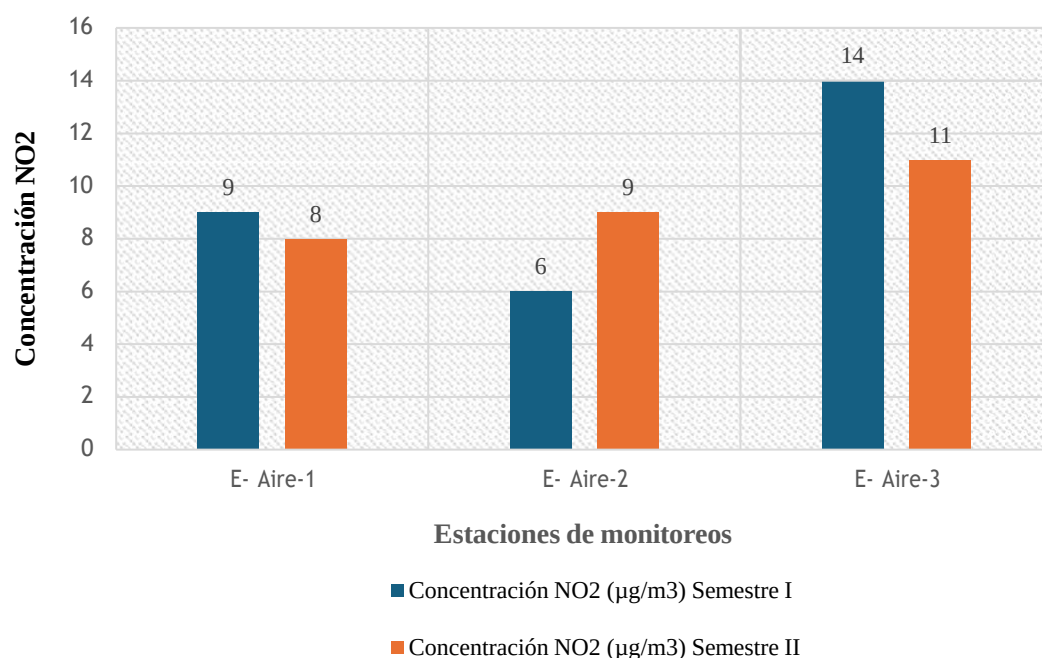
Material particulado(PM_{10})



En la figura 6: Durante el I semestre la estación con menor concentración fue E-Aire-2 con $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el II semestre mantuvo esa condición con $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, las estaciones E-Aire-1 y E-Aire-3 exhiben niveles superiores y con tendencia ascendente, lo que sugiere una mayor carga de partículas en suspensión en estos puntos de monitoreo.

- **Calidad de aire: Emisiones Atmosféricas NO₂**

Figura7
Emisiones Atmosféricas NO₂

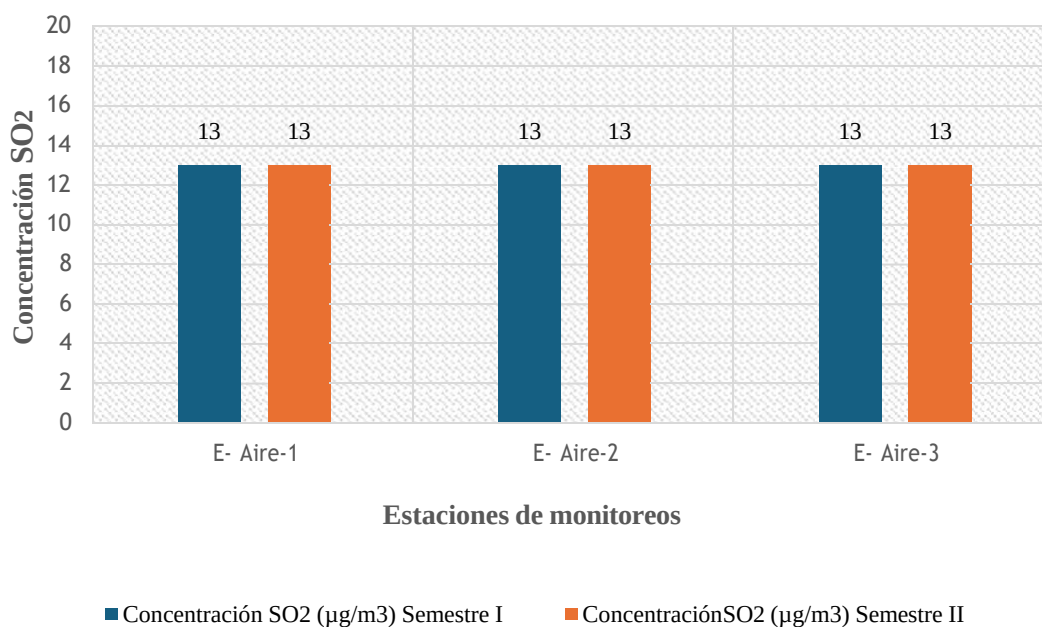


La figura 7: Muestra las concentraciones de **NO₂** en tres estaciones de monitoreo durante los semestres de 2025. En E-Aire-1, las concentraciones fueron de 9 µg/m³ en el Semestre I y 8 µg/m³ en el Semestre II, con una ligera disminución. En E-Aire-2, se observó un aumento de 6 µg/m³ a 9 µg/m³, lo que sugiere un incremento en las emisiones. Finalmente, en E-Aire-3, las concentraciones disminuyeron de 14 µg/m³ a 11 µg/m³ en el segundo semestre.

- **Calidad de aire: Emisiones Atmosféricas SO₂**

Figura8

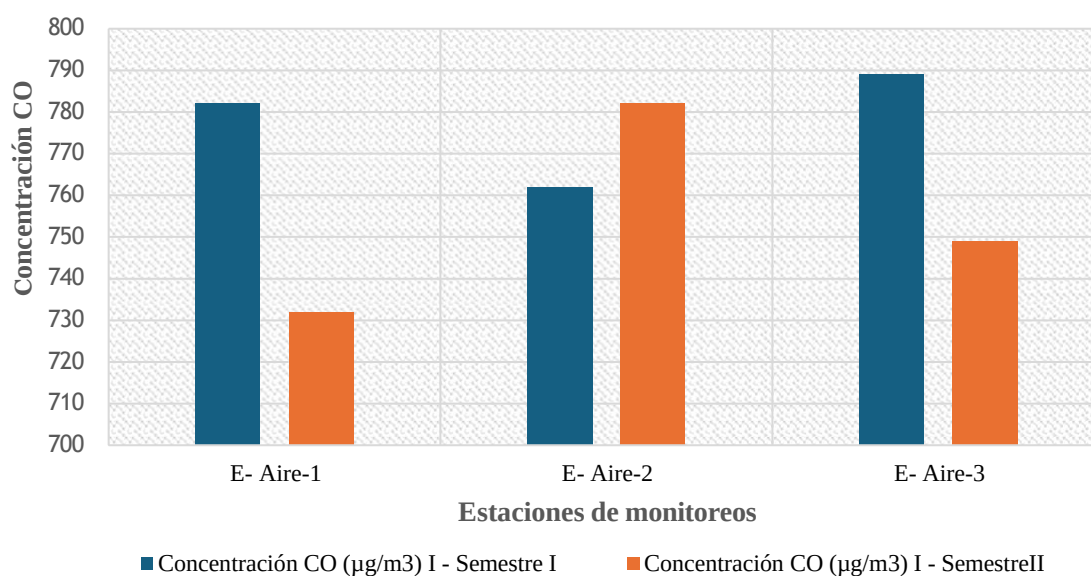
Emisiones atmosféricas SO₂



- La figura 8: Muestra las concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) en tres estaciones de monitoreo (E-Aire-1, E-Aire-2 y E-Aire-3) durante dos periodos del año 2025: el Semestre I y el Semestre II. En todas las estaciones, las concentraciones de SO₂ se mantienen constantes, con un valor de 13 µg/m³ tanto en el primer como en el segundo semestre. Esto indica que no hubo variaciones significativas en las concentraciones de SO₂ a lo largo del año, lo que sugiere una emisión estable de este contaminante durante ambos períodos de monitoreo.

- **Calidad de aire: Emisiones Atmosféricas CO**

Figura9
Emisiones Atmosféricas CO

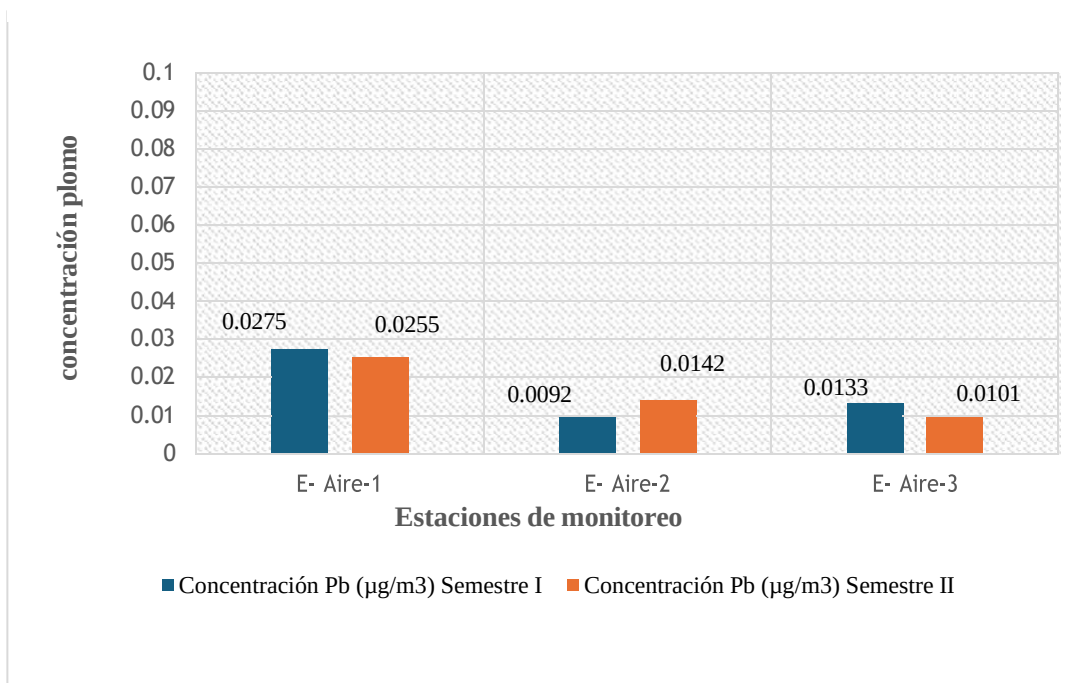


El gráfico de calidad de aire para emisiones atmosféricas de monóxido de carbono (CO) evidencia la variación semestral de las concentraciones registradas en las estaciones E-Aire-1, E-Aire-2 y E-Aire-3. En E-Aire-1, la concentración disminuye de aproximadamente en el semestre II. En E-Aire-2, se observa un comportamiento opuesto, con un incremento. Por su parte, en E-Aire-3 la concentración desciende. En conjunto, estos resultados indican una mejora general en la calidad del aire respecto al CO durante el segundo semestre, aunque con un comportamiento no homogéneo entre estaciones, lo que sugiere la influencia de factores locales como fuentes de combustión, intensidad del tránsito vehicular y condiciones de dispersión atmosférica.

- **Metales pesados en PM10: Plomo (Pb)**

Figura10

PM₁₀: Plomo (Pb)

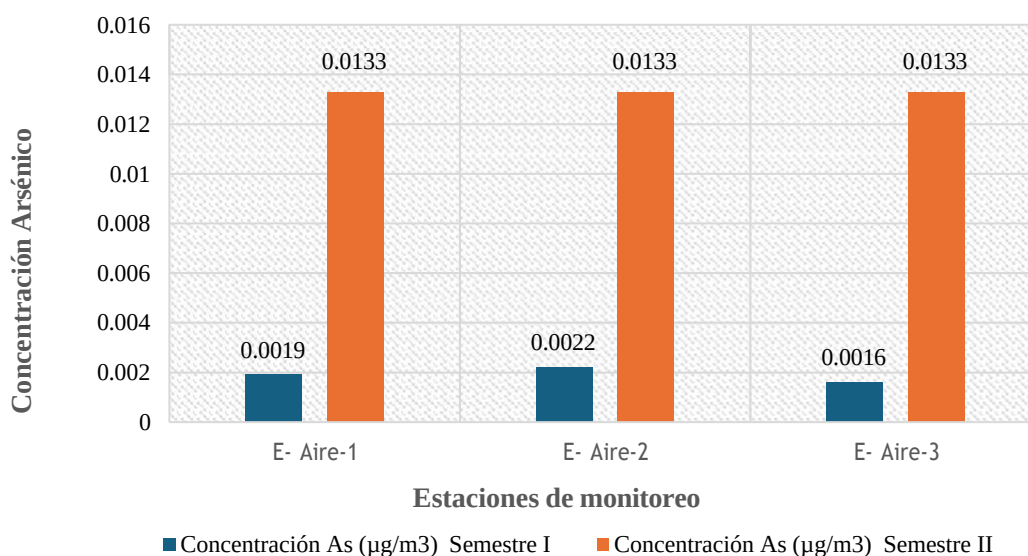


En la figura 10: Se evidencia que el plomo (Pb) en PM10, tiene una variación semestral poco significativa. La estación E-Aire-1 presentó las concentraciones más altas en ambos periodos evaluados, aunque con una ligera disminución. En E-Aire-2 se registró un incremento, constituyéndose en la única estación con tendencia ascendente, mientras que E-Aire-3 mostró una reducción. En términos generales, el promedio semestral del contaminante se mantuvo prácticamente estable, por lo que no se evidencia una variación global relevante en la concentración de Pb durante el periodo analizado.

- **Metales pesados en PM10: Arsénico(As)**

Figura11

PM10: Arsénico(As)

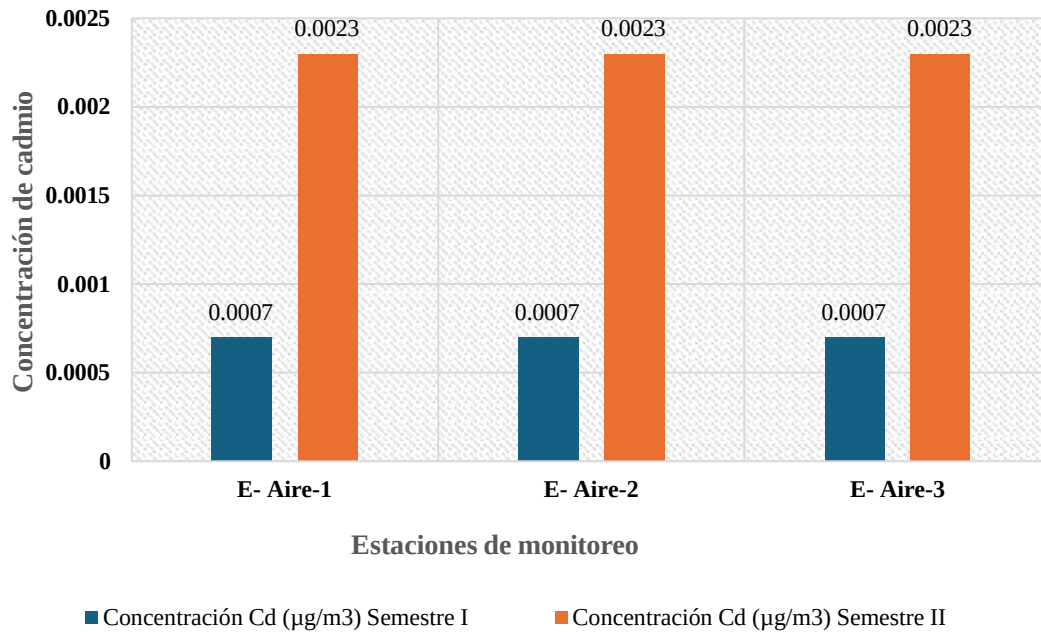


En la figura 11: El análisis de arsénico (As) asociado al PM10, evidencia un incremento de las concentraciones en todas las estaciones de monitoreo durante el semestre II. En el semestre I, los valores registrados fueron bajos y diferenciados en las tres estaciones. E-Aire-3, siendo esta última la de menor concentración. Sin embargo, en el semestre II las tres estaciones reportan un mismo valor de 0.0133 µg/m³, lo que refleja un incremento respecto al periodo anterior y una homogenización del contaminante en el área evaluada. Este comportamiento indica influencia de una fuente común de emisión, cambios en las condiciones de dispersión atmosférica o procesos de resuspensión de partículas con contenido de arsénico.

- **Metales pesados en PM10: Cadmio(Cd)**

Figura12

PM10: Cadmio(Cd)

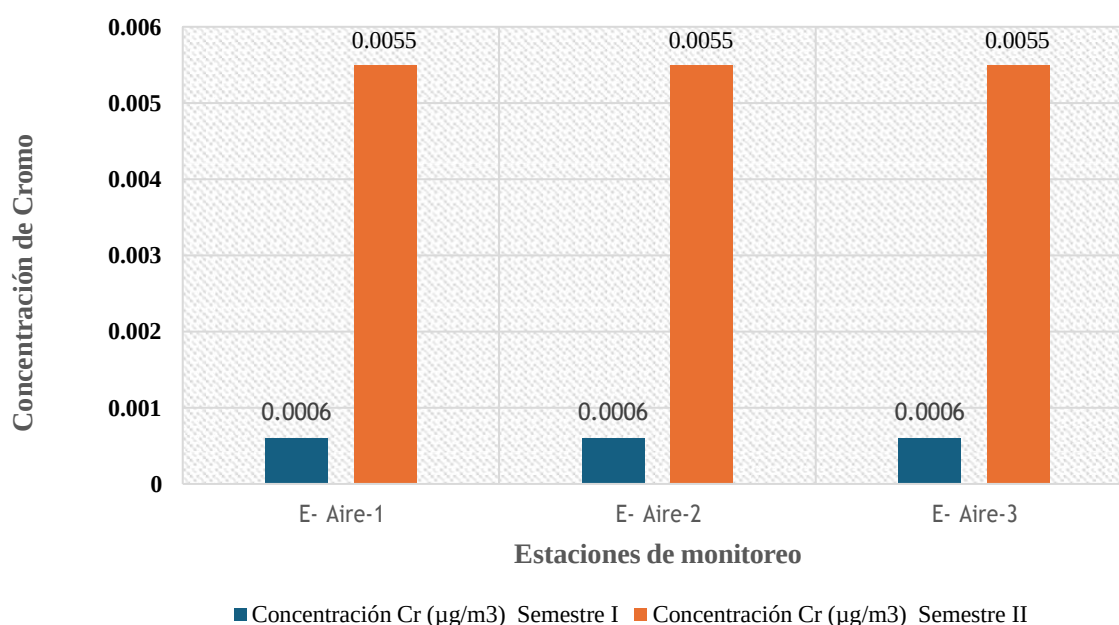


En la figura 12, La concentración de cadmio (Cd) asociado al PM10 evidencia un incremento significativo en las tres estaciones de monitoreo durante el semestre II. En el semestre I, las estaciones E-Aire-1, E-Aire-2 y E-Aire-3 registraron una concentración de 0.0007 µg/m³, mientras que en el semestre II las tres presentaron un valor de 0.0023 µg/m³. Esto representa un aumento absoluto de cada estación, equivalente a un incremento respecto al periodo inicial, posiblemente asociado a una fuente común de emisión, a procesos de dispersión atmosférica similares o a resuspensión generalizada de partículas.

- **Metales pesados en PM10: Cromo(Cr)**

Figura13

PM10: Cromo(Cr)



En figura 13: el análisis de cromo (Cr) asociado al PM10 evidencia un incremento significativo de las concentraciones en las tres estaciones de monitoreo durante el semestre II. En el semestre I, las estaciones E-Aire-1, E-Aire-2 y E-Aire-3 registraron una concentración de 0.0006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el semestre II las tres presentaron un valor de 0.0055 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los resultados muestran un deterioro de la calidad del aire respecto al cromo durante el segundo semestre, por lo que se recomienda mantener el seguimiento de este parámetro y complementar su evaluación con el análisis de las fuentes potenciales de emisión y de las condiciones meteorológicas.

- **Comparar las concentraciones de las emisiones atmosféricas con los ECA- Aire, establecidos por la normativa ambiental vigente.**

Del resultado de las concentraciones de emisiones atmosférica realizados en el año 2025, se tiene el promedio de ambos semestres en la siguiente tabla:

- **Comparación emisión atmosférica con los Estándares calidad aire (ECA-Aire)**

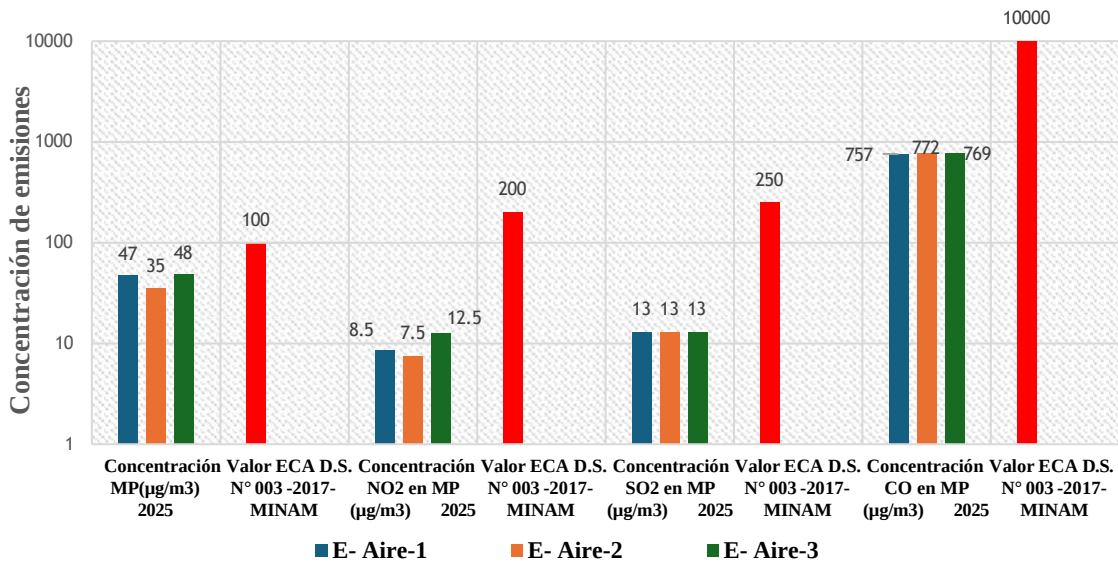
Tabla12

Emisiones atmosféricas con los ECA- Aire

ESTACIÓN DE MONITOREO	Concentración MP(µg/m3) 2025	ECA D.S. N° 003 - 2017- MINAM	Concentración NO ₂ (µg/m3) 2025	ECA D.S. N° 003 - 2017- MINAM	Concentración SO ₂ (µg/m3) 2025	ECA D.S. N° 003 - 2017- MINAM	Concentración CO (µg/m3) 2025	ECA D.S. N° 003 - 2017- MINAM
E- Aire-1	47	100	8.5	200	13	250	757	10000
E- Aire-2	35		7.5		13		772	
E- Aire-3	48		12.5		13		769	

Figura14

Emisiones atmosféricas con los ECA- Aire



De la figura 14: Comparación de las concentraciones registradas en las estaciones E-Aire-1, E-Aire-2 y E-Aire-3 con los Estándares de Calidad Ambiental para Aire establecidos en el D.S. N.º 003-2017-MINAM, se concluye que los parámetros evaluados presentan cumplimiento normativo. Las concentraciones de PM10 (35–48 µg/m³), NO₂ (8.5–12.5 µg/m³), SO₂ (13 µg/m³) y CO (726–769 µg/m³) se encuentran por debajo de los valores de referencia aplicables. En consecuencia, los resultados obtenidos no evidencian excedencias respecto de la normativa ambiental vigente para calidad de aire.

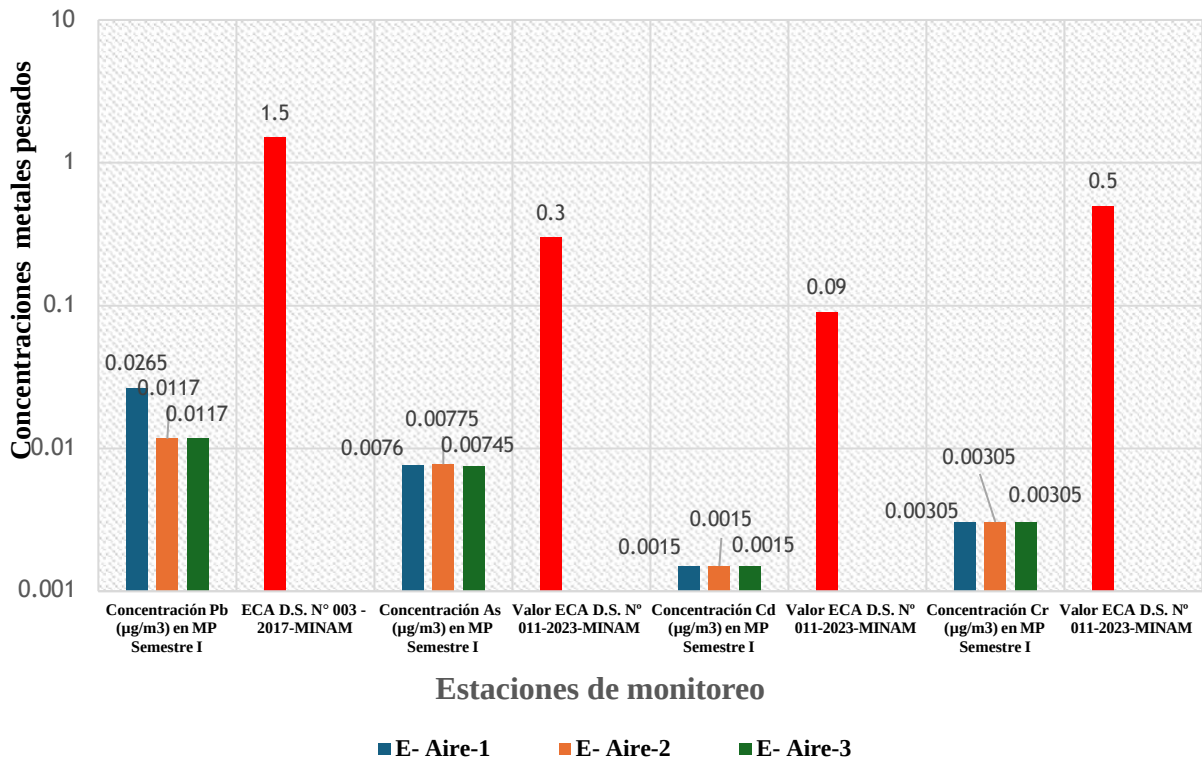
- **Comparación emisiones atmosféricas: Metales pesados en (PM₁₀)**

Tabla13
Emisiones atmosféricas metales pesados en PM₁₀

ESTACIÓN DE MONITOREO	Concentración plomo (µg/m3) en 2025	ECA D.S. N° 003 - 2017- MINAM	Concentración Arsénico (µg/m3) en 2025	ECA D.S. N° 011- 2023- MINAM	Concentración Cadmio (µg/m3) en 2025	ECA D.S. N° 011- 2023- MINAM	Concentración Cromo (µg/m3) en 2025	ECA D.S. N° 011- 2023- MINAM
E- Aire-1	0.0265		0.0076		0.0015		0.00305	
E- Aire-2	0.0117	1.5	0.00775	0.3	0.0015	0.09	0.00305	0.5
E- Aire-3	0.0117		0.00745		0.0015		0.00305	

Figura15

Emisiones atmosféricas metales pesados en PM₁₀



De la figura 15, las comparaciones de las concentraciones de metales pesados asociados al material particulado PM₁₀ registradas en las estaciones E-Aire-1, E-Aire-2 y E-Aire-3 durante 2025, con los Estándares de Calidad Ambiental para Aire vigentes, los valores obtenidos cumplen con la normativa ambiental aplicable. Las concentraciones de plomo (0.0117–0.0265 µg/m³) se encuentran por debajo de los ECA establecidos en el D.S. N.º 003-2017-MINAM, mientras que las concentraciones de arsénico (0.00745–0.00775 µg/m³), cadmio (0.0015 µg/m³) y cromo (0.00305 µg/m³) se ubican por debajo de los valores aprobados por el D.S. N.º 011-2023-MINAM. En consecuencia, no se evidencian excedencias de los estándares de calidad ambiental para los metales pesados evaluados en el componente aire.

- **Resultados de la evaluación de riesgos de las emisiones atmosféricas, producidas por la actividad de extracción de minerales en una planta minera en el año 2025.**

Para el desarrollo de la evaluación del riesgo ambiental se aplica la guía de evaluación de riesgos ambientales MINAN (2011), propone un modelo estandarizado para la identificación de peligros, análisis y evaluación de los riesgos ambientales que generan las actividades mineras.

- **Paso 1: Identificación de peligros**

Tabla14
Identificación de peligros

Origen	Agente contaminante	Tipo de peligro	Vía de exposición	Efectos	Concentración (µg/m3)
Antrópicas	PM10	Químico-material particulado	Inhalación	Vías respiratorias	43.5
	SO2	Químico gas irritante	Inhalación	Irritación Vías respiratorias	9.5
	NO2	Químico gas toxico/irritante	Inhalación	Inflamación a las vías respiratoria	13.0
	CO	Químico gas toxico	Inhalación	Disminución del transporte de oxígeno en sangre	766.0
	Plomo(Pb) en PM	Químico – metal pesado	Inhalación	Toxicidad Crónica neurológico	0.0016
	Arsénico (As) en PM	Químico – metal pesado	Inhalación	Toxicidad Crónica irreversible	0.0076
	Cadmio(Cd) en PM	Químico – metal pesado	Inhalación	Toxicidad renal crónica	0.0015
	Cromo(Cr)	Químico – metal pesado	Inhalación	Toxicidad crónica efecto severo	0.00305

En la tabla 14: Se identifican los peligros existentes para la calidad del aire, presenta el agente químico de origen antrópico, cuyo mecanismo de afectación es la inhalación. En este sentido, el PM10 fue clasificado como material particulado respirable; el SO₂, NO₂

y CO como gases contaminantes; y el plomo, arsénico, cadmio y cromo como metales pesados asociados al material particulado. Para todos los casos, la peligrosidad relevante se vincula principalmente con la toxicidad, los efectos irritantes agudos en algunos gases y los efectos crónicos o irreversibles en material particulado y metales pesados.

- **Paso 2: Análisis de escenarios de riesgo**

En esta etapa se identifican los posibles escenarios de riesgo que pueden ocurrir debido a un evento o situación particular. Estos escenarios pueden incluir incidentes relacionados con la emisión de contaminantes, desastres naturales, fallos en sistemas o cualquier otro factor que represente una amenaza para la seguridad, salud o el medio ambiente.

Tabla 15
Análisis de escenarios de riesgo

Determinación de escenario de riesgo					
Escenarios	Elemento	riesgo	Causa	Consecuencia	
1 (E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral(E-1)	Aire	Contaminación del aire por material particulado	Inadecuado manejo de equipos y condiciones climáticas.	Daño al ambiente y la salud	
2 (E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales	Aire	Contaminación del aire por material particulado y/ metales pesados	Emisión de material particulado por explosivos	Daño al ambiente y la salud	
3 (E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas	Aire	Contaminación del aire por partículas polvo u otros	Concentración de material particulado(polvo)	Daño al ambiente y la salud	
4 (E-4) Fuentes fijas de combustión(calderos , generadores etc.)	Aire	Contaminantes del aire por emisiones gaseosas PM10, SO2. NO2 Y CO	Inadecuado manejo de las emisiones gaseosas.	Daño al ambiente y la salud.	

De la tabla 15: En la actividad minera se identificó cuatro escenarios y/o etapas con potencial contaminación al aire, asociados a fuentes antrópicas de la actividad minera. En el escenario E-1 (chancado, zarandeo y transferencia de mineral), el riesgo se origina por el manejo inadecuado de equipos y la influencia de condiciones climáticas, lo que genera dispersión de polvo. En E-2 (perforación, voladura y carguío), el riesgo es más crítico porque además del material particulado, libera metales pesados asociados al mineral y residuos de explosivos. En E-3 (transporte interno en vías no pavimentadas), la principal causa es la resuspensión de polvo por tránsito vehicular. Finalmente, en E-4 (fuentes fijas de combustión), el riesgo se asocia a un manejo inadecuado de emisiones gaseosas, generando contaminantes que pueden afectar la calidad del aire de la zona.

- **Paso 3: Estimación de la probabilidad**

Se estima la probabilidad de que cada escenario ocurra. Esta evaluación se puede basar en datos históricos, estudios de condiciones de operación o modelados predictivos. La probabilidad también puede estar vinculada a la frecuencia del evento, es decir, cuántas veces podría ocurrir en un periodo determinado. Para evaluar la probabilidad se aplica: Tabla 16. Estimación de la probabilidad.

Tabla17
Estimación de la probabilidad

	Escenarios	Contaminantes	Probabilidad
1	(E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral	PM10.	4
2	(E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales	PM10 y metales pesados.	3
3	(E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas	PM10	5
4	(E-4) Fuentes fijas de combustión (calderos, generadores etc.)	PM10, SO2. NO2 Y CO	3

En la tabla 16, se evaluó la estimación de la probabilidad indica que el escenario con mayor ocurrencia de emisiones atmosféricas es E-3 (transporte interno en vías no pavimentadas), debido a la frecuente generación de polvo. Le sigue E-1 (chancado, zarandeo y transferencia de mineral), también como fuente importante de PM10. En cambio, E-2 (perforación, voladura y carguío) y E-4 (fuentes fijas de combustión) presentan una probabilidad moderada; sin embargo, en E-2 la peligrosidad puede ser mayor por la presencia de metales pesados, y en E-4 por la emisión de gases de combustión como SO₂, NO₂ y CO.

- **Paso 4: Determinación de las consecuencias**

Es una fase crítica del proceso de evaluación de riesgos. En esta etapa, se busca identificar y evaluar las repercusiones que tendría la materialización de un escenario de riesgo en el entorno humano, el entorno natural y los aspectos socioeconómicos. Es decir, si el evento de riesgo identificado se llegara a ocurrir, cómo afectaría a las personas, el medio ambiente, las operaciones y la comunidad en general. Para determinar las consecuencias se aplica: la tabla 5. Estimación de la gravedad de las consecuencias y la tabla 10. Rango de estimación de consecuencias.

Tabla18*Determinación de las consecuencias entorno humano.*

Consecuencia entorno humano							
ESCENARIOS	cantidad	peligrosidad	Extensión	Calidad del medio	Valoración	Valor de la consecuencia	Valor asignado
1 (E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral	3	2(3)	3	4	16	Grave	4
2 (E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales	3	2(3)	3	3	15	Grave	3
3 (E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas	2	2(2)	3	3	12	Moderado	3
4 (E-4) Fuentes fijas de combustión (calderos, generadores etc.)	2	2(3)	2	3	13	moderado	3

De la tabla 18: Los escenarios E-1 y E-2 (chancado, zarandeo, transferencia de mineral y perforación/voladura) tienen el mayor impacto sobre el entorno humano, debido a su alta peligrosidad y extensión. El escenario E-3 (transporte interno en vías no pavimentadas) tiene un riesgo moderado, aunque la exposición al polvo sigue siendo una preocupación significativa. El escenario E-4 (fuentes fijas de combustión) también tiene un impacto moderado, pero su frecuencia es menor y el área afectada es más limitada.

Tabla19*Determinación de las consecuencias entorno natural.*

		Consecuencia entorno natural						Valor asignado
ESCAPARIOS		cantidad	peligrosidad	Extensión	Calidad del medio	Valoración	Valor de la consecuencia	
1 (E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral		3	2(3)	3	4	16	Grave	4
2 (E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales		3	2(3)	2	3	15	Grave	3
3 (E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas		2	2(3)	3	3	12	Moderado	3
4 (E-4) Fuentes fijas de combustión (calderos, generadores etc.)		2	2(3)	2	2	12	moderado	3

En la tabla19: El escenario E-1 (chancado, zarandeo y transferencia de mineral) tiene el mayor impacto sobre el entorno natural, con un riesgo grave y un valor de 16. E-2 (perforación, voladura y carguío de minerales) sigue siendo grave, con un valor de 15. E-3 (transporte interno en vías no pavimentadas) y E-4 (fuentes fijas de combustión) tienen un impacto moderado, pero aún requieren medidas de mitigación para evitar efectos a largo plazo sobre el medio ambiente. Por lo tanto, los escenarios de mayor riesgo son los relacionados con el manejo y procesamiento del mineral, mientras que los otros escenarios tienen un impacto más limitado, pero aún significativo en términos de calidad del aire y la salud ambiental.

Tabla20*Determinación de las consecuencias entorno socioeconómico.*

		Consecuencia entorno socioeconómico						
ESCENARIOS		cantidad	peligrosidad	Extensión	Calidad del medio	Valoración	Valor de la consecuencia	Valor asignado
1	(E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral	3	2(3)	3	3	15	Grave	4
2	(E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales	2	2(3)	2	3	13	Grave	3
3	(E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas	2	2(2)	3	2	11	Moderado	3
4	(E-4) Fuentes fijas de combustión (calderos, generadores etc.)	2	2(3)	2	2	12	moderado	3

De la Tabla 20: El escenario E-1 (que incluye la trituración, el zarandeo y la transferencia de mineral) tiene el impacto socioeconómico más alto, con un grave riesgo debido a que esta actividad se realiza con mucha frecuencia y es peligrosa. Además, causa un deterioro considerable en términos de salud pública y economía local. Los escenarios E-2 (perforación, voladura y carga de minerales) y E-3 (transporte interno por vías no asfaltadas) tienen un impacto entre medio y alto. Su principal afectación es a la salud pública y al aire, aunque en términos de costos socioeconómicos su efecto es limitado. El escenario E-4 (fuentes fijas de combustión) tiene un riesgo moderado y efectos más localizados, pero son igualmente significativos en términos de calidad del aire y salud pública.

- **Paso 5: Determinación nivel de riesgo y % riesgo ambiental**

Determinar el porcentaje del riesgo ambiental es un procedimiento que consiste en detectar, valorar y dar prioridad a los riesgos vinculados con una actividad. Supone el estudio de la probabilidad y seriedad de los escenarios de riesgo, así como su combinación para determinar el riesgo total. Este valor se transforma en un porcentaje que facilita la clasificación y priorización de los riesgos. Se aplica la figura 4 estimador de riesgo ambiental para calcular el nivel de riesgo y para determinar los cálculos del porcentaje de riesgo figura 5 estimador del porcentaje de riesgo y la tabla de valoración del anexo 5

Tabla21

Nivel de riesgo entorno Humano

Entorno humano							
ESCENARIOS		Contaminante	probabilidad	Puntuación Consecuencia	Riego Humano (P x GH)	NIVEL DE RIESGO	% RIESGO AMBIENTAL
1	(E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral	PM10 y metales pesados.	4	4	16	Significativo	64%
2	(E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales	PM10 y metales pesados.	3	4	12	Moderado	48%
3	(E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas	PM10	5	3	15	Moderado	60%
4	(E-4) Fuentes fijas de combustión (calderos, generadores etc.)	PM10, SO2. NO2 Y CO	3	3	9	Moderado	36%
						Promedio	52%

De la tabla 21: El entorno humano presenta un riesgo del 52%, lo que indica que más de la mitad del impacto ambiental está relacionado con la salud pública y la calidad de vida de las personas cercanas a la operación minera. Esto puede estar vinculado a las Emisiones de material particulado (PM₁₀) y metales pesados durante las actividades mineras, como el chancado y la transferencia de mineral, que pueden afectar la respiración y causar enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La contaminación del aire generados por el proceso minero son factores importantes que inciden en el bienestar de las comunidades cercanas.

Figura16
Porcentaje de riesgo entorno humano

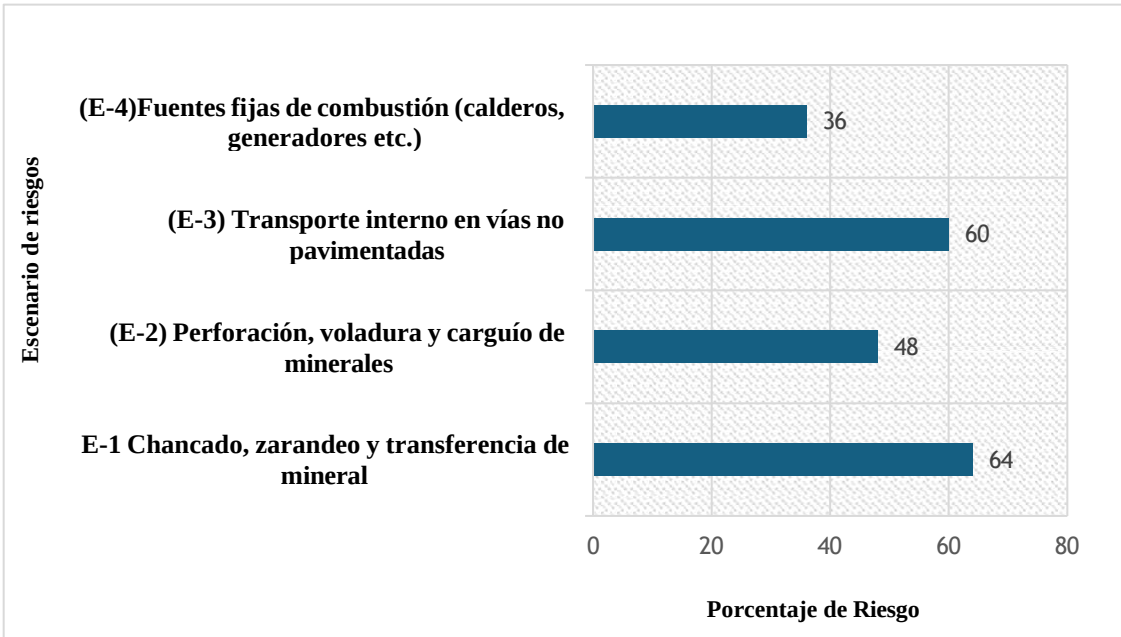


Tabla22*Nivel de riesgo entorno natural*

Entorno natural							
ESCENARIOS		Contaminante	probabilidad	Puntuación gravedad	Riesgo Humano (P x GH)	NIVEL DE RIESGO	% RIESGO AMBIENTAL
1	(E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral	PM10 y metales pesados.	4	4	16	Significativo	64
2	(E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales	PM10 y metales pesados.	3	4	12	Moderado	48
3	(E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas	PM10	5	3	15	Moderado	60
4	(E-4) Fuentes fijas de combustión (calderos, generadores etc.)	PM10, SO2. NO2 Y CO	3	3	9	Moderado	36
Promedio							52%

De la tabla22: El entorno natural también tiene un riesgo del 52%, lo que sugiere que las actividades mineras están afectando significativamente al medio ambiente, con un impacto directo sobre los recursos naturales: Alteración de la calidad del aire debido a las emisiones de material particulado y gases contaminantes. Destrucción de la flora y fauna local debido a las operaciones mineras y el uso de vías no pavimentadas, que generan erosión y comprometen la biodiversidad. Posibles efectos sobre los cuerpos de agua cercanos debido a la contaminación por metales pesados que se podrían liberar durante las actividades de procesamiento del mineral.

Figura17
Nivel del % riesgo entorno natural

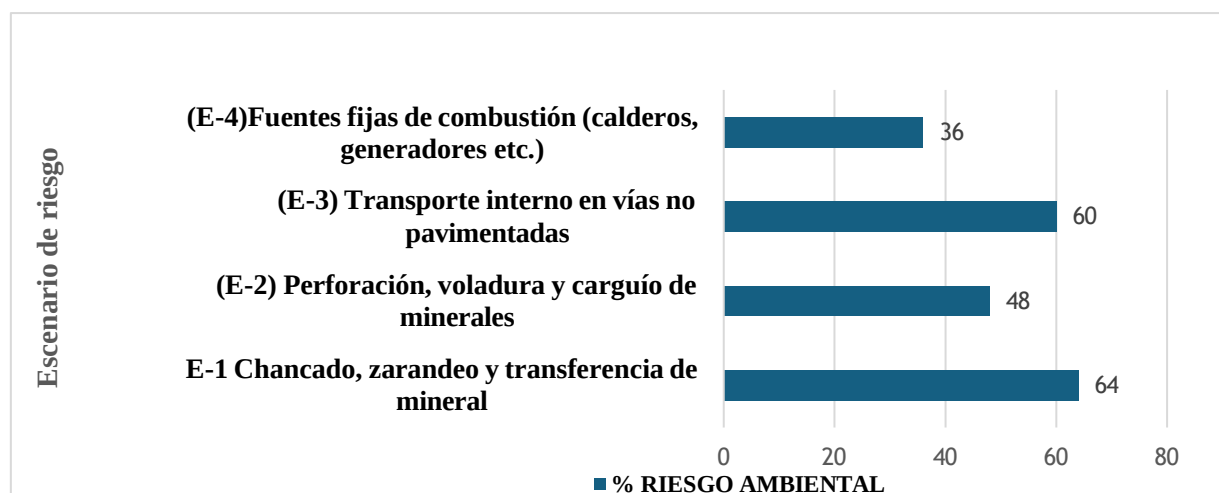
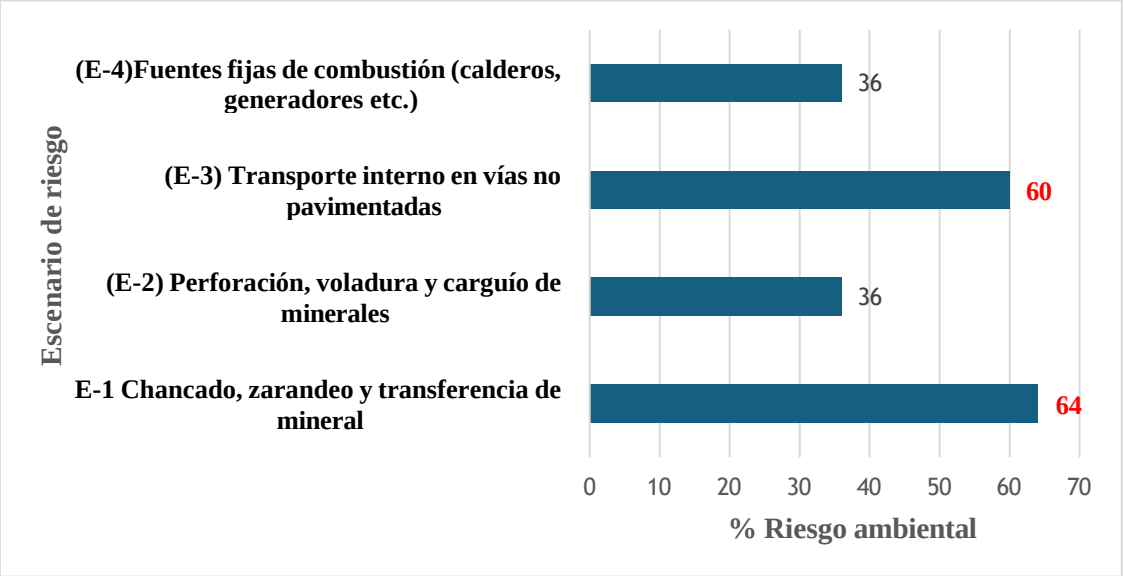


Tabla23
Nivel de riesgo entorno socioeconómico

Entorno socioeconómico						
ESCAPARIOS	Contaminante	probabilidad	Puntuación gravedad	Riego Humano (P x GH)	NIVEL DE RIESGO	% RIESGO AMBIENTAL
1 (E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral	PM10 y metales pesados.	4	4	16	Significativo	64%
2 (E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales	PM10 y metales pesados.	3	3	9	Moderado	36%
3 (E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas	PM10	5	3	15	Moderado	60%
4 (E-4) Fuentes fijas de combustión (calderos, generadores etc.)	PM10, SO2. NO2 Y CO	3	3	9	Moderado	36%
Promedio						49%

El entorno socioeconómico tiene un riesgo del 49%, lo que indica que las actividades mineras tienen un impacto considerable, pero no tan grave como en los otros dos entornos. Este impacto puede incluir: Afectación a la salud pública, lo que genera costos económicos relacionados con la atención médica y la pérdida de productividad laboral. Reducción de la calidad de vida de las comunidades cercanas debido a la contaminación del aire y los ruidos generados por las actividades mineras. Posibles perjuicios económicos para las comunidades debido a la degradación ambiental, que puede afectar actividades económicas locales como la agricultura o el turismo.

Figura 18
Riesgo ambiental entorno socioeconómico



Caracterización del riesgo(CR): de la evaluación ambiental realizado en la minera, encontramos el siguiente riesgo ambiental: Entorno humano 52%, entorno natural 52%, y entorno socioeconómico 49%

$$CR = \frac{EH + EN + ES}{3}$$

Según los resultados de la evaluación del riesgo ambiental tenemos:

$$CR = \frac{52 + 52 + 49}{3} = 51\%$$

El riesgo ambiental total obtenido de 51% refleja un impacto moderado en los tres entornos, pero con una afectación significativa en el entorno humano y natural, lo que requiere acciones inmediatas de mitigación y control. La salud pública, la biodiversidad local y las condiciones socioeconómicas deben ser monitoreadas y protegidas con políticas y estrategias adecuadas, para garantizar que las actividades mineras sean sostenibles a largo plazo y no causen daño irreversible al entorno.

CAPITULO V:

DISCUSION DE RESULTADOS

5.1 Discusión

- Los resultados del monitoreo realizado en el año 2025 evidencian que la actividad de extracción de minerales genera emisiones atmosféricas compuestas principalmente por material particulado (PM₁₀), seguido por contaminantes gaseosos y, en menor magnitud, por metales pesados asociados al PM₁₀. Entre los parámetros evaluados, el PM₁₀ presentó los valores más representativos en las tres estaciones de monitoreo, con concentraciones entre 35 y 48 µg/m³. Al igual que el estudio de Licla (2021). Desarrolló una investigación cuyo propósito fue evaluar la calidad del aire, donde encontró que la concentración de material particulado (PM₁₀) es menor a 10 micras, lo cual indica que los niveles materiales particulado que se generan en las labores de explotación (decapeo, desbroce, extracción, carguío, almacenamiento y transporte), no representan un riesgo significativo para la salud de los trabajadores ni para el medio ambiente. Caso contrario del estudio de García y Rodríguez (2023), que encontraron concentraciones altas de PM₁₀ de 120.5 µg/m³ y considera que el material particulado (PM₁₀), es el principal contaminante asociado a las actividades mineras. Esto confirma que las actividades mineras constituyen las principales fuentes de emisión de partículas. Este comportamiento es coherente con la naturaleza de las actividades extractivas, en las que la fragmentación, manipulación y movilización del mineral favorecen la generación y resuspensión de polvo. En caso metales pesados asociados al PM₁₀. los resultados muestran concentraciones relativamente bajas de plomo (Pb),

arsénico (As), cadmio (Cd) y cromo (Cr). El plomo presentó su mayor valor en la estación E-Aire-1 con $0.0265 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el arsénico osciló alrededor de $0.0075 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las tres estaciones. En el caso del cadmio y el cromo, se observaron concentraciones homogéneas de $0.0015 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.00305 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

- De acuerdo con el D.S. N.º 003-2017-MINAM, los resultados obtenidos muestran que las concentraciones de PM₁₀, SO₂, NO₂ y CO se mantuvieron por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA-Aire). El PM₁₀ registró valores entre 35 y $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin exceder los límites establecidos; sin embargo, su proximidad al valor anual de referencia evidencia que este contaminante constituye el principal factor de presión ambiental en el área de estudio. En contraste, las concentraciones de SO₂ ($13 \mu\text{g}/\text{m}^3$), NO₂ ($8.5\text{--}12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y CO ($726\text{--}769 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fueron considerablemente menores que los valores normativos, lo que indica una baja incidencia de emisiones gaseosas. Respecto a los metales pesados asociados al PM₁₀, se identificaron concentraciones bajas de Pb, As, Cd y Cr en las estaciones evaluadas. No obstante, su importancia ambiental y sanitaria radica en su toxicidad y en los posibles efectos acumulativos derivados de exposiciones prolongadas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Hijar (2024) de la minera La Estrella menciona que el parámetro Material Particulado PM₁₀, evaluados en los 4 trimestre, se registró una concentración mínima de $3.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación CAH-5 durante el primer trimestre y un valor máximo de $66.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación CAH-2 durante el tercer trimestre. Las concentraciones de gases CO se obtuvo valores muy por debajo ($652 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Dióxido de Nitrógeno (NO₂) ($<8.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$), el SO₂ los resultados obtenidos ($<12.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) los parámetro en todas las estaciones se mantuvieron dentro de los límites establecidos, A diferencia del estudio de García y Rodríguez

(2023) en la zona minera Morococha–La Oroya, donde el PM₁₀ (120.5 µg/m³) fue señalado como el contaminante más influenciado por la actividad minera, mientras que los gases se mantuvieron por debajo de los estándares ECA- Aire. En ese sentido, los hallazgos confirman que el material particulado representa el componente más relevante en la evaluación de la calidad del aire en contextos mineros.

- En lo que respecta a la identificación y estudio de los riesgos en los contextos, se pudo determinar que el procesamiento del escenario (E-1), Chancado, zarandeo y transferencia de mineral, tiene el porcentaje más alto de riesgo (64%) en los tres entornos. Se considera significativo y es la situación más grave para el componente aire. Sin embargo, tomando en cuenta los resultados de la matriz de caracterización, presento en los tres entornos tenemos, entorno humano 52%, entorno natural 52%, y entorno socioeconómico 49% con un promedio 51%. Al igual que Vilcas (2024), que estudió la actividad minera en la sierra peruana, los niveles de riesgo fueron del 57,33 % en el entorno natural y del 51 % en el entorno humano. El promedio general fue de 57,33 %, con un riesgo ambiental moderado. La puntuación en cuanto al entorno socioeconómico fue del 40,0 % y la de la variable 74,67 %. El estudio concluye que la actividad minera conlleva grandes riesgos para el medio ambiente, y que es indispensable crear estrategias de mitigación para proteger el entorno y minimizar los impactos sobre la salud de la gente.

CAPITULO VI:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Concluye que: Las mediciones realizadas en la planta minera en el año 2025 permitieron determinar que las emisiones atmosféricas están dominadas principalmente por material particulado PM10, seguido por gases contaminantes como SO₂, NO₂ y CO, y en menor medida por metales pesados asociados al PM10. Las concentraciones de PM10 oscilan entre 35 y 48 µg/m³, manteniéndose por debajo del ECA de 100 µg/m³ para 24 horas y del ECA anual de 50 µg/m³. No obstante, el valor máximo de 48 µg/m³ se encuentra cercano al límite anual, lo que sugiere que las actividades de chancado, zarandeo, transferencia de mineral y transporte interno en vías no pavimentadas continúan siendo las principales fuentes de contaminación por material particulado.

- Se concluye que: Los resultados de las mediciones de emisiones atmosféricas en la planta minera en 2025 muestran que las concentraciones se encuentran dentro de los límites establecidos por los ECA-Aire, lo que sugiere que las operaciones cumplen con la normativa vigente en cuanto a la calidad del aire. Sin embargo, el PM10 sigue siendo el contaminante más relevante, y es necesario continuar con las estrategias de control de polvo y el monitoreo continuo de gases y metales pesados, con el fin de asegurar que las concentraciones no excedan los límites en el futuro y se minimicen los riesgos para la salud y el ambiente.

- Se concluye que: La evaluación del % de riesgo ambiental pone de manifiesto que las actividades de procesamiento de mineral y el transporte en vías no pavimentadas son las principales fuentes de riesgo ambiental en la planta minera, debido a la emisión de material particulado. Aunque las concentraciones de los contaminantes se mantienen dentro de los ECA-Aire, es crucial que la planta continúe implementando medidas de control de polvo y de manejo de gases de combustión, con el fin de reducir aún más el impacto de las actividades mineras sobre la calidad del aire y la salud pública.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda continuar con el monitoreo continuo de las concentraciones de PM10, SO₂, NO₂, CO y metales pesados, ampliando estaciones de medición en zonas clave de la planta minera, especialmente en áreas con altas emisiones la cual permitirá detectar las variaciones en las concentraciones de contaminantes y tomar medidas correctivas oportunas. A si mismo evaluar la efectividad de las medidas de control implementadas y ajustar las estrategias en caso de ser necesario.
- La comparación con los ECA-Aire ha evidenciado que las concentraciones de contaminantes en la atmósfera de la planta minera no sobrepasan los niveles fijados por la legislación vigente durante el año 2025. No obstante, es crucial que la planta minera siga poniendo en marcha medidas de control y prevención, especialmente para el PM10, que sigue siendo el contaminante más presente. Asimismo, es crucial que se realice un monitoreo de acuerdo con los estándares establecidos para asegurar el cumplimiento y la protección del medio ambiente natural y de la salud pública.

- Dado que el PM10 representa el contaminante de mayor riesgo, con el 64% de riesgo ambiental asociado principalmente al chancado, zarandeo, transferencia de mineral y transporte en vías no pavimentadas, se recomienda reforzar las medidas de control de polvo en estas áreas clave, el uso de sistema humectación para reducir las partículas y la encapsulación de los equipos como trituradoras y zarandas para minimizar la dispersión de partículas y Pavimentación de las vías de transporte.

REFERENCIAS

7.1 Fuentes bibliográficas

- Blanco, E., & Paricahua, H. (2020). *Identificación y valoración de impactos ambientales generados por las actividades de la minería informal, en el Cerro Luicho del Distrito de Colta, Provincia de Paucar del Sara Sara, Ayacucho* [Tesis, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio UTP. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/3017>
- Duarte, J. (2022). Occupational exposure to mineral dust in mining and earthmoving industries. *Safety (MDPI)*, 8(1), 9. <https://www.mdpi.com/2313-576X/8/1/9>
- EPA. (2017). *Guideline on Air quality models (Appendix W)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. (2019). *AERMOD user guide*. U.S. Environmental Protection Agency. https://gaftp.epa.gov/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_userguide.pdf
- Evaluación de riesgos ambientales por actividad minera en el distrito de Vista Alegre - provincia de Nazca. (2021). <https://hdl.handle.net/20.500.13028/5749>
- Freitas, A. C. V., Belardi, R.-M., & Barbosa, H. M. J. (2021). Characterization of particulate matter in the iron ore mining region of Itabira, Minas Gerais, Brazil. *Atmosfera*, 35(4), 781–802. <https://doi.org/10.20937/ATM.52987>
- García, L., & Rojas, M. (2018). *Gestión del riesgo ambiental en poblaciones vulnerables*. Editorial EcoHabitat.

- García Comun, R. U., & Rodríguez Ramos, L. T. (2023). *Impacto de la actividad minera sobre la calidad del aire en el Distrito de Morococha - Oroya - Junín, 2017-2018* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/9861>
- Hijar Gamboa, F. J. (2024). *Monitoreo y análisis ambiental de calidad de aire y ruido en la unidad minera La Estrella, La Libertad, Perú* [Tesis].
- Jeanette Justo Aracayo. (2021). *Evaluación de la calidad del aire según los niveles de concentración de SO₂, NO₂, CO y O₃ en puntos críticos de la ciudad de Juliaca* [Tesis]. <https://hdl.handle.net/20.500.14845/173>
- Julca Condezo, K. G. (2018). *Evaluación de los impactos ambientales generados por el funcionamiento de la planta complementaria de beneficio de minerales oxidados en el distrito de Simón Bolívar de Rancas perteneciente a Volcan Compañía Minera S.A.A.* [Tesis]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/870>
- Kan, H., & colaboradores. (2022). WHO global air quality guidelines 2021: Implications for public health policy — summary and commentary. *Environmental Health*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8920460/>
- Kasperson, R. E., & Kasperson, J. X. (2005). *The social contours of risk*. Earthscan.
- La Rotta Latorre, Á. M., & Torres Tovar, M. H. (2017). Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá. *Saúde Em Debate*, 41(112), 77–91. <https://doi.org/10.1590/0103-1104201711207>
- Licla Tomayro, L. R. (2021). *Evaluación de la calidad de aire en el proyecto de explotación Cantera Camucha, distrito de Morococha, provincia de Yauli, Junín* [Tesis].
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). *Estándares de calidad ambiental para aire* (D.S. 003-2017-MINAM).

- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2018). *Guía de monitoreo de calidad del aire*.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2023, 23 de noviembre). *Decreto Supremo N.º 011-2023-MINAM: Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de aire de los parámetros cadmio, arsénico y cromo en material particulado menor a diez micras (PM10)*. El peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/4880911-0011-2023-minam>
- Mohammadi, M. J., et al. (2023). Ecological and health risk assessment of heavy metals in particulate matter. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2022). *Reporte N.º 00026-2022-OEFA/DEAM-STECC: Informe de monitoreo de la calidad del aire (enero–noviembre 2022)*. OEFA. <https://repositorio.oefa.gob.pe/bitstreams/5c390d83-e93b-4348-bd74-69595ab1f2a8/download>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2022). *Informe N.º 00037-2022-OEFA/DEAM-STECC: Evaluación ambiental de seguimiento — Calidad del aire (unidad minera — 2022)*. OEFA. https://repositorio.oefa.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12788/1320/INF_00037-2022-OEFA-DEAM-STECC.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Global Air Quality Guidelines*.
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Impacto de la contaminación del aire en la salud humana*. OMS.
- Pérez, D., & Delgado, H. (2020). Percepción comunitaria del riesgo ambiental en zonas de influencia minera. *Revista de Medio Ambiente y Sociedad*, 12(2), 45–58.
- Sánchez, A. (2015). *Evaluación del riesgo ambiental: teoría y aplicación*. Universidad Nacional de Colombia.

- Sánchez, F., & Bebbington, A. (2020). *Mining, environment and society in Latin America*. Cambridge University Press.
- SINIA. (2019). *Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM: Decreto Supremo que aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire*.
www.peru.gob.pe
- Soto, F., & Villamizar, R. (2019). Factores de riesgo ambiental de origen humano. *Revista Ciencias Ambientales*, 33(1), 65–79.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2017). *Guideline on Air Quality Models (Appendix W) — Final Rule*. Federal Register. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-modeling>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2019). *User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD) (Revision for Final Rule Publication)*. EPA-454/B-16-011.
https://gaftp.epa.gov/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_userguide.pdf
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

ANEXOS

Anexo1 : Cálculo de la evaluación de riesgos

	ESCENARIOS DE RIESGOS	CONSECUENCIA ENTORNO HUMANO					CONSECUENCIA ENTORNO NATURAL						CONSECUENCIA ENTORNO SOCIOECONOMICO						
		cantidad	peligrosidad	Extensión	Calidad del medio	gravedad	Gravedad humana	cantidad	peligrosidad	Extensión	Calidad del medio	gravedad	Gravedad Natural	cantidad	peligrosidad	Extensión	Calidad del medio	gravedad	Gravedad socioeconómica
1	(E-1) Chancado, zarandeo y transferencia de mineral	3	2(3)	3	4	16	4	3	2(3)	3	4	16	4	3	2(3)	3	3	15	4
2	(E-2) Perforación, voladura y carguío de minerales	3	2(3)	3	3	15	3	3	2(3)	2	3	15	4	2	2(3)	2	3	13	3
3	(E-3) Transporte interno en vías no pavimentadas	2	2(2)	3	3	12	3	2	2(3)	3	3	12	3	2	2(2)	3	2	11	3
4	(E-4) Fuentes fijas de combustión (calderos, generadores etc.)	2	2(3)	2	3	13	3	2	2(3)	2	2	12	3	2	2(3)	2	2	12	3

Anexo 2: Calculo de la estimación del riesgo ambiental

		Consecuencia				
Probabilidad		1	2	3	4	5
	1					
	2					
	3			E-4	E-2	
	4				E-1	
	5			E-3		

	Riesgo significativo:	16-25
	Riesgo moderado:	6-15
	Riesgo leve:	1-5

ESTIMACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL ENTORNO NATURAL

		Consecuencia				
Probabilidad		1	2	3	4	5
	1					
	2					
	3			E-4	E-2	
	4				E-1	
	5			E-3		

ESTIMACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL ENTORNO SOCIO
ECONOMICO

		Consecuencia				
Probabilidad		1	2	3	4	5
	1					
	2					
	3			E-2 E-4		
	4				E-1	
	5			E-3		

Anexo 3: Estándares de calidad aire para los parámetros monitoreados

PARAMETRO	PERIODO	VALOR $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	FORMA DEL ESTANDAR	NORMATIVA
Dióxido de azufre(SO ₂)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	D.S N°003-2017- MINAN
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	
	Anual	100	Media aritmética anual	
Material particulado 10 micras(PM ₁₀)	24 hora	100	NE más de 7 veces al año	
	Anual	50	Media aritmética Anual	
Monóxido de carbono total (CO)	1 hora	30000	NE más de 2 veces al año	
	8 horas	10000	Anual	
Plomo (Pb) en PM ₁₀	Mensual	1.5	NE más de 4 veces al año	D.S N°011-2023- MINAN
	Anual	0.50	Media aritmética valores mensuales	
Arsénico (As) en PM ₁₀	24 horas	0.3	No exceder	
	Anual	0.023	Media aritmética Anual	
Cadmio (Cd) en PM ₁₀	24 horas	0.09	No exceder	
	Anual	0.018	Media aritmética Anual	
Cromo(Cr) en PM ₁₀	24 horas	0.5	No exceder	
	Anual	0.11	Media aritmética anual	

Anexo 4: Cálculo del porcentaje de riesgo ambiental

Estimador del porcentaje de riesgo ambiental

		Valor Matricial	Equivalencia (%)	Promedio (%)	
	Riesgo significativo:	16 - 25	64 - 100	82	Riesgo alto 
	Riesgo moderado:	6 - 15	24 - 60	42	
	Riesgo leve:	1 - 5	1 - 20	10.50	

Nota: En base a la norma UNE 150008-2008 Evaluación de riesgos ambientales

Anexo 5: *Tabla de valoración del porcentaje de riesgo.*

Valoración del porcentaje de riesgo			
Valor	Riesgo Leve (1–5→1% 20%)	Riesgo Moderado (6–15→ 24%– 60%)	Riesgo Significativo (16–25→64%– 100%)
1	1%		
2	5.75%		
3	10.5%		
4	15.25%		
5	20%		
6		24%	
7		28%	
8		32%	
9		36%	
10		40%	
11		44%	
12		48%	
13		52%	
14		56%	
15		60%	
16			64%
17			68%
18			72%
19			76%
20			80%
21			84%
22			88%
23			92%
24			96%
25			100%