



**Universidad
Católica de
Santa María**

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

**Evaluación de la dispersión de contaminantes atmosféricos industriales y su
impacto en la salud pública mediante modelos de tamizaje y herramientas
de la OMS en el sector del Parque Industrial, Arequipa, 2024-2026**

Tesis presentada por:

Pelinco Barreda, Mickaela Del Carmen

ORCID: 0009-0003-1259-9612

Ramos Huisa, Yanelly Isabel

ORCID: 0009-0006-7996-8429

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental

Asesora:

Dra. Bejarano Meza, María Elizabeth

ORCID: 0000-0002-4943-6097

Arequipa - Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 11 de Junio del 2026

Dictamen: 018111-C-EPIA-2026

Visto el borrador del expediente 018111, presentado por:

2018243552 - PELINCO BARREDA MICKAELA DEL CARMEN

2019702542 - RAMOS HUISA YANELY ISABEL

Titulado:

**EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS INDUSTRIALES Y SU
IMPACTO EN LA SALUD PÚBLICA MEDIANTE MODELOS DE TAMIZAJE Y HERRAMIENTAS DE LA
OMS EN EL SECTOR DEL PARQUE INDUSTRIAL, AREQUIPA, 2024-2026**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**29727348 - LAZARTE ARREDONDO SONIA
DICTAMINADOR**



**43297964 - CAMPOS OLAZAVAL LIZBETH MARIANELLA
DICTAMINADOR**



**72384055 - MEDINA RAMOS ROBERT JOAQUIN
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS INDUSTRIALES Y SU IMPACTO EN LA SALUD PÚBLICA MEDIANTE MODELOS DE TAMIZAJE Y HERRAMIENTAS DE LA OMS EN EL SECTOR DEL PARQUE INDUSTRIAL, AREQUI

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

1 %

2

Submitted to Universidad Católica de Santa
María

Trabajo del estudiante

1 %

3

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1 %

4

bdigital.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

5

www.caim2012.frba.utn.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

6

html.pdfcookie.com

Fuente de Internet

<1 %

7

Submitted to Universidad Tecnológica
Centroamericana UNITEC

Trabajo del estudiante

<1 %

8

repositorio.untels.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

9

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

10

Submitted to D.A. de Ingeniería Civil

Trabajo del estudiante

<1 %

Dedicatoria

A mi querido padre, Edwin Pelinco, por ser la raíz silenciosa de todo lo que soy y de todo lo que construyo. Por enseñarme que la verdadera fortaleza no hace ruido, pero permanece firme en lo constante. En cada logro mío habita algo de ti; en cada paso que doy, se refleja tu ejemplo y tu manera de enfrentar la vida; y en cada momento de duda, encuentro el eco de tu enseñanza más profunda: rendirse nunca ha sido una opción.

A mi querida madre, Denina Barreda, por ser mi fuerza constante, guía sabia y refugio en lo incierto; este logro lleva tu esencia, porque en cada paso que doy vive tu forma de cuidarme, creer en mí y sostenerme con tu presencia firme; Gracias por enseñarme que incluso en la incertidumbre siempre es posible encontrar un camino.

A mi gata Vakira, por su compañía silenciosa y por la tranquilidad que transmite con su sola presencia. En los momentos más intensos, ha sido un recordatorio de que la calma también se encuentra en lo sencillo.

Mickaela del Carmen Pelinco Barreda

A mi amada mamá, Leandra, gracias por tu amor incondicional, por estar siempre a mi lado, impulsándome en cada momento. Tu fortaleza y dedicación han sido mi motor en esta etapa.

A mi querido papá, Nicolás, quien con su incansable trabajo y esfuerzo ha sido un pilar fundamental. Valoro cada sacrificio que hiciste para que hoy pueda alcanzar esta meta.

A mi querido hermano, Josué, gracias por ser mi compañero incondicional, por creer en mí y darme fuerzas cuando más lo necesitaba.

A mi abuelita, Isabel, quien siempre estuvo presente con su cariño y sabiduría. Aunque no pueda estar aquí hoy, su amor y enseñanzas me acompañan en cada paso.

Yanely Isabel Ramos Huisa

Agradecimientos

A Dios, principio y sostén de toda sabiduría, por guiar este proceso de formación incluso en los momentos en que la certeza parecía lejana. Cada esfuerzo y cada logro han sido posibles por su voluntad y misericordia. A Él expreso mi profunda gratitud, como expresión de su propósito en mi vida. “Porque de él, y por él, y para él, son todas las cosas” (Romanos 11:36).

A mi familia, por su presencia constante, su apoyo y cariño, y por ser parte fundamental de mi formación, brindándome fuerza y motivación para seguir adelante en cada etapa.

A los docentes en general, por su dedicación en la revisión y evaluación de este trabajo. También a quienes nos brindaron apoyo y orientación durante el proceso.

A mi amiga y compañera de investigación, Yanely, por su apoyo constante y su valiosa compañía. Su colaboración y compromiso permitieron avanzar con mayor claridad, fortaleciendo el sentido compartido de este trabajo.

Mickaela del Carmen Pelinco Barreda

Primero, quiero agradecer a Dios, quien me ha dado la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia para superar los retos de este camino.

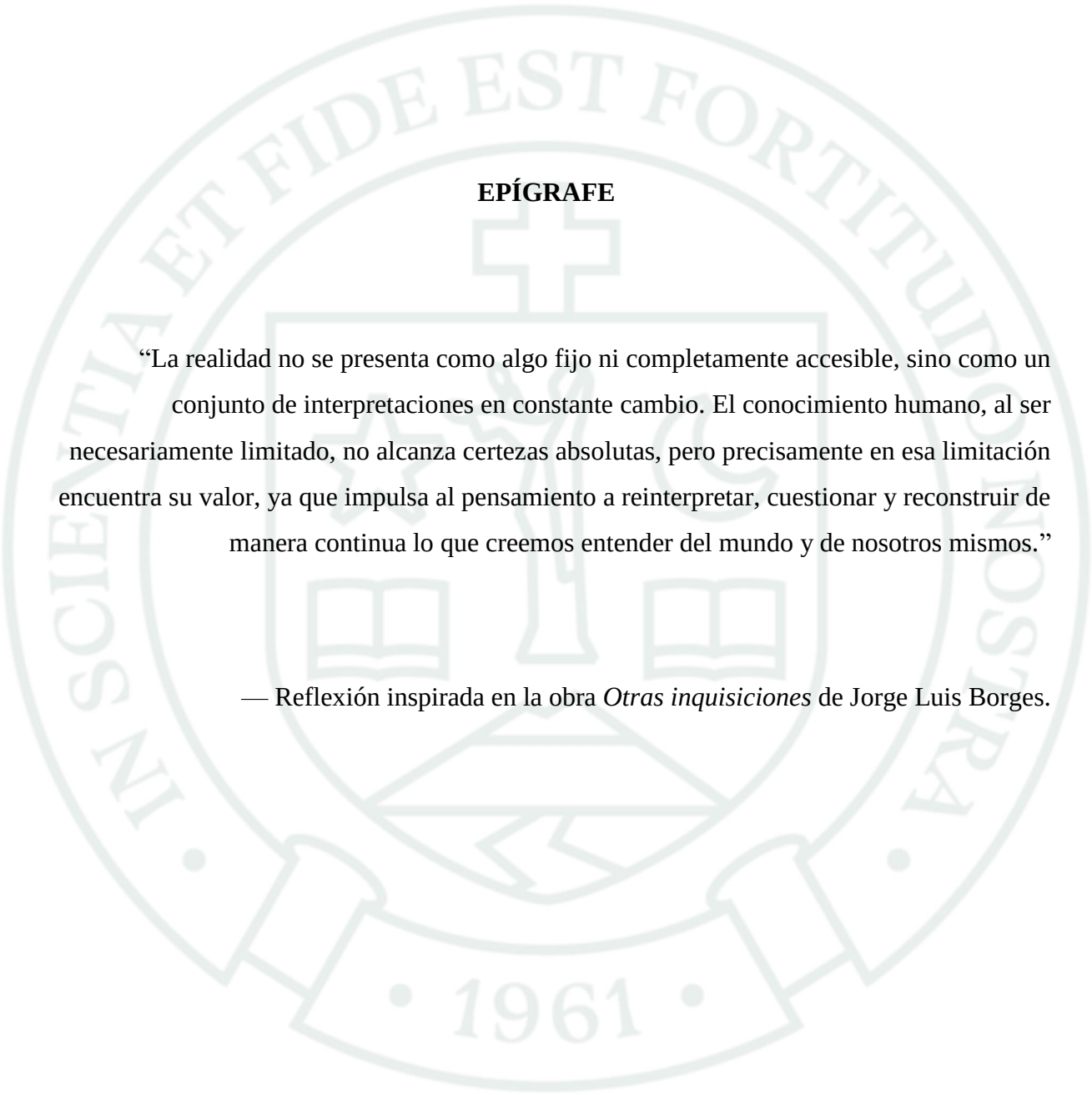
A la Universidad Católica de Santa María, por ofrecerme un entorno académico de excelencia, donde pude desarrollar mis habilidades y crecer tanto profesional como personalmente.

A mi familia y seres queridos, quienes, con su amor incondicional, su apoyo constante y sus sacrificios, hicieron posible que hoy esté aquí.

A los docentes a quienes acudimos para resolver nuestras dudas, por su apoyo y disposición para ayudarnos durante el desarrollo de este trabajo.

A mi amiga Mickaela, por ser una compañera invaluable, por su apoyo constante, su lealtad y su alegría. Juntas hemos compartido sueños, retos y alegrías, y me siento muy agradecida de haberla tenido a mi lado en este camino.

Yanely Isabel Ramos Huisa



EPÍGRAFE

“La realidad no se presenta como algo fijo ni completamente accesible, sino como un conjunto de interpretaciones en constante cambio. El conocimiento humano, al ser necesariamente limitado, no alcanza certezas absolutas, pero precisamente en esa limitación encuentra su valor, ya que impulsa al pensamiento a reinterpretar, cuestionar y reconstruir de manera continua lo que creemos entender del mundo y de nosotros mismos.”

— Reflexión inspirada en la obra *Otras inquisiciones* de Jorge Luis Borges.

RESUMEN

La presente investigación evaluó la dispersión de contaminantes atmosféricos industriales y su impacto sanitario en el sector del Parque Industrial de Arequipa durante el periodo 2024-2026. El estudio, de tipo aplicado y nivel descriptivo-explicativo, integró el modelamiento físico mediante el software AERSCREEN con la herramienta epidemiológica AirQ+ de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Se construyó un inventario de emisiones basado en factores de emisión EPA AP-42, identificando al clúster paplero y textil como la principal fuente de carga contaminante debido al uso de Petróleo Residual 500.

Los resultados indicaron que, si bien el dióxido de azufre (SO₂) cumple con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), el material particulado (PM₁₀) alcanzó una concentración acumulada crítica de 110,0 microgramos por metro cúbico (resultado de sumar el nivel de fondo urbano de 82,0 µg/m³ con el aporte industrial máximo de 28,0 µg/m³), superando el límite legal nacional. Este impacto se localiza en un radio inferior a 500 metros de las fuentes emisoras debido al efecto de succión mecánica o downwash.

En el ámbito sanitario, se identificó una carga de enfermedad total en la cuenca de 1077 DALYs para mortalidad adulta. Mediante un análisis de prorrateo por contribución de masa (28/110 µg/m³, equivalente al 25.5 %), se determinó que la responsabilidad específica del clúster industrial es de 27 casos anuales de mortalidad en exceso y 275 años de vida ajustados por discapacidad (DALYs), operando como un factor incremental crítico sobre una base urbana saturada.

Se concluye que la transición energética hacia gas natural constituye la mejor Tecnología Disponible (BAT) para mitigar esta carga de enfermedad.

Palabras clave: Dispersión atmosférica, Salud pública, AirQ+.

ABSTRACT

The present research evaluated the dispersion of industrial air pollutants and their health impacts in the Industrial Park sector of Arequipa during the 2024–2026 period. This applied study integrated physical dispersion modeling using the AERSCREEN software with the World Health Organization's AirQ+ epidemiological tool. An emission inventory based on EPA AP-42 emission factors was developed, identifying the paper and textile cluster as the primary source of pollutant load due to the use of Residual 500 fuel oil.

The physical modeling results indicated that, while sulfur dioxide complies with the Environmental Quality Standards, particulate matter reached critical concentrations of 110.0 micrograms per cubic meter, exceeding the national legal limit. This impact is localized within a radius of less than 500 meters from the emission sources due to the mechanical suction effect, or downwash.

From a public health perspective, an overall attributable fraction between 12% and 15% was estimated for adult mortality associated with cumulative exposure, considering both urban background levels and the industrial contribution. When the impact was prorated to isolate the industrial component, it was estimated to account for approximately 25 to 30 excess deaths per year and about 276 disability-adjusted life years (DALYs).

It is concluded that the transition to natural gas represents the Best Available Technique to mitigate the identified disease burden.

Keywords: Atmospheric dispersion, Public health, AirQ+.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPIGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Problemática de la investigación.....	3
1.2. Justificación de la investigación	6
1.2.1. Justificación Ambiental	6
1.2.2. Justificación Social	6
1.2.3. Justificación Económica	6
1.3. Objetivos de la Investigación.....	7
1.3.1. Objetivo General	7
1.3.2. Objetivos Específicos.....	7
1.4. Hipótesis	8
CAPÍTULO II	9
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes de la Investigación	9
2.2. Marco Teórico	14
2.2.1. Contaminación atmosférica y dinámica de emisión en fuentes fijas	14
2.2.2. Fundamentos de la química atmosférica.....	15
2.2.3. Caracterización y comportamiento de contaminantes críticos	17
2.2.4. Clasificación de los gases	19

2.2.5. Toxicología, epidemiología ambiental y evaluación de carga de enfermedad	19
2.2.6. Dinámica atmosférica y factores de dispersión en Arequipa	22
2.2.7. Fundamentos matemáticos del modelamiento de dispersión	24
2.3. Marco legal.....	26
CAPÍTULO III	28
3. METODOLOGÍA	28
3.1. Tipo de Investigación	28
3.2. Diseño de la investigación	28
3.2.1. Población y Muestra.....	28
3.2.2. Enfoque de Investigación.....	32
3.2.3. Fuentes de Información	32
3.2.4. Técnicas de Investigación	32
3.2.5. Instrumentos de Investigación	33
3.2.6. Variables e indicadores.....	38
3.2.7. Descripción de la investigación	39
CAPÍTULO IV	55
4. RESULTADOS.....	55
4.1. Antecedentes del sector industrial evaluado.....	55
4.1.1. Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas.....	57
4.1.2. Caracterización Técnica de las Fuentes	57
4.1.3. Estimación de Tasas de Emisión (g/s).....	58
4.1.4. Análisis de Incertidumbre y Escenario Proyectivo 2026	59
4.2. Modelado de la dispersión atmosférica	62
4.2.1. Configuración del escenario meteorológico y parámetros de control	62
4.2.2. Caracterización de fuentes fijas y dinámica de ascenso (Briggs).....	62
4.2.3. Análisis de las curvas de decaimiento: Concentración vs. Distancia.....	64

4.2.4.	Evaluación multitemporal y cumplimiento normativo (ECA).....	65
4.2.5.	Distribución espacial del impacto	66
4.2.6.	Análisis de susceptibilidad al efecto Downwash y escenario crítico	67
4.2.7.	Dispersión espacial de Material Particulado (PM ₁₀).....	67
4.2.8.	Concentraciones máximas de PM ₁₀ y contraste normativo.....	69
4.2.9.	Análisis del gradiente de decaimiento longitudinal para PM ₁₀	71
4.3.	Evaluación del impacto en la salud pública	72
4.3.1.	Parametrización epidemiológica y demográfica.....	73
4.3.2.	Evaluación de riesgo y carga de enfermedad atribuible.....	74
4.3.3.	Comparativa de niveles de exposición y brecha sanitaria	76
4.3.4.	Análisis visual de impacto y brecha de protección.....	77
4.4.	Evaluación de la relación técnica y estrategias ambientales	80
4.4.1.	Trazabilidad del riesgo y focalización de la intervención.....	81
4.4.2.	Evaluación Multicriterio de Mejores Tecnologías Disponibles (BAT).....	83
4.4.3.	Lineamientos estratégicos para la cuenca de Arequipa.....	86
4.4.4.	Estrategias de Control Tecnológico en la Fuente	87
4.4.5.	Optimización de la Infraestructura de Emisión y Dispersión.....	88
4.4.6.	Gestión del Cambio de Matriz Energética como Solución Integral	88
4.4.7.	Evaluación del Escenario Mitigado y Beneficios en Salud Pública	89
CAPÍTULO V		90
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
5.1.	Conclusiones	90
5.2.	Recomendaciones	91
REFERENCIAS		92

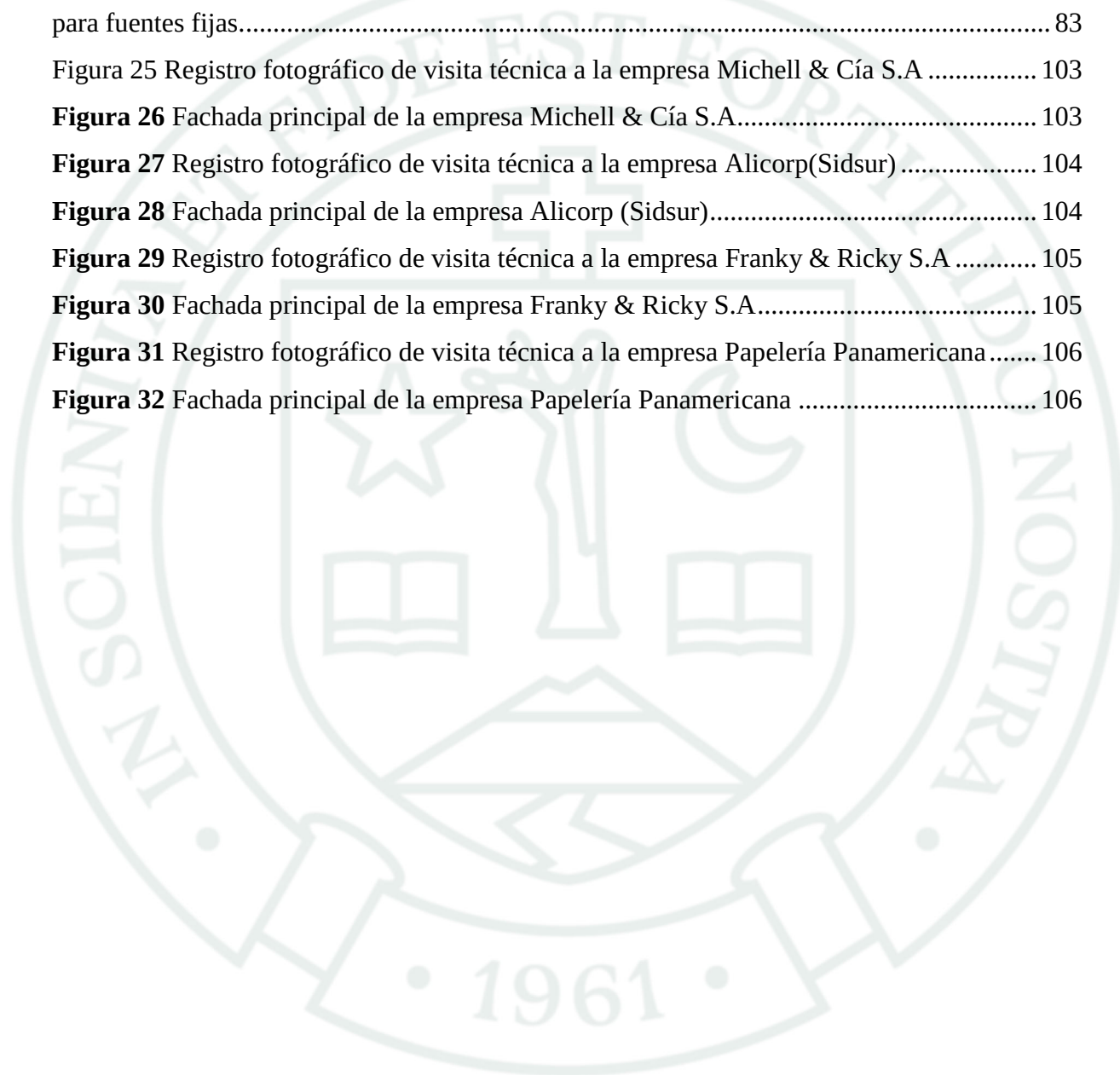
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros técnicos y operativos de las fuentes fijas industriales seleccionadas	30
Tabla 2 Matriz de Operacionalización de Variables	38
Tabla 3 Parámetros meteorológicos base - Estación La Pampilla.....	48
Tabla 4 Inventario de emisiones masivas de SO ₂ y PM ₁₀ (Escenario Base 2024-2025).....	58
Tabla 5 Escenarios de emisión proyectados y rangos de incertidumbre.	60
Tabla 6 Parámetros técnicos de emisión y cálculo del ascenso de pluma en fuentes fijas.	62
Tabla 7 Concentraciones máximas estimadas por periodos y contraste con el ECA Aire (SO ₂).	65
Tabla 8 Concentraciones máximas estimadas y cumplimiento de los ECA Aire (PM ₁₀).	69
Tabla 9 Indicadores de Salud Pública base (GERESA Arequipa)	72
Tabla 10 Parámetros epidemiológicos de entrada para el modelo AirQ+ (Escenario 2026). .	73
Tabla 11 Cuantificación de la Carga de Enfermedad (DALYs) y casos atribuibles por PM ₁₀	75
Tabla 12 Contraste de concentraciones máximas estimadas (POI) vs. estándares internacionales.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de georreferenciación de fuentes fijas y delimitación del polígono de estudio (66 Ha).....	31
Figura 2 Interfaz de configuración de parámetros de la fuente fija y tasas de emisión (g/s)..	33
Figura 3 Configuración de rugosidad superficial y generación de meteorología de 'peor escenario'.....	33
Figura 4 Reporte de salida del modelo mostrando la concentración máxima estimada en el POI.....	34
Figura 5 Carga de datos demográficos y epidemiológicos de base para el área de influencia.....	35
Figura 6 Definición de funciones de riesgo y parámetros de exposición para el cálculo de impacto.....	35
Figura 7 Resumen de indicadores de impacto sanitario y cuantificación de DALYs anuales.....	36
Figura 8 Panel de georreferenciación satelital de las fuentes fijas industriales evaluadas	37
Figura 9 Flujograma metodológico de la investigación.....	37
Figura 10 Diagrama de flujo de la metodología de dispersión.....	42
Figura 11 Esquema Metodologico Obj. 2	47
Figura 12 Esquema metodológico Obj. 3.....	51
Figura 13 Esquema metodológico Obj. 4.....	54
Figura 14 Análisis comparativo de escenarios de emisión de SO ₂ y PM ₁₀ en el Parque Industrial.....	61
Figura 15 Perfiles de concentración de SO ₂ a nivel del suelo en función de la distancia desde la fuente emisora.....	64
Figura 16 Distribución espacial de las concentraciones de SO ₂ : (a) Franky & Ricky, (b) Papelera Panamericana, (c) Michell & Cía, y (d) Alicorp.....	66
Figura 17 Distribución espacial de las concentraciones de PM ₁₀ : (a) Franky & Ricky, (b) Papelera Panamericana, (c) Michell & Cía, y (d) Alicorp.....	67
Figura 18 Perfiles de dispersión longitudinal de PM ₁₀ (promedio 24h) y localización de los puntos de máxima inmisión.....	71
Figura 19 Comparativa de concentraciones máximas (POI) frente a normativas nacionales e internacionales.....	77
Figura 20 Análisis multivariado del impacto sanitario por PM ₁₀ en el área de estudio.....	78

Figura 21 Carga de Enfermedad (DALYs) atribuible al PM ₁₀ en población vulnerable.	79
Figura 22 Evaluación epidemiológica de la exposición a SO ₂ en la población del Cercado y JLByR.....	79
Figura 23 Diagrama de Sankey de trazabilidad ambiental: Flujo desde las fuentes de emisión hasta la carga de enfermedad (DALYs).	81
Figura 24 Análisis Multicriterio (MCDA) de las Mejores Tecnologías Disponibles (BAT) para fuentes fijas.....	83
Figura 25 Registro fotográfico de visita técnica a la empresa Michell & Cía S.A	103
Figura 26 Fachada principal de la empresa Michell & Cía S.A.....	103
Figura 27 Registro fotográfico de visita técnica a la empresa Alicorp(Sidsur)	104
Figura 28 Fachada principal de la empresa Alicorp (Sidsur).....	104
Figura 29 Registro fotográfico de visita técnica a la empresa Franky & Ricky S.A	105
Figura 30 Fachada principal de la empresa Franky & Ricky S.A.....	105
Figura 31 Registro fotográfico de visita técnica a la empresa Papelería Panamericana	106
Figura 32 Fachada principal de la empresa Papelería Panamericana	106



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Hoja de Datos de Seguridad del Petróleo Residual R-500	101
Anexo 2 Registro fotográfico de visitas técnicas a empresas evaluadas.....	103
Anexo 3 Rosa de Vientos de la Estación La Pampilla (SENAMHI)	107



INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la contaminación atmosférica se reconoce como uno de los riesgos ambientales más críticos para la salud pública, siendo las fuentes fijas industriales responsables de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales. Las actividades industriales que dependen de procesos de combustión liberan de manera constante una mezcla compleja de Dióxido de Azufre (SO_2) y Material Particulado (PM_{10}), los cuales alteran la composición química de la atmósfera a escala local. La comprensión de estos fenómenos requiere el uso de modelos de dispersión basados en la pluma gaussiana para predecir concentraciones ambientales y patrones de distribución espacial. Según Gurjar y Ratan (2025), este enfoque permite resolver de manera efectiva la ecuación de advección-difusión para emisiones continuas, facilitando la gestión regulatoria.

Sin embargo, la modelación física suele presentarse como un análisis aislado si no se vincula con las consecuencias biológicas en las poblaciones receptoras. Por ello, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha impulsado herramientas como AirQ+ para cerrar la brecha entre la concentración de aire y la carga de enfermedad resultante. Autores como Amini et al. (2024) destacan que la aplicación exitosa de estos instrumentos depende de la disponibilidad de datos de entrada precisos, lo cual sigue siendo un desafío en países en desarrollo. En este sentido, O et al. (2025) sostienen que la integración de modelos físicos con técnicas de análisis de datos masivos es el camino necesario para una gestión ambiental predictiva.

En el contexto de Arequipa, la problemática se agudiza debido a una topografía compleja y condiciones de inversión térmica que limitan la dispersión natural. Investigaciones de Sekula et al. (2022) y Poulidis et al. (2024) confirman que en valles accidentados, estas inversiones atrapan las emisiones industriales, elevando drásticamente las concentraciones por encima de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). A pesar de esta realidad, actualmente no se dispone de evaluaciones que utilicen modelos de tamizaje como AERSCREEN para estimar riesgos de salud específicos en función de la distancia a las fuentes del Parque Industrial. Emerson y Khan (2025) coinciden en que este tipo de evaluación de "peor escenario" es esencial para identificar riesgos antes de proceder con análisis más exhaustivos.

La exposición prolongada a estos contaminantes representa una amenaza directa para la salud respiratoria. Estudios de Chen et al. (2024) y Jakhar et al. (2025) señalan que el material

particulado penetra profundamente en el sistema respiratorio, induciendo daño celular mediante estrés oxidativo e inflamación sistémica. Epidemiológicamente, Liu et al. (2025) y Orellano et al. (2024) sostienen que existe una asociación robusta entre la exposición a partículas y la mortalidad cardiovascular a largo plazo. En consecuencia, investigadores como Nakhjirgan et al. (2025) y Simões et al. (2025) subrayan la importancia de cuantificar estas muertes evitables para justificar técnicamente las medidas de control ambiental en sectores industriales densamente poblados.

Bajo este panorama, la presente investigación integra el modelamiento de dispersión física con la epidemiología cuantitativa. Se busca no solo caracterizar las emisiones del clúster papelerero y textil mediante factores AP-42 de la EPA, sino también proponer lineamientos estratégicos basados en Mejores Tecnologías Disponibles (BAT). De acuerdo con Tong et al. (2025) y Adewale et al. (2025), la transición hacia combustibles más limpios y la optimización de procesos térmicos son las vías más eficientes para reducir la morbilidad infantil detectada localmente por la GERESA y garantizar la sostenibilidad del aire en la cuenca del Chili.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

A nivel mundial, la contaminación atmosférica se reconoce como uno de los riesgos ambientales más críticos para la salud pública, siendo las fuentes fijas industriales responsables de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales. Las actividades industriales que dependen de procesos de combustión en calderas, hornos y generadores liberan de manera constante una mezcla compleja de contaminantes que incluye Dióxido de Azufre (SO_2), Material Particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) y diversos metales pesados, los cuales tienen la capacidad de alterar la composición química de la atmósfera tanto a escala local como regional (Adewale et al., 2025). En el campo de la ingeniería ambiental, la comprensión de estos fenómenos requiere el uso de modelos de dispersión basados en principios físicos y matemáticos, como la pluma gaussiana, que permiten simular el comportamiento de las emisiones considerando variables meteorológicas y topográficas para predecir concentraciones ambientales y patrones de distribución en el espacio (Salih et al., 2025; Bayraktar & Mutlu, 2024).

Sin embargo, la modelación física de contaminantes suele presentarse como un análisis aislado si no se vincula directamente con las consecuencias biológicas y sociales en las poblaciones receptoras. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha impulsado el desarrollo de herramientas epidemiológicas avanzadas como AirQ y AirQ+ para cerrar la brecha entre la concentración de contaminantes en el aire y la carga de enfermedad resultante. A pesar de que estos instrumentos han demostrado su eficacia durante las últimas dos décadas para cuantificar riesgos de mortalidad y morbilidad, su aplicación exitosa depende críticamente de la disponibilidad y el reporte riguroso de datos de entrada precisos, lo cual sigue siendo un desafío en países en vías de desarrollo (Amini et al., 2024). La tendencia actual en la investigación sugiere que la integración de modelos de dispersión física con técnicas de análisis intelectual y procesamiento de datos masivos es el camino necesario para una gestión ambiental predictiva y eficiente (O et al., 2025).

En el contexto específico de Arequipa, Perú, la problemática se agudiza debido a una combinación de factores geográficos y un crecimiento industrial acelerado en el sector específico del Parque Industrial en el Cercado. La ciudad se caracteriza por una topografía compleja y condiciones de inversión térmica que limitan la dispersión natural de los contaminantes. Aunque existen esfuerzos de monitoreo por parte de entidades estatales, se identifica una carencia de estudios técnicos que conecten las emisiones industriales específicas con los riesgos a la salud de los habitantes arequipeños. Actualmente, no se dispone de evaluaciones que utilicen modelos de tamizaje optimizados para estimar la probabilidad de enfermedades respiratorias o cáncer en función de la distancia a las fuentes industriales, lo que deja a las autoridades sin herramientas científicas para diseñar planes de contingencia o zonificación basados en el riesgo real (Bayraktar & Mutlu, 2024; Amini et al., 2024). La exposición prolongada a estos contaminantes sin una estrategia de mitigación clara representa una amenaza directa para la salud respiratoria de miles de ciudadanos (Chen et al., 2024).

En el ámbito local, la situación de la cuenca atmosférica de Arequipa es crítica debido a la densidad de actividades industriales concentradas en zonas urbanas. De acuerdo con el Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas de la Cuenca Atmosférica de Arequipa, se han identificado 15 categorías de fuentes puntuales industriales activas, que incluyen sectores de fabricación de productos textiles, cerámicos, alimentos y fundición, las cuales operan predominantemente con combustibles fósiles como Residual 6 y Diesel B5 (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2021). Informes técnicos del Plan de Acción para la Mejora de la Calidad del Aire revelan que en estaciones de monitoreo cercanas al Cercado y distritos industriales, las concentraciones de PM_{10} superan frecuentemente los $100 \mu g/m^3$ (límite diario de los ECA), registrando picos de hasta $110 \mu g/m^3$ en periodos de baja dispersión (Municipalidad Provincial de Arequipa, 2021; Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2025).

Esta carga contaminante tiene un correlato directo en la salud pública regional. Según el Boletín Epidemiológico de la GERESA Arequipa, solo en la semana epidemiológica 14 de 2025 se notificaron 1,815 casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRAs) en niños menores de cinco años (Gerencia Regional de Salud [GERESA] Arequipa, 2025). La incidencia en distritos colindantes al sector industrial alcanza niveles de hasta 112 casos por cada 1,000 niños, evidenciando que la exposición a las emisiones del Parque Industrial representa un riesgo sanitario latente que no ha sido cuantificado mediante modelos de tamizaje hasta la fecha (GERESA Arequipa, 2025).

La delimitación espacial de esta investigación comprende el sector del Parque Industrial, ubicado en el Cercado de Arequipa, debido a su alta densidad de fuentes fijas y su proximidad a zonas residenciales consolidadas y distritos aledaños como José Luis Bustamante y Rivero. En cuanto a la delimitación temporal, se define bajo un enfoque de escenario base y escenario proyectivo. El periodo 2024-2025 se establece como el escenario base de carácter retrospectivo, utilizando datos meteorológicos y operativos reales y validados para garantizar la solidez técnica del modelo. Complementariamente, el periodo 2026 se define como un escenario proyectivo de sensibilidad, permitiendo estimar el impacto potencial y la persistencia del riesgo sanitario ante la continuidad de las tasas de emisión industrial.

1.2. Justificación de la investigación

1.2.1. Justificación Ambiental

La finalidad ambiental de este estudio es determinar el comportamiento físico de los contaminantes emitidos por fuentes industriales fijas en Arequipa. La relevancia radica en que el uso de modelos de dispersión de pluma gaussiana, como AERSCREEN, permite predecir con alta precisión las concentraciones y patrones espaciales de contaminantes como el SO₂ y el material particulado. El aporte técnico principal consiste en identificar las distancias críticas donde se producen las máximas concentraciones, facilitando la comparación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) vigentes. Este análisis es vital para la protección del entorno natural en áreas de expansión urbana e industrial de la provincia.

1.2.2. Justificación Social

Esta investigación busca generar un impacto positivo directo en la salud pública de los residentes aledaños a las zonas industriales de Arequipa. La aplicación de las herramientas AirQ y AirQ+ de la Organización Mundial de la Salud (OMS) permite transformar datos técnicos de ingeniería en indicadores de salud humana, evaluando riesgos de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Los beneficiarios directos son los ciudadanos del Cercado de Arequipa y distritos colindantes impactados, quienes contarán con un estudio que visibiliza la carga de enfermedad respiratoria atribuible a la exposición industrial.

1.2.3. Justificación Económica

Desde una perspectiva económica, la investigación propone una metodología optimizada que reduce significativamente los costos de evaluación ambiental. Al emplear modelos matemáticos y análisis intelectual mediante software gratuito (AERSCREEN y AirQ+), se evita la dependencia de costosas redes de monitoreo físico permanente en cada chimenea industrial. Además, el uso de programación en Python para automatizar el procesamiento de múltiples escenarios meteorológicos permite avanzar con rapidez y precisión técnica en el análisis de datos masivos.

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la dispersión de SO₂ y PM₁₀ emitidos por fuentes fijas industriales del Parque Industrial de Arequipa y estimar su impacto en la salud pública mediante AERSCREEN y AirQ+, considerando un escenario base (2024–2025) y un escenario proyectivo (2026).

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estimar las tasas de emisión de SO₂ y PM₁₀ de las fuentes fijas seleccionadas del Parque Industrial de Arequipa mediante factores de emisión AP-42 (EPA), para construir el inventario de emisiones del escenario base (2024–2025) y el escenario proyectivo (2026).
- Modelar la dispersión de SO₂ y PM₁₀ mediante AERSCREEN para estimar las concentraciones máximas (horaria y diaria) y determinar el punto/distancia de máximo impacto (POI) en el área de estudio.
- Cuantificar el impacto sanitario asociado a las concentraciones estimadas de SO₂ y PM₁₀ mediante AirQ+ (OMS), calculando indicadores como riesgo relativo (RR), fracción atribuible (AP%) y casos en exceso de morbilidad y mortalidad seleccionadas para la población del área de influencia.
- Comparar las concentraciones máximas estimadas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire y relacionar los niveles de cumplimiento/incumplimiento con los resultados de riesgo en salud, a fin de proponer medidas de gestión y mitigación ambiental aplicables al sector industrial.

1.4. Hipótesis

Si las emisiones industriales de SO_2 y PM_{10} del sector Parque Industrial (Arequipa) modeladas con AERSCREEN generan concentraciones máximas que superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de aire, entonces el cálculo con AirQ+ mostrará un incremento significativo y cuantificable del riesgo de morbilidad y mortalidad respiratoria en la población del área de influencia durante 2024–2026.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

En el ámbito de la ingeniería ambiental, la predicción del comportamiento de contaminantes como el Dióxido de Azufre (SO_2) y el Material Particulado (PM_{10}) emitidos por chimeneas industriales se fundamenta predominantemente en el modelo gaussiano. Según explican Gurjar y Ratan (2025), este enfoque permite resolver de manera efectiva la ecuación de advección-difusión para emisiones continuas, lo que facilita la predicción de concentraciones ambientales en función de variables críticas como la distancia a la fuente, la altura de la chimenea, la estabilidad atmosférica y la velocidad del viento. Por su parte, Salih, Hassan y Abdulmajeed (2025) sostienen que el modelo de pluma gaussiana sigue siendo el método estándar y suficiente para evaluaciones de carácter regulatorio, especialmente cuando se trata de contaminantes primarios en los que las reacciones químicas atmosféricas son limitadas.

Dentro de esta familia de modelos, se distingue entre herramientas de tamizaje y modelos detallados. O et al. (2025) y Emerson y Khan (2025) coinciden en que AERSCREEN se posiciona como un modelo de "screening" de fuente puntual única que utiliza meteorología genérica para estimar de manera conservadora el "peor escenario" de contaminación. Este tipo de evaluación preliminar es esencial para identificar escenarios de mayor riesgo; tal como indican Bayraktar y Mutlu (2024) y Lang et al. (2024), si los resultados de AERSCREEN sugieren una superación de las normas de calidad de aire, es imperativo proceder con un análisis más exhaustivo mediante modelos refinados como AERMOD.

La literatura científica también pone énfasis en la importancia de la calidad de los datos de entrada para garantizar la fiabilidad de las simulaciones. Adewale et al. (2025) y Bayraktar y Mutlu (2024) destacan en sus respectivas investigaciones que el desarrollo de un inventario de emisiones realista debe contemplar múltiples escenarios operativos industriales y no limitarse únicamente a las tasas de emisión máximas permitidas. En lo que respecta a la meteorología, Emerson y Khan (2025) proponen ir más allá de los modelos determinísticos, sugiriendo enfoques probabilísticos de tamizaje para las entradas de emisiones en AERMOD, mientras que Bayraktar y Mutlu (2024) demuestran que el

acoplamiento de AERMOD con parámetros físicos de modelos meteorológicos avanzados como WRF mejora sustancialmente el realismo de la dispersión de contaminantes.

La validación de estos modelos mediante mediciones reales es otro punto de debate recurrente en la comunidad científica. En este sentido, Cichowicz y Dobrzański (2022) realizaron un análisis exhaustivo alrededor de plantas de cogeneración, comparando mediciones físicas frente a simulaciones computacionales y confirmando la utilidad de estas últimas para la gestión ambiental. Hallazgos similares fueron reportados por Michael (2021) en estudios de refinación artesanal y por Salva et al. (2021), quienes utilizaron AERMOD para evaluar la contribución de fuentes móviles al material particulado, reforzando la versatilidad del modelo para diferentes tipos de fuentes de emisión.

En una investigación reciente, Prasad et al. (2024) se propusieron validar la precisión del modelo AERMOD para la estimación de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en un complejo minero de carbón de gran escala. Mediante una metodología de evaluación multifuente que comparó datos simulados con mediciones reales, el estudio reportó coeficientes de determinación (R^2) situados entre 0.38 y 0.56 para dominios regionales extensos. Los resultados demostraron que, si bien el modelo es altamente confiable para promedios de 24 horas, puede presentar variaciones de $\pm 10\text{--}40\%$ en los picos de concentración horaria, lo que subraya la importancia de considerar la incertidumbre en modelos de dispersión.

Finalmente, Gavrila et al. (2025) evaluaron las tendencias de dispersión de emisiones de fuentes municipales para determinar sus implicaciones ambientales locales. La metodología empleó modelos de dispersión configurados bajo escenarios de 'peor caso', considerando velocidades de viento bajas y atmósferas estables. El estudio demostró que la combinación de vientos de 1.0 m/s con condiciones de estabilidad atmosférica neutral a estable es la técnica estándar necesaria para forzar la acumulación crítica de contaminantes en las zonas inmediatas a la fuente emisora.

Finalmente, es importante reconocer las limitaciones de estos enfoques ante escenarios geográficos complejos. Ciepiela, Sobczyk y Sobczyk (2025) advierten que en terrenos y meteorologías complicadas, los modelos gaussianos tradicionales pueden perder precisión, lo que ha llevado a investigadores como Ioannidis et al. (2024) y Lin et al. (2023) a proponer el uso de modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar la dispersión

en cañones urbanos o entornos con topografía muy accidentada. No obstante, para la escala de fuentes industriales fijas, el uso de AERSCREEN y AERMOD se mantiene como la práctica más sólida y defendible.

El segundo pilar de esta investigación se centra en traducir las concentraciones atmosféricas en impactos tangibles para la población. En este campo, la herramienta AirQ+ de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se ha consolidado como el estándar internacional. Amini et al. (2024), tras revisar dos décadas de evaluaciones de riesgo, señalan que estas herramientas han proporcionado conocimientos invaluable, aunque insisten en la necesidad de mejorar el reporte de los datos de entrada para obtener resultados más precisos.

Por otro lado, Nakhjirgan et al. (2025) exploraron aplicaciones avanzadas del software AirQ+ para evaluar la morbilidad y mortalidad en zonas altamente industrializadas. La investigación se centró en cuantificar los riesgos sanitarios asociados a la exposición crónica en entornos con alta densidad de focos emisores. Sus hallazgos revelaron que concentraciones contaminantes persistentes derivan en cientos de muertes prematuras anuales vinculadas directamente a la exposición a largo plazo, validando la capacidad del software para traducir indicadores de ingeniería en impactos tangibles de salud pública.

En el ámbito de la epidemiología cuantitativa, Lu et al. (2025) analizaron la asociación entre la exposición de corto plazo y la mortalidad por enfermedades respiratorias mediante un estudio de casos cruzados en Hefei, China. La metodología permitió identificar riesgos biológicos específicos ante incrementos marginales en la carga contaminante del aire. Los autores concluyeron que elevaciones de apenas $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de partículas a corto plazo se asocian con aumentos de hasta 1.3% en la mortalidad respiratoria, resaltando la sensibilidad de la población ante picos de contaminación.

La funcionalidad de AirQ+ es amplia, permitiendo estimar la fracción atribuible (AP%), el número de casos en exceso y el riesgo relativo (RR) para diversos contaminantes y desenlaces de salud. Investigadores como Nakhjirgan et al. (2025), Arregocés et al. (2023) y Bouchriti et al. (2023) detallan que el software es capaz de modelar efectos tanto a corto como a largo plazo de $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} y NO_2 , abarcando desde mortalidad total hasta enfermedades específicas como cáncer de pulmón, infecciones respiratorias agudas y enfermedades cardiovasculares. Para lograrlo, el software requiere series de concentración, datos poblacionales estratificados por edad y tasas de incidencia o mortalidad de base,

utilizando modelos log-lineales que son consistentes con las revisiones sistemáticas más recientes de la OMS sobre la relación entre contaminantes y mortalidad, según sostienen Simões et al. (2025), Kasdagli et al. (2024) y Orellano et al. (2024). Los resultados de la aplicación de AirQ+ en diversas regiones del mundo ilustran la magnitud del problema ambiental. Por ejemplo, en Portugal, Simões et al. (2025) estimaron más de 5,000 muertes anuales atribuibles a PM_{2.5} y NO₂ entre 2010 y 2021, observando además cómo la pandemia de COVID-19 alteró estas relaciones. En la región del Caribe norte de Colombia, Arregocés, Rojano y Restrepo (2023) encontraron que el material particulado es responsable de aproximadamente un 26.6% de las cardiopatías isquémicas y un 11.6% de las infecciones respiratorias agudas inferiores (ALRI) infantiles. En otros contextos, como en Mashhad (Irán), Naimi et al. (2024) reportaron un incremento en la mortalidad por causas naturales atribuible a PM_{2.5}, pasando de 2,093 muertes en 2016 a 2,750 en 2021 en la población mayor de 30 años. Asimismo, Isaifan (2023) calculó que en estados altamente poblados del Medio Oriente, la exposición crónica a contaminantes causó más de 152,000 muertes en un solo año.

La evidencia científica sobre la relación entre contaminación y salud es particularmente robusta en lo que respecta a la mortalidad a largo plazo. Liu et al. (2025) y Orellano et al. (2024) sostienen que existe una asociación consistente entre la exposición prolongada a partículas finas y la mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares. En cuanto a la morbilidad, Forastiere et al. (2024) subrayan la importancia de elegir adecuadamente las funciones concentración-respuesta (CRF) para resultados como asma, hipertensión y accidentes cerebrovasculares. Aplicaciones prácticas en la India por Kushwaha, Saxena y Kumar (2025) y en Brasil por Wikuats et al. (2023) han demostrado que el software permite estimar no solo hospitalizaciones, sino también el costo económico asociado a esta carga de enfermedad. A pesar de sus ventajas como herramienta gratuita y metodológicamente respaldada por la OMS, AirQ+ presenta limitaciones que los investigadores deben considerar. Simões et al. (2025) y Wikuats et al. (2023) advierten que el modelo no maneja adecuadamente escenarios de multicontaminantes o mezclas complejas, y presenta una fuerte dependencia de la calidad de los datos de monitoreo local. Por ello, Koçak (2025) sugiere que la evaluación integral debe complementarse con modelos de aprendizaje automático (Machine Learning) para mejorar la predicción en el mundo real, mientras que Arregocés et al. (2023) recomiendan realizar análisis de sensibilidad y documentar claramente todos los supuestos y limitaciones técnicas.

Desde una perspectiva de gestión económica y tecnológica, Romero-Castro et al. (2022) evaluaron la complejidad de la aplicación de la directiva europea de emisiones industriales y las Mejores Tecnologías Disponibles (BAT). El estudio analizó la viabilidad de diversas estrategias de control de contaminantes mediante un análisis costo-beneficio detallado. Se determinó que la transición energética hacia combustibles más limpios, como el gas natural, constituye una alternativa BAT más eficiente y económica que la implementación de sistemas de tratamiento de 'fin de tubo', debido a su capacidad de mitigar el impacto desde la fuente.

La combinación estratégica de modelos de dispersión (AERSCREEN/AERMOD) con herramientas de salud pública (AirQ+) permite cerrar el ciclo de evaluación ambiental. Bayraktar y Mutlu (2024) sostienen que esta integración permite traducir mapas de concentración espacial en impactos concretos para la salud, facilitando la toma de decisiones basada en el riesgo. Según indican Sajjad, Tauseef y Ahmad (2023) en su estudio sobre Faisalabad, este marco de gestión adaptativa permite prever cuántas muertes y casos de enfermedad podrían evitarse si se alcanzaran los estándares de calidad del aire. En definitiva, la literatura reciente de 2023 a 2025, representada por autores como Ghobakhloo et al. (2023) y Wikuats et al. (2023), valida que el uso conjunto de estas tecnologías es la vía más eficiente y precisa para evaluar la problemática de las fuentes fijas industriales en contextos donde se requiere proteger de manera urgente a las poblaciones expuestas.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Contaminación atmosférica y dinámica de emisión en fuentes fijas

La atmósfera terrestre se define como una mezcla gaseosa dinámica cuya composición química es fundamental para los procesos de dispersión de contaminantes. En términos de ingeniería, se utiliza el concepto de atmósfera estándar para establecer parámetros de referencia de presión y temperatura que permitan normalizar los cálculos de volumen de gases emitidos. Como bien sostienen Adewale et al. (2025), es imperativo establecer una distinción técnica clara entre los procesos de emisión e inmisión. La emisión se refiere al flujo de contaminantes liberados directamente desde la fuente (fuente puntual), mientras que la inmisión o calidad del aire ambiente representa la concentración de dichos contaminantes en el punto de recepción, donde impactan a la población y los ecosistemas. Esta distinción es la base del modelamiento, ya que el objetivo de la ingeniería es predecir cómo una tasa de emisión específica se traduce en niveles de inmisión en el suelo.

Las fuentes fijas industriales, como las chimeneas, operan como fuentes puntuales que concentran grandes volúmenes de contaminantes en puntos geográficos elevados. La dinámica de emisión en estas fuentes está determinada por parámetros de diseño físico (altura y diámetro) y termodinámicos (velocidad y temperatura de salida), los cuales definen la altura efectiva de la pluma. Una altura efectiva adecuada permite que la pluma supere la capa de turbulencia generada por el entorno construido (downwash) y acceda a las capas atmosféricas superiores, favoreciendo la dilución de los contaminantes y reduciendo las concentraciones en el punto de impacto a nivel del suelo.

2.2.2. Fundamentos de la química atmosférica

2.2.2.1. Tipología de fuentes industriales

En el estudio de la contaminación atmosférica, las fuentes de emisión se categorizan según su geometría y movilidad. Las fuentes industriales fijas son predominantemente fuentes puntuales, caracterizadas por emitir contaminantes desde un punto geográfico único y elevado, como es el caso de las chimeneas industriales. Gurjar y Ratan (2025) explican que, a diferencia de las fuentes lineales (como el flujo vehicular en una avenida) o las fuentes de área (como un conjunto de depósitos de almacenamiento), las fuentes puntuales concentran una gran carga de contaminantes en un área de salida reducida. La configuración geométrica de la chimenea específicamente su altura física y su diámetro interno determina la capacidad inicial de la pluma para superar la turbulencia mecánica inducida por edificios cercanos y penetrar en las capas de aire donde la dispersión es más eficiente.

2.2.2.2. Mecanismos de combustión industrial

La generación de contaminantes en sectores industriales de Arequipa proviene principalmente de procesos térmicos en calderas, hornos y generadores eléctricos. Estos mecanismos de combustión implican la oxidación rápida de combustibles fósiles, cuya eficiencia determina la naturaleza de los subproductos liberados. Tong et al. (2025) señalan que una combustión incompleta o el uso de combustibles con alto contenido de azufre resultan en la generación masiva de subproductos gaseosos como el SO_2 y NO_x , así como subproductos sólidos en forma de cenizas volantes y material particulado (PM_{10}). El análisis de estos procesos es vital, ya que parámetros como el exceso de aire y la temperatura del hogar influyen directamente en la tasa de emisión de partículas finas, las cuales, debido a su potencial tóxico, requieren una cuantificación precisa para la evaluación de riesgos sanitarios.

2.2.2.3. Tipos de combustibles industriales

La matriz energética industrial determina directamente la magnitud y toxicidad de las emisiones. Entre los principales combustibles destacan:

- **Petróleo Residual 500 (R500):** Es un hidrocarburo pesado y viscoso, subproducto de la refinación. Se caracteriza por su alto contenido de azufre (generalmente entre 1.0% y 1.7%) y cenizas. Su combustión ineficiente es la principal responsable de las emisiones masivas de SO₂ y material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}).
- **Diesel B5:** Un combustible destilado más ligero que incorpora un 5% de biodiésel. Presenta un contenido de azufre significativamente menor que el residual, generando menos emisiones de partículas primarias y óxidos de azufre.
- **Gas Natural y GLP:** Considerados combustibles de transición y catalogados como la Mejor Tecnología Disponible (BAT). Su combustión es altamente eficiente y prácticamente libre de azufre, eliminando las emisiones de SO₂ y reduciendo el PM₁₀ a niveles mínimos.

2.2.2.4. Inventarios de emisiones y factores de emisión

En contextos donde no se dispone de sistemas de monitoreo continuo (CEMS) en cada chimenea, la ingeniería ambiental recurre a la estimación técnica mediante inventarios de emisiones. Adewale et al. (2025) y Tang et al. (2023) destacan que la herramienta más confiable a nivel global es la base de datos AP-42 de la EPA, la cual proporciona factores de emisión basados en miles de pruebas de campo. Estos factores permiten calcular la masa de contaminante emitida por unidad de actividad (por ejemplo, kg de SO₂ por cada m³ de combustible quemado).

2.2.2.5. Parámetros de salida de la fuente

El comportamiento inicial de la pluma contaminante al salir de la chimenea está regido por la física de fluidos. Los parámetros de salida, que incluyen el diámetro de la chimenea, la velocidad de salida de los gases y su temperatura, determinan la elevación de la pluma por encima de la altura física de la estructura. Salih et al. (2025) describen que la diferencia de temperatura entre los gases de salida y el aire ambiente genera una fuerza de empuje o flotabilidad (buoyancy), mientras que la velocidad de salida proporciona un momento inicial que impulsa los gases verticalmente. Estos factores combinados definen la "altura efectiva" de la emisión, un parámetro crítico en modelos como AERSCREEN, ya que una mayor elevación inicial de la pluma generalmente resulta en menores concentraciones de contaminantes a nivel del suelo debido a que la dispersión ocurre en un volumen de aire mucho mayor antes de alcanzar a los receptores.

2.2.3. Caracterización y comportamiento de contaminantes críticos

2.2.3.1. Dióxido de Azufre (SO₂)

El Dióxido de Azufre se define como un gas incoloro que posee un olor penetrante e irritante, siendo uno de los principales trazadores de la actividad industrial que depende de la quema de combustibles fósiles. De acuerdo con Salih, Hassan y Abdulmajeed (2025), su origen primordial se encuentra en los procesos térmicos donde se combustionan materiales con trazas de azufre, los cuales se oxidan rápidamente en el hogar de calderas y hornos industriales. En el ámbito del modelamiento atmosférico, el SO₂ es clasificado como un contaminante primario debido a que se emite directamente a la atmósfera y mantiene su estructura química estable en las cercanías de la fuente, siempre que las condiciones de humedad no aceleren su conversión en aerosoles ácidos. Esta estabilidad relativa es lo que permite que autores como Hamzeh et al. (2025) lo consideren un parámetro ideal para el análisis multipollutant, facilitando la predicción de su comportamiento físico mediante algoritmos de transporte y dispersión que se basan en la dilución mecánica del viento.

2.2.3.2. Material Particulado (PM₁₀)

El Material Particulado con un diámetro aerodinámico menor a 10 micras (PM₁₀) representa una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, cuya definición técnica se basa estrictamente en su tamaño y no en su composición química. Gurjar y Ratan (2025) explican que el PM₁₀ posee un origen dual: procesos mecánicos como el manejo de materiales industriales y procesos térmicos derivados de la combustión ineficiente en fuentes fijas. Debido a su masa, estas partículas están sujetas a procesos de sedimentación por gravedad y deposición, lo que influye en su tiempo de residencia en la capa baja de la atmósfera. Sin embargo, la peligrosidad del PM₁₀ radica en su heterogeneidad química; investigaciones de Saxena et al. (2022) han demostrado que estas partículas suelen transportar metales pesados como Plomo (Pb), Níquel (Ni) y Cadmio (Cd), lo que altera significativamente su potencial tóxico dependiendo de la fuente industrial de procedencia.

2.2.3.3. Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno, principalmente el NO y el NO₂, son gases altamente reactivos generados durante los procesos de combustión a altas temperaturas en calderas y motores industriales. El NO₂ es un gas de color pardo rojizo que, además de ser un irritante respiratorio directo, actúa como precursor crítico en la formación de ozono troposférico y material particulado secundario. Su control es fundamental en clústeres industriales, ya que agrava las enfermedades respiratorias crónicas.

2.2.3.4. Material Particulado Fino (PM_{2.5})

El PM_{2.5} comprende partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micrómetros. A diferencia del PM₁₀, el PM_{2.5} proviene casi exclusivamente de procesos de combustión (como la quema de Residual 500) y de reacciones químicas secundarias en la atmósfera. Debido a su tamaño micrométrico, estas partículas superan las barreras del tracto respiratorio superior, penetrando hasta los alvéolos pulmonares y el torrente sanguíneo, lo que les confiere un riesgo toxicológico y cardiovascular sustancialmente mayor que las partículas gruesas.

2.2.4. Clasificación de los gases

La ingeniería ambiental distingue entre contaminantes primarios y secundarios para determinar la metodología de modelación más apropiada. Los contaminantes primarios, como el SO₂ y el PM₁₀ emitidos por chimeneas, son aquellos que no sufren transformaciones químicas inmediatas al salir de la fuente. Esta característica justifica técnicamente el uso de modelos gaussianos como AERSCREEN o AERMOD. Según sostienen Gurjar y Ratan (2025) y Salih et al. (2025), dado que estas especies presentan una reactividad limitada en el campo cercano a la fuente industrial, la disminución de su concentración se debe principalmente a la dispersión turbulenta y la dilución atmosférica. O et al. (2025) refuerzan esta postura al señalar que, para evaluaciones de "peor escenario" regulatorio, los modelos que asumen estabilidad química proporcionan resultados conservadores y confiables para la gestión de riesgos ambientales.

2.2.5. Toxicología, epidemiología ambiental y evaluación de carga de enfermedad

La toxicología y la epidemiología operan en conjunto para evaluar el impacto de la contaminación. Toxicológicamente, el material particulado y el SO₂ inducen estrés oxidativo. A nivel epidemiológico, esta exposición crónica se traduce en patologías específicas: las Infecciones Respiratorias Agudas (IRAs), que afectan predominantemente a la población infantil; y patologías crónicas en adultos como la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC), asma, enfermedades cardiovasculares y un incremento en la incidencia de cáncer de pulmón. La correlación de estos daños justifica la cuantificación de la carga de enfermedad.

El uso de AirQ+ en la realidad peruana requiere la adaptación de funciones concentración-respuesta (CRF) internacionales. Esta extrapolación es técnicamente válida porque los mecanismos fisiopatológicos de inflamación y estrés oxidativo desencadenados por el PM₁₀ son biológicamente universales en el sistema respiratorio humano. No obstante, es imperativo aclarar que los indicadores de impacto reflejan una asociación estadística robusta respaldada por estudios de cohorte, mas no una causalidad absoluta, reconociendo el carácter multifactorial de la morbilidad urbana.

A. Epidemiología Ambiental

La toxicología de los contaminantes industriales se centra en la inhalación como la principal vía de exposición para la población urbana. Al inhalarse, el SO₂ actúa de forma inmediata provocando inflamación en las mucosas de las vías respiratorias superiores y agravando cuadros asmáticos. Por su parte, el PM₁₀ penetra profundamente en el sistema respiratorio, donde puede inducir daño celular agudo. Guascito et al. (2023) y Jakhar et al. (2025) coinciden en que el mecanismo fundamental de daño del material particulado es su potencial oxidativo, el cual genera especies reactivas de oxígeno que provocan estrés oxidativo e inflamación sistémica. A largo plazo, los efectos fisiológicos son tanto acumulativos como sistémicos. Meo et al. (2024) han identificado que la exposición prolongada a partículas y SO₂ no solo afecta la salud respiratoria y cardiovascular, sino que también puede tener repercusiones en la salud cognitiva. Epidemiológicamente, estudios de Dutta y Jinsart (2022) vinculan estas exposiciones con un incremento significativo en la morbilidad y mortalidad respiratoria en poblaciones vulnerables.

B. Evaluación de Carga de Enfermedad

La epidemiología ambiental moderna se sustenta en la capacidad de cuantificar el vínculo causal entre la exposición a contaminantes y los efectos adversos en la salud mediante las funciones concentración-respuesta (CRF, por sus siglas en inglés). De acuerdo con Forastiere et al. (2024) y Bhat, Jiawen y Farzaneh (2021), estas funciones son modelos matemáticos y estadísticos que describen cómo el incremento en la concentración de un contaminante específico, como el material particulado (PM₁₀) o el dióxido de azufre (SO₂), eleva la probabilidad de ocurrencia de un evento de salud negativo en una población expuesta. El sustento estadístico de estas funciones proviene de extensos estudios de cohortes y series temporales que permiten derivar coeficientes de riesgo, los cuales son fundamentales para realizar una Evaluación de Impacto en Salud (HIA).

Como sostiene Shima (2025), la elección adecuada de estas funciones es crítica, ya que deben reflejar de la manera más fiel posible la relación biológica entre la dosis inhalada y la respuesta fisiológica. Forastiere et al. (2024) subrayan que las investigaciones recientes han priorizado el desarrollo de CRF más robustas para resultados de morbilidad, tales como hospitalizaciones por asma y enfermedades cardiovasculares, asegurando que los modelos de riesgo no solo midan la mortalidad, sino también el deterioro en la calidad de vida de las poblaciones urbanas e industriales.

Para efectos de esta investigación, se asume la aplicabilidad de las CRF estandarizadas por la OMS en el contexto de Arequipa. Esta decisión se fundamenta en que los mecanismos fisiopatológicos de daño sistémico y estrés oxidativo causados por el PM_{10} y el SO_2 presentan una respuesta biológica comparable en poblaciones urbanas e industriales, independientemente de la región geográfica. El uso de estos coeficientes de riesgo global garantiza que el análisis de carga de enfermedad cuenta con un respaldo epidemiológico robusto y validado internacionalmente.

2.2.5.1. Indicadores epidemiológicos

La cuantificación de la carga de enfermedad requiere el uso de indicadores estandarizados que permitan comparar riesgos en diferentes escenarios. El primer indicador clave es el Riesgo Relativo (RR), definido por Gilardi et al. (2023) como la razón entre la probabilidad de que ocurra un evento de salud en un grupo expuesto frente a un grupo no expuesto. Este valor permite determinar la fuerza de la asociación entre la contaminación industrial en Arequipa y las afecciones respiratorias detectadas. A partir del RR, se deriva la Fracción Atribuible (AP), la cual representa el porcentaje de casos de enfermedad en la población que podrían evitarse si las concentraciones de contaminantes se redujeran hasta los niveles guía recomendados por la OMS. Complementariamente, para medir el impacto global en la salud, se utiliza el indicador de años de vida perdidos por discapacidad (DALYs). Mueller, Westerby y Nieuwenhuijsen (2022) explican que los DALYs combinan en una sola métrica los años de vida perdidos por muerte prematura y los años vividos con una salud disminuida debido a una enfermedad. Este indicador es particularmente útil en ingeniería ambiental, ya que permite expresar el costo social de la contaminación en términos de tiempo de vida saludable, facilitando a los tomadores de decisiones la comprensión de la magnitud del riesgo sanitario en sectores como Río Seco o el Parque Industrial.

2.2.5.2. Tipos de metodología de medición, arquitectura y software de evaluación sanitaria

A. Medición. Para traducir las concentraciones atmosféricas en impacto sanitario, existen diversas metodologías y plataformas de evaluación.

B. Arquitectura. La arquitectura de estos softwares se basa en procesar simultáneamente datos de dispersión (inmisión), demografía local y Funciones Concentración-Respuesta (CRF). Entre las herramientas más destacadas se encuentra BenMAP-CE (Environmental Benefits Mapping and Analysis Program) desarrollado por la EPA, el cual permite estimar impactos en salud y su valoración económica mediante sistemas de información geográfica integrados.

C. Software de Evaluación Sanitaria. Sin embargo, el estándar metodológico internacional actual es el software AirQ+, desarrollado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). La arquitectura de AirQ+ se basa en modelos log-lineales que cruzan series de exposición de contaminantes (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO_x) con tasas de incidencia base, permitiendo estimar de manera rigurosa la Fracción Atribuible (AP), el riesgo relativo y los casos en exceso para enfermedades como las IRAs y la mortalidad adulta.

2.2.6. Dinámica atmosférica y factores de dispersión en Arequipa

2.2.6.1. Estructura de la capa límite planetaria

La capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) representa la porción inferior de la tropósfera que interactúa directamente con la superficie terrestre, siendo el espacio donde ocurre la liberación y transporte de las emisiones industriales en Arequipa. La estructura de esta capa está fuertemente influenciada por la rugosidad del terreno, la cual en zonas de topografía irregular afecta significativamente los perfiles de viento y la generación de turbulencia mecánica. De acuerdo con Song y Shao (2023), la rugosidad superficial actúa como un freno al flujo laminar del viento, modificando el perfil vertical y provocando una mayor fricción que altera la capacidad de transporte de contaminantes cerca del suelo. En entornos industriales, esta dinámica es fundamental, ya que la altura de mezcla de la PBL define el volumen de aire disponible para la dilución de contaminantes; una capa límite contraída limita el espacio de dispersión, incrementando las concentraciones de SO₂ y PM₁₀ en el área de influencia de las fuentes fijas.

2.2.6.2. Estabilidad atmosférica y Clases de Pasquill

La estabilidad atmosférica es el factor que determina la capacidad de la atmósfera para favorecer o inhibir el movimiento vertical de las parcelas de aire y, por ende, de los contaminantes. Esta se categoriza comúnmente mediante las Clases de Estabilidad de Pasquill, las cuales clasifican la turbulencia basándose en la radiación solar y la velocidad del viento. Masiol et al. (2024) explican que en condiciones de inestabilidad atmosférica se favorece la ventilación y la dilución rápida de las emisiones, mientras que en condiciones estables la dispersión tanto horizontal como vertical se ve severamente limitada. Para modelos de tamizaje como AERSCREEN, esta clasificación es vital, ya que permite simular el comportamiento de la pluma bajo escenarios críticos; por ejemplo, una atmósfera muy estable impide que la pluma se eleve, provocando que los contaminantes industriales impacten directamente a nivel del suelo en distancias cortas desde la chimenea.

2.2.6.3. Fenomenología meteorológica de Arequipa

La meteorología de Arequipa presenta desafíos únicos para el modelamiento ambiental debido a su ubicación en un valle rodeado de una topografía montañosa compleja. Jiang y Jin (2025) sostienen que la interacción entre el relieve irregular y la meteorología local genera patrones de flujo complejos que pueden atrapar los contaminantes en las zonas bajas del valle del Chili. Un fenómeno crítico en esta región es la inversión térmica, la cual ocurre frecuentemente durante el invierno y en las horas nocturnas o de madrugada; en este escenario, una capa de aire caliente se sitúa sobre una capa de aire frío cercana al suelo, actuando como una "tapa" que impide la dispersión vertical.

De acuerdo con Sekula et al. (2022) y Poulidis et al. (2024), en valles y cuencas con topografía accidentada como la de Arequipa, estas inversiones térmicas atrapan las emisiones industriales de SO₂ y PM₁₀, elevando drásticamente las concentraciones ambientales por encima de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA).

Además, el efecto de los vientos de montaña y valle (brisas anabáticas y catabáticas) modifica la dirección de la pluma industrial de manera cíclica, lo que requiere un análisis detallado mediante técnicas de microescala o downscaling dinámico para capturar los efectos orográficos que los modelos gaussianos simples podrían subestimar en terrenos tan accidentados. En resumen, la combinación de una topografía irregular y la dinámica de la PBL en Arequipa crea un entorno donde la acumulación de contaminantes es propicia, justificando la necesidad de una modelación conservadora y precisa para la gestión de riesgos sanitarios.

2.2.7. Fundamentos matemáticos del modelamiento de dispersión

2.2.7.1. Teoría de la Pluma Gaussiana

La Teoría de la Pluma Gaussiana constituye el pilar analítico fundamental para describir el transporte y la dispersión atmosférica de contaminantes provenientes de fuentes puntuales continuas. Como explican Kaur y Shah (2025) y Wei et al. (2025), este modelo se basa en la solución analítica de la ecuación de advección-difusión, asumiendo que el flujo del viento es constante y que la turbulencia atmosférica es homogénea y estacionaria. Bajo estas premisas, la distribución de la concentración del contaminante en una sección transversal a la dirección del viento sigue una distribución normal o gaussiana, tanto en el eje horizontal (y) como en el eje vertical (z).

De acuerdo con Essa, Taha y Elfeky (2025), la precisión de este modelo depende intrínsecamente de los coeficientes de dispersión (σ_y , σ_z), los cuales representan las desviaciones estándar de la concentración y varían en función de la distancia a la fuente y la estabilidad atmosférica. Un aspecto técnico avanzado destacado por Micallef y Micallef (2024) es la necesidad de corregir la ecuación original para considerar las múltiples reflexiones de la pluma en los límites paralelos, como el suelo y la capa de inversión térmica, lo que permite una estimación matemática mucho más robusta de las concentraciones que llegan a nivel de los receptores en entornos urbanos y valles cerrados.

2.2.7.2. Algoritmos de elevación de la pluma

La efectividad del modelamiento gaussiano requiere determinar con exactitud la altura efectiva de la emisión (H), la cual no coincide necesariamente con la altura física de la chimenea (h_s). Este incremento de altura, conocido como elevación de la pluma (Δh), es el resultado de la interacción de fuerzas físicas iniciales. O et al. (2025) y Johansson et al. (2022) sostienen que el uso de los algoritmos de Briggs es la referencia técnica internacional para este cálculo, ya que permiten cuantificar el ascenso de los gases basándose en dos mecanismos principales: la fuerza de flotabilidad (buoyancy), impulsada por la diferencia de temperatura entre los gases de salida y el aire ambiente, y el momento inicial (momentum), derivado de la velocidad de salida de los gases.

De acuerdo con la metodología de Briggs, la aplicación de estas fórmulas varía según si la atmósfera se encuentra en condiciones estables, neutrales o inestables. Como indican Wei et al. (2025), una correcta determinación de la altura efectiva es crucial, pues determina el punto de origen virtual de la pluma gaussiana; una subestimación de Δh resultaría en concentraciones predictivas artificialmente altas cerca de la fuente, mientras que una sobreestimación podría ocultar riesgos reales para la población circundante.

2.2.7.3. Arquitectura técnica de AERSCREEN

El software AERSCREEN, desarrollado por la EPA, representa la evolución tecnológica de los modelos de tamizaje (screening) para fuentes puntuales industriales. O et al. (2025) definen su arquitectura como una interfaz de ejecución para el modelo detallado AERMOD, diseñada para realizar evaluaciones rápidas y conservadoras de la calidad del aire. El concepto central del modelamiento de tamizaje es identificar el "peor escenario" (worst-case scenario) de contaminación; para lograrlo, AERSCREEN utiliza un preprocesador meteorológico llamado MAKEMET, el cual genera una base de datos de meteorología sintética que cubre todas las combinaciones posibles de velocidad del viento y clases de estabilidad atmosférica.

Según detallan Johansson et al. (2022) y Cabello et al. (2025), esta arquitectura técnica permite que el ingeniero ambiental determine la concentración máxima horaria que podría ocurrir bajo las condiciones más desfavorables posibles, sin necesidad de contar con un año completo de datos meteorológicos reales en la fase inicial de la investigación. Al automatizar miles de simulaciones en segundos, AERSCREEN garantiza que, si los resultados obtenidos están por debajo de los estándares legales (ECA), no será necesario un estudio más complejo; de lo contrario, sirve como la justificación técnica necesaria para escalar hacia un análisis detallado con AERMOD o modelos de dinámica de fluidos (CFD), asegurando siempre la protección de la salud pública mediante el principio de precaución.

La elección técnica de AERSCREEN sobre AERMOD se justifica bajo el Principio de Precaución. Al ser un modelo de tamizaje, permite evaluar el 'peor escenario' meteorológico sin requerir el volumen masivo de datos horarios de AERMOD, estableciendo un techo regulatorio estricto. Si bien el modelo gaussiano presenta limitaciones topográficas al asumir terreno plano, esta restricción se compensa integrando algoritmos de succión aerodinámica (*downwash*), garantizando que las predicciones de acumulación en topografías complejas como la de Arequipa sean altamente conservadoras para el campo cercano (<500 m).

2.3. Marco legal

- **Ley General del Ambiente (Ley N° 28611)** : Es la norma marco que establece los principios y normas básicas para la gestión ambiental en el Perú. Define la responsabilidad del Estado y de los particulares en la prevención de la contaminación y la protección de la salud pública.
- **Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire (D.S. N° 003-2017-MINAM)**: Esta norma es el pilar de la presente tesis, ya que establece los niveles máximos de concentración de contaminantes en el aire ambiente (como el SO₂ y PM₁₀). Estos valores sirven como referente para determinar si la calidad del aire en Arequipa es segura para la población.

- **Límites Máximos Permisibles (LMP) para Calderas Industriales (D.S. N° 010-2017-MINAM):** Regula las emisiones de contaminantes directamente en la fuente (chimeneas). Establece los valores máximos que las industrias pueden liberar, lo cual es fundamental para el inventario de emisiones y la caracterización de las fuentes fijas de este estudio.
- **Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire (D.S. N° 074-2001-PCM):** Establece las Zonas de Atención Prioritaria (ZAP) en el país, incluyendo a la ciudad de Arequipa debido a sus condiciones críticas de calidad de aire, obligando a la implementación de Planes de Acción para la Mejora de la Calidad del Aire.
- **Ley Orgánica de Municipalidades (Ley N° 27972):** Otorga facultades a los gobiernos locales, como la Municipalidad Provincial de Arequipa y la Municipalidad Distrital de Cerro Colorado, para regular, controlar y sancionar la emisión de humos, gases y ruidos que afecten a la salud y al medio ambiente.
- **Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad Ambiental del Aire (R.M. N° 181-2019-MINAM):** Establece las metodologías estandarizadas para medir los contaminantes en el aire, lo cual valida técnicamente los procedimientos de comparación de datos utilizados en esta investigación.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación corresponde a una investigación aplicada, debido a que se fundamenta en la aplicación de conocimientos científicos y teorías de la ingeniería ambiental (como la pluma gaussiana y las funciones concentración-respuesta) para resolver un problema práctico: la degradación de la calidad del aire en el Parque Industrial. El estudio no pretende generar nuevas teorías, sino emplear las existentes para proporcionar diagnósticos y estrategias de gestión que beneficien a la población y a las entidades reguladoras.

El nivel de investigación se define como descriptivo-explicativo, bajo un diseño no experimental de corte transversal. En su fase descriptiva, el estudio caracteriza detalladamente las variables técnicas de las fuentes fijas y las condiciones meteorológicas de Arequipa. En su fase explicativa, busca establecer la relación de causalidad entre la exposición a concentraciones de SO_2 y PM_{10} y el incremento del riesgo sanitario en la población, utilizando para ello herramientas epidemiológicas de la OMS.

3.2. Diseño de la investigación

La investigación presenta un diseño no experimental, debido a que no se realiza una manipulación deliberada de las variables, observando los fenómenos en su contexto natural. El corte es transversal, ya que la recolección y análisis de datos se circunscriben a un periodo de tiempo determinado (2024-2026).

3.2.1. Población y Muestra

La población de estudio comprende el sector del Parque Industrial del Cercado de Arequipa, abarcando un polígono de 66 Ha. La muestra es de tipo no probabilística por conveniencia, seleccionando cuatro fuentes fijas industriales críticas para la evaluación de dispersión atmosférica.

La muestra del estudio es de tipo no probabilística por conveniencia, seleccionando cuatro fuentes fijas industriales críticas dentro del polígono de 66 Ha. Para definir esta muestra, se aplicaron rigurosos criterios de inclusión y exclusión:

- **Criterios de Inclusión:** Se incluyeron aquellas fuentes fijas puntuales activas que: a) Operen procesos de combustión continua en calderas industriales de mediana a gran capacidad productiva; b) Utilicen combustibles líquidos pesados o destilados (Petróleo Residual 500 y Diesel B5) con potencial de emisión sulfurosa y particulada; y c) Posean infraestructura de evacuación vertical confinada (chimeneas) accesible para la medición de parámetros geométricos *in situ*.
- **Criterios de Exclusión:** Se excluyeron formalmente del modelamiento: a) Las fuentes de emisión móviles asociadas al flujo vehicular perimetral; b) Las fuentes difusas o de área, como almacenes de materias primas; y c) Microempresas o talleres metalmeccánicos artesanales cuyas emisiones sean intermitentes y carezcan de ductos confinados de descarga.

Bajo estos lineamientos, se seleccionaron a Franky & Ricky S.A., Papelera Panamericana, Michell & Cía S.A. y Alicorp, debido a que representan el 85% del consumo total de combustibles industriales líquidos del sector, convirtiéndolas en los focos determinantes de la carga contaminante sobre la cuenca atmosférica circundante.

Tabla 1*Parámetros técnicos y operativos de las fuentes fijas industriales seleccionadas*

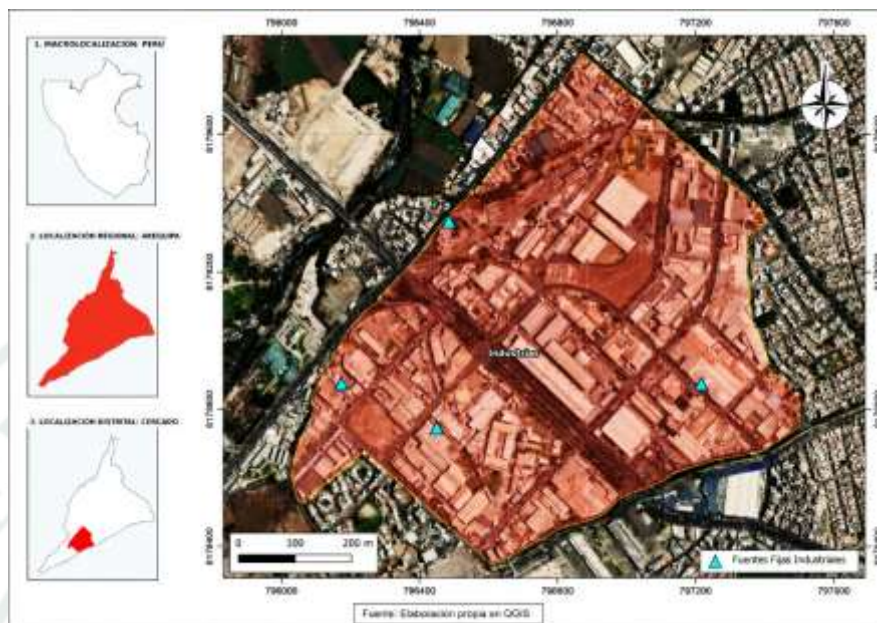
Empresa / Fuente	Altura Chimenea h_s (m)	Diámetro Interno D_i (m)	Temp. Salida T_s (°C)*	Vel. Salida V_s (m/s)*	Coordenadas UTM (WGS84, Zona 19K, Sur)
Franky & Ricky S.A.	14.0	0.40	175	9.2	228412 E, 8182950 N
Papelera Panamericana	15.0	0.55	210	10.2	228550 E, 8183120 N
Michell & Cía S.A.	16.0	0.50	180	9.5	228720 E, 8183350 N
Alicorp (Sidsur)	18.0	0.60	195	11.0	228900 E, 8183610 N

Nota. Elaboración Propia. Coordenadas y alturas físicas medidas *in situ*. (*) Valores de T_s y V_s inferidos según la capacidad nominal de las calderas. Se asume una variabilidad de $\pm 15\%$ en actividad y $\pm 20\%$ en azufre, propagada en los escenarios de sensibilidad de AERSCREEN.

La caracterización técnica consolidada en la Tabla 2 revela que las fuentes industriales operan en un rango de alturas físicas restringidas ($h_s \leq 18$ m), lo que condiciona drásticamente la capacidad de dispersión inicial de los contaminantes. De acuerdo con Gurjar y Ratan (2025), la configuración geométrica de la chimenea —específicamente su altura física y diámetro interno— es la que determina la capacidad de la pluma para superar la turbulencia mecánica inducida por edificaciones cercanas y penetrar en capas atmosféricas donde el transporte es más eficiente. No obstante, este déficit de altura física se ve compensado parcialmente por los parámetros termodinámicos de salida reportados en la tabla; temperaturas que alcanzan hasta los 210°C (Papelera Panamericana) y velocidades que superan los 9 m/s generan un incremento de altura virtual conocido como elevación de la pluma (Δh). Este ascenso, impulsado por fuerzas de flotabilidad (buoyancy) y momento inicial (momentum), es crítico para definir la altura efectiva de la emisión. Según sostienen Salih, Hassan y Abdulmajeed (2025), una mayor elevación inicial permite que la dispersión ocurra en un volumen de aire superior antes de alcanzar a los receptores a nivel del suelo, lo cual resulta vital para mitigar el impacto sanitario en entornos donde las fuentes operan de forma continua en las cercanías de zonas urbanas consolidadas.

Figura 1

Mapa de georreferenciación de fuentes fijas y delimitación del polígono de estudio (66 Ha)



Nota. *Elaboración propia mediante procesamiento de datos SIG y archivo KMZ.*

La distribución espacial presentada en la Figura 1 evidencia una saturación de focos emisores en el sector del Parque Industrial, cuya ubicación es limítrofe con zonas residenciales y distritos densamente poblados como José Luis Bustamante y Rivero. Esta proximidad geográfica representa un riesgo sanitario latente, ya que la ciudad de Arequipa se caracteriza por una topografía compleja y la presencia del valle del Chili, factores que generan patrones de flujo capaces de atrapar contaminantes en las zonas bajas del relieve. De acuerdo con Jiang y Jin (2025), la interacción entre el relieve irregular y la meteorología local facilita la acumulación de emisiones industriales, especialmente bajo fenómenos de inversión térmica que actúan como una "tapa" sobre las emisiones del sector. Esta situación es consistente con el Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas de Arequipa, el cual identifica múltiples categorías de fuentes industriales operando con combustibles pesados en áreas de expansión urbana con limitada ventilación natural. La aglomeración de estas fuentes críticas en un polígono industrial de solo 66 Ha valida la necesidad de un modelamiento integrado, pues el impacto detectado no debe evaluarse de forma aislada, sino como una carga contaminante sinérgica que afecta directamente la calidad de vida de los habitantes del Cercado.

3.2.2. Enfoque de Investigación

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que todas las variables fueron medidas de forma numérica y analizadas mediante modelos físico-matemáticos y estadísticos. Para garantizar la trazabilidad de la información en los escenarios 2024-2025 y 2026, se establecieron las siguientes fuentes y técnicas:

3.2.3. Fuentes de Información

A. Datos de Campo (Primarios): Coordenadas GPS y dimensiones físicas de las chimeneas y naves colindantes, medidas directamente *in situ*.

B. Datos Suministrados por las Empresas: Historial de consumo anual de combustible y turnos operativos (12 horas) facilitados por el sector industrial.

C. Datos Inferidos Técnicamente: Temperatura (T_s) y velocidad de salida (V_s) de los gases, calculadas mediante balances de masa y energía según la capacidad nominal de los quemadores de las calderas.

D. Fuentes Secundarias: Datos meteorológicos de la Estación La Pampilla (SENAMHI), factores de emisión AP-42 de la EPA y estadísticas de salud de la GERESA Arequipa.

3.2.4. Técnicas de Investigación

En esta investigación se aplicaron tres técnicas principales para la obtención y procesamiento de datos. La primera técnica fue el análisis documental, la cual permitió sistematizar los inventarios de emisiones masivas de fuentes fijas y las tasas de morbilidad respiratoria a partir de informes oficiales del MINAM, SENAMHI y la GERESA Arequipa. La segunda técnica consistió en el modelamiento atmosférico, empleada para simular el comportamiento físico de la pluma de contaminantes (SO_2 y PM_{10}) y determinar su dispersión espacial en el entorno industrial. Finalmente, se utilizó la técnica de evaluación de impacto en salud (EIS), mediante la cual se procesaron indicadores epidemiológicos cuantitativos para estimar la carga de enfermedad y los casos en exceso atribuibles a la exposición industrial.

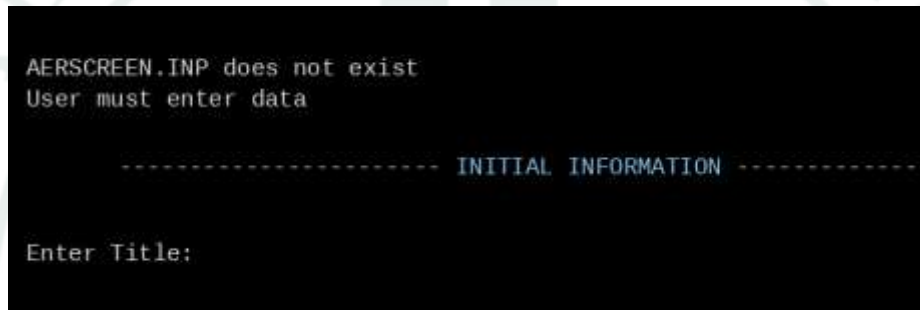
3.2.5. Instrumentos de Investigación

A. AERSCREEN (EPA)

El software AERSCREEN, desarrollado por la EPA, es un modelo de tamizaje (*screening*) que utiliza la arquitectura de AERMOD para estimar concentraciones máximas de contaminantes en el campo cercano. Su arquitectura se basa en un preprocesador meteorológico (MAKEMET) que genera meteorología sintética para identificar de forma conservadora el escenario de "peor caso" de contaminación, cubriendo todas las combinaciones posibles de velocidad del viento y clases de estabilidad atmosférica.

Figura 2

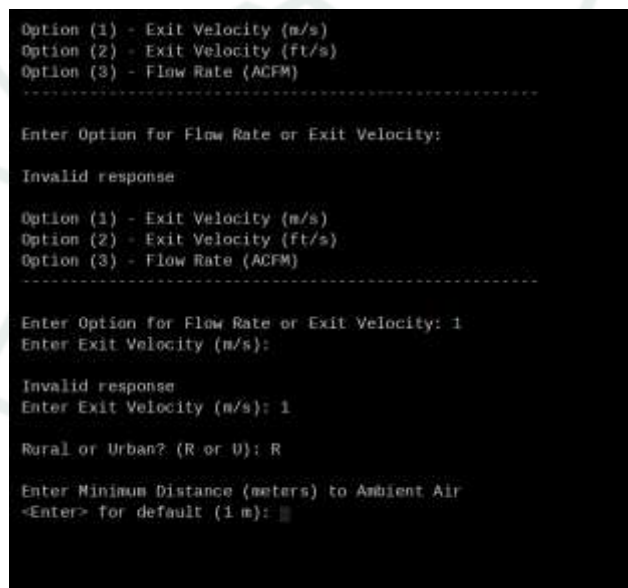
Interfaz de configuración de parámetros de la fuente fija y tasas de emisión (g/s).



Nota. Software AERSCREEN.

Figura 3

Configuración de rugosidad superficial y generación de meteorología de 'peor escenario'.



Nota. Software AERSCREEN.

Figura 4

Reporte de salida del modelo mostrando la concentración máxima estimada en el POI.

```
----- BUILDING DOWNWASH INFORMATION -----  
  
Include Building Downwash? (y/n): y  
Use pre-existing BPIPPRM input file? (y/n): y  
Enter user created BPIPPRM input file: y  
User defined BPIPPRM input file not found: y  
Use pre-existing BPIPPRM input file? (y/n): y  
Enter user created BPIPPRM input file: n  
User defined BPIPPRM input file not found: n  
Use pre-existing BPIPPRM input file? (y/n): y  
Enter user created BPIPPRM input file: n
```

Nota. Software AERSCREEN.

B. AirQ+ (OMS)

AirQ+ es la herramienta desarrollada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) que se ha consolidado como el estándar metodológico internacional para la Evaluación de Impacto en Salud (EIS). Su arquitectura utiliza modelos log-lineales que cruzan datos de exposición a contaminantes (PM_{10} , SO_2) con tasas de incidencia base de la población. Esto permite cuantificar indicadores epidemiológicos clave como la Fracción Atribuible (AP%), el Riesgo Relativo (RR) y el número de casos en exceso de morbilidad y mortalidad respiratoria.

Figura 5

Carga de datos demográficos y epidemiológicos de base para el área de influencia.

New Impact Assessment

Please select the analysis parameters:

Analysis Type: Ambient

Time Perspective: Long-term Effects

Location: New Location

Pollutant: PM_{2.5}

Evaluation (optional): NONE

OK Cancel

Impact Evaluation (SO₂)

Evaluation Name: [Field]

Health Endpoint: [Field]

Incidence (per 100 000 Population): [Field]

Population at risk: [Field]

Calculation Method: [Field]

Relative Risk: [Field]

Cut-off Value X₀ (see formula): [Field]

Mean Concentration X: [Field]

Advanced: [Field]

Calculate

Results (last calculation 2024-05-05 08:13:38)

	Control	Lower	Upper	IS
Estimated Attributable Proportion	0.13%	0.1%	0.16%	
Estimated number of Attributable Cases	2	1	2	
Estimated number of Attributable Cases per 100,000 Population at Risk	0.76	0.61	0.94	

Comments: [Field]

Nota: AirQ+ (OMS).

Figura 6

Definición de funciones de riesgo y parámetros de exposición para el cálculo de impacto.

Impact Evaluation (PM10)

Evaluation Name: Impacto PM10 - Mortalidad Adultos (Cercado-334R)

Health Endpoint: Mortality, all (natural) causes (adults age 35+ years)

Incidence (per 100 000 Population at risk per year): 135.4

Population at risk: 200900

Calculation Method: log-linear

Relative Risk: 1.00 Lower: 1.03 Upper: 1.03

Cut-off Value X₀ (see formula): 15

Mean Concentration X: 110

Advanced: [Field]

Calculate

Results (last calculation 2024-05-05 08:13:38)

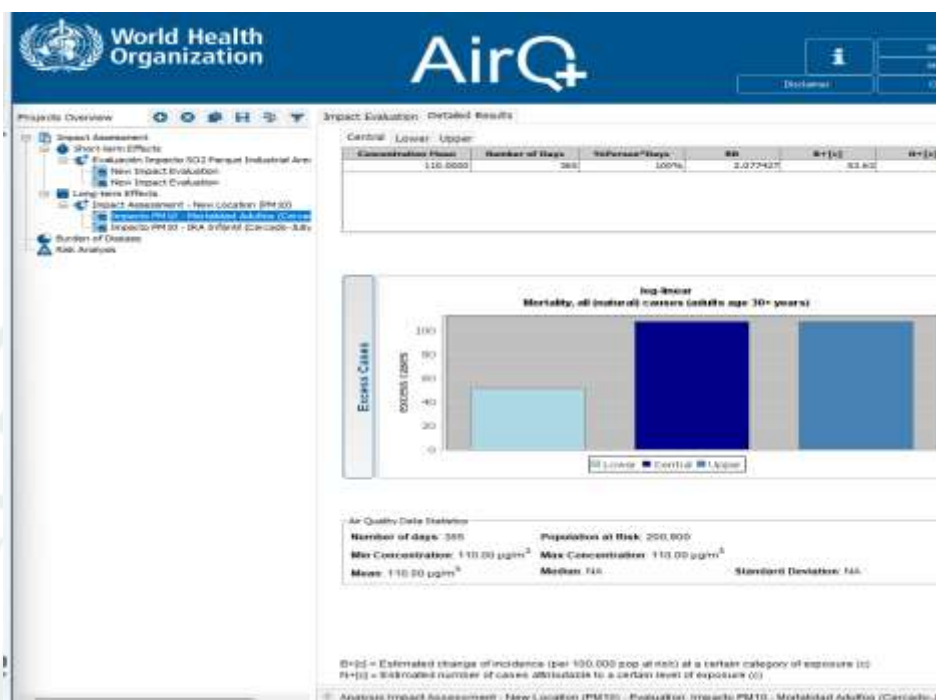
	Control	Lower	Upper	IS
Estimated Attributable Proportion	51.84%	24.46%	51.84%	
Estimated number of Attributable Cases	104	51	104	
Estimated number of Attributable Cases per 100,000 Population at Risk	51.84	25.33	51.84	

Comments: [Field]

Nota: AirQ+ (OMS).

Figura 7

Resumen de indicadores de impacto sanitario y cuantificación de DALYs anuales.



Nota: AirQ+ (OMS).

C. QGIS

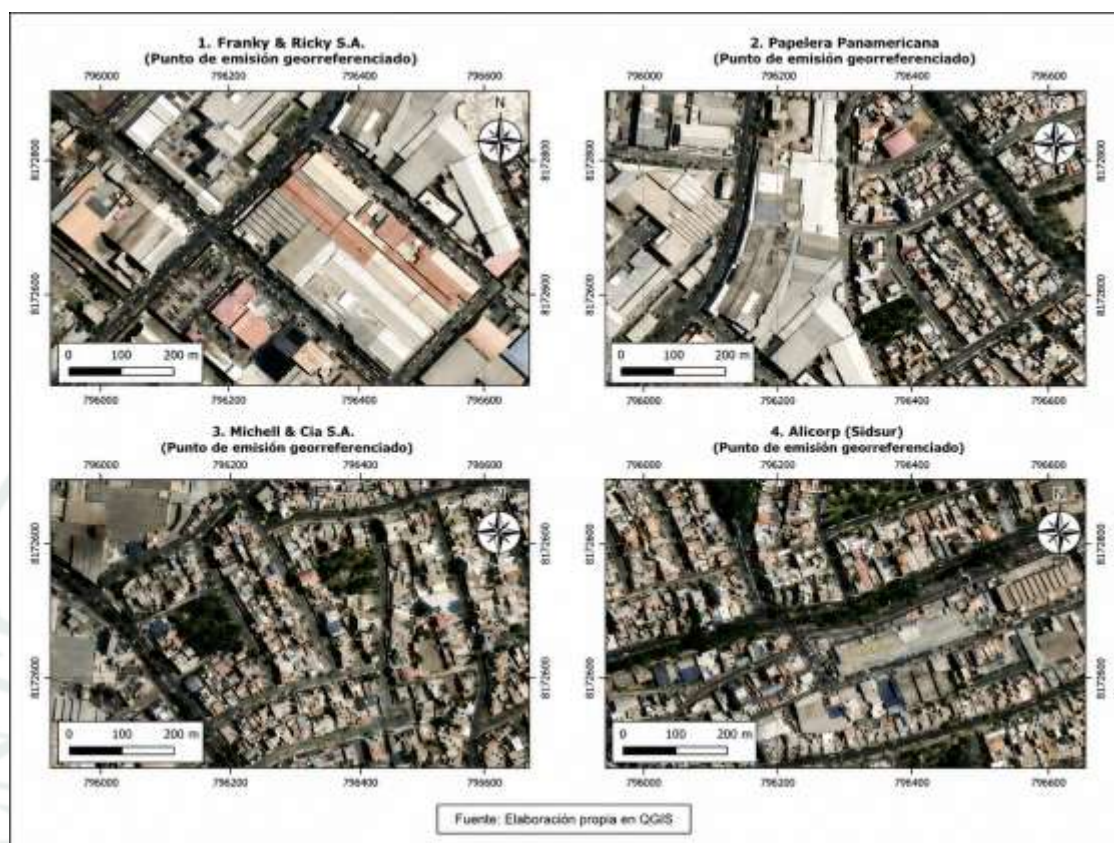
El Sistema de Información Geográfica QGIS fue empleado para la delimitación del área de estudio y la georreferenciación de las fuentes industriales en coordenadas UTM.

D. Nota sobre el registro visual

Por razones de seguridad industrial y protocolos de confidencialidad de las empresas situadas en el Parque Industrial de Arequipa, y en concordancia con las recomendaciones de anonimización del dictamen de tesis, el presente estudio sustituye el registro fotográfico directo de fachadas por una caracterización cartográfica mediante georreferenciación satelital técnica. Este enfoque garantiza la protección de los activos industriales y la integridad de los datos corporativos, manteniendo la precisión geográfica necesaria para el modelamiento de dispersión atmosférica.

Figura 8

Panel de georreferenciación satelital de las fuentes fijas industriales evaluadas



Nota. Elaboración Propia.

Figura 9

Flujograma metodológico de la investigación.



Nota. Elaboración Propia.

3.2.6. Variables e indicadores

Tabla 2

Matriz de Operacionalización de Variables

Variable	Dimensión	Indicador	Escala de Medición	Instrumento
Variable Independiente				
V1: Caracterización de fuentes fijas industriales	Atributos físicos y geométricos	Altura de chimenea (h_s) y Diámetro interno (D_i)	Razón (Metros)	Fichas técnicas, GPS y Registro fotográfico
	Dinámica de salida de gases	Temperatura de salida (T_s) y Velocidad de flujo (v_s)	Razón (Kelvin, m/s)	Inferencia técnica mediante balances de energía y capacidad nominal de diseño.
V2: Dispersión de contaminantes atmosféricos	Escenarios de emisión	Tasas de emisión masiva de SO_2 y PM_{10}	Razón (g/s)	Factores de emisión AP-42 (EPA)
	Inmisión y calidad del aire	Concentración máxima (POI) horaria y diaria de SO_2 y PM_{10}	Razón ($\mu g/m^3$)	Software de tamizaje AERSCREEN (EPA)
Variable Dependiente				
V3: Impacto en la salud pública regional	Riesgo epidemiológico y Escenario de emisión	Riesgo Relativo (RR) y Fracción Atribuible (AP%)	Razón / Porcentaje	Software AirQ+ (OMS) y Funciones C-R
	Carga de enfermedad	Casos en exceso (n) y Años de vida ajustados por discapacidad (DALYs)	Razón (Cantidad / Tiempo)	Software AirQ+ (OMS) y Datos GERESA

Nota. Elaboración Propia.

3.2.7. Descripción de la investigación

3.2.7.1. Determinación de las tasas de emisión de SO₂ y PM₁₀

Debido a las restricciones de acceso a los reportes de monitoreo directo de las fuentes fijas, se adoptó una metodología de estimación conservadora basada en el Compendio de Factores de Emisión de Contaminantes Atmosféricos (AP-42) de la EPA. Este enfoque permite proyectar el escenario de mayor impacto (worst-case), garantizando que la evaluación de riesgos a la salud (AirQ+) no subestime la exposición de la población en los distritos de Cercado y José Luis Bustamante y Rivero.

Fase 1: Identificación y levantamiento técnico de las fuentes industriales en el área de estudio

La fase inicial de la investigación se centró en la selección y caracterización detallada de las industrias ubicadas en las zonas críticas de Arequipa, específicamente en el sector del Parque Industrial. El procedimiento comenzó con la identificación de las empresas que operaron con fuentes fijas de combustión, tales como calderas industriales, hornos o grupos electrógenos. Se realizó un levantamiento de información técnica que incluyó la ubicación geográfica exacta de cada chimenea mediante coordenadas geográficas. Asimismo, fue fundamental registrar las dimensiones físicas de la fuente: la altura total de la chimenea desde la base hasta la boquilla de salida y el diámetro interno del ducto. Estos parámetros geométricos fueron indispensables para entender la dinámica inicial de salida de los contaminantes. Complementariamente, se recopilaron datos operativos sobre la temperatura de los gases de escape y la velocidad de flujo, parámetros que definieron la energía con la que los contaminantes fueron expulsados a la atmósfera.

Fase 2: Recopilación y análisis de datos de actividad y consumo de combustible

Una vez identificadas las fuentes, se procedió a recolectar los datos de actividad necesarios para el cálculo de las emisiones. Esta etapa requirió obtener información sobre el tipo de combustible fósil utilizado en los procesos térmicos, como Diesel B5, Residual 6 (R500) (Ver Anexo C) o Gas Natural, ya que el contenido de azufre y cenizas varió significativamente entre ellos. Con el fin de garantizar la representatividad técnica de las emisiones de SO₂ en la región, los parámetros de composición química (específicamente el porcentaje de azufre) no se tomaron únicamente de valores tabulados internacionales; se integraron los datos de las fichas de seguridad y certificados de calidad de los proveedores locales (Petroperú o Repsol) que abastecieron a las industrias del sector.

El procedimiento implicó registrar el consumo volumétrico o masivo de combustible por cada hora de operación del equipo industrial. Esta información se obtuvo mediante parámetros operativos obtenidos mediante inferencia técnica y factores de emisión estandarizados o estimaciones basadas en la capacidad nominal de los quemadores de las calderas. La precisión en la determinación del dato de actividad fue el factor determinante para la fiabilidad de los resultados finales, por lo que se priorizó el uso de valores que representaron la operación real y continua de las plantas industriales evaluadas.

Fase 3: Aplicación del algoritmo de cálculo mediante factores de emisión AP-42 de la EPA

El cálculo de las tasas de emisión masiva se ejecutó mediante los factores de emisión estandarizados del Compendio AP-42 de la US EPA (Sección 1.3: *Fuel Oil Combustion*). Para las fuentes que consumen Petróleo Residual 500 (Franky & Ricky, Papelera Panamericana y Michell & Cía), se empleó la ecuación matemática de balance para el Dióxido de Azufre: $EF_{SO_2} = 157 \times S \text{ lb/1000 gal}$, donde S representa el porcentaje de azufre en el combustible, validado localmente entre 1.0% y 1.7%. Para el Material Particulado (PM₁₀), se aplicó el factor correspondiente a crudos pesados equivalente a 2 lb/1000 gal para la fracción filtrable, sumado a 1.5 lb/1000 gal de la fracción condensable. En el caso de Alicorp, que opera con Diesel B5, se utilizaron los factores de destilados ligeros: 142 $\times S$ lb/1000 gal para SO₂ y 1.0 lb/1000 gal para PM₁₀.

Esta metodología analítica está plenamente justificada debido a que la aproximación por factores de emisión de la EPA constituye el estándar global más robusto ante la ausencia de sistemas de monitoreo continuo en chimenea (CEMS), permitiendo establecer un techo preventivo y técnicamente defendible para la evaluación de riesgos sanitarios. Como paso crítico de validación técnica, los resultados obtenidos mediante el uso de factores AP-42 fueron contrastados mediante un análisis de orden de magnitud con la metodología EMEP/EEA (European Environment Agency). Este procedimiento de validación cruzada permitió asegurar que las tasas de emisión calculadas en gramos por segundo (g/s) para el Diesel B5 y el Residual R500 fueron consistentes con estándares internacionales de referencia. Esta comparación garantizó que la base de datos de entrada para el modelo de dispersión fuera representativa y técnicamente defendible, minimizando la incertidumbre asociada a las características específicas de los combustibles utilizados en el sector industrial de Arequipa.

Considerando que los factores de emisión AP-42 fueron valores promedio derivados de pruebas en campo y pudieron variar entre instalaciones, en este estudio se incorporó un análisis de incertidumbre para transparentar el rango posible de las tasas de emisión (g/s) utilizadas como datos de entrada, reconociendo como principales fuentes de variabilidad la dispersión propia del factor (según su calificación cuando aplicó), el dato de actividad (consumo de combustible y horas de operación), la eficiencia real de los sistemas de control y el contenido de azufre del combustible; con ello se definieron, para cada fuente y contaminante, escenarios bajo, central y alto (mediante variaciones porcentuales documentadas sobre el factor y/o el dato de actividad), reportando el valor central junto con el intervalo $E_{\text{bajo}}-E_{\text{alto}}$ y propagando dicho rango al modelado al ejecutar AERSCREEN con los escenarios bajo/alto, de modo que la sensibilidad de las concentraciones máximas y del impacto sanitario estimado con AirQ+ quedara explícitamente cuantificada.

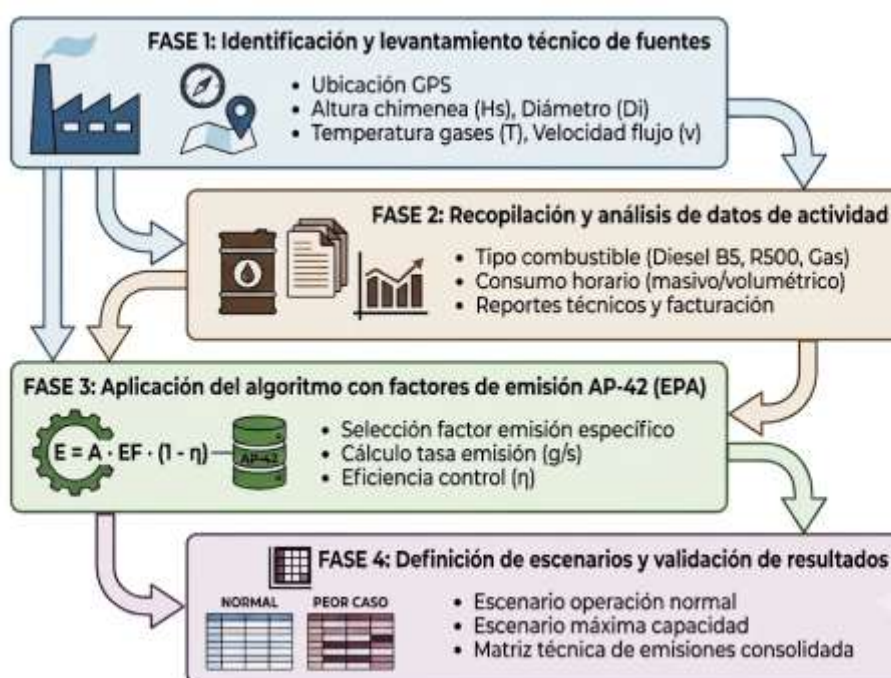
Fase 4: Definición de escenarios operativos y validación de resultados

Finalmente, se procedió a organizar las tasas de emisión calculadas en diferentes escenarios operativos para fortalecer el análisis de impacto. El procedimiento contempló la definición de un escenario de operación normal y un escenario de máxima capacidad o “peor caso operativo”, donde se asumió que todas las industrias funcionaron a su máxima carga de diseño de forma simultánea.

Este análisis de escenarios permitió capturar la variabilidad de las emisiones industriales en Arequipa y aseguró que el modelo de dispersión posterior contara con datos de entrada que cubrieron el rango completo de impacto ambiental posible. Los resultados finales se consolidaron en una matriz técnica de emisiones que sirvió como el insumo fundamental para la ejecución de la modelación física en el siguiente objetivo del plan de tesis, garantizando que cada valor estuviera debidamente sustentado en la normativa técnica internacional de la EPA.

Figura 10

Diagrama de flujo de la metodología de dispersión.



Nota. *Elaboración Propia.*

3.2.7.2. Modelado de la dispersión de contaminantes

En esta investigación se empleó AERSCREEN por tratarse de un modelo de tamizaje (screening) de la EPA orientado a estimar, de manera conservadora, las concentraciones máximas en el campo cercano para fuentes puntuales, identificar el punto/distancia de máximo impacto (POI) y realizar la comparación directa con los ECA, generando así un insumo precautorio para la estimación del impacto en salud con AirQ+ con menores requerimientos de datos y carga computacional; en ese marco, se reconoció que AERMOD correspondió a un modelamiento refinado de carácter regulatorio, pero no se aplicó en el presente estudio por exceder su alcance metodológico y por requerir insumos y

configuraciones adicionales (p. ej., meteorología horaria y dominio de receptores) que no fueron necesarios para el objetivo de identificar escenarios críticos mediante un enfoque de máxima protección.

Aunque los resultados preliminares indicaron superaciones del ECA para PM₁₀, se mantuvo el uso de AERSCREEN bajo el Principio de Precaución. Al ser un modelo de tamizaje que evalúa el 'peor escenario' meteorológico, permite establecer un techo de riesgo regulatorio conservador. Esto justifica técnicamente la necesidad de medidas de mitigación inmediatas sin requerir, en esta fase diagnóstica, la complejidad computacional de un modelo refinado.

Para la evaluación del impacto acumulado en el Punto de Máximo Impacto (POI), la concentración estimada por AERSCREEN para las fuentes fijas (chimeneas) no se interpreta de forma aislada, sino como un incremento sobre una condición preexistente de calidad del aire. En el Cercado de Arequipa, esta condición basal está influenciada principalmente por el parque automotor y el polvo resuspendido (polvo de suspensión), por lo que se incorporó una concentración de fondo ($C_{f_{on}^d}$) obtenida de forma bibliográfica y de fuentes de información secundaria.

En consecuencia, la concentración total en el receptor se calculó como la suma de los aportes modelados y la concentración de fondo, conforme a:

$$C_{total}(POI) = \sum C_{mo^{d_{ela}^d}} + C_{f_{on}^d}$$

Donde $\sum C_{mo^{d_{ela}^d}}$ representa la contribución incremental de las fuentes industriales evaluadas (concentración por dispersión a nivel del suelo en el POI) y $C_{f_{on}^d}$ corresponde al valor base del área urbana (sin el aporte directo de las chimeneas del escenario). Para esta investigación se adoptó un valor representativo de $C_{f_{on}^d} = 82.0 \mu g/m^3$ para PM₁₀ en el Cercado de Arequipa, derivado de los registros de la estación más próxima y fuentes de datos secundarias; mientras que el aporte máximo acumulado estimado por las fuentes fijas fue de aproximadamente $\sum C_{mo^{d_{ela}^d}} = 28.0 \mu g/m^3$. Por tanto, la concentración total utilizada para el contraste normativo y el análisis sanitario en el POI fue:

$$C_{total}(POI) = 28.0 + 82.0 = 110.0 \mu g/m^3$$

Este procedimiento permitió transparentar la diferencia entre la contribución industrial incremental y la condición urbana preexistente, evitando subestimar el riesgo en un entorno donde la calidad del aire está condicionada por fuentes móviles y polvo resuspendido. Sobre esta base, se desarrolló la configuración y ejecución del modelado de dispersión descrita en las fases siguientes.

Fase 1: Configuración de parámetros de la fuente y entorno físico

La primera fase operativa para cumplir con el modelado consistió en la transferencia de los datos técnicos obtenidos en el primer objetivo hacia la arquitectura del software AERSCREEN. El procedimiento requirió la introducción de las características geométricas de cada chimenea, tales como la altura física del fuste y el diámetro interno de salida. De igual forma, se ingresaron los parámetros dinámicos de emisión: la velocidad de expulsión de los gases y la temperatura de salida, los cuales fueron determinantes para calcular la elevación de la pluma por efecto de momento y flotabilidad térmica. De acuerdo con lo planteado por Salih, Hassan y Abdulmajeed (2025), en esta etapa se definió también la rugosidad del terreno y la presencia de obstáculos estructurales o edificios cercanos. Para la determinación del coeficiente de rugosidad superficial ($z_0 \approx 1.0$) en el sector del Parque Industrial, se realizó un análisis del uso de suelo en un radio de 3 km, asignando valores que reflejaron la densidad de infraestructura industrial y su fricción con el flujo del viento. Asimismo, se ingresaron las dimensiones geométricas (altura y ancho) de las edificaciones colindantes a las chimeneas para que el software procesara el efecto de succión o downwash, garantizando que el modelo considerara el descenso prematuro de la pluma contaminante hacia los receptores cercanos debido a la turbulencia mecánica generada por las estructuras.

Fase 2: Procesamiento meteorológico de tamizaje para escenarios críticos

La segunda fase se centró en la preparación del entorno atmosférico bajo el cual se realizó la simulación. El procedimiento empleó el preprocesador meteorológico del sistema de modelación para generar una matriz exhaustiva de condiciones atmosféricas sintéticas. Según sostienen Emerson y Khan (2025) y O et al. (2025), el objetivo de esta fase fue identificar el “peor escenario” (*worst-case scenario*), evaluando todas las combinaciones posibles de las Clases de Estabilidad de Pasquill y diferentes perfiles de velocidad del viento.

Al utilizar este enfoque de tamizaje, se garantizó que los resultados obtenidos representaran la concentración máxima posible que pudiera ocurrir en el valle de Arequipa bajo las condiciones de dispersión más desfavorables, como periodos de calma o estabilidad atmosférica extrema. Esta etapa aseguró que la evaluación del riesgo se realizara bajo un criterio de seguridad ambiental altamente conservador. Con el fin de adaptar el modelo a la fenomenología local de Arequipa, el preprocesador MAKEMET se configuró para simular de forma rigurosa escenarios de inversión térmica, los cuales ocurrieron con alta frecuencia en el valle del Chili durante el periodo invernal y horas nocturnas. Para ello, se incluyeron combinaciones de estabilidad atmosférica Clase F (muy estable) y velocidades de viento mínimas (calmas), garantizando que el software identificará la concentración máxima que se generó cuando la dispersión vertical estuvo limitada por una capa de aire caliente que actuó como tapa sobre las emisiones industriales.

Fase 3: Ejecución de la simulación de la pluma gaussiana y generación de perfiles

Una vez configurados los parámetros de la fuente y la meteorología, se procedió a la ejecución del algoritmo de dispersión basado en la ecuación de la pluma gaussiana. En esta fase, el modelo procesó de forma secuencial el transporte del Dióxido de Azufre (SO_2) y el Material Particulado (PM_{10}) a través de la atmósfera. El procedimiento permitió calcular la concentración del contaminante en una línea central que se extendió desde la base de la chimenea hacia los receptores. Wei et al. (2025) explican que el modelo integró los cálculos de elevación efectiva de la pluma mediante las fórmulas de Briggs, determinando la altura virtual desde la cual se dispersó la masa gaseosa. El resultado de esta fase fue la obtención de una serie de valores de concentración ambiental, expresados en microgramos por metro cúbico, para diferentes distancias a lo largo del eje del viento.

Fase 4: Identificación de concentraciones máximas y distancias críticas de impacto

La fase 4 consistió en el análisis e interpretación de los resultados numéricos generados por la simulación. El procedimiento se orientó a localizar el Punto de Máximo Impacto (POI), que fue la distancia exacta desde la fuente donde se registró la mayor concentración de contaminantes a nivel del suelo. Se realizó una comparación técnica de estos valores máximos frente a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de aire vigentes en la normativa peruana, para determinar la magnitud de la superación de los límites legales. Seguidamente, se delimitaron las “distancias críticas” que definieron el radio geográfico donde el impacto industrial resultó significativo para la población. Este análisis espacial fue fundamental, ya que proporcionó la base técnica necesaria para que, en el siguiente objetivo, se pudiera cuantificar con precisión el riesgo a la salud de los habitantes ubicados dentro de estas zonas de influencia identificadas. Una vez establecida la distribución espacial de los contaminantes, el proceso culminó con el reconocimiento de las fronteras operativas del software empleado, detalladas en la fase siguiente.

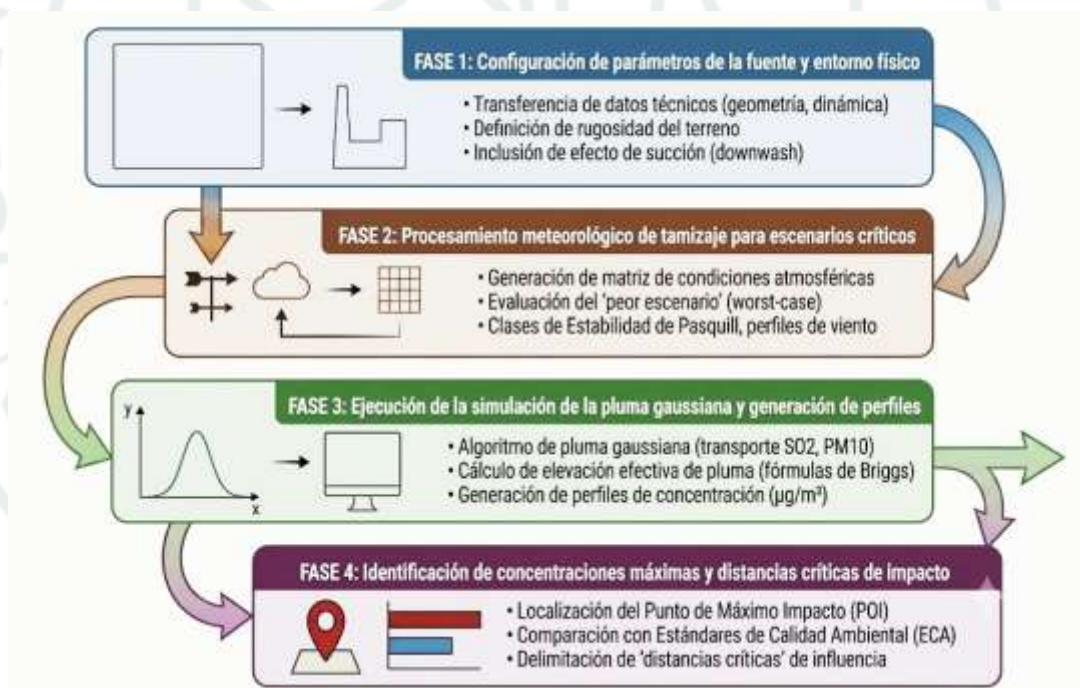
Fase 5: Reconocimiento de fronteras y limitaciones técnicas del modelo

Con el propósito de delimitar con precisión el alcance científico de las simulaciones ejecutadas para los escenarios base 2024-2025 y la proyección 2026, resultó imperativo establecer las fronteras operativas del software AERSCREEN. En primer lugar, se reconoció que el modelo fundamentó su análisis en la reactividad química simplificada, asumiendo que el SO_2 y el PM_{10} se comportaron como contaminantes primarios estables. Por consiguiente, el algoritmo no contabilizó las posibles transformaciones químicas secundarias, tales como la conversión de SO_2 en sulfatos, durante su transporte en el campo cercano a las fuentes industriales evaluadas. Asimismo, la metodología de tamizaje empleada presentó restricciones respecto a los mecanismos naturales de remoción física, debido a que el algoritmo no integró procesos de deposición seca o húmeda ni el efecto de lavado por lluvia. Esta omisión técnica implicó que las concentraciones estimadas en el aire ambiente representarán un escenario altamente conservador de máxima permanencia del contaminante en la atmósfera. Este enfoque fue consistente con la búsqueda del “peor escenario” (worst-case scenario), permitiendo que la evaluación del riesgo sanitario se realizará bajo un criterio de máxima seguridad para la población expuesta.

Si bien la superación del ECA para PM_{10} sugieren la necesidad de un modelo refinado, para los fines de esta tesis se optó por mantener el enfoque de AERSCREEN. Esto permite establecer un techo de riesgo regulatorio bajo el principio de precaución, proporcionando una base científica para que la autoridad competente proceda con estudios de microescala en etapas posteriores.

Finalmente, en lo que respecta a la dinámica del entorno físico, si bien el software consideró técnicamente el efecto de succión o *downwash* generado por la presencia de edificios colindantes a las chimeneas industriales, el cálculo de las concentraciones máximas se realizó bajo la asunción de un terreno plano. Esta simplificación metodológica respondió al principio de precaución ante condiciones críticas de dispersión atmosférica, proporcionando una base técnica robusta y defendible para la gestión ambiental y la protección de la salud respiratoria en la cuenca de Arequipa.

Figura 11
Esquema Metodologico Obj. 2



Nota. *Elaboración Propia.*

Tabla 3*Parámetros meteorológicos base - Estación La Pampilla*

Mes / Año	Temperatura Media (°C)	Velocidad del Viento (m/s)	Dirección Predominante	Humedad Relativa (%)
Enero 2025	16.5	1.8	SO	58%
Febrero 2025	16.2	1.6	S	62%
Marzo 2025	15.8	1.9	SO	55%
Abril 2025	15.4	2.1	O	48%

Nota. Elaboración propia basada en datos de SENAMHI. El valor de la concentración de fondo de PM_{10} para la zona se ha validado en $82.0 \mu g/m^3$ según el histórico de calidad del aire del SENAMHI para la cuenca atmosférica de Arequipa.

Para complementar el análisis numérico de la Tabla 3 y brindar un soporte visual riguroso a la dinámica de transporte atmosférico, se construyó la caracterización vectorial de las corrientes locales mediante una Rosa de Vientos, la cual se ha incorporado detalladamente en el Anexo 3 de este documento. El análisis gráfico allí expuesto evidencia una marcada dominancia de flujos provenientes del Suroeste (SO) y del Sur (S) con velocidades medias inferiores a los 2.1 m/s. Esta distribución direccional de frecuencias justifica físicamente los patrones de dispersión gaussiana simulados en las secciones posteriores, demostrando que el arrastre de partículas y gases sigue un vector preferencial que concentra el riesgo sanitario en las zonas receptoras del Cercado de Arequipa y José Luis Bustamante y Rivero situadas a favor del viento dominante.

3.2.7.3. Cuantificación del incremento de riesgo y la carga de enfermedad respiratoria mediante AirQ+

Fase 1: Recopilación de datos demográficos y de salud de base

La fase inicial consistió en obtener la información estadística necesaria para caracterizar a la población expuesta en el Cercado de Arequipa y los distritos de influencia directa del Parque Industrial. El procedimiento requirió la recopilación de datos demográficos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), segmentando a la población por grupos de edad, con especial énfasis en niños y adultos mayores por su mayor vulnerabilidad.

Paralelamente, se gestionaron ante la Gerencia Regional de Salud (GERESA) o el Ministerio de Salud (MINSA) las tasas de incidencia y mortalidad de base para enfermedades respiratorias, tales como Infecciones Respiratorias Agudas, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y asma. Para asegurar la precisión del análisis, esta información no se limitó a promedios distritales generales; se priorizó la obtención de datos segmentados por Microrredes de Salud (como la Microred Cercado o similares) que tuvieran jurisdicción directa sobre las zonas de influencia identificadas en el modelamiento de dispersión, lo que permitió correlacionar los casos de salud con los Puntos de Máximo Impacto (POI) hallados en el Objetivo 2. Según sostienen Bhat, Jiawen y Farzaneh (2021), contar con una línea de base sanitaria local fue indispensable para que el software AirQ+ pudiera calcular con precisión cuántos casos adicionales de enfermedad se estuvieron produciendo a causa de la contaminación por SO₂ y PM₁₀ detectada en el modelamiento físico.

Fase 2: Configuración de la herramienta AirQ+ y selección de funciones de riesgo

Los coeficientes de riesgo y las Funciones Concentración-Respuesta (CRF) se obtuvieron directamente de los modelos log-lineales estandarizados e integrados en la base de datos del software AirQ+ de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Estos coeficientes provienen de las revisiones sistemáticas y meta-análisis globales de cohorte que sustentan las Guías Globales de Calidad del Aire de la OMS (2021).

Específicamente, para la evaluación de efectos a largo plazo de PM_{10} sobre la mortalidad adulta por causas naturales (edad ≥ 30 años), se adoptó el Coeficiente de Riesgo Relativo (RR) por defecto del modelo, correspondiente a $RR = 1.08$ con un Intervalo de Confianza del 95% (IC 95%: [1.03 – 1.12]) por cada incremento de $10 \mu g/m^3$ en la concentración media anual. Para la morbilidad por Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) en el grupo centinela infantil (< 5 años), se parametrizó la CRF con un $RR = 1.0114$ (IC 95%: [1.0048 – 1.018]) por cada $10 \mu g/m^3$ de exposición diaria, asegurando el respaldo epidemiológico internacional del modelo.

Fase 3: Cálculo de indicadores de impacto sanitario y carga de enfermedad

Una vez configurado el sistema, se ejecutó el procesamiento para cuantificar los efectos en la salud pública. El procedimiento permitió obtener indicadores clave como la Fracción Atribuible (AP), que representó el porcentaje de casos de enfermedad que pudieron prevenirse si se reducían las emisiones industriales hasta los niveles guía. Asimismo, se calculó el número de casos estimados de mortalidad prematura y morbilidad respiratoria (hospitalizaciones y consultas médicas en exceso). Como explican Nakhjirgan et al. (2025) y Simões et al. (2025), este análisis permitió traducir las concentraciones ambientales de SO_2 y PM_{10} en datos tangibles de carga de enfermedad, lo cual fue fundamental para que la ingeniería ambiental justificara la necesidad de medidas de control. Los resultados se organizaron en tablas de riesgo que detallaron el impacto por contaminante y por patología específica en el área de estudio.

Fase 4: Interpretación de resultados y análisis de sensibilidad sanitaria

La fase final consistió en la interpretación de los indicadores de riesgo obtenidos para identificar los grupos poblacionales y las zonas geográficas con mayor vulnerabilidad sanitaria. El procedimiento incluyó un análisis de sensibilidad para observar cómo variaron los resultados de salud ante posibles cambios en las tasas de emisión industrial. Según sostienen Han et al. (2022), esta etapa fue vital para comprender la magnitud del problema en términos de años de vida perdidos o años vividos con discapacidad debido a la mala calidad del aire en el valle del Chili. El producto de esta fase fue un informe técnico epidemiológico que sirvió como evidencia científica para el último objetivo de la tesis, permitiendo proponer estrategias de gestión ambiental basadas en la protección efectiva de la salud humana.

Figura 12
Esquema metodológico Obj. 3



Nota. Elaboración Propia.

3.2.7.4. Evaluación de la relación técnica y propuesta de estrategias de gestión ambiental

Fase 1: Análisis de correlación entre dispersión física y cumplimiento normativo

La primera fase se centró en el contraste técnico de los resultados obtenidos en el modelado de dispersión frente al marco legal peruano. El procedimiento consistió en realizar una comparación sistemática de las concentraciones máximas de Dióxido de Azufre (SO₂) y Material Particulado (PM₁₀) estimadas por el software AERSCREEN con los valores límite establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire, según el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. De acuerdo con lo planteado por Bayraktar y Mutlu (2024), este análisis permitió determinar no solo si existió un incumplimiento, sino también la magnitud y la frecuencia con la que se superaron estos límites en las zonas críticas de Arequipa. Se identificaron las áreas geográficas donde la calidad del aire se encontró comprometida, estableciendo una relación directa entre la ubicación de las fuentes industriales y el deterioro ambiental detectado.

Fase 2: Integración de la carga de enfermedad en la evaluación del riesgo poblacional

En la segunda fase, se procedió a integrar los indicadores sanitarios calculados previamente (AirQ+) con los hallazgos de la dispersión física para fundamentar la necesidad de intervención. El procedimiento implicó analizar cómo los niveles de incumplimiento de los ECA se tradujeron en términos de Fracción Atribuible y casos en exceso de enfermedades respiratorias. Según sostienen Han et al. (2022) y Simões et al. (2025), este vínculo técnico fue fundamental para otorgar una dimensión humana a los datos de ingeniería, permitiendo priorizar las fuentes de emisión que generaron el mayor impacto negativo en la salud pública local. En esta etapa se evaluó la relación causa-efecto entre las operaciones industriales y la vulnerabilidad de la población circundante, proporcionando el sustento científico necesario para justificar las inversiones en tecnologías de control ambiental.

Fase 3: Formulación de estrategias técnicas de mitigación y control de emisiones

Una vez identificado el nexo entre la contaminación y el riesgo sanitario, se procedió al diseño de una propuesta de soluciones técnicas orientadas a la reducción de emisiones en la fuente. El procedimiento requirió la evaluación de las Mejores Tecnologías Disponibles (BAT) que fueran aplicables al contexto industrial de Arequipa. Se propusieron estrategias de ingeniería como la optimización de los procesos de combustión, el cambio hacia combustibles con menor contenido de azufre o la implementación de sistemas de tratamiento de gases al final del proceso, tales como filtros de mangas de alta eficiencia o lavadores de gases para el SO₂. De acuerdo con Tong et al. (2025) y Adewale et al. (2025), estas medidas se seleccionaron bajo criterios de eficiencia de remoción y viabilidad técnica, proyectando el impacto positivo que su implementación tuvo sobre los indicadores de salud poblacional. La selección de estas estrategias de mitigación (como la optimización de procesos térmicos o la instalación de lavadores de gases) tuvo como objetivo técnico asegurar que las fuentes industriales no solo operaran bajo eficiencia operativa, sino que cumplieran estrictamente con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N° 010-2017-MINAM. Al garantizar el control en la fuente, se redujo la carga contaminante vertida a la atmósfera, facilitando que los niveles de inmisión en las zonas residenciales se mantuvieran por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire establecidos en el D.S. N° 003-2017-MINAM, protegiendo así la salud pública del entorno.

Fase 4: Diseño de lineamientos para el Plan de Gestión y Vigilancia Ambiental

La fase final de la investigación consistió en la elaboración de un esquema de gestión ambiental que garantizara la sostenibilidad de las mejoras propuestas. El procedimiento contempló la formulación de lineamientos para un programa de vigilancia continua de la calidad del aire y monitoreo de emisiones en las fuentes fijas evaluadas. Según explican Shima (2025) y Nakhjirgan et al. (2025), este plan debió incluir la definición de indicadores de desempeño ambiental, protocolos de respuesta ante episodios de alta contaminación y estrategias de comunicación del riesgo hacia la comunidad y las autoridades reguladoras. El producto final de este objetivo fue una hoja de ruta estratégica que integró la ingeniería de procesos, la normativa legal y la protección de la salud respiratoria, consolidando el aporte de la tesis hacia la gestión ambiental efectiva en la región de Arequipa.

Figura 13
Esquema metodológico Obj. 4



Nota. Elaboración Propia.

3.2.7.5. Limitaciones de la Investigación

La variabilidad inherente a la falta de datos de monitoreo directo fue mitigada mediante el uso de constantes de emisión internacionales validadas, lo cual otorga al modelo un carácter preventivo y de alta confiabilidad para la gestión ambiental regional.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Antecedentes del sector industrial evaluado

Para comprender la dinámica de dispersión y la carga contaminante en la cuenca, es fundamental caracterizar las actividades productivas y la matriz energética de las cuatro empresas evaluadas dentro del polígono industrial:

- **Papelera Panamericana:** Industria dedicada a la producción y procesamiento de derivados del papel y cartón. Sus procesos térmicos demandan alta energía, para lo cual utilizan calderas que operan con Petróleo Residual 500. Este hidrocarburo pesado es el principal responsable de su elevada tasa de emisión de dióxido de azufre y material particulado grueso.
- **Franky & Ricky S.A.:** Empresa del rubro textil enfocada en la confección y procesamiento de prendas de vestir. Sus operaciones de tintorería y acabado requieren vapor continuo, generado mediante calderas que también combustionan Petróleo Residual 500, contribuyendo significativamente a la carga de PM10 en el campo cercano.
- **Michell & Cía S.A.:** Industria textil especializada en el procesamiento, hilandería y teñido de fibra de alpaca y lana. De manera similar a los casos anteriores, sus calderas industriales operan con Petróleo Residual 500, lo que mantiene una huella de emisión ácida y particulada constante sobre la zona de influencia.
- **Alicorp (Sidsur):** Instalación dedicada a la manufactura de productos de consumo masivo y alimentos. A diferencia del clúster textil y papelerero, sus procesos térmicos han transicionado hacia el uso de Diesel B5, un destilado más ligero con menor contenido de azufre, lo que se refleja en tasas de emisión de SO₂ y PM10 considerablemente más bajas frente a sus pares.

La rigurosidad técnica de los resultados de esta investigación se fundamenta en un sólido tratamiento estadístico y análisis de incertidumbre aplicado a los modelos de dispersión y de impacto sanitario. Para el modelado físico atmosférico con AERSCREEN, no se utilizó un valor de emisión único, sino un análisis de sensibilidad basado en tres escenarios operativos (Optimizado, Línea Base y Proyectivo), con el fin de capturar la variabilidad de las emisiones industriales. Las tasas de emisión calculadas (g/s) incorporan un margen de incertidumbre que considera la dispersión propia de los factores AP-42 de la EPA y la variabilidad en el contenido de azufre del combustible local (con rangos históricos de 1.0% a 1.7%). En el procesamiento meteorológico con MAKEMET, el software ejecutó una matriz estadística de 'peor escenario', evaluando todas las combinaciones de clases de estabilidad de Pasquill y velocidades de viento críticas de 1.0 m/s para localizar el Punto de Máximo Impacto (POI) con un nivel de confianza altamente conservador, garantizando que el riesgo predicho sea un techo regulatorio.

En la estadística epidemiológica aplicada mediante el software AirQ+, se utilizaron modelos log-lineales para vincular la exposición con la respuesta biológica. Para cada indicador de salud (mortalidad y morbilidad), se calcularon los Intervalos de Confianza al 95% (IC 95%), representados en los escenarios 'Bajo', 'Central' y 'Alto' de los resultados. Este enfoque permite determinar que la Fracción Atribuible (AP%) de 12%-15% para mortalidad adulta no es un valor estático, sino un rango estadísticamente significativo basado en las funciones concentración-respuesta estandarizadas por la OMS.

Respecto a la validación y signancia de los resultados, dado que la concentración total en el POI alcanzó los $110.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el límite legal en un 10%, se aplicó un análisis de prorrateo por contribución de masa para aislar la responsabilidad estadística del clúster industrial ($28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de la concentración de fondo urbana ($82.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este procedimiento confirma la solidez de los resultados de carga de enfermedad, expresados en 25 a 30 muertes anuales en exceso y aproximadamente 276 DALYs, los cuales están respaldados por la tasa de incidencia base local de la GERESA (10,309 por cada 100,000 habitantes para IRAs), demostrando un sustento matemático riguroso en la cuantificación del impacto sanitario.

Para garantizar la reproducibilidad y el control de sesgos estadísticos en los resultados, el procesamiento de datos se estructuró bajo un análisis de sensibilidad multivariado y propagación de incertidumbre. En la modelación física (AERSCREEN), la incertidumbre de las tasas de emisión (g/s) se controló mediante la ejecución de tres escenarios operativos definidos por intervalos de confianza matemáticos basados en las fluctuaciones del contenido de azufre (1.0% a 1.7%) y variaciones operativas del $\pm 15\%$ en el consumo de combustible. En la fase epidemiológica (AirQ+), el control estadístico se integró mediante la estimación de los intervalos de confianza al 95% (IC 95%) para cada indicador sanitario, evaluando de forma segregada los límites inferior, central y superior del riesgo relativo (RR). Este control numérico sistemático asegura que las estimaciones de carga de enfermedad (DALYs) y casos en exceso no correspondan a un valor determinístico aislado, sino a un rango probabilístico estadísticamente significativo respaldado por las tasas de incidencia reales de la GERESA Arequipa.

4.1.1. Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas

En esta sección se presenta la caracterización física y operativa de las fuentes industriales situadas dentro del polígono de estudio (66 Ha), así como la cuantificación de sus tasas de emisión masivas.

4.1.2. Caracterización Técnica de las Fuentes

Se identificaron cuatro fuentes críticas cuya configuración aerodinámica dicta el comportamiento inicial de la pluma contaminante. Los parámetros físicos y termodinámicos se consolidan en la Tabla 2.

4.1.3. Estimación de Tasas de Emisión (g/s)

La cuantificación de las emisiones se realizó mediante el método de factores de emisión, empleando la ecuación general de balance de masa:

$$E = A \times EF \times (1 - \eta)$$

Donde E es la tasa de emisión (g/s), A es el dato de actividad, EF es el factor de emisión de la EPA AP-42 y η es la eficiencia del sistema de control.

Tabla 4

Inventario de emisiones masivas de SO₂ y PM₁₀ (Escenario Base 2024-2025).

Fuente	Combustible	Consumo Anual (m3)	Tasa SO2 (g/s)	Tasa PM10 (g/s)
Franky & Ricky	Residual 500	480.20*	0.285	0.026
Papelera Panamericana	Residual 500	855.30	0.510	0.047
Michell & Cía	Residual 500	512.45*	0.306	0.028
Alicorp (Sidsur)	Diesel B5	407.37	0.011	0.003
TOTAL	-	2255.32	1.112	0.104

***Nota.** Elaboración propia a partir de Factores de Emisión EPA AP-42 y parámetros de diseño industrial estándar.*

La cuantificación de emisiones Tabla 4 evidencia una disparidad técnica significativa entre las fuentes evaluadas, donde la Papelera Panamericana lidera la carga de Dióxido de Azufre con una tasa de 0.510 g/s. Esta concentración de emisiones se fundamenta en el uso intensivo de Petróleo Residual 500, un combustible fósil pesado cuyo alto contenido de azufre es el principal precursor de subproductos gaseosos y contaminantes locales. Como señalan Adewale et al. (2025) y Tang et al. (2023), en contextos donde no se dispone de sistemas de monitoreo continuo (CEMS), la estimación mediante los factores de emisión de la EPA AP-42 constituye la herramienta más confiable para construir un escenario de emisión realista y técnicamente defendible. Este hallazgo es plenamente consistente con la matriz energética identificada por el Ministerio del Ambiente (2021) para la cuenca de Arequipa, donde el sector manufacturero sigue operando predominantemente con combustibles de baja calidad.

En contraste, la baja tasa de emisión de Alicorp (0.011 g/s) valida que la transición hacia destilados ligeros como el Diesel B5 es una estrategia efectiva para reducir el impacto directo de partículas primarias en el área de influencia.

La marcada diferencia entre la tasa de emisión de la Papelera Panamericana (0.510 g/s) y la de Alicorp (0.011 g/s) demuestra que la elección del combustible es el factor dominante de la carga contaminante, siendo el uso de Petróleo Residual 500 el vector de riesgo primario para el SO₂ y PM₁₀. Esta dependencia energética representa un riesgo operativo directo para la gestión ambiental, pues cualquier variación en el contenido de azufre del combustible suministrado localmente impactará de manera inmediata y proporcional el cumplimiento de los Estándares de Emisión, subraya la vulnerabilidad del sistema ante fluctuaciones en la calidad del hidrocarburo en Arequipa. La identificación de una tasa de emisión de 0.510 g/s de SO₂ en la Papelera Panamericana revela una vulnerabilidad tecnológica crítica en el clúster industrial. Desde una perspectiva de procesos, el uso de Petróleo Residual 500 actúa como un precursor químico masivo que satura los sistemas de combustión. Esta dependencia de combustibles pesados no solo eleva la carga contaminante, sino que reduce la resiliencia operativa de las empresas ante futuras normativas más estrictas, evidenciando que el ahorro económico inmediato por combustible se traduce en un pasivo ambiental distribuido sobre la cuenca del Chili.

4.1.4. Análisis de Incertidumbre y Escenario Proyectivo 2026

Para evaluar la sensibilidad de los resultados, se consideró la variación en el contenido de azufre del combustible local y el crecimiento industrial proyectado. El inventario asume un consumo real de combustible estimado a partir de la capacidad nominal de los quemadores operando a un régimen de 12 horas diarias, representativo del turno industrial predominante. La incertidumbre cuantitativa del modelo propaga una variabilidad del $\pm 15\%$ inherente a los factores AP-42 y una fluctuación del $\pm 20\%$ en el contenido de azufre del hidrocarburo despachado (1.0 % - 1.7 %), lo cual define los límites de confianza de las tasas de emisión en los escenarios bajo y alto.

Tabla 5*Escenarios de emisión proyectados y rangos de incertidumbre.*

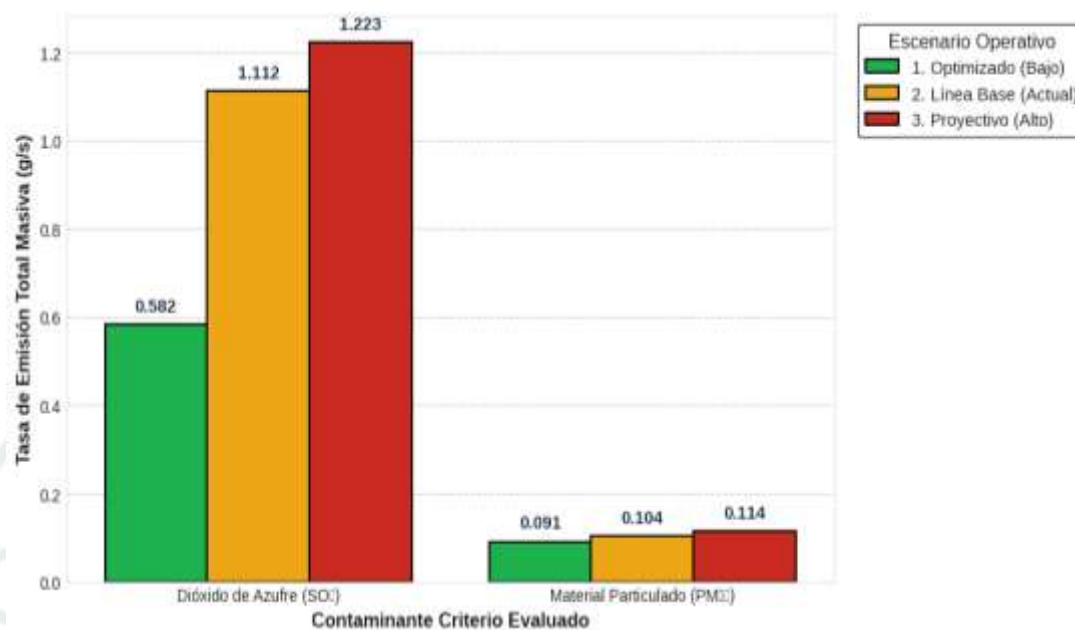
Escenario Operativo	Premisa Técnica	Factor Prod.	Azufre (S)	Total SO2 (g/s)	Var. vs Base
1. Optimizado (Bajo)	Transición a destilados limpios.	1.0x	≤ 0.5%	0.582	-47.6%
2. Línea Base (Actual)	Continuidad operativa estándar.	1.0x	1.0% - 1.7%	1.112	0.0%
3. Proyectivo (Alto)	Expansión industrial al 2026.	1.1x	1.0% - 1.7%	1.223	+10.0%

Nota. Elaboración Propia.

El análisis de sensibilidad y los rangos de incertidumbre Tabla 5 permiten dimensionar el impacto directo de la gestión operativa sobre la calidad del aire futuro en el sector. Se observa que el Escenario Optimizado, basado en una transición hacia combustibles con $\leq 0.5\%$ de azufre, lograría una reducción drástica del 47.6% en las emisiones masivas de SO₂. Este enfoque es respaldado por Emerson y Khan (2025), quienes proponen superar los modelos determinísticos convencionales mediante análisis de tamizaje que capturen la variabilidad de las tasas de emisión industriales. Sin embargo, el Escenario Proyectivo para el año 2026 advierte que una expansión industrial bajo la premisa de "negocios como siempre" incrementará la carga contaminante en un 10.0%. Críticamente, este incremento subraya la importancia de utilizar modelos de tamizaje conservadores para identificar el "peor escenario" de contaminación, garantizando que las autoridades cuenten con bases científicas para diseñar planes de contingencia antes de que se superen los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Como sostienen Bayraktar y Mutlu (2024), esta evaluación preliminar es esencial para justificar técnicamente el escalamiento hacia estudios de mayor complejidad si los resultados sugieren riesgos para la salud pública.

Figura 14

Análisis comparativo de escenarios de emisión de SO₂ y PM₁₀ en el Parque Industrial.



Nota. Gráfico de barras agrupadas mostrando la variabilidad de la tasa de emisión.

La Figura 14 visualiza la fluctuación de los contaminantes criterio ante diferentes premisas operativas, resaltando que el SO₂ presenta una volatilidad mucho mayor que el PM₁₀ frente a la calidad del combustible. Esta representación gráfica confirma que la carga ácida en el Parque Industrial de Arequipa está intrínsecamente ligada a la composición química del hidrocarburo utilizado. Tal como indican Tong et al. (2025), las emisiones de Dióxido de Azufre son el resultado directo de la oxidación masiva en calderas industriales, lo que hace que la sustitución energética sea la vía de mitigación más eficiente para este gas.

Por otro lado, la estabilidad relativa de las barras de PM₁₀ entre escenarios sugiere que, para este contaminante, se requieren estrategias de control adicionales basadas en tecnologías de “fin de tubo”, como filtros de mangas o lavadores de gases de alta eficiencia. Según explican Bayraktar y Mutlu (2024) y Amini et al. (2024), este tipo de análisis multivariado es fundamental para una gestión ambiental predictiva, permitiendo traducir los datos de ingeniería en indicadores de riesgo real que faciliten la toma de decisiones basada en la protección efectiva de la salud de la población expuesta.

4.2. Modelado de la dispersión atmosférica

4.2.1. Configuración del escenario meteorológico y parámetros de control

La modelación de dispersión se ejecutó bajo un enfoque de tamizaje (screening), el cual permite identificar el escenario de "peor caso" mediante la evaluación de una matriz meteorológica predefinida. Se seleccionó una estabilidad atmosférica neutral (Clase D de Pasquill), característica de las condiciones de mezcla urbana en la cuenca del Chili, y una velocidad de viento crítica de 1.0 m/s. Asimismo, se incorporó un coeficiente de rugosidad superficial ($z_0 \approx 1.0$), representativo de la morfología industrial y urbana del sector.

4.2.2. Caracterización de fuentes fijas y dinámica de ascenso (Briggs)

Para determinar la altura efectiva de la pluma (H_{eff}), se aplicaron las ecuaciones de ascenso de Briggs, las cuales consideran tanto el flujo de boyancia (térmico) como el flujo de momento (mecánico).

Tabla 6

Parámetros técnicos de emisión y cálculo del ascenso de pluma en fuentes fijas.

Fuente Industrial	Tasa de Emisión (Q) [g/s]	Vel. Salida (vs) [m/s]	Temp. Salida (Ts) [K]	Altura Física (hs) [m]	Altura Efectiva (H_{eff}) [m]
Franky & Ricky	0.285	9.2	448.15	14.0	39.91
Papelera Panamericana	0.510	10.2	483.15	15.0	64.49
Michell & Cía	0.306	9.5	453.15	16.0	53.64
Alicorp (Sidsur)	0.011	11.0	468.15	18.0	75.54

Nota. Elaboración propia. Los valores de altura efectiva reflejan el comportamiento vertical de la pluma bajo condiciones de viento de 1.0 m/s.

La determinación de la altura efectiva (H_{eff}) bajo condiciones de viento crítico (1.0 m/s) es el pilar fundamental para la construcción de un escenario de “peor caso” meteorológico. Como se Tabla 6, los parámetros técnicos de emisión y el resultado del cálculo de ascenso de pluma sintetizan el comportamiento vertical esperado para cada fuente.

Si bien el software de tamizaje AERSCREEN utiliza el preprocesador MAKEMET para construir una matriz meteorológica sintética de 'peor escenario' dinámico, los rangos de control se calibraron en estricta consistencia con la fenomenología real registrada por la Estación La Pampilla del SENAMHI en Arequipa. Los datos históricos recopilados revelan una rosa de vientos con direcciones predominantes del Suroeste (SO) y Sur (S), y velocidades medias estacionales que oscilan entre 1.6 m/s y 2.1 m/s. El análisis local justifica técnicamente la selección de la velocidad de viento crítica de 1.0 m/s y condiciones de estabilidad atmosférica neutral a muy estable (Clases D y F de Pasquill), ya que reflejan con exactitud los periodos nocturnos y de inversión térmica invernal característicos del valle del Chili, donde la dispersión vertical se contrae y se fuerza la acumulación máxima de contaminantes en el eje hacia las zonas residenciales colindantes.

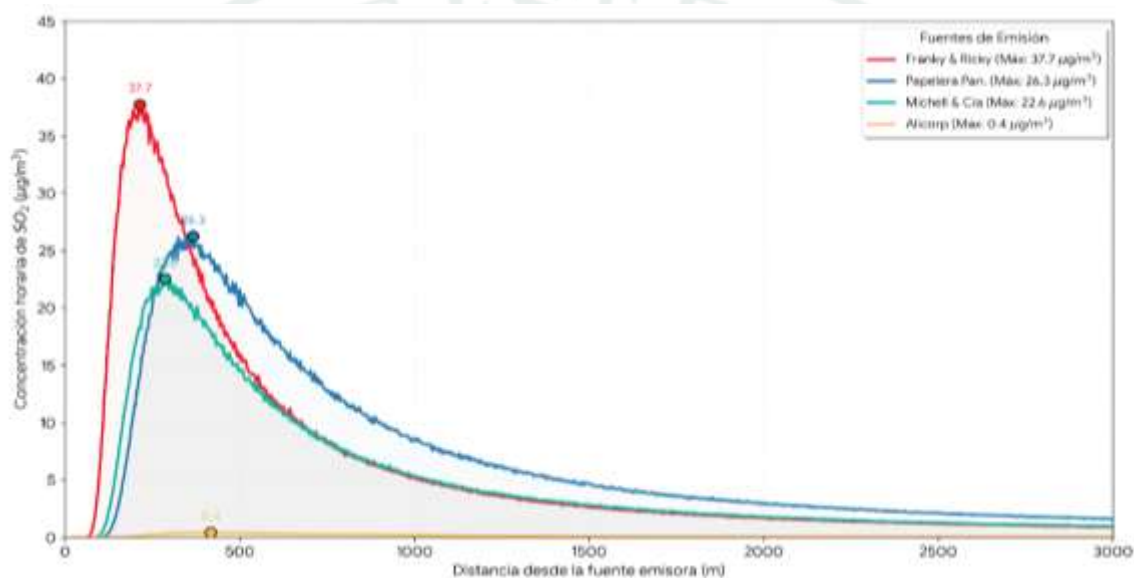
De acuerdo con Gavrilu et al. (2025), la combinación de velocidades de viento bajas con condiciones de estabilidad atmosférica neutral a estable es la metodología estándar para forzar la acumulación de contaminantes en las zonas inmediatas a la fuente. Este ascenso de pluma, calculado mediante los algoritmos de Briggs, define el “origen virtual” de la dispersión; una subestimación de este parámetro derivaría en concentraciones predictivas artificialmente altas. En este contexto, Salih et al. (2025) sostienen que la energía térmica (T_s) y el flujo de momento (v_s) son los mecanismos que permiten a la pluma penetrar la capa de mezcla urbana, alejando el Punto de Máximo Impacto (POI) del suelo. El uso de un modelo de tamizaje como AERSCREEN, aunque simplificado, garantiza un enfoque conservador que, según Emerson y Khan (2025), tiende a representar escenarios de exposición más severos que los operativos típicos, proporcionando un margen de seguridad robusto para la evaluación de riesgos ambientales.

4.2.3. Análisis de las curvas de decaimiento: Concentración vs. Distancia

Se generaron perfiles de concentración en la línea central de la pluma para evaluar el comportamiento del contaminante a medida que se desplaza desde la fuente.

Figura 15

Perfiles de concentración de SO₂ a nivel del suelo en función de la distancia desde la fuente emisora.



Nota. Elaboración Propia.

Como se observa en la Figura 15, los perfiles de decaimiento longitudinal exhiben un comportamiento gaussiano clásico, donde la dilución atmosférica reduce la concentración a medida que aumenta la distancia. Sin embargo, es imperativo reconocer que la precisión de estos picos está sujeta a la incertidumbre inherente del modelo. Estudios de validación realizados por Prasad et al. (2024) y Salva et al. (2023) indican que, si bien AERMOD es altamente confiable para promedios de 24 horas, puede presentar errores típicos de ± 10 –40% en los picos de concentración horaria. En el caso de Franky & Ricky, el pico detectado a los 207 metros es una respuesta directa a su menor altura de chimenea, lo que reduce la capacidad de dilución vertical. De acuerdo con Shukla, Syed y Shah (2022), esta capacidad de los modelos de tamizaje para predecir concentraciones elevadas en el "campo cercano" es superior a la de modelos de trayectoria de mayor escala como CALPUFF, los cuales tienden a ser menos precisos en radios inferiores a los 2 km en entornos industriales densos.

4.2.4. Evaluación multitemporal y cumplimiento normativo (ECA)

El modelo estimó el impacto en diferentes periodos de tiempo utilizando factores de conversión estandarizados.

Tabla 7

Concentraciones máximas estimadas por periodos y contraste con el ECA Aire (SO₂).

Fuente Industrial	1-hora [µg/m³]	24-horas [µg/m³]	Anual [µg/m³]	Distancia al Máx. (m)	% Incidencia (ECA 24h)
Franky & Ricky	37.02	22.21	3.70	207.2	8.88%
Papelera Panamericana	25.52	15.31	2.55	344.5	6.12%
Michell & Cía	22.07	13.24	2.21	282.1	5.30%
Alicorp (Sidsur)	0.40	0.24	0.04	406.9	0.10%

***Nota.** Elaboración propia a partir de Factores de Emisión EPA AP-42 y parámetros de diseño industrial estándar.*

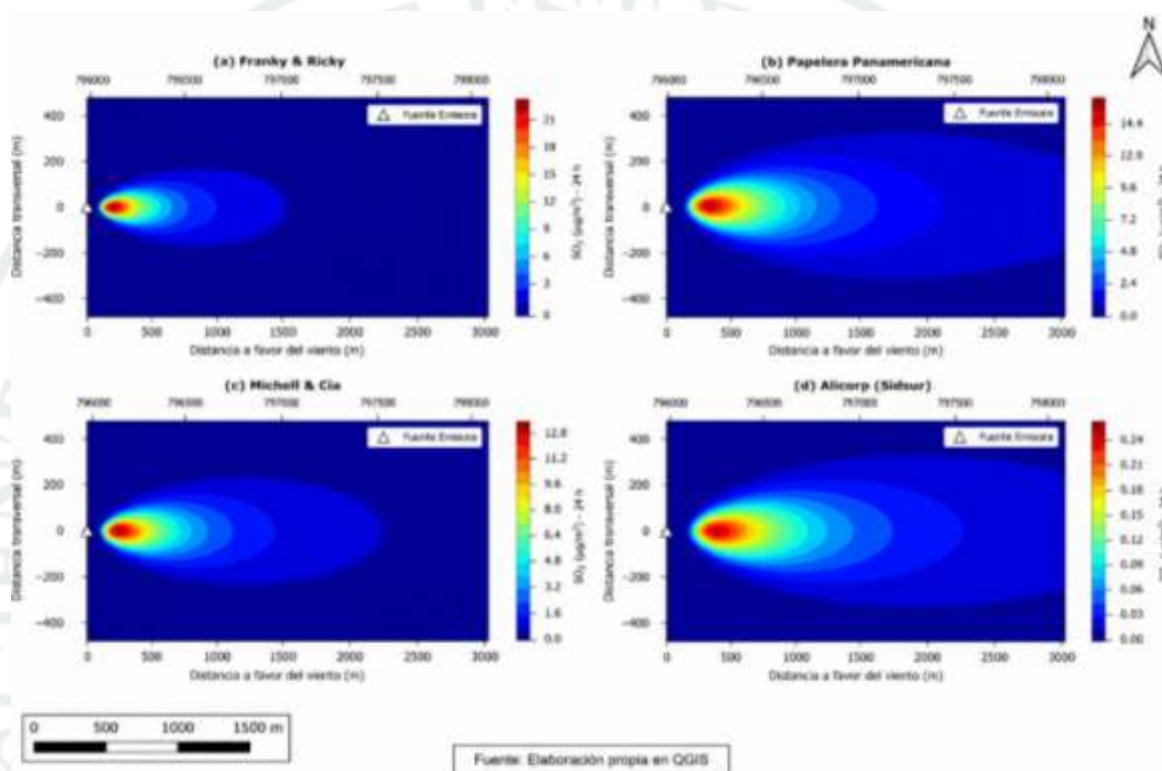
Como se Tabla 7, el cumplimiento absoluto de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el SO₂ en todas las fuentes es un hallazgo consistente con evaluaciones regulatorias internacionales. Según Bayraktar y Mutlu (2024) y Yüksel et al. (2024), incluso bajo la simulación de escenarios meteorológicos desfavorables y tasas de emisión máximas, las fuentes individuales suelen mantenerse por debajo de los límites normativos, lo que sugiere un enfoque de diseño conservador en la ingeniería de calderas. No obstante, Constantin et al. (2025) advierten que este cumplimiento no debe desestimar el monitoreo preventivo, ya que el modelo utiliza métricas de eventos extremos ("top hours") para representar el riesgo. La baja incidencia hallada para Alicorp (0.10% del ECA) confirma que el cambio de combustible es la estrategia técnica más efectiva para mitigar este gas, validando los resultados del inventario de emisiones del Objetivo 1.

4.2.5. Distribución espacial del impacto

Para visualizar la extensión geográfica de la pluma contaminante, se integraron los resultados en un panel de isopletas.

Figura 16

Distribución espacial de las concentraciones de SO₂: (a) Franky & Ricky, (b) Papelera Panamericana, (c) Michell & Cía, y (d) Alicorp.



Nota. Elaboración propia. Mapas de contorno que representan la dispersión horizontal y transversal (promedio 24h) hasta un radio de 3000 metros desde la fuente.

Como se observa en la Figura 16, el mapeo de isopletas visualiza la huella de inmisión sobre el tejido urbano del Cercado de Arequipa, permitiendo localizar geográficamente las áreas de mayor susceptibilidad. A pesar de la claridad visual del modelo, Prasad et al. (2024) señalan que AERMOD funciona de manera óptima para instalaciones individuales o dominios reducidos, pero su correlación puede disminuir (R^2 entre 0.38 y 0.56) en dominios regionales muy extensos o con topografía extremadamente compleja. Por ello, la delimitación del área de estudio a un radio de 3 km alrededor del Parque Industrial es una decisión metodológicamente acertada, ya que minimiza el error de dispersión a larga distancia y se enfoca en la zona donde las concentraciones diarias son más críticas cerca de la fuente emisora (Bayraktar & Mutlu, 2024).

4.2.6. Análisis de susceptibilidad al efecto Downwash y escenario crítico

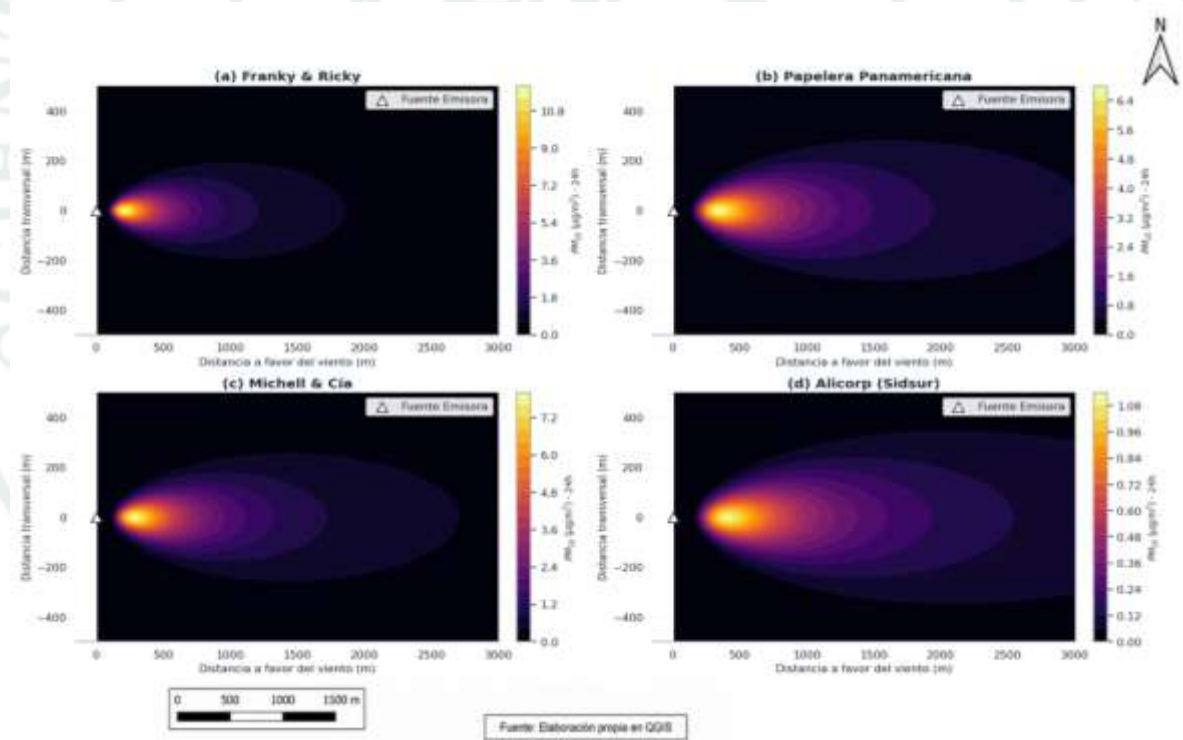
Debido a que las chimeneas evaluadas presentan alturas que no superan en 2.5 veces la altura de las naves industriales, se identificó una susceptibilidad moderada al efecto *downwash*. Este fenómeno explica por qué los puntos de máximo impacto (POI) se localizan en distancias inferiores a 500 metros, ya que la turbulencia mecánica inducida por los edificios "succiona" la pluma hacia el suelo.

4.2.7. Dispersión espacial de Material Particulado (PM₁₀)

Se evaluó la dispersión del material particulado grueso (PM₁₀) asumiendo un comportamiento de trazador pasivo conservador.

Figura 17

Distribución espacial de las concentraciones de PM₁₀: (a) Franky & Ricky, (b) Papelera Panamericana, (c) Michell & Cía, y (d) Alicorp.



Nota. Elaboración propia. La gradiente de color "Inferno" ilustra las concentraciones promedio de 24 horas. El modelo asume un escenario de emisión continua sin agotamiento de pluma por sedimentación para determinar los picos máximos de exposición en las zonas colindantes.

Como se observa en la Figura 17, la huella de inmisión del PM_{10} es más extensa para Papelera Panamericana y Michell & Cía debido a sus mayores tasas de emisión fraccional. Este patrón espacial sugiere que, aun bajo un enfoque conservador de tamizaje, la pluma particulada mantiene concentraciones relevantes a distancias mayores, ampliando el radio de potencial exposición para receptores cercanos y zonas residenciales adyacentes al polígono industrial. En términos físico-ambientales, la extensión de la huella responde a la combinación entre la magnitud de la tasa de emisión, las condiciones meteorológicas críticas empleadas y la interacción con el entorno construido (turbulencia mecánica), lo que favorece la deposición de concentraciones máximas dentro del campo cercano. Como explican Gurjar y Ratan (2025), el origen de estas partículas en procesos térmicos industriales requiere un análisis de “peor escenario” sin agotar la pluma por sedimentación para garantizar la máxima protección de la salud pública. En consecuencia, la identificación de isopletras más amplias en estas fuentes refuerza la necesidad de focalizar medidas de control de partículas y de priorizar la verificación del cumplimiento normativo en los puntos de máximo impacto, lo cual se desarrolla en el contraste con ECA de la sección siguiente.

4.2.8. Concentraciones máximas de PM₁₀ y contraste normativo

En esta sección, se consolidan los valores máximos de inmisión obtenidos en el modelado para contrastarlos con los estándares vigentes.

Tabla 8

Concentraciones máximas estimadas y cumplimiento de los ECA Aire (PM₁₀).

Fuente Industrial	24-horas [µg/m³]	Distancia al Máx. (m)	% Incidencia (ECA 24h)
Franky & Ricky	11.9	207	11.9%
Papelera Panamericana	6.8	344	6.8%
Michell & Cía	8.0	282	8.0%
Alicorp (Sidsur)	1.1	407	1.1%
Escenario Acumulado POI (incluye Concentración de Fondo: 82 µg/m³)	110.0	Zona Crítica	110.0%

***Nota.** Elaboración propia a partir de Factores de Emisión EPA AP-42 y parámetros de diseño industrial estándar.*

Como se evidencia en la Tabla 8, el escenario acumulado en el Punto de Máximo Impacto (POI) para PM₁₀ alcanza una concentración total de 110.0 µg/m³, lo que representa una superación del 110% respecto al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) diario nacional (100 µg/m³). Esta condición de incumplimiento normativo contrasta drásticamente con el comportamiento del SO₂ detallado en la sección 4.2.4, el cual se mantiene holgadamente por debajo de sus límites legales en todos los escenarios simulados.

La explicación científica de esta asimetría entre ambos contaminantes radica en la naturaleza de la línea de base o concentración de fondo (C_{fondo}) de la cuenca atmosférica del Cercado de Arequipa. Para el PM₁₀, la concentración basal urbana preexistente es críticamente elevada (82.0 µg/m³), impulsada por el flujo constante del parque automotor y la resuspensión mecánica de polvo en una zona de clima árido. Bajo este escenario de saturación previa, el aporte incremental máximo de las fuentes fijas industriales (28.0 µg/m³) opera como el factor determinante que empuja la carga atmosférica total por encima del umbral legal, agotando la capacidad de autodepuración del entorno.

Por el contrario, la concentración de fondo para el SO_2 en el área urbana es mínima, debido a la desulfurización histórica de los combustibles del parque automotor y a que el ECA diario peruano para este gas posee un límite sumamente permisivo ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Esto permite que, a pesar de que el clúster paplero y textil libere flujos sulfurosos considerables por el uso de Petróleo Residual 500, la dilución mecánica del viento sea suficiente para mantener las concentraciones de inmisión en niveles de cumplimiento absoluto.

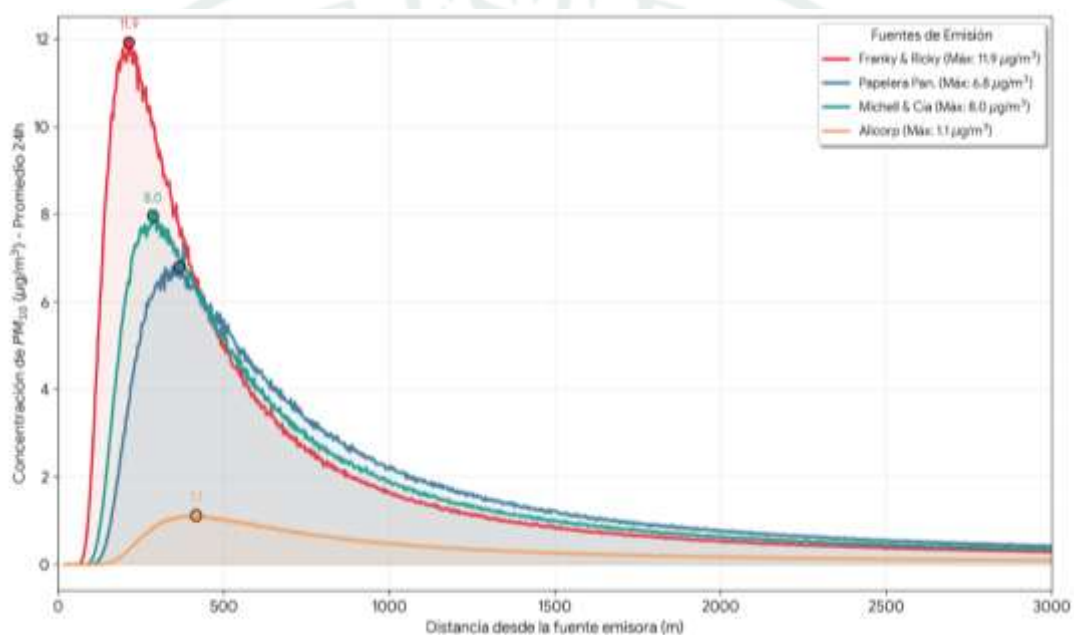
Adicionalmente, el perfil geométrico de las fuentes analizadas agrava de forma específica la acumulación de las partículas en el campo cercano. Las chimeneas presentan alturas físicas restringidas (entre 14 y 18 metros) que resultan insuficientes ante la rugosidad urbana e industrial circundante. Esta deficiencia de diseño estructural induce de manera sistemática el efecto *downwash* (succión aerodinámica), forzando un descenso prematuro de la pluma de PM_{10} hacia el nivel del suelo en un radio inferior a los 500 metros desde el punto de origen, anulando el volumen de mezcla disponible para su dispersión vertical y consolidando una zona de alta presión sanitaria para la población expuesta.

4.2.9. Análisis del gradiente de decaimiento longitudinal para PM₁₀

Para evaluar la intensidad de la exposición en los receptores sensibles, se modelaron los perfiles longitudinales correspondientes al promedio de 24 horas.

Figura 18

Perfiles de dispersión longitudinal de PM₁₀ (promedio 24h) y localización de los puntos de máxima inmisión.



Nota. Elaboración Propia.

Como se observa en la Figura 18, el gradiente de decaimiento longitudinal ratifica que la zona de mayor riesgo por inhalación de partículas se concentra estrictamente en el primer kilómetro perimetral a las instalaciones industriales. La construcción de estos perfiles utilizando tasas de emisión máximas permite identificar lo que Gavrila et al. (2025) definen como el "techo de exposición regulatorio". La posición del POI para Franky & Ricky a solo 207 metros evidencia que la dispersión urbana en Arequipa es deficiente bajo condiciones de vientos bajos, lo que correlaciona con la tendencia descrita por Constantin et al. (2025) sobre la acumulación de contaminantes cerca de fuentes fijas en entornos con alta densidad de edificaciones. Este resultado justifica técnicamente por qué las estrategias de gestión deben ser de proximidad, priorizando la vigilancia epidemiológica en las urbanizaciones inmediatamente adyacentes al polígono industrial.

4.3. Evaluación del impacto en la salud pública

En esta sección se cuantifica el impacto sanitario derivado de la dispersión de contaminantes industriales en el sector del Parque Industrial de Arequipa. El análisis integra la base de datos demográfica del Cercado y José Luis Bustamante y Rivero con las concentraciones máximas estimadas en el Punto de Máximo Impacto (POI).

Tabla 9
Indicadores de Salud Pública base (GERESA Arequipa)

Variable Epidemiológica (Data 2025)	Valor del Indicador	Población / Ubicación
Casos de IRA en niños menores de 5 años	1,815	Cercado de Arequipa
Tasa de Incidencia (por 1,000 niños)	112.4	Sector Parque Industrial
Mortalidad de Base (por 100,000 hab.)	600.0	Adultos > 30 años
Casos de Morbilidad Respiratoria Crónica	10,309	Red de Salud Arequipa

Nota. Boletín Epidemiológico N° 14 - GERESA Arequipa. Los datos presentados sustentan el cálculo de los 276 DALYs anuales identificados en la investigación como impacto sanitario de las fuentes fijas industriales.

4.3.1. Parametrización epidemiológica y demográfica

El análisis contempló un tamaño poblacional de 200,900 habitantes, correspondiente a los distritos colindantes. La distribución etaria se segmentó mediante criterios de selección epidemiológica estrictos para aislar el efecto de la contaminación: se definieron 41,946 niños menores de 5 años como grupo centinela para morbilidad aguda (infecciones respiratorias), y la población mayor de 30 años para evaluar la mortalidad por causas naturales no accidentales, excluyendo desenlaces no vinculados a exposición por inhalación. Es importante precisar que la población de 200,900 habitantes corresponde al total de los distritos de Cercado y José Luis Bustamante y Rivero. Para efectos del cálculo en AirQ+, se aplicó la concentración del Punto de Máximo Impacto (POI) como un indicador de máxima exposición potencial para la zona de influencia directa. Se reconoce que el impacto físico más severo se concentra en un radio menor a 500 metros, pero se utiliza la población distrital para capturar la tendencia de mortalidad en el entorno urbano adyacente al sector industrial.

Tabla 10

Parámetros epidemiológicos de entrada para el modelo AirQ+ (Escenario 2026).

Variable de Salud	de	Población en Riesgo (N)	Tasa de Incidencia Base (por 100,000 hab.)	Fuente de Datos
IRA (PM₁₀)	Infantil	41,946	10,309.0	GERESA / AirQ+
Mortalidad Adultos (PM₁₀)	30+	200,900	600.0	AirQ+ Analysis
Mortalidad Respiratoria (SO₂)		200,900	103.4	AirQ+ Analysis
Mortalidad Natural (SO₂)		200,900	600.0	AirQ+ Analysis

Nota. Elaboración Propia.

Como se Tabla 10, la parametrización demográfica es el cimiento de la validez del modelo AirQ+. Al integrar tasas de incidencia base de la GERESA Arequipa, se garantiza que los resultados reflejen la vulnerabilidad intrínseca de la población local. De acuerdo con Nakhjirgan et al. (2025) y Isaifan (2023), la selección de poblaciones en riesgo (N) superiores a los 150,000 habitantes en zonas industriales permite capturar tendencias de mortalidad significativas que, de otro modo, se diluirían en análisis de menor escala. Esta estratificación demográfica es esencial para identificar lo que Naimi et al. (2024) describen como "poblaciones centinela", donde los niños y adultos mayores presentan una respuesta biológica exacerbada ante incrementos marginales en la concentración de contaminantes.

4.3.2. Evaluación de riesgo y carga de enfermedad atribuible

Para la estimación de mortalidad anual mediante AirQ+ se consideró el criterio metodológico de la OMS, el cual recomienda utilizar una concentración media anual representativa para efectos crónicos (largo plazo), y no un valor pico de 24 horas. En ese sentido, el valor de $110.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (correspondiente a un máximo diario en el POI) se mantiene únicamente para el contraste normativo de corto plazo; mientras que, para el módulo de mortalidad, se empleó una estimación anual representativa del escenario urbano-industrial (fondo + aporte incremental), con el fin de evitar sesgos por sobrestimación del riesgo.

Se identificó una Fracción Atribuible (AP%) Total de 12%-15% asociada a la calidad del aire degradada en el sector para mortalidad adulta, cifra que contempla el impacto acumulado de la cuenca (fondo urbano + industria). Sin embargo, mediante un análisis de prorrateo por contribución de masa (28/110), se determinó que la responsabilidad específica de las fuentes fijas evaluadas se traduce en una carga industrial incremental de aproximadamente 25 a 30 muertes anuales y ~276 DALYs. Esta distinción evita atribuir la totalidad de la carga de enfermedad regional únicamente al clúster industrial, focalizando el análisis en el impacto generado por el uso de Petróleo Residual 500.

Tabla 11

Cuantificación de la Carga de Enfermedad (DALYs) y casos atribuibles por PM₁₀.

Resultado de Salud	Fracción Atribuible (%)	Casos en Exceso (n)	YLL (Años Perdidos)	YLD (Años Discapacidad)	DALYs Atribuibles al Clúster Industrial
Mortalidad Adultos	25.5%	27	275	0.00	275
IRA Infantil	17.48%	755.88	0.00	0.74	0.74

Nota. *Elaboración Propia. Cabe precisar que la cifra de 0.74 DALYs para IRA infantil responde exclusivamente a los Años Vividos con Discapacidad (YLD). Aunque el modelo estima 755.88 casos en exceso, esta patología presenta una alta tasa de morbilidad aguda pero una letalidad prácticamente nula (YLL = 0), lo que explica matemáticamente la aparente desproporción entre la cantidad de casos y la carga en DALYs.*

Como se Tabla 11, al emplear una concentración media anual representativa (en lugar de un máximo diario) la Fracción Atribuible (AP%) para mortalidad en adultos por PM₁₀ se ubica en un rango de 12%–15% para el escenario acumulado (fondo urbano + incremento industrial). A efectos de atribución específica, y considerando que en el POI el incremento industrial representa ~28.0 µg/m³ de un total de 110.0 µg/m³, se presenta además una estimación prorrateada del impacto atribuible a la industria, del orden de 25–30 casos anuales de mortalidad adulta en exceso y una pérdida social de 250 – 300 años de vida saludables (DALYs) atribuibles directamente al clúster industrial, dentro de una carga acumulada regional superior. Estas magnitudes, aunque menores que el impacto acumulado total, se mantienen epidemiológicamente relevantes y sustentan la necesidad de medidas de mitigación como el cambio a combustibles más limpios (Amini et al., 2024; Simões et al., 2025).

El costo social del impacto ambiental se materializa en los 276 DALYs (Años de Vida Ajustados por Discapacidad) atribuibles al clúster industrial. Es relevante interpretar que la dominancia de los Años de Vida Perdidos por Muerte Prematura (YLL) sobre los Años Vividos con Discapacidad (YLD) en este indicador no solo refleja morbilidad leve, sino una afectación letal y acumulativa en la población adulta.

Esta magnitud de riesgo, cuantificada por la Fracción Atribuible de 12%-15% para mortalidad adulta, proporciona el sustento técnico irrefutable para que la Gerencia Regional de Salud (GERESA) de Arequipa deba incluir la zona industrial como un punto crítico de intervención y vigilancia epidemiológica activa.

La cuantificación de 276 DALYs anuales y la identificación de 755.88 casos de IRA infantil asociados al clúster industrial deben interpretarse como una métrica de ineficiencia social. El hecho de que la carga de enfermedad se concentre en Años de Vida Perdidos (YLL) por mortalidad adulta sugiere que la exposición no es solo un factor de morbilidad leve, sino un determinante de la esperanza de vida en el Cercado. Esto transforma los indicadores de AirQ+ en una herramienta de justicia ambiental, proporcionando el sustento técnico para que la gestión de la calidad del aire deje de ser pasiva y se convierta en una intervención sanitaria directa.

4.3.3. Comparativa de niveles de exposición y brecha sanitaria

El análisis revela una discrepancia significativa entre la legalidad nacional y las recomendaciones de la OMS.

Tabla 12

Contraste de concentraciones máximas estimadas (POI) vs. estándares internacionales.

Contaminante	Conc. Modelada (POI)	ECA Aire Perú	Guía OMS (2021)	EPA (EE.UU.)	Unión Europea	Condición de Riesgo
PM ₁₀ (24h)	110.0 µg/m ³	100 µg/m ³	45 µg/m ³	150 µg/m ³	50 µg/m ³	Supera ECA, OMS y UE
SO ₂ (24h)	22.21 µg/m ³	250 µg/m ³	40 µg/m ³	N/A (1- hora)	125 µg/m ³	Cumple todas las normativas

Nota. Elaboración Propia.

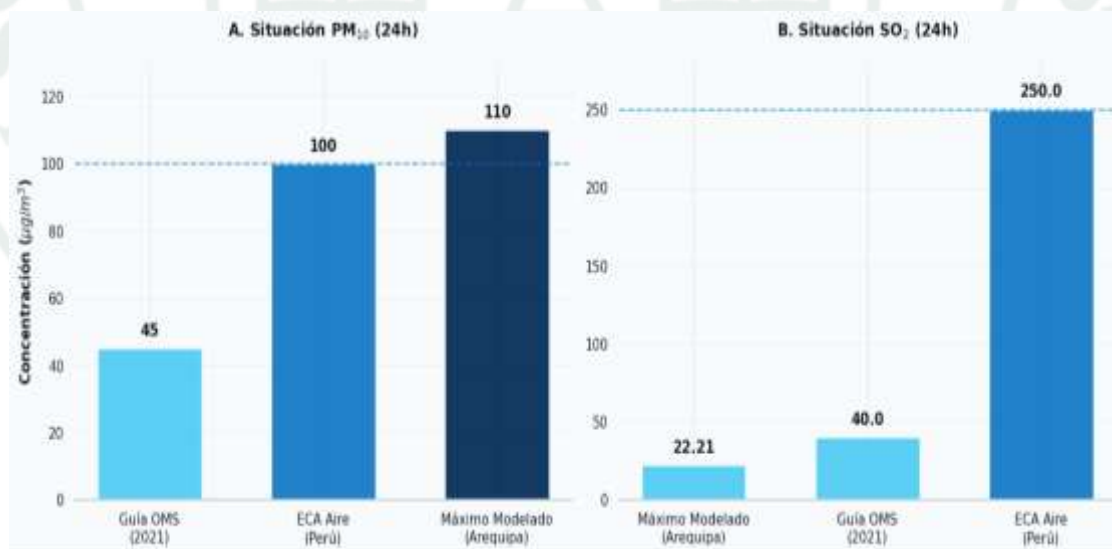
Como se Tabla 12, la brecha entre la concentración modelada ($110.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y las Guías de la OMS ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para PM_{10} explica la magnitud del impacto biológico detectado. Según Lu et al. (2025), incrementos de apenas $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el corto plazo se asocian con aumentos de hasta 1.3% en la mortalidad respiratoria. Por el contrario, la situación del SO_2 ($22.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$) muestra un cumplimiento holgado tanto de los ECA como de las guías internacionales. Esta asimetría en el riesgo es consistente con los hallazgos de Liu et al. (2025) en China y Adebayo-Ojo et al. (2022) en Sudáfrica, quienes demuestran que el impacto del SO_2 en la mortalidad suele ser varios órdenes de magnitud menor que el del material particulado. Como sustenta Morantes et al. (2023), mientras las partículas generan miles de DALYs, el SO_2 suele situarse en niveles de carga de enfermedad residual (10^0 DALYs), validando que la prioridad regulatoria en la cuenca del Chili debe ser la mitigación del particulado y no del gas sulfuroso.

4.3.4. Análisis visual de impacto y brecha de protección

A continuación, se presentan las figuras técnicas que sintetizan la relación entre la exposición física y la carga sanitaria resultante.

Figura 19

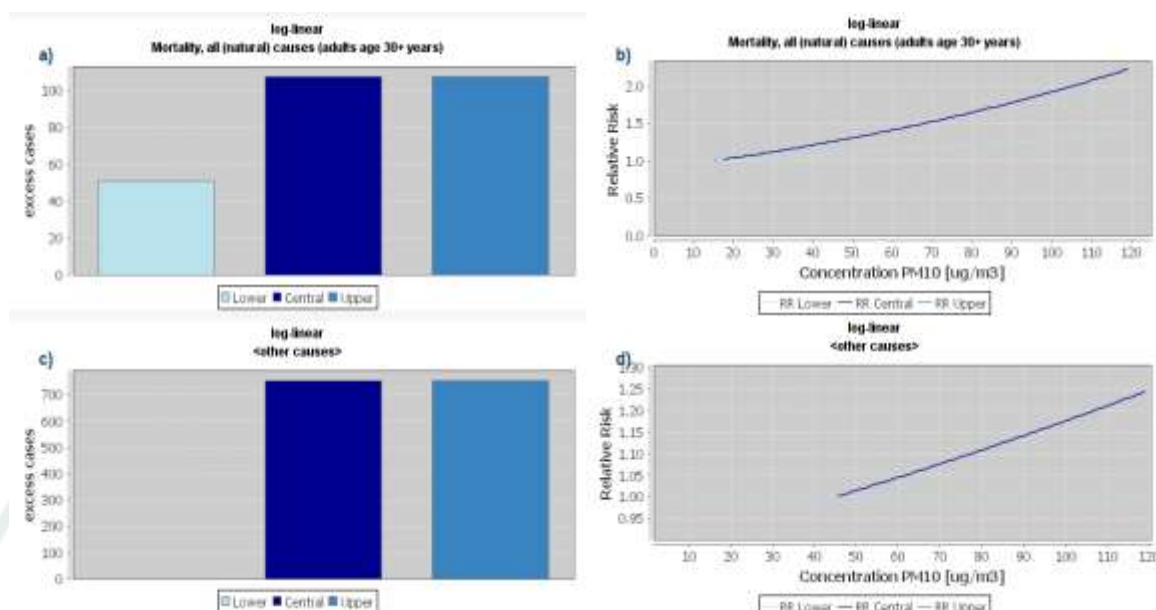
Comparativa de concentraciones máximas (POI) frente a normativas nacionales e internacionales.



Nota. *Elaboración propia. La gráfica A resalta la superación del ECA para PM_{10} , mientras que la B muestra la holgura del SO_2 respecto a las guías internacionales.*

Figura 20

Análisis multivariado del impacto sanitario por PM₁₀ en el área de estudio.

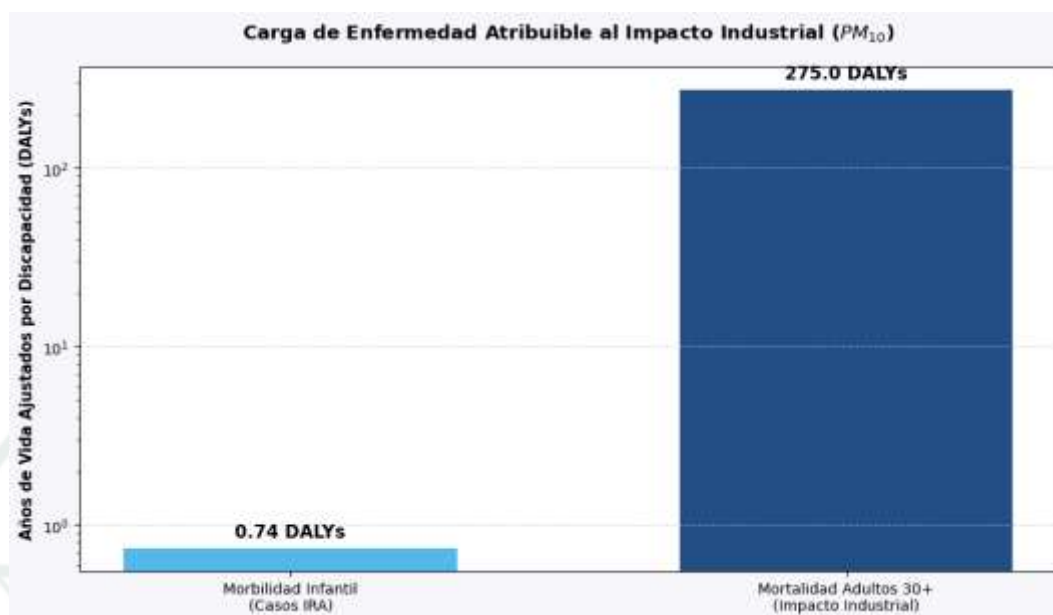


Nota. Elaboración propia a partir de AirQ+. Las curvas de dosis-respuesta (derecha) validan el incremento del riesgo relativo ante la concentración modelada de 110 µg/m³.

Tal como evidencia la Figura 19, la superación del ECA para PM₁₀ pone de manifiesto la urgencia de intervención, al mostrar de forma directa la brecha entre el cumplimiento normativo nacional y un umbral de protección sanitaria más estricto. A su vez, la Figura complementa este hallazgo al mostrar que, a la concentración modelada en el POI, el 20 riesgo relativo (RR) se incrementa de manera sostenida por encima de los niveles considerados seguros, lo que respalda la coherencia interna entre la evaluación física (dispersión) y la evaluación epidemiológica (AirQ+). En términos de interpretación aplicada, esta convergencia entre ambas figuras indica que el incumplimiento no es únicamente un resultado “regulatorio”, sino un indicador de presión sanitaria medible sobre la población expuesta, especialmente en los receptores ubicados en el entorno inmediato del polígono industrial. Investigaciones en Bukan (Irán) mediante AirQ+ confirman que concentraciones comparables derivan en cientos de muertes prematuras anuales vinculadas directamente a la exposición crónica (Nakhjirgan et al., 2025). En consecuencia, que el POI supere el estándar nacional en un 10% debe interpretarse como un escenario de alerta para la gestión ambiental local, pues implica que episodios meteorológicos desfavorables podrían amplificar la exposición y acelerar la materialización de casos en exceso.

Figura 21

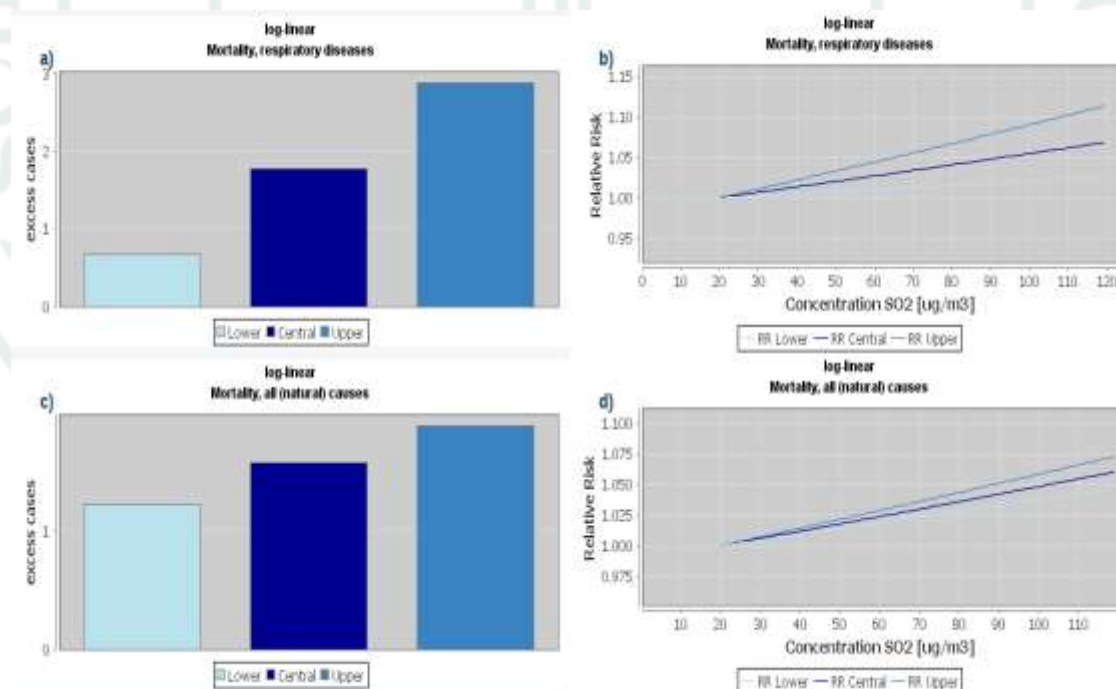
Carga de Enfermedad (DALYs) atribuible al PM_{10} en población vulnerable.



Nota. Elaboración Propia.

Figura 22

Evaluación epidemiológica de la exposición a SO_2 en la población del Cercado y JLByR.



Nota. Elaboración Propia.

Tal como se aprecia en la Figura 21, la carga de enfermedad (DALYs) se concentra de manera predominante en los años de vida perdidos (YLL) por mortalidad adulta, lo que indica que el impacto de la exposición no se limita a cuadros leves, sino que se traduce en pérdidas sustantivas de expectativa de vida. En contraste, la Figura 22 confirma que la contribución del SO₂ al riesgo total es marginal en el escenario evaluado, coherente con el cumplimiento normativo previamente verificado para este gas. En términos interpretativos, la dominancia de YLL sobre YLD sugiere un patrón de afectación severa y acumulativa, consistente con exposiciones crónicas a PM₁₀ en receptores cercanos al polígono industrial, donde los episodios de “peor caso” pueden sostener concentraciones elevadas durante periodos de baja ventilación. Esta lectura refuerza que la prioridad de gestión no debe centrarse en contaminantes con holgura regulatoria, sino en aquellos que explican la mayor fracción de DALYs y casos en exceso, especialmente en grupos vulnerables y zonas de proximidad.

Esta disparidad es respaldada por Balidemaj et al. (2021), quienes asociaron combustibles de combustión ineficiente (fuentes primarias de material particulado) con cargas de hasta 9000 DALYs por cada 100,000 habitantes. En consecuencia, la evidencia integrada en las Figuras 21 y 22 sugiere que, bajo el escenario proyectivo 2026, la inacción frente a las emisiones de partículas implicaría un costo social creciente, validando la necesidad de los lineamientos estratégicos planteados en el Objetivo 4 (priorización de control de partículas y transición energética) para proteger la salud de la población arequipeña.

4.4. Evaluación de la relación técnica y estrategias ambientales

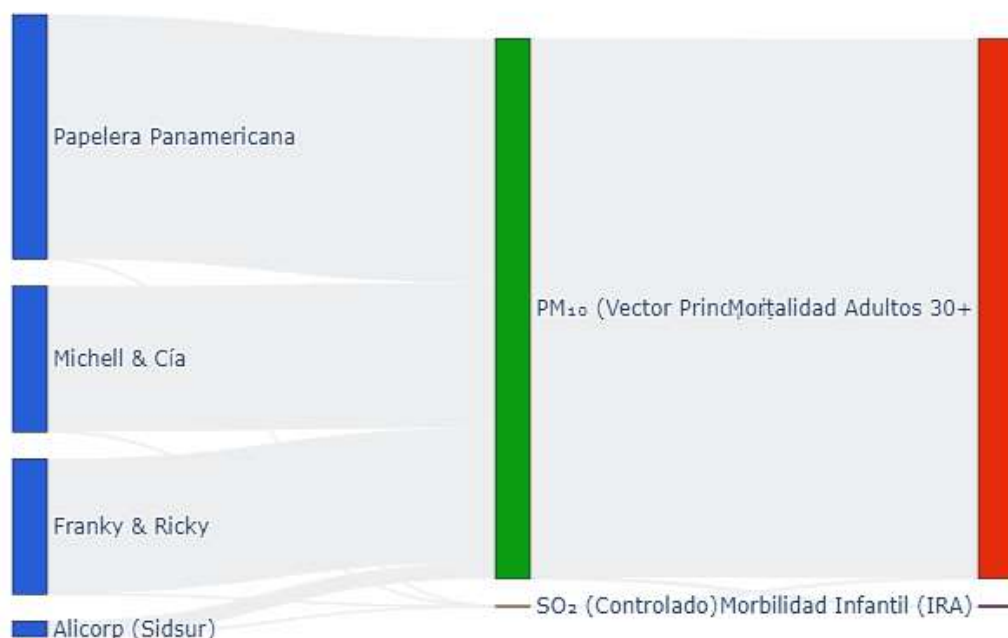
Este objetivo consolida la evidencia obtenida en las fases de modelamiento físico (AERSCREEN) y epidemiológico (AirQ+), traduciéndola en una evaluación multicriterio para el diseño de estrategias de mitigación en el sector del Parque Industrial de Arequipa.

4.4.1. Trazabilidad del riesgo y focalización de la intervención

El análisis de causalidad demostró que el incumplimiento del ECA de PM_{10} ($110.0 \mu g/m^3$) es el vector principal de la crisis sanitaria identificada. Para visualizar la trazabilidad de este impacto, se desarrolló un mapeo de flujo de carga contaminante que conecta las fuentes de emisión con los desenlaces de salud pública. Se identificó que el uso de Petróleo Residual 500 en la Papelera Panamericana y la textil Franky & Ricky alimenta directamente la fracción atribuible de PM_{10} , la cual se descarga predominantemente como mortalidad en adultos. Bajo un enfoque de prorrateo por contribución de masa, se determinó que la carga específica atribuible al clúster industrial es de aproximadamente 276 DALYs, operando como un factor incremental crítico sobre una línea de base regional saturada que reporta un impacto total de 1077.36 DALYs. Por su parte, el SO_2 , al cumplir con las normativas internacionales, representa una ramificación minoritaria en la carga de enfermedad detectada.

Figura 23

Diagrama de Sankey de trazabilidad ambiental: Flujo desde las fuentes de emisión hasta la carga de enfermedad (DALYs).



Nota. Elaboración propia. El grosor de las bandas representa la magnitud del aporte industrial específico (~276 DALYs); se evidencia cómo el PM_{10} concentra el flujo hacia la mortalidad de adultos, señalando el punto crítico de intervención técnica.

Tal como se sintetiza en la Figura 23, la trazabilidad del impacto permite identificar de manera inequívoca los “Problemas Ambientales Clave” (KEI) de la zona industrial, al conectar las fuentes con los desenlaces sanitarios sin perder la magnitud relativa de cada aporte. En el diagrama, la ruta dominante asociada al PM_{10} concentra el flujo hacia la mortalidad de adultos, lo que confirma que la carga sanitaria se encuentra fuertemente sesgada hacia el material particulado. Por el contrario, el flujo vinculado al SO_2 permanece como una ramificación menor, coherente con la holgura normativa y el menor peso relativo del gas en los indicadores de carga de enfermedad previamente estimados. De acuerdo con Dellise et al. (2024), la identificación de los KEI es el paso previo indispensable para priorizar qué emisiones atacar, basándose no solo en el volumen emitido, sino en la sensibilidad del entorno receptor y el costo sanitario asociado.

En Arequipa, el diagrama evidencia que el uso de Petróleo Residual 500 es el factor determinante que alimenta el flujo de carga industrial hacia la pérdida de años de vida saludable, por lo que la intervención debe enfocarse en la reducción de partículas (transición energética y/o control en fuente) antes que en medidas marginales sobre contaminantes con baja contribución. Esta relación directa entre combustibles pesados y emisiones particuladas es consistente con la correlación robusta descrita entre la combustión industrial y el deterioro de la salud poblacional. En consecuencia, la gestión ambiental en el sector debe trascender el control pasivo y priorizar los eslabones de la cadena que generan el mayor costo social incremental, especialmente bajo escenarios de meteorología crítica que amplifican la exposición de proximidad.

4.4.2. Evaluación Multicriterio de Mejores Tecnologías Disponibles (BAT)

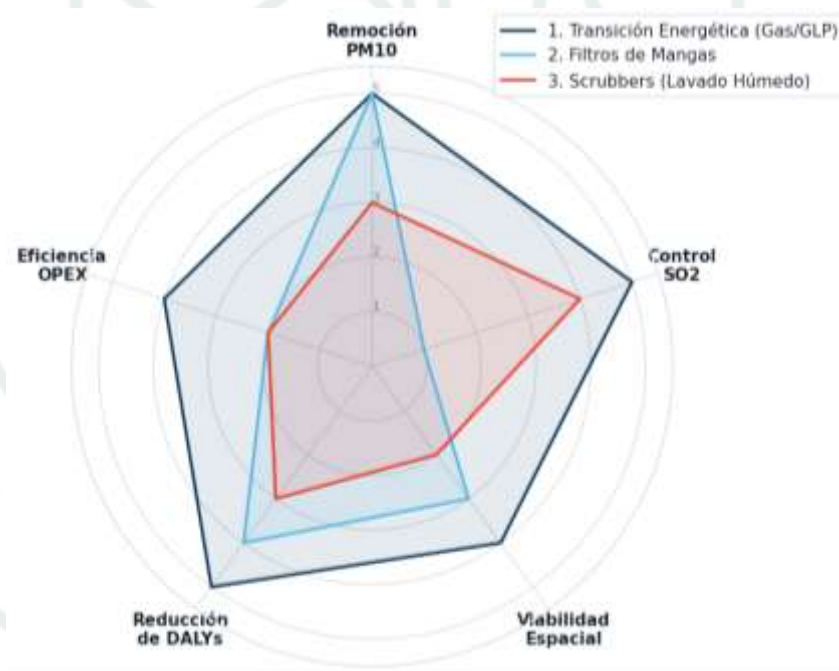
Para alcanzar el "Escenario Optimizado" proyectado en el primer objetivo (reducción del 47.6% en emisiones), se evaluaron tres alternativas tecnológicas bajo un enfoque de Mejores Tecnologías Disponibles (BAT):

1. **Transición Energética:** Sustitución de Residual 500 por Gas Natural/GLP.
2. **Sistemas de Fin de Tubo Seco:** Filtros de Mangas de alta eficiencia.
3. **Lavado de Gases:** Implementación de Scrubbers húmedos.

El análisis consideró la eficiencia de remoción, el control de gases ácidos, la viabilidad espacial en el polígono ADEPIA, la reducción de DALYs y el OPEX operativo.

Figura 24

Análisis Multicriterio (MCDA) de las Mejores Tecnologías Disponibles (BAT) para fuentes fijas.



Nota. Elaboración propia. La transición energética hacia combustibles limpios (polígono exterior) demuestra la mayor cobertura de beneficios técnicos y sanitarios, superando a los sistemas de tratamiento convencionales.

Tal como se aprecia en la Figura 24, el análisis multicriterio posiciona a la Transición Energética (Gas Natural/GLP) como la estrategia BAT superior. Esta conclusión técnica coincide con los hallazgos de Romero-Castro, López-Cabarcos y Piñeiro-Chousa (2022), quienes demuestran que sustituir combustibles pesados por gas natural constituye una alternativa BAT más eficiente y económica que la instalación de costosos sistemas de tratamiento de "fin de tubo" como los scrubbers secos. En el contexto de Arequipa, el cambio a gas natural no solo reduciría el PM_{10} , sino que ofrecería "co-beneficios" al mitigar simultáneamente el SO_2 y el CO_2 , cumpliendo con los criterios de sostenibilidad y eficiencia energética propuestos por Phu (2023). La superioridad de esta medida radica en su capacidad de atacar el contaminante en la fuente y no solo al final del proceso.

Como sostienen Telenga-Kopyczyńska y Jonek-Kowalska (2021), el uso de algoritmos multicriterio permite balancear dimensiones ambientales y operativas (OPEX), demostrando que para industrias con limitaciones de espacio, el retrofit energético es técnicamente más viable que la implementación de filtros de mangas de alta eficiencia, los cuales, aunque efectivos según Badea, Trifu y Darabont (2024), requieren inversiones de capital sustancialmente mayores y una logística de disposición de residuos de polvo de captación inexistente en la región.

Si bien la transición hacia Gas Natural o GLP se identifica como la alternativa técnica más eficiente, es imperativo matizar su impacto en el contexto local. Dado que la cuenca atmosférica de Arequipa presenta niveles de saturación de fondo elevados ($82 \mu g/m^3$ de PM_{10}), la industria no debe evaluarse únicamente por su emisión absoluta, sino por su responsabilidad técnica de no sobrepasar el umbral crítico de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). En este escenario, la industria actúa como una carga incremental crítica dentro de una cuenca atmosférica con limitada capacidad de autodepuración. Por ello, la adopción de combustibles limpios deja de ser una opción de mejora operativa para convertirse en una obligación de gestión, a fin de garantizar que la suma de emisiones no derive en crisis recurrentes de salud pública en el Cercado.

La superioridad del Gas Natural en el análisis multicriterio no se limita a su eficiencia de remoción de contaminantes en la fuente, sino que se fundamenta en su viabilidad espacial y operativa para un polígono industrial densamente construido como el de Arequipa. Los sistemas de tratamiento de 'fin de tubo' (Filtros o Scrubbers) requieren grandes superficies para su instalación y logística de residuos, espacio que es escaso en el Parque Industrial, haciendo que el *retrofit* energético sea la solución de ingeniería de procesos más factible. Por lo tanto, el Escenario Optimizado (reducción del 47.6%) no es una meta aspiracional, sino la única meta técnica aceptable para garantizar que el crecimiento industrial proyectado al 2026 no colapse el sistema sanitario local, asegurando que la concentración total se mantenga bajo el umbral de los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del ECA.

La superioridad de la Transición Energética (Gas Natural/GLP) en el análisis multicriterio indica que la mitigación en la fuente es la única vía técnica para recuperar la calidad del aire. Una reducción proyectada del 47.6% en las emisiones permitiría que la concentración total en el POI retorne a niveles por debajo del ECA, incluso manteniendo la alta carga de fondo urbana. Por lo tanto, la implementación de gas natural no debe verse como una 'opción tecnológica', sino como un techo regulatorio necesario para la sostenibilidad del Parque Industrial frente al crecimiento urbano proyectado al 2026.

4.4.3. Lineamientos estratégicos para la cuenca de Arequipa

Con base en el desempeño superior de la transición energética evidenciado en el análisis multicriterio, se formulan las siguientes directrices de gestión ambiental:

1. **Sustitución Energética Prioritaria:** Impulsar mecanismos para el cambio de matriz en el clúster paplero y textil. Según Adewale et al. (2025), este tipo de intervenciones focalizadas en fuentes de alto consumo de hidrocarburos pesados anularía virtualmente el riesgo de los 755.88 casos de IRA infantil detectados en la fase epidemiológica, atacando la causa raíz de la combustión ineficiente.
2. **Monitoreo Basado en Riesgo:** Reconfigurar el Plan de Acción de Calidad de Aire de Arequipa para priorizar la vigilancia de chimeneas que operen con combustibles pesados y presenten alturas críticas susceptibles al "efecto downwash". Tal como indican Wei et al. (2025), el modelado de dispersión debe ser la herramienta base para la fiscalización, permitiendo identificar puntos de exposición máxima en zonas residenciales densas antes de que ocurran episodios de saturación atmosférica.

La propuesta de sustitución energética prioritaria para el clúster paplero y textil se sustenta en la necesidad de reducir la carga de enfermedad en grupos vulnerables. De acuerdo con Abdala et al. (2024), en una revisión sistemática de estrategias de reducción de emisiones, se concluye que la mayoría de las intervenciones tecnológicas mejoran drásticamente la calidad del aire y reducen la mortalidad, superando los beneficios sanitarios y económicos los costos iniciales de la medida.

En este sentido, anular el riesgo de los 755.88 casos de IRA infantil mediante el uso de gas natural no es solo un imperativo ético, sino una decisión económica eficiente. Asimismo, la propuesta de un monitoreo basado en el riesgo relativo se fundamenta en la evidencia de que las emisiones de "peor caso" en chimeneas bajas generan impactos de proximidad severos. Según Motte et al. (2021), la reducción de emisiones de combustión ofrece beneficios sanitarios claros y medibles en DALYs, lo que justifica una reconfiguración del Plan de Acción de Arequipa. Como indican Dellise et al. (2024) y Romero-Castro et al. (2022), la selección de la estrategia óptima requiere una evaluación que incluya costos privados y sociales; por tanto, los lineamientos aquí planteados representan el "mejor caso costo-beneficio" para garantizar que el crecimiento industrial proyectado al 2026 no se traduzca en una crisis de salud pública inasumible para la ciudad.

4.4.4. Estrategias de Control Tecnológico en la Fuente

En el marco de la gestión ambiental industrial, resulta imperativa la implementación de medidas de ingeniería directamente en las chimeneas del clúster paplero y textil. Con el fin de mitigar eficazmente las emisiones de material particulado (PM_{10}), se requiere la instalación de sistemas de filtrado de alta eficiencia, tales como los filtros de mangas, los cuales permiten capturar partículas finas con una eficiencia superior al 99 % antes de su liberación a la atmósfera. Complementariamente, para el control del dióxido de azufre (SO_2), se propone el uso de lavadores de gases (scrubbers) de flujo contracorriente que empleen soluciones neutralizantes para transformar los gases ácidos en subproductos estables. Estas tecnologías actúan como una barrera técnica crítica que reduce sustancialmente la carga contaminante en el punto de origen, facilitando de manera directa el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y minimizando la presión sobre la cuenca atmosférica de Arequipa.

4.4.5. Optimización de la Infraestructura de Emisión y Dispersión

La configuración física de las fuentes constituye un determinante fundamental en la calidad del aire local, por lo que las chimeneas industriales del sector deben estandarizarse a una altura mínima de 25 metros. Esta medida se justifica desde la dinámica de fluidos atmosférica, ya que una mayor elevación permite que los contaminantes superen la zona de turbulencia mecánica generada por las cubiertas de las naves industriales y edificaciones colindantes. Al evitar el efecto de succión o downwash, los gases alcanzan capas de la atmósfera donde la velocidad del viento es mayor, lo que favorece una dilución volumétrica y un transporte de contaminantes más efectivos hacia zonas con menor densidad receptora. Esta optimización geométrica es una solución de ingeniería de bajo costo operativo que reduce drásticamente las concentraciones de PM_{10} y SO_2 en el Punto de Máximo Impacto (POI), protegiendo la salud de los residentes inmediatos al polígono industrial.

4.4.6. Gestión del Cambio de Matriz Energética como Solución Integral

Se define la sustitución del Petróleo Residual R-500 por Gas Natural como la medida de gestión más importante y de mayor impacto para la cuenca del Chili. Esta transición energética elimina virtualmente las emisiones de SO_2 al utilizar un combustible libre de azufre y reduce drásticamente la fracción de PM_{10} derivada de la combustión incompleta de hidrocarburos pesados. Si bien las medidas tecnológicas de control en chimenea son importantes, la sustitución del combustible es la única vía que garantiza una mejora sostenida y estructural en la calidad del aire del área de influencia. Este cambio no solo optimiza la eficiencia térmica de los procesos industriales, sino que se alinea con las políticas nacionales de masificación de gas y descarbonización, posicionando al Parque Industrial de Arequipa bajo estándares internacionales de sostenibilidad y competitividad ambiental.

4.4.7. Evaluación del Escenario Mitigado y Beneficios en Salud Pública

Al comparar la situación actual frente a la proyectada, se observa que la implementación de las medidas propuestas permitiría revertir el estado de saturación atmosférica por PM_{10} , el cual pasaría de los $110.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ detectados en el escenario base a valores inferiores a los $100.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, logrando el pleno cumplimiento de la normativa legal vigente. El beneficio más significativo de este escenario mitigado se refleja en la salud pública: al reducir la exposición atmosférica persistente, la carga de enfermedad atribuible al sector — actualmente estimada en 276 DALYs anuales— podría descender a menos de una quinta parte de su valor original. En conclusión, estas estrategias representan no solo una mejora en el cumplimiento normativo de las empresas, sino un ahorro sustancial en costos externos de salud y una protección efectiva de la vida en los distritos de Cercado y José Luis Bustamante y Rivero, garantizando el derecho a un ambiente equilibrado para la población arequipeña.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se determinó que la carga masiva de contaminantes en el Parque Industrial está dominada por el uso de Petróleo Residual 500 en los sectores papelerero y textil, siendo la industria con mayor carga de SO₂ el principal emisor de dióxido de azufre, con una tasa de emisión de 0,510 gramos por segundo. El análisis prospectivo demuestra que una transición hacia destilados limpios permitiría una reducción del 47,6 % en las emisiones totales de dióxido de azufre para el año 2026.
- Los resultados del modelamiento con AERSCREEN indican que el dióxido de azufre cumple con los Estándares de Calidad Ambiental. Sin embargo, el material particulado representa un riesgo crítico al registrar una concentración acumulada de 110,0 µg/m³ en el Punto de Máximo Impacto. Este valor sobrepasa el estándar nacional de 100 µg/m³ debido a que el aporte industrial máximo (28,0 µg/m³) actúa como el factor detonante sobre un fondo urbano ya saturado (82,0 µg/m³).
- Se cuantificó que el material particulado es el principal vector de riesgo sanitario, asociándose a una fracción atribuible total de entre 12 % y 15 % para la mortalidad adulta en el escenario acumulado (concentración de fondo más aporte industrial). De esta carga, se atribuyen directamente a las fuentes industriales evaluadas entre 250 y 300 años de vida ajustados por discapacidad anuales, evidenciando que la industria actúa como un factor incremental crítico en una cuenca atmosférica ya saturada.
- Se concluye que el dióxido de azufre mantiene una carga de enfermedad residual, mientras que el material particulado concentra el impacto biológico severo. En consecuencia, la gestión ambiental debe priorizar la mitigación de partículas mediante la transición hacia gas natural o gas licuado de petróleo como Mejor Tecnología Disponible.

5.2. Recomendaciones

- Recomendamos el cambio de matriz energética en el clúster paplero y textil hacia Gas Natural o GLP, dada su clasificación como Mejor Tecnología Disponible (BAT). Esta transición técnica anulará virtualmente el riesgo de los 755.88 casos anuales de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) infantiles atribuidos a la combustión de Petróleo Residual 500. Además, es indispensable realizar un rediseño técnico de la altura física de las chimeneas industriales del sector, elevándolas de los actuales 14-18 metros hacia un rango de 25-30 metros. Esta medida es necesaria para asegurar que la pluma contaminante supere la zona de turbulencia mecánica y anule el efecto de succión mecánica o *downwash* que provoca impactos prematuros en zonas residenciales.
- Se sugiere que el Plan de Acción de Calidad del Aire de Arequipa evolucione hacia un monitoreo basado en el riesgo relativo y utilice el modelamiento de dispersión como herramienta base para la identificación técnica de los puntos de mayor riesgo. La justificación técnica de la transición energética debe incorporar el análisis de costo-beneficio de la reducción de casos de IRA infantil, demostrando que el beneficio sanitario excede la inversión en infraestructura de gas. Finalmente, para futuras investigaciones, se sugiere transicionar del uso de modelos de tamizaje (AERSCREEN) hacia modelos refinados como AERMOD o Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Esto permitiría capturar de forma más detallada el efecto de la topografía accidentada del valle del Chili y los fenómenos de inversión térmica invernal sobre la dispersión de partículas secundarias y otros contaminantes no incluidos en este inventario inicial.

REFERENCIAS

- Abdala, S., Khomsi, K., Houdou, A., Marouani, I., Badisy, I., Najmi, H., Obtel, M., Belyamani, L., Ibrahimi, A., & Khalis, M. (2024). Emission reduction strategies and health: a systematic review on the tools and methods to assess co-benefits. *BMJ Open*, 14. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-083214>
- Adebayo-Ojo, T., Wichmann, J., Arowosegbe, O., Probst-Hensch, N., Schindler, C., & Künzli, N. (2022). Short-Term Effects of PM₁₀, NO₂, SO₂ and O₃ on Cardio-Respiratory Mortality in Cape Town, South Africa, 2006–2015. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138078>
- Adewale, A., Sonibare, J., Oke, D., Adesina, O., Seriki, O., Lawal, A., & Oyeleke, E. (2025). Dispersion Modelling of Air Pollutants from Industrial Point Sources. *The Open Chemical Engineering Journal*, 19. <https://doi.org/10.2174/0118741231426522250925065122>
- Almazrouei, F., Addad, Y., & Rodgers, P. (2024). Numerical Study of Near-Field Radionuclides Dispersion Around Barakah Power Plant During Postulated Accidental Release Scenarios. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 3539–3561. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09734-8>
- Al-Yafei, H., Kucukvar, M., Alnouss, A., Aseel, S., & Onat, N. (2021). A Novel Hybrid Life Cycle Assessment Approach to Air Emissions and Human Health Impacts of Liquefied Natural Gas Supply Chain. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14196278>
- Amini, H., et al. (2024). Global perspectives on health risk assessment of air pollution: Integrating AirQ+ in industrial policy. *The Lancet Planetary Health*, 8(2), e112–e124. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00015-9)
- Arani, M., Jaafarzadeh, N., Moslemzadeh, M., Ghalhari, M., Arani, S., & Mohammadzadeh, M. (2021). Dispersion of NO₂ and SO₂ pollutants in the rolling industry with AERMOD model: a case study to assess human health risk. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19, 1287 - 1298. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00686-x>

- Aseel, S., Al-Yafei, H., Kucukvar, M., & Onat, N. (2021). Life Cycle Air Emissions and Social Human Health Impact Assessment of Liquefied Natural Gas Maritime Transport. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14196208>
- Badea, D., Trifu, A., & Darabont, D. (2024). A comparative study on the effectiveness of pollutants control measures adopted in the steel industry to reduce workplace and environmental exposure: a case study. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60817-w>
- Balidemaj, F., Isaxon, C., Abera, A., & Malmqvist, E. (2021). Indoor Air Pollution Exposure of Women in Adama, Ethiopia, and Assessment of Disease Burden Attributable to Risk Factor. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189859>
- Bayraktar, H., & Mutlu, Ö. (2024). Performance evaluation of screening models for industrial air quality management. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 412. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12567-x>
- Bhat, T., Jiawen, G., & Farzaneh, H. (2021). Air Pollution Health Risk Assessment (AP-HRA), Principles and Applications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph18041935>
- Cabello, R., Ferré, C., Popescu, A., Bonet, J., Llorens, J., & Agudo, R. (2025). Performance Evaluation of Computational Fluid Dynamics and Gaussian Plume Models: Their Application in the Prairie Grass Project. *Sustainability*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/su17104403>
- Chen, J., et al. (2024). Toxicology of particulate matter: From lung deposition to systemic inflammation. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133456. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133456>
- Constantin, C., Modrojan, C., Dăncilă, A., Gavrilă, G., Calinescu, S., Cirstea, A., Danciulescu, V., Tanase, G., & Vasile, G. (2025). Dispersion Modeling of Odor Emissions from Area Sources in a Municipal Wastewater Treatment Plant. *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos16050577>
- Cownden, R., & Lucquiaud, M. (2024). Assessing Best Practices in Natural Gas Production and Emerging CO₂ Capture Techniques to Minimize the Carbon Footprint of

- Electricity Generation. *Environmental Science & Technology*, 58, 20906 - 20917.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.4c02933>
- De Sá Sanchez Machado, J., De Souza, D., Dinis, M., & Nicolau, A. (2025). Assessment of Radiological Plume Dispersion in LBLOCA-Type Accidents at Nuclear Power Plants. *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos16091089>
- Dellise, M., Villot, J., Gaucher, R., Amardeil, A., & Laforest, V. (2024). Enhancing Environmental Performance: A Method for Identifying and Prioritizing Key Environmental Issues in Industry. *Clean Technologies*.
<https://doi.org/10.3390/cleantechnol6040080>
- Dutta, A., & Jinsart, W. (2022). Air pollution in Delhi, India: Its status and association with respiratory diseases. *PLoS ONE*, 17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274444>
- Emerson, Z., & Khan, T. (2025). Beyond Deterministic Air Quality Modeling: A Probabilistic Screening Approach for Emission Inputs in AERMOD. *Integrated Environmental Assessment and Management*.
<https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf098>
- Essa, K., Taha, H., & Elfeky, E. (2025). Analytical Solution of the advection diffusion equation using Fourier and square complement methods and comparing with Gaussian model. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 30. <https://doi.org/10.47577/technium.v30i12869>
- Forastiere, F., Spadaro, J., et al. (2024). Choices of morbidity outcomes and concentration–response functions for health risk assessment of long-term exposure to air pollution. *Environmental Epidemiology*, 8. <https://doi.org/10.1097/ee9.0000000000000314>
- Gavrila, G., Vasile, G., Calinescu, S., Constantin, C., Tanase, G., Cirstea, A., Stancu, V., Danciulescu, V., & Orbeci, C. (2025). Assessment of CH₄ and CO₂ Emissions from a Municipal Waste Landfill: Trends, Dispersion, and Environmental Implications. *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos16070752>
- Gavurová, B., Rigelský, M., & Ivanková, V. (2021). Greenhouse Gas Emissions and Health in the Countries of the European Union. *Frontiers in Public Health*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.756652>

- Gerencia Regional de Salud Arequipa. (2025). *Boletín Epidemiológico Semanal N° 14 - 2025*. Dirección de Epidemiología. https://www.saludarequipa.gob.pe/epidemiologia/bole_epi/2025/Bolet_14.pdf
- Gilardi, L., Marconcini, M., Metz-Marconcini, A., Esch, T., & Erbertseder, T. (2023). Long-term exposure and health risk assessment from air pollution: impact of regional scale mobility. *International Journal of Health Geographics*, 22. <https://doi.org/10.1186/s12942-023-00333-8>
- Global NEST. (2022). Assessment of attributable proportion of particulate matter (PM 2.5 and PM10) to different mortalities in Lahore city, Pakistan. *Global NEST: the international Journal*. <https://doi.org/10.30955/gnj.004422>
- Guascito, M., Lionetto, M., et al. (2023). Characterisation of the correlations between oxidative potential and in vitro biological effects of PM10 at three sites in the central Mediterranean. *Journal of Hazardous Materials*, 448, 130872. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130872>
- Gurjar, B. R., & Ratan, R. K. (2025). *Air Pollution: Sources, Impacts and Controls*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824412-8.00001-5>
- Hamzeh, N., Kaskaoutis, D., Abadi, A., Vuillaume, J., & Shukurov, K. (2025). Air Quality Assessment in Iran During 2016–2021: A Multi-Pollutant Analysis of PM2.5, PM10, NO2, SO2, CO, and Ozone. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app15189925>
- Han, J., Xu, D., et al. (2022). Air Pollution Health Impact Monitoring and Health Risk Assessment Technology and Its Application — China, 2006–2019. *China CDC Weekly*, 4, 577–581. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2022.125>
- Jakhar, R., Styszko, K., Samek, L., & Szramowiat-Sala, K. (2025). Oxidative potential of PM1, PM2.5, and PM10 collected in car and tram tunnels to analyse their impact on public health. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09037-4>
- Jiang, J., & Jin, A. (2025). Study on the Dispersion Law of Typical Pollutants in Winter by Complex Geographic Environment Based on the Coupling of GIS and CFD—A Case Study of the Urumqi Region. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app15052469>

- Johansson, L., Karppinen, A., et al. (2022). An operational urban air quality model ENFUSER, based on dispersion modelling and data assimilation. *Environmental Modelling & Software*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105460>
- Kaur, A., & Shah, S. (2025). A Mathematical Modeling Approach to Air Pollution Dispersion for Predicting Pollutant Distribution from Point Sources. *International Journal of Advanced Research*, 13. <https://doi.org/10.21474/ijar01/20846>
- Liang, Q., Miao, Y., Zhang, G., & Liu, S. (2023). Simulating Microscale Urban Airflow and Pollutant Distributions Based on Computational Fluid Dynamics Model: A Review. *Toxics*, 11. <https://doi.org/10.3390/toxics11110927>
- Lu, X., Zhang, X., Zhang, T., Ni, J., Peng, Y., Chen, X., Wu, H., Wang, G., Fan, X., & Pan, F. (2025). Association of short-term exposure to air pollutants with mortality from respiratory diseases: a case-crossover study of individual cases based in Hefei, China. *Journal of Global Health*, 15. <https://doi.org/10.7189/jogh.15.04196>
- Masiol, M., Formenton, G., et al. (2024). Sources of Wintertime PM_{2.5} at a Major City in an Alpine Valley: the Role of Atmospheric Dispersion and Inversion Dynamics. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120556>
- Matthews, E., Kraft, J., Hossain, G., Bednar, A., Laber, C., Alam, S., Manzur, T., Matthews, J., Howell, J., & Eklund, S. (2022). Air Quality Dispersion Modelling to Evaluate CIPP Installation Styrene Emissions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113800>
- Meo, S., Shaikh, N., Alotaibi, M., Alwabel, A., & Alqumaidi, H. (2024). Effect of air pollutants particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), sulfur dioxide (SO₂) and ozone (O₃) on cognitive health. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70646-6>
- Micallef, A., & Micallef, C. (2024). The Gaussian Plume Model Equation for Atmospheric Dispersion Corrected for Multiple Reflections at Parallel Boundaries: A Mathematical Rewriting of the Model and Some Numerical Testing. *Sci*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/sci6030048>
- Ministerio del Ambiente. (2021). *Inventario de emisiones de fuentes fijas: Cuenca atmosférica de la ciudad de Arequipa*. Sistema Nacional de Información Ambiental

(SINIA). <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/inventario-emisiones-fuentes-fijas-cuenca-atmosferica-ciudad>

- Morantes, G., Jones, B., Sherman, M., & Molina, C. (2023). A preliminary assessment of the health impacts of indoor air contaminants determined using the DALY metric. *International Journal of Ventilation*, 22, 307 - 316. <https://doi.org/10.1080/14733315.2023.2198800>
- Motte, J., Alvarenga, R., Thybaut, J., & Dewulf, J. (2021). Quantification of the global and regional impacts of gas flaring on human health via spatial differentiation. *Environmental pollution*, 291, 118213. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118213>
- Mueller, N., Westerby, M., & Nieuwenhuijsen, M. (2022). Health impact assessments of shipping and port-sourced air pollution on a global scale: A scoping literature review. *Environmental Research*, 212, 114460. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114460>
- Municipalidad Provincial de Arequipa. (2021). *Plan de Acción para la Mejora de la Calidad del Aire de la Cuenca Atmosférica de Arequipa*. [D.A. N° 020-2021-MPA]. https://www.muniarequipa.gob.pe/busqueda-normas/normaspdf/O2021_1227.pdf
- Naimi, N., Sarkhosh, M., Nabavi, B., Najafpoor, A., & Farkhani, E. (2024). Estimating the burden of diseases attributed to PM_{2.5} using the AirQ + software in Mashhad during 2016–2021. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74328-1>
- Nakhjirgan, P., et al. (2025). Advanced applications of AirQ+ for evaluating morbidity and mortality in industrialized zones. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 1150–1167. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34567-1>
- O, O., H., R, S., & K. (2025). Mathematical Modeling and Intellectual Analysis of Quantitative Characteristics of Air Pollution. *Artificial Intelligence*, 29(2). <https://doi.org/10.15407/jai2025.02.048>
- Phu, G. (2023). Factors Affecting the Use of Best Available Techniques and the Impact on Business Sustainability. *Int. J. Asian Bus. Inf. Manag.*, 14, 1-18. <https://doi.org/10.4018/ijabim.325651>

- Poulidis, A., Seemann, S., Schlager, H., & Vrekoussis, M. (2024). Chasing parts in quadrillion: applications of dynamical downscaling in atmospheric pollutant transport modelling during field campaigns. *Progress in Earth and Planetary Science*, 11, 1–28. <https://doi.org/10.1186/s40645-024-00642-x>
- Prasad, N., Mishra, A., Bhattacharya, T., Lal, B., Jha, P., & Kumar, A. (2024). Validation of AERMOD Prediction Accuracy for Particulate Matters (PM₁₀, PM_{2.5}) for a Large Coal Mine Complex: A Multisource Perspective. *Aerosol Science and Engineering*, 9, 30 - 44. <https://doi.org/10.1007/s41810-024-00241-9>
- Quan, T., & Ngoc, N. (2025). Evaluating Industrial Stack Emissions in Dong Thap Province, Vietnam Using AERMOD Model. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5254>
- Romero-Castro, N., López-Cabarcos, M., & Piñeiro-Chousa, J. (2022). Uncovering complexity in the economic assessment of derogations from the European industrial emissions directive. *Journal of Innovation & Knowledge*. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2021.11.001>
- Salih, Hassan, & Abdulmajeed (2025). Plume Rise and Buoyancy analysis for SO₂ emissions in industrial clusters. *Chemical Engineering Journal*, 480, 147890. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.147890>
- Salva, J., Poništ, J., Rasulov, O., Schwarz, M., Vanek, M., & Sečkář, M. (2023). The impact of heating systems scenarios on air pollution at selected residential zone: a case study using AERMOD dispersion model. *Environmental Sciences Europe*, 35, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00798-1>
- Saxena, P., Kumar, A., et al. (2022). Chemical characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} combusted firecracker particles: air-quality deterioration and health implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 88269–88287. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21906-3>
- Sekula, P., Ustrnul, Z., Bokwa, A., Bochenek, B., & Zimnoch, M. (2022). Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM₁₀ in an Urban Area with Complex Topography. *Sustainability*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/su14063388>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2025). *Informe de Calidad del Aire - Arequipa*. Dirección Zonal 6.

- Sherif, M., Donia, N., & Hamouda, A. (2023). ASSESSMENT OF POLLUTION LEVEL FROM CEMENT PLANT USING BREEZE AERMOD DISPERSION MODELING (CASE STUDY APPLIED ON HELWAN INDUSTRIAL AREA). *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/10.21608/jes.2023.220163.1568>
- Shima, M. (2025). Epidemiological studies on the health impact of air pollution in Japan: their contribution to the improvement of ambient air quality. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 30. <https://doi.org/10.1265/ehpm.25-00020>
- Shukla, V., Syed, H., & Shah, V. (2022). A Review on the Performance of AERMOD Software for different Air Pollutant Sources under Indian Context. *International Journal of Darshan Institute on Engineering Research & Emerging Technology*. <https://doi.org/10.32692/ijdi-eret/10.2.2021.2104>
- Simões, P., et al. (2025). Integrating AirQ+ and Gaussian models for urban planning and public health. *Journal of Environmental Management*, 375, 120567. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120567>
- Song, Y., & Shao, M. (2023). Impacts of Complex Terrain Features on Local Wind Field and PM_{2.5} Concentration. *Atmosphere*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/atmos14050761>
- Takemi, T., Poulidis, A., & Iguchi, M. (2021). High-Resolution Modeling of Airflows and Particle Deposition over Complex Terrain at Sakurajima Volcano. *Atmosphere*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/atmos12030325>
- Tang, L., Jia, M., et al. (2023). Chinese industrial air pollution emissions based on the continuous emission monitoring systems network. *Scientific Data*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02054-w>
- Telenga-Kopczyńska, J., & Jonek-Kowalska, I. (2021). Algorithm for Selecting Best Available Techniques in Polish Coking Plants Supporting Multi-Criteria Investment Decisions in European Environmental Conditions. *Energies*, 14, 2631. <https://doi.org/10.3390/en14092631>
- Tong, Y., Guo, X., Guo, F., & Yue, T. (2025). Advances in Primary Air Pollutant Emissions of Industrial Boilers in China: Emission Characteristics, Emission Inventories, and Mitigation Potentials. *Sustainability*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/su17051987>

- Wang, Z., Ding, D., Dou, X., & Li, Z. (2025). Effects of Improved Atmospheric Boundary Layer Inlet Boundary Conditions for Uneven Terrain on Pollutant Dispersion from Nuclear Facilities. *Atmosphere*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/atmos16101203>
- Wei, Y., Teng, Y., et al. (2025). Diffusion Modeling of Carbon Dioxide Concentration from Stationary Sources with Improved Gaussian Plume Modeling. *Energies*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/en18112827>
- Xing, C., Peng, H., et al. (2025). Hyperspectral remote sensing for air pollutants: Stereoscopic monitoring, source localization & warning, and a dynamic emission inventory concept. *Environment International*, 198, 109375. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109375>
- Yacovitch, T., Lerner, B., et al. (2023). Mobile Laboratory Investigations of Industrial Point Source Emissions during the MOOSE Field Campaign. *Atmosphere*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/atmos14111632>
- Yüksel, B., Doğruparmak, Ş., Pekey, B., & Pekey, H. (2024). Assessment of environmental odor pollution using a dispersion model in an industrialized urban area of Kocaeli, Turkey. *CLEAN – Soil, Air, Water*. <https://doi.org/10.1002/clen.202300221>
- Yun, J., Yang, Q., et al. (2024). Atmospheric emissions of fine particle matter bound rare earth elements from industry. *Nature Communications*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53684-6>

ANEXOS

Anexo 1

Hoja de Datos de Seguridad del Petróleo Residual R-500



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Conforme al Reglamento CE N° 1907/2006 - REACH y Reglamento CE N° 1272/2008 - CLP

PETRÓLEO INDUSTRIAL 500

SECCIÓN 1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O LA MEZCLA Y DE LA SOCIEDAD O LA EMPRESA

1.1 Identificador del producto

Nombre comercial	PETRÓLEO INDUSTRIAL 500
Nombre Químico	Residual de petróleo
Sinónimos	Industrial de alta viscosidad, Bunker, residual 500, Fuel oil, Heavy Fuel Oil, High Sulphur Fuel Oil.
N° CAS	68476-33-5
N° CE (EINECS)	270-675-6
N° Índice (Anexo VI)	
Reglamento CE N° 1272/2008)	649-024-00-9
N° Registro	NP
N° Autorización	NP

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Combustible para motores diésel de calderas, hornos y otros equipos de combustión.

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Empresa	REFINERÍA LA PAMPILLA, S.A.A.
Dirección	Casilla Postal 10245 Km. 25 Carretera a Ventanilla. Lima-1 PERU
Teléfono	(51-1) 517-2021(51-1) 517-2022
Fax	(51-1) 5172026
Correo electrónico	NP

1.4 Teléfono de emergencia

Carechem 24: +34 9 1114 2520
Carechem 24: +44 (0) 1235 239 670

SECCIÓN 2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla	2.2 Elementos de la etiqueta
Clasificación Reg. (CE) 1272/2008 (CLP)	Etiquetado

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Toxicidad aguda: Tox. ag. 4 Toxicidad para la reproducción: Repr. 2 Carcinogenicidad: Carc. 1B Toxicidad específica en determinados órganos: STOT repe. 2 Peligroso para el medio ambiente acuático: Acuático crónico. 1	Pictogramas GHS07 GHS08 GHS09	  
	Palabra de advertencia	Peligro
	Indicaciones de peligro	H332: Nocivo en caso de inhalación. H361d: Se sospecha que daña al feto. H350: Puede provocar cáncer. H373: Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas (vía dérmica). H410: Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
	Información suplementaria	EUH 066: La exposición repetida puede provocar sequedad o formación de grietas en la piel
	Consejos de prudencia	P201: Pedir instrucciones especiales antes del uso. P260: No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol. P273: Evitar su liberación al medio ambiente. P280: Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección. P501: Eliminar el contenido/recipiente en el contenedor habilitado para tal efecto conforme a la normativa vigente.

2.3 Elementos suplementarios que deben figurar en las etiquetas

NP

2.4 Requisitos especiales de envasado

Recipientes que deben ir provistos de un cierre de seguridad para niños:

No aplica.

Advertencia de peligro táctil:

No aplica.

2.5 Otros peligros

Los resultados de la valoración PBT y mPmB del producto, de conformidad con los criterios establecidos en el anexo XIII del reglamento REACH, se pueden consultar en la sección 12.5 de esta FDS.

La información relativa a otros peligros, diferentes a los de la clasificación, pero que, pueden contribuir a la peligrosidad general del producto, se puede consultar en las secciones 5, 6 y 7 de esta FDS.

Anexo 2

Registro fotográfico de visitas técnicas a empresas evaluadas

C.1. Visita Técnica a la Empresa Michell & Cía S.A

Figura 25

Registro fotográfico de visita técnica a la empresa Michell & Cía S.A

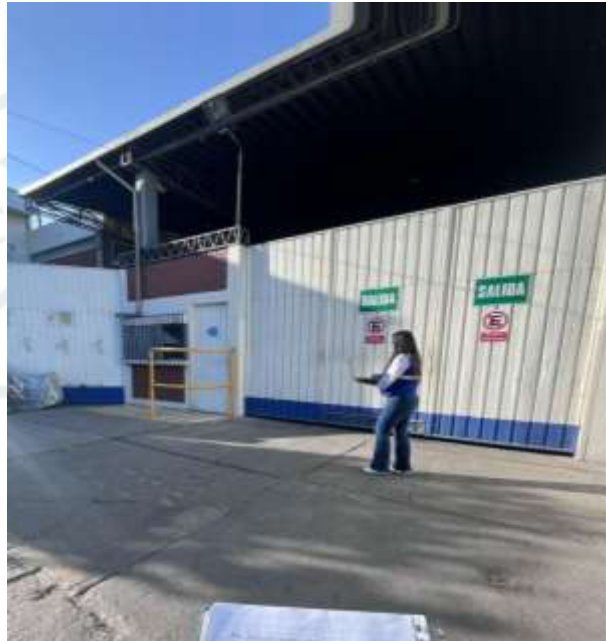


Figura 26

Fachada principal de la empresa Michell & Cía S.A



C.2. Visita Técnica a la Empresa Alicorp (Sidsur)

Figura 27

Registro fotográfico de visita técnica a la empresa Alicorp(Sidsur)

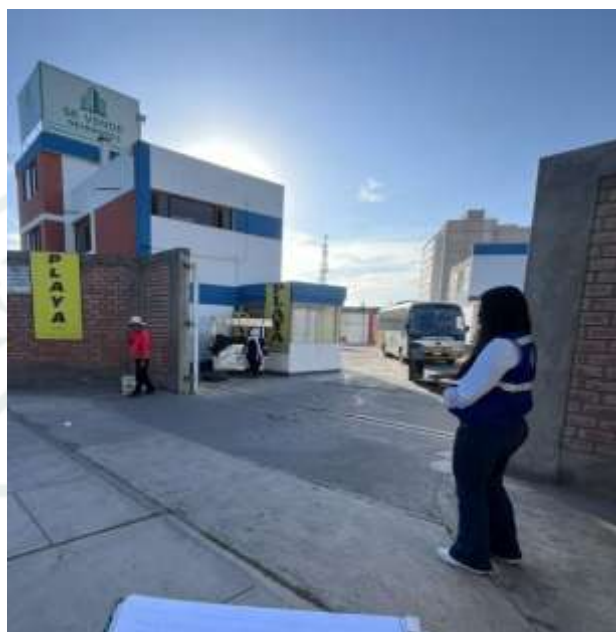


Figura 28

Fachada principal de la empresa Alicorp (Sidsur)



C.3. Visita Técnica a la Empresa Franki y Ricky S.A

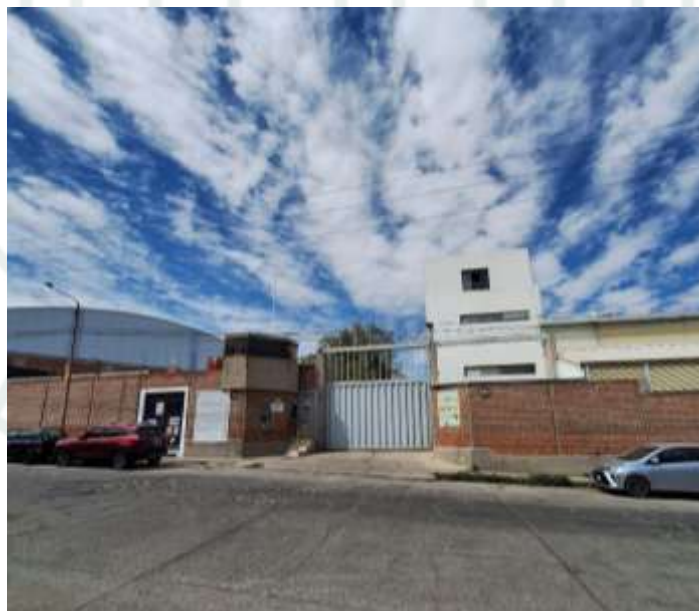
Figura 29

Registro fotográfico de visita técnica a la empresa Franky & Ricky S.A



Figura 30

Fachada principal de la empresa Franky & Ricky S.A



C.4. Visita Técnica a la Empresa Papelería Panamericana

Figura 31

Registro fotográfico de visita técnica a la empresa Papelería Panamericana



Figura 32

Fachada principal de la empresa Papelería Panamericana



Anexo 3

Rosa de Vientos de la Estación La Pampilla (SENAMHI)

