

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y RECURSOS NATURALES



Tesis

**Calidad de aire y su relación con la actividad ladrillera en la comunidad campesina
de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024**

Asesor:

Mag. Sota Cano, Angela Fiorella

Autores:

Apaza Salas, Emperatriz

Salazar Rodriguez, Elida

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Cusco – Cusco - Perú

2025



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES
" Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana "

Acta N°: 004

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 21 días del mes de febrero del año 2025, siendo las 12:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 032-2025-UTEA-FI-EPIARN-SD de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería

Presidente :	Econ. Vega Villafuerte Wilfredo Baltazar
Dictaminante :	Blga. Ing. Allende Ramos Gladys
Replicante :	Mg. Pozo Gonzales José Salustio

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Calidad de aire y su relación con la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco - 2023-2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Bach: Apaza Salas, Emperatriz

Bach: Salazar Rodriguez, Elida

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniera Ambiental

Concluido el acto de Sustentación, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Mayoría

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Bach: Apaza Salas, Emperatriz	Aprobado
Bach: Salazar Rodriguez, Elida	Aprobado

Siendo las 14:00 horas concluyó el Acto Académico, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Econ. Vega Villafuerte Wilfredo Baltazar

Dictaminante: Blga. Ing. Allende Ramos Gladys

Replicante: Mg. Pozo Gonzales José Salustio

(*): Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

CALIDAD DE AIRE Y SU RELACION CON LA ACTIVIDAD
LADRILLERA EN LA COMUNIDAD CAMPESINA DE SUCSO
AUCAYLLE, DISTRITO DE SAN JERÓNIMO, CUSCO – 2023-
2024.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%	18%	11%	9%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes Trabajo del estudiante	2%
3	vsip.info Fuente de Internet	1%
4	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	extwprlegs1.fao.org Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.upsc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1%

Submitted to Universidad Politécnica del Perú

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Apaza Salas, Emperatriz
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	43091449
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0008-5113-0557
Apellidos y nombres	:	Salazar Rodriguez, Elida
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	72969982
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0001-1125-6453
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Mag. Sota Cano, Angela Fiorella
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	44538035
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0003-2757-7259
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad Ambiental
Rango de años en que se realizó las investigaciones	:	Mayo 2023 – febrero 2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	19 %
URL del OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Dedicatoria

A nuestro Dios, por ser el origen de mi fortaleza, inspiración, motivación y orientación en cada etapa de este recorrido.

A nuestros padres y familia, por su apoyo incondicional, amor y comprensión, quienes han sido el motor para alcanzar nuestras metas.

A nuestros maestros y Universidad, que con su apoyo, presencia y enseñanza han formado en nosotras un espíritu de perseverancia y estudio.

Agradecimiento

A nuestro creador Dios, por darnos la fuerza, sabiduría y también salud para concluir este trabajo, y por iluminar mi camino en los momentos más desafiantes.

A nuestros padres y familia, por su afecto permanente, su apoyo constante como también sus palabras de aliento, que representaron mi principal motor de motivación durante todo este proceso.

A nuestra asesora y a los docentes que nos guiaron a lo largo de esta investigación, por compartir su conocimiento, experiencia y orientación, los cuales fueron fundamentales para lograr los objetivos planteados.

Finalmente, agradecemos a todos aquellos que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de esta investigación. Su apoyo y colaboración han sido invaluable para alcanzar este logro.

Resumen

El trabajo investigación tuvo como objetivo general evaluar la relación entre la calidad del aire y la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024. Para dicho caso se usó una metodología aplicada, de diseño no experimental y nivel descriptivo-correlacional. Se identificaron 3 puntos estratégicos de monitoreo y se emplearon instrumentos especializados como el Aeroqual (monitor portátil de calidad de aire) series 500, además del software WRPLOT para analizar la dirección del viento mediante rosas de viento. Los resultados revelaron que la calidad del aire en la comunidad de Sucso Aucaylle está significativamente afectada. Las concentraciones de PM10 y PM2.5, superan los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA-aire), alcanzando valores promedio de 118.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 54.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por otra parte, los contaminantes NO₂, CO y SO₂ no superan los ECA-aire. Se concluye que existe un riesgo considerable para la salud de los habitantes en San Jerónimo por la calidad de aire, especialmente en la comunidad de Sucso Aucaylle, que se encuentra con un nivel de afectación moderado por la actividad ladrillera, agravado por condiciones meteorológicas que restringen la propagación de los agentes contaminantes.

Palabras clave: Calidad aire, ladrilleras, contaminación atmósfera, riesgo ambiental.

Abstract

The research aimed to evaluate the relationship between air quality and brick-making activity in the rural community of Sucso Aucaylle, San Jerónimo district, Cusco – 2023-2024. An applied methodology was used, with a non-experimental design and a descriptive-correlational level. Three strategic monitoring points were identified, and specialized instruments were employed, such as the Aeroqual Series 500 (portable air quality monitor), as well as the WRPLOT software to analyze wind direction using wind roses. The results revealed that air quality in the community of Sucso Aucaylle is significantly affected. The concentrations of PM10 and PM2.5 exceed the limits established by the Environmental Quality Standards (ECA-air), reaching average values of 118.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 54.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. On the other hand, pollutants such as NO₂, CO, and SO₂ do not surpass the ECA-air thresholds. It is concluded that there is a considerable health risk for the inhabitants of San Jerónimo due to air quality, particularly in the community of Sucso Aucaylle, which is experiencing a moderate level of impact from brick-making activity, worsened by meteorological conditions that limit the dispersion of pollutants.

Keywords: Quality, brick kilns, air pollution, environmental risk.

Índice

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud.....	ii
Metadatos.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Índice de tablas	xi
Índice de figuras.....	xii
Índice de anexos.....	xiv
I. Introducción	15
II. Planteamiento del problema	17
2.1. Descripción y formulación del problema	17
2.2. Objetivos	23
2.2.1. Objetivo General	23
2.2.2. Objetivos Específicos.....	23
2.3. Justificación e importancia	23
2.4. Hipótesis.....	27
2.5. Variables.....	28

III. Marco teórico	30
3.1. Antecedentes	30
3.2. Bases teóricas	38
3.3. Definición de términos	57
IV. Metodología	66
4.1. Tipo y nivel de investigación	66
4.2. Ámbito temporal y espacial.....	67
4.3. Población y muestra	67
4.4. Instrumentos	69
4.5. Procedimientos	70
4.6. Análisis de datos.....	73
4.7. Consideraciones éticas.....	73
V. Resultados y discusión.....	75
VI. Conclusiones.....	117
VII. Recomendaciones	119
VIII. Referencias	121
IX. Anexos.....	131

Índice de tablas

Tabla 1 Estándares de Calidad Ambiental.....	50
Tabla 2 Directrices mundiales de la OMS en calidad de aire.....	51
Tabla 3 Coordenadas de ubicación de monitoreos.	68
Tabla 4 Datos de la estación meteorológica Granja Kayra.....	69
Tabla 5 Puntos principales de las ladrilleras en la zona de estudio.....	75
Tabla 6 Datos meteorológicos Estación Kayra – 5 años (mes enero, febrero).....	79
Tabla 7 Datos meteorológicos – 5 años (mes mayo, junio).....	80
Tabla 8 Coordenadas de los puntos de monitoreo.....	87
Tabla 9 Promedios de Monitoreo para el $[(PM)]_{2.5}$ (ug/m3).....	87
Tabla 10 Promedios de Monitoreo para el $[(PM)]_{10}$ (ug/m3).....	88
Tabla 11 Promedios de Monitoreo para el CO (ug/m3).....	89
Tabla 12 Promedios obtenidos para el Dióxido de azufre (ug/m3).....	90
Tabla 13 Promedios obtenidos para el Dióxido de Nitrógeno (ug/m3).....	91
Tabla 14 Comparación de resultados del $[(PM)]_{2.5}$ con los ECA- Aire Y AQG (OMS).	100
Tabla 15 Comparación de Resultados $[(PM)]_{10}$ con los ECA -Aire Y AQG (OMS).101	
Tabla 16 Comparación de Resultados de CO con ECA -Aire Y AQG (OMS).....	102
Tabla 17 Comparación de Resultados de $[(SO)]_2$ con los ECA -Aire.	103
Tabla 18 Comparación de resultados del $[(NO)]_2$ con los ECA – Aire.	104
Tabla 19 Pruebas de normalidad.....	106
Tabla 20 Pruebas de pruebas emparejadas.	109

Índice de figuras

Figura 1 Ubicación de los puntos de monitoreo	68
Figura 2 Diagrama de flujo del procedimiento para la recolección y análisis de información	72
Figura 3 Área de influencia directa e indirecta	77
Figura 4 Humedad promedio de la zona de estudio (mes enero, febrero).....	81
Figura 5 Temperatura promedio en la zona de estudio (mes mayo, junio)	82
Figura 6 Rosa de viento – Temporada Húmeda (mes de enero-febrero)	83
Figura 7 Rosa de viento – Temporada Seca (mes mayo- junio).....	85
Figura 8 Roseta de viento en la zona de estudio	85
Figura 9 Ubicación de puntos de monitoreo.....	87
Figura 10 Niveles obtenidos de <i>PM</i> _{2.5} (ug/m ³)	88
Figura 11 Niveles obtenidos de <i>PM</i> ₁₀ (ug/m ³).....	89
Figura 12 Niveles obtenidos de CO (ug/m ³).....	90
Figura 13 Niveles obtenidos para el Dióxido de Azufre (ug/m ³)	91
Figura 14 Niveles obtenidos para el Dióxido de Nitrógeno (ug/m ³)	92
Figura 15 Horno paulista.....	94
Figura 16 Horno tradicional mejorado con cúpula.....	94
Figura 17 Horno de tiro vertical adaptado con una chimenea con ductos horizontal	96
Figura 18 Horno paulista con ducto subterráneo y chimenea	97
Figura 19 Horno de forma romana con cúpula con tapas metálicas.....	98
Figura 20 Hornos con cúpula de cono con chimeneas	99
Figura 21 Horno rectangular con cúpula y chimenea.....	100
Figura 22 Comparación de niveles de <i>PM</i> _{2.5} con los ECA -Aire y AQG (OMS)	101
Figura 23 Comparación de niveles de <i>PM</i> ₁₀ con los ECA -Aire Y AQG (OMS).....	102

Figura 24 Comparación de niveles de <i>CO</i> con los ECA -Aire Y AQG (OMS).....	103
Figura 25 Comparación de niveles de <i>SO2</i> con los ECA – Aire.....	104
Figura 26 Comparación de niveles de <i>NO2</i> con los ECA – Aire.....	105

Índice de anexos

Anexo 1 Matriz de consistencia	132
Anexo 2 Documento que autorizan la aplicación del instrumento.....	134
Anexo 3 Validación de instrumentos	135
Anexo 4 Instrumento de investigación - guía de entrevista	137
Anexo 5 Instrumento completo	138
Anexo 6 Base de datos	140
Anexo 7 Galería fotográfica.....	147

I. Introducción

La preocupación cada vez más mayor por el deterioro de la calidad del aire y sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente ha motivado el desarrollo del presente trabajo de investigación. En particular, en el distrito de San Jerónimo – Cusco, la comunidad campesina de Sucso Aucaylle se ha consolidado como un centro importante de producción ladrillera artesanal. Sin embargo, dicha actividad, al realizarse de manera informal y sin controles ambientales adecuados, representa una fuente significativa de emisiones contaminantes. El interés por esta problemática surge no solo del impacto ambiental evidente, sino también de la ausencia de estudios técnicos específicos que evalúen la magnitud real de la contaminación atmosférica en esta zona rural.

Para abordar esta problemática, se diseñó una investigación de enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con un diseño no experimental y nivel descriptivo-correlacional. Esta estrategia metodológica permitió recolectar datos ambientales precisos mediante instrumentos especializados, como el monitor portátil Aeroqual Series 500, y se complementó con el uso del software WRPLOT para el análisis de la dirección del viento. Asimismo, se tomó como método de aplicación las encuestas a los responsables de las ladrilleras con el fin de conocer las características de su producción y su percepción respecto a la contaminación que generan. Los datos recolectados fueron expuestos a un riguroso análisis estadístico para determinar el grado de conexión entre la actividad ladrillera y la calidad del aire.

La temática fue abordada mediante el estudio simultáneo de dos variables principales: la calidad del aire, evaluada a través de la medición de contaminantes como PM10, PM2.5, NO₂, CO y SO₂; y la actividad ladrillera, analizada a partir del tipo de hornos utilizados, combustibles empleados y volumen de producción. A través de la delimitación de áreas de influencia directa e indirecta y del análisis de los estándares de calidad ambiental vigentes (ECA-Aire), se estableció el nivel de afectación existente y su impacto en la salud y el entorno.

La estructura del presente trabajo se distribuye en seis ítems. El primer ítem desarrolla la introducción, el planteamiento del problema, los objetivos, hipótesis y la justificación de la investigación. El segundo ítem comprende el marco teórico, con antecedentes, bases teóricas, marco legal y definiciones de términos clave. El tercer ítem detalla la metodología de la investigación, incluyendo el tipo, nivel, diseño, técnicas e instrumentos utilizados. El cuarto ítem expone los resultados obtenidos y su análisis, acompañados de gráficos, tablas y discusión crítica. El quinto ítem presenta las conclusiones derivadas del estudio, seguidas de las recomendaciones en el ítem seis, orientadas a autoridades y productores. Finalmente, se incluyen las referencias bibliográficas y los anexos correspondientes.

Esta investigación busca generar evidencia científica aplicable, que permita no solo visibilizar el problema ambiental existente, sino también proponer soluciones sostenibles que beneficien tanto al medio ambiente como al desarrollo económico de la comunidad.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

A nivel mundial, las ladrilleras artesanales constituyen una de las industrias que generan ingresos significativos. Por esta razón, su presencia en el sector de la construcción continúa siendo relevante en Latinoamérica. No obstante, con el transcurso del tiempo, muchas de estas ladrilleras se han establecido en áreas urbanas densamente pobladas, lo que afecta negativamente el uso del suelo, la salud de los habitantes y provoca impactos adversos en la atmósfera (Cahuantico, 2019).

A nivel nacional, el Programa Regional Aire Limpio (PRAL), en su informe mensual, reveló que en Perú existen aproximadamente 2,000 ladrilleras, de las cuales solo el 20% están registradas como unidades productivas ante la SUNAT, mientras que el 80% no cuenta con dicho registro. Además, se estima que esta industria artesanal podría experimentar un crecimiento del 3%, impulsado por la alta demanda en el sector de la construcción. El informe también destaca que las ladrilleras son especialmente solicitadas en las regiones de Piura, Trujillo, Lima, Ica, Arequipa y Cusco (Dalens & Macedo, 2022).

A nivel local, la industria de la fabricación de ladrillos se ha convertido en una de las principales fuentes de contaminación ambiental. Esto se debe al uso de materiales como ramas secas de eucalipto, aserrín, llantas y plásticos, que contribuyen a efectos perjudiciales en el entorno. Estas prácticas generan erosión del suelo, pérdida de vegetación y

contaminación del aire, lo que a su vez pone en riesgo la salud de las comunidades cercanas y afecta la calidad de vida de los habitantes de la región (López, 2020).

En el distrito de San Jerónimo, la actividad de las ladrilleras representa la segunda fuente económica más importante. Este distrito alberga la mayor concentración de estos productores, distribuidos en Sucso Aucaylle (65%), Pillao Matoa (28%) y Pico Orcpujio (7%). En total, se registran 450 hornos activos y más de 2,450 personas empleadas en esta industria artesanal, lo que subraya su relevancia no solo económica, sino también social, para la comunidad local y su desarrollo.

Además, el [Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental] OEFA (2019) realizó un monitoreo en 20 puntos críticos, en los cuales se evidenció que, en 06 puntos se exceden los (ECA) para aire; en los parámetros $[[PM]]_{10}$ y $[[PM]]_{2.5}$. Además, se señalaron impactos ambientales forjados por el inoportuno manejo de los residuos sólidos originados por el almacenamiento y disposición final de ladrillos en mal estado.

Frente a esta problemática, el Programa Regional Aire Limpio (PRAL) ha estado implementando desde 2005 iniciativas en Arequipa y Cusco para mejorar la calidad del aire, con el objetivo de reducir los impactos negativos en la salud y el medio ambiente. Este programa ha fomentado la formación de Grupos Técnicos Ambientales de Aire (GESTA), basándose en tres líneas de acción: planificación, fiscalización normativa y concienciación ciudadana. Además, se han promovido mejores prácticas y tecnologías más eficientes en las ladrilleras. Como parte de esta iniciativa, se han desarrollado proyectos piloto y creado grupos organizados para una supervisión activa de la gestión de la calidad del aire.

En la ciudad de Cusco, la contaminación atmosférica se ha convertido en una problemática creciente, siendo el parque automotor la principal fuente emisora de contaminantes. Sin embargo, en segundo lugar, se encuentra la actividad ladrillera, la cual representa una amenaza significativa para la calidad del aire, especialmente en el distrito de

San Jerónimo. Esta actividad, que forma parte de la dinámica económica local, ha estado acompañada durante años por el uso de insumos como palos rollizos, aserrín, leña y otros materiales de combustión que generan emisiones contaminantes. Como resultado, se ha afectado progresivamente el bienestar de las comunidades cercanas, evidenciando la necesidad de evaluar sus impactos y promover prácticas más sostenibles en este sector productivo.

En el sector de Sucso Aucaylle, ubicado en el distrito de San Jerónimo, Cusco, la actividad ladrillera se ha consolidado como una fuente económica importante, pero también como un factor de presión ambiental. Esta actividad, desarrollada en gran parte de manera artesanal, ha generado preocupación por sus posibles efectos en la calidad del aire, debido al uso de combustibles como leña, rollizos y, en algunos casos, residuos de madera altamente contaminantes. A esto se suma la presencia de hornos tradicionales con ventilación limitada y procesos de combustión poco eficientes, que incrementan el riesgo de emisiones atmosféricas nocivas.

Uno de los principales factores que agravan esta problemática es el incumplimiento de los procesos productivos, entendido como la realización de actividades de fabricación de ladrillos sin seguir estándares técnicos, ambientales o normativos que garanticen una producción eficiente y sostenible. Este incumplimiento se manifiesta en el uso de materiales no autorizados como llantas y plásticos, en la ausencia de tecnologías limpias (como hornos mejorados o sistemas de control de emisiones), y en la falta de protocolos adecuados para minimizar los impactos ambientales. Como resultado, las ladrilleras generan niveles elevados de material particulado (PM10 y PM2.5) y gases contaminantes (CO, NO₂, SO₂), superando los Estándares de Calidad Ambiental (ECA-aire) y poniendo en riesgo la salud de la población.

No obstante, La actividad ladrillera artesanal en Sucso Aucaylle ha ocasionado serios impactos ambientales y sociales, destacando la degradación de la calidad del aire por altas concentraciones de material particulado (PM10 y PM2.5) y gases contaminantes como CO, NO₂ y SO₂. Esta contaminación ha incrementado las enfermedades respiratorias en la población, afectando especialmente a grupos vulnerables. Asimismo, se ha registrado pérdida de vegetación, afectación de cultivos y alteración de la biodiversidad local. La ausencia de fiscalización ambiental y el uso de insumos altamente contaminantes agravan la situación, evidenciando la necesidad urgente de implementar medidas correctivas sostenibles basadas en datos técnicos.

Asimismo, la escasa fiscalización por parte de las autoridades competentes ha contribuido a que muchos sectores ladrilleros operen sin controles ambientales adecuados. Aunque algunos grupos organizados han implementado normas internas para regular el uso de materiales y sancionar prácticas contaminantes, persiste una notable heterogeneidad en la gestión ambiental de la zona. En sectores como Pícol o Pillao Matao, se evidencian casos de resistencia a la adopción de prácticas sostenibles, mientras que otros productores han incorporado mejoras técnicas como chimeneas, ductos y ventiladores que favorecen una combustión más limpia.

Este panorama revela una problemática compleja, donde el desarrollo económico de la industria ladrillera coexiste con condiciones que pueden afectar el equilibrio ecológico y la salud de las comunidades cercanas. Las causas del deterioro ambiental se relacionan no solo con los materiales utilizados en la combustión, sino también con la falta de organización sectorial, la limitada conciencia ambiental y la ausencia de políticas de control efectivas. Por ello, comprender esta dinámica territorial resulta esencial para lograr promover una producción más limpia, responsable y sostenible en Sucso Aucaylle.

Del mismo modo la exposición prolongada a los contaminantes generados por la actividad ladrillera, especialmente al material particulado fino (PM_{2.5}), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂), ha tenido efectos negativos en la salud de los habitantes de la comunidad campesina de Sucso Aucaylle. Las principales consecuencias reportadas incluyen afecciones respiratorias crónicas como fibrosis pulmonar, asma, rinitis alérgica, bronquitis, así como síntomas frecuentes como tos seca, dolor de cabeza, irritación ocular y fatiga persistente. Estos impactos afectan especialmente a sectores más expuestos donde habitan menores de edad, adultos mayores e individuos con condiciones médicas previas, reduciendo significativamente su calidad de vida y aumentando la demanda de atención médica.

Además del deterioro de la salud, se han identificado afectaciones psicosociales, como la preocupación constante por la contaminación, la pérdida de bienestar general y la percepción de abandono institucional por parte de las autoridades. A nivel ambiental, la contaminación del ambiente aéreo ha producido efectos en la vegetación circundante, afectando pequeños cultivos y reduciendo la biodiversidad en los alrededores de las zonas de producción ladrillera.

Para poder superar las consecuencias identificadas, es necesario implementar acciones integrales desde un enfoque preventivo, correctivo y participativo. En primer lugar, se requiere fortalecer la fiscalización ambiental por parte de las autoridades competentes, asegurando el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y sancionando el uso de materiales altamente contaminantes. Asimismo, se debe fomentar la incorporación de tecnologías sostenibles en las actividades industriales, como hornos mejorados con sistemas de ventilación, extractores de gases o lavadores tipo Venturi, que reduzcan las emisiones contaminantes.

En paralelo, se recomienda capacitar a los productores ladrilleros en buenas prácticas ambientales, uso eficiente de combustibles y manejo de residuos. Esto puede realizarse mediante convenios entre los gobiernos locales, el Ministerio del Ambiente (MINAM), universidades e instituciones técnicas. También se debe impulsar la concienciación ciudadana sobre los riesgos de la contaminación atmosférica y el derecho a un ambiente saludable, fomentando la vigilancia ambiental comunitaria.

Finalmente, se propone la implementación de proyectos piloto de reconversión tecnológica y producción limpia, así como la creación de incentivos económicos o programas de financiamiento para facilitar la modernización del sector ladrillero sin afectar la sostenibilidad económica de los pequeños productores.

Problema General

¿Cuál es la relación entre la calidad del aire y la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024?

Problemas específicos

¿Cuál es el área de influencia directa e indirecta afectada por la actividad ladrillera en la comunidad campesina Sucso Aucaylle distrito del distrito de San Jerónimo, Cusco - 2023-2024?

¿Cuáles son los principales contaminantes presentes en el aire del área de influencia producidos por la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024?

¿Qué características de operación tienen las ladrilleras que se encuentran en el área de influencia en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024?

¿Existe relación entre la calidad de aire respecto al cumplimiento del ECA-aire en la zona ladrillera de la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024?

2.2. Objetivos

2.2.1. *Objetivo General*

Evaluar la relación entre la calidad del aire y la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.

2.2.2. *Objetivos Específicos*

1. Establecer el área de influencia directa e indirecta afectada por la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.
2. Identificar los principales contaminantes presentes en el aire del área de influencia producidos por la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de san jerónimo, cusco – 2023-2024.
3. Determinar las características operativas de las ladrilleras que se encuentran en el área de influencia en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.
4. Establecer la relación entre la calidad del aire respecto al cumplimiento de ECA-aire en la zona ladrillera de la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.

2.3. Justificación e importancia

Justificación teórica

La presente investigación surge a partir de la creciente preocupación ambiental por los efectos negativos que genera la actividad ladrillera en la calidad del aire, especialmente en comunidades rurales como Sucso Aucaylle, en el distrito de San Jerónimo, Cusco. Esta

zona enfrenta una problemática evidente de contaminación atmosférica provocada por los hornos de las ladrilleras, sin que hasta el momento existan estudios técnicos que sustenten de manera objetiva el nivel real de emisiones contaminantes. La ausencia de información científica y contextualizada, sumada a la importancia económica que tiene esta actividad para la población local, revela la urgencia de evaluar rigurosamente el impacto ambiental que produce.

Este estudio constituye el primer esfuerzo en brindar datos empíricos sobre el vínculo entre la actividad ladrillera y la calidad del aire en Sucso Aucaylle, mediante el uso de equipos especializados de monitoreo ambiental. Los resultados obtenidos permitirán dimensionar adecuadamente el problema, visibilizando los niveles reales de contaminación y generando evidencia técnica que funcionará como fundamento para la elaboración de propuestas normativas, medidas correctivas y políticas públicas adaptadas al contexto local. De este modo, la investigación busca equilibrar el progreso económico de la comunidad con la necesidad de una gestión ambiental sostenible y responsable.

Asimismo, la investigación aporta a la Ingeniería Ambiental al aplicar herramientas técnicas de supervisión atmosférica en contextos rurales, generando datos científicos sobre la contaminación producida por ladrilleras artesanales. Sus resultados permiten proponer soluciones sostenibles, como tecnologías limpias y estrategias de mitigación, fortaleciendo así el rol de la ingeniería en la gestión ambiental y en la defensa de la salud de la población y del entorno natural.

Justificación practica

Este estudio reviste importancia práctica porque permite comprender cómo la actividad ladrillera desarrollada en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle afecta directamente la calidad del aire. Mediante el análisis de contaminantes atmosféricos como material particulado (PM10 y PM2.5) y gases como CO, NO₂ y SO₂, se identifican los niveles

reales de contaminación presentes en la zona de estudio. Esta información resulta útil para proponer medidas concretas de mitigación ambiental, sin afectar la continuidad económica de las actividades ladrilleras.

Asimismo, los resultados obtenidos aportan evidencia técnica para que las autoridades municipales y organismos ambientales puedan fortalecer los mecanismos de regulación, control y fiscalización de esta actividad. De igual manera, el estudio brinda insumos valiosos para la elaboración de políticas locales de desarrollo sostenible, la promoción de tecnologías limpias y el fortalecimiento del bienestar ciudadano expuestos a la contaminación atmosférica.

Justificación Metodológica

El trabajo de investigación emplea un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con diseño no experimental y nivel descriptivo-correlacional, adecuado para analizar el vínculo entre la calidad del aire y la actividad ladrillera en Sucso Aucaylle. Esta metodología permite recolectar y analizar datos objetivos mediante el uso de instrumentos especializados de monitoreo ambiental, sin manipular las variables en estudio. Además, posibilita establecer relaciones estadísticas entre los contaminantes atmosféricos y las prácticas productivas ladrilleras, generando evidencia científica útil para proponer soluciones técnicas, normativas y sostenibles frente a la problemática ambiental identificada.

Justificación ambiental

El trabajo de estudio se justifica desde el enfoque ambiental al analizar el impacto de la actividad ladrillera sobre la calidad del aire en la comunidad de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco. A través de la utilización de equipos especializados de monitoreo, se evidenció el nivel de contaminación atmosférica y sus efectos tanto en el ecosistema local como en la salud de la población. Los resultados obtenidos permitieron identificar medidas correctivas orientadas a minimizar las emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire,

aportando insumos valiosos para el fortalecimiento de la legislación ambiental y el desarrollo de políticas públicas de control de emisiones.

Asimismo, la investigación responde a la necesidad urgente de generar información técnica precisa que sirva como base para implementar estrategias de fiscalización ambiental, fomentar la adopción de tecnologías limpias y promover una gestión ambiental más sostenible en el sector ladrillero. Todo ello sin comprometer la sostenibilidad económica de esta actividad productiva, articulando así la optimización local con la preservación ecológica y el desarrollo humano sostenible.

Justificación económica

Este estudio se justifica desde una perspectiva económica, ya que analiza el efecto ambiental de la actividad ladrillera en la calidad del aire sin proponer su erradicación, sino más bien la implementación de estrategias que permitan reducir sus aspectos desfavorables sin comprometer el desarrollo productivo del sector. La industria ladrillera en Sucso Aucaylle representa una fuente significativa de empleo y sustento de las personas que laboran en estas ladrilleras; sin embargo, su crecimiento ha estado marcado por la falta de regulación ambiental y el uso de combustibles contaminantes, lo que genera costos ocultos relacionados con la degradación del medio ambiente y los efectos adversos en la salud pública.

Justificación social

Este estudio se justificó socialmente porque analizó el impacto de la actividad ladrillera en la calidad del aire y su efecto en la salud de la población de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco. Se evidenció que la contaminación generada por las ladrilleras afectó en el bienestar de los residentes, especialmente a grupos vulnerables como niños y adultos mayores.

Cahuantico (2019) señala que, actualmente existen 400 hornos. Sin embargo, no existe un sustento técnico que demuestre el nivel de contaminación que existe en esta zona a causa de esta industria. Asimismo, los pobladores presentan afecciones como fibrosis pulmonar, inflamación nasal (rinitis), asma, formaciones quísticas en los senos paranasales, deterioro visual, cefalea, molestias cervicales, así como también signos de tos persistente y resequeidad en las vías nasales., por eso, este estudio busca mostrar la relación con la calidad del aire y en base a esta se puedan ofrecer soluciones que beneficien directamente a la población de Sucso Aucaylle, mejorando su calidad de vida, reduciendo los riesgos de salud y promoviendo un desarrollo económico más responsable y sostenible en el sector ladrillero.

Los principales aportes de la investigación son:

- Evidenciar con datos científicos el nivel de contaminación atmosférica en Sucso Aucaylle.
- Proponer recomendaciones técnicas y normativas para mejorar la gestión ambiental en ladrilleras.
- Ofrecer alternativas sostenibles que concilien el desarrollo económico del sector con la conservación ambiental y la protección sanitaria.
- Fortalecer las capacidades institucionales para la fiscalización ambiental y la toma de decisiones basadas en evidencia.

2.4. Hipótesis

Hipótesis General

La calidad del aire tiene relación directa con la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.

Hipótesis Específicas

La comunidad campesina de Sucso Aucaylle se encuentra en el área de influencia directa e indirecta afectada por la actividad del distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.

Los principales contaminantes son PM10, PM2.5, NO2, CO, SO2, producidos por la actividad ladrillera en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.

Las ladrilleras que están ubicadas dentro del área de impacto delimitada por los puntos de monitoreo (X: 186302.00, Y: 8499858.00), (X: 186100.00, Y: 8499638.00) y (X: 186416.00, Y: 8500195.00) dentro de la zona 19L presentan características operativas que están relacionadas Respecto a la calidad del aire en la comunidad rural de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.

La calidad del aire presenta valores superiores respecto a los límites determinados por los ECA-aire en el área de influencia en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo, Cusco – 2023-2024.

2.5. Variables

Variable Independiente

Actividad ladrillera: Es la fabricación artesanal para cortar el ladrillo en la que se emplea moldes de diferentes materiales y se prioriza la cantidad y calidad del producto sin tener en cuenta las condiciones de trabajo (Maldovan, 2018).

Variable dependiente

Calidad de aire: “La pureza del aire hace alusión a su estructura y a su adecuación para usos específicos. Entre los componentes más destacados que componen el aire se encuentran el nitrógeno, el oxígeno y el hidrógeno. (Querol X. , 2008).

Operacionalización de las variables

Variable	Definición de la variable	Definición operacional	Dimensión	Indicador
Actividad ladrillera	Es la fabricación artesanal para cortar el ladrillo en la que se emplea moldes de diferentes materiales y se prioriza la cantidad y calidad del producto sin tener en cuenta las condiciones de trabajo (Maldovan, 2018).	Actividad productiva de fabricación de ladrillos en Sucso Aucaylle, que emplea diversos combustibles y tecnologías de combustión, generando emisiones contaminantes.	Uso de combustibles	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de combustibles utilizados (palos rollizos, aserrín, leña, otros materiales)
			Tecnología de combustión	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de hornos empleados (tradicionales, mejorados, con ventiladores, extractores, lavadores de gases)
			Producción	<ul style="list-style-type: none"> Volumen de producción de ladrillos en el área de influencia
Calidad del aire	La calidad del aire alude a su constitución y a su aptitud para ciertos usos específicos; entre los componentes más comunes presentes en el aire se hallan en el nitrógeno, el oxígeno y el hidrógeno. (Querol X. , 2008)	Calidad del aire en Sucso Aucaylle, medida en función de la concentración de contaminantes atmosféricos generados por la actividad ladrillera.	Material Particulado	<ul style="list-style-type: none"> Niveles de PM10 y PM2.5 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$
			Gases Contaminantes	<ul style="list-style-type: none"> Niveles de NO₂, CO, SO₂ en ppm
			Cumplimiento normativo	<ul style="list-style-type: none"> Comparación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA-Aire)

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

A nivel Internacional

Quito (2023) Una investigación en Ecuador tuvo el propósito de identificar el estado del aire en las áreas de impacto directo de las ladrilleras artesanales ubicadas en la parroquia Sinincay, se utilizaron dispositivos electroquímicos de bajo costo y fotografías multiespectrales obtenidas mediante teledetección., cuantificando los contaminantes atmosféricos generados en la fabricación de ladrillos artesanales, siendo este un estudio cuantitativo y de tipo aplicado, obtuvo resultados de la mayor concentración de CO, CO₂, NO₂; el cantón de Sigcho un valor de 22 ug/m³ , San Luis de Lajas un valor de 36 ug/m³ y finalmente el Chorro un valor de 32 ug/m³; respecto a CO₂, la zona de Dolorosa presenta un valor de 2016 ug/m³ ; el Sigcho un valor de 31577 ug/m³ , San Luis de Lajas un valor de 1254 ug/m³ y finalmente el Chorro un valor de 1587 ug/m³; para PM_{2.5} la zona de Dolorosa presenta un valor de 136,72 ug/m³ ; el Sigcho un valor de 495,26 ug/m³ , San Luis de Lajas un valor de 65,5 ug/m³ y finalmente el Chorro un valor de 202,29 ug/m³ y para NO₂ la zona de Dolorosa presenta un valor de 48,09 ug/m³ ; el Sigcho un valor de 16,48 ug/m³ , San Luis de Lajas un valor de 19,49 ug/m³ y finalmente el Chorro un valor de 35,93 ug/m³; se concluyó que el sector del Sigcho ostenta una concentración de PM_{2.5} de 8 ug/m³, es este contaminante el que más se pudo observar a diferencia de los otros contaminantes y es necesario la implantación de una normativa que regule estos dos contaminantes.

Álvarez y Benitez (2020) De la investigación en Colombia, tuvieron como objetivo principal proponer una medida de mitigación para reducir las emisiones de PM_{2.5} generadas por la actividad de la ladrillera CERANOVA CONSTRUCTORA LOMALINDA LTDA en el municipio de Cogua, Cundinamarca mediante el análisis y la comparación de las emisiones contaminantes en relación con la normativa actual tanto a nivel nacional como internacional, con el fin de implementar una solución viable para mejorar la calidad del aire en la zona; el enfoque fue cuantitativo y aplicado, realizando mediciones de PM_{2.5} utilizando equipos especializados y se compararon los resultados con los límites establecidos por la Resolución 2254 de 2017 de Colombia y los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud (OMS); en cuanto a los resultados, las mediciones de PM_{2.5} en la ladrillera CERANOVA mostraron valores elevados, de 26,9 µg/m³ hasta 27,2 µg/m³, superando los límites permitidos por las normativas nacionales e internacionales y entre las alternativas evaluadas para mitigar las emisiones, la implementación de un lavador de gases Venturi fue identificada como la mejor opción debido a su alta eficiencia en la reducción de partículas contaminantes y su viabilidad económica y técnica para la empresa.

Martinez-Abarca et al. (2022) realizaron un estudio en México cuyo objetivo fue examinar la polución del aire causada por la contacto con emisiones de humo proveniente de las ladrilleras en Tonalá, Jalisco, así como comprender la interpretación de las afectaciones a la salud.; para ello, se utilizó una metodología mixta, básica, de tipo no experimental, donde se utilizó un dispositivo *Urban Sensor Board* (USB-SCK2.1), equipado con sensores que miden contaminantes en el aire, incluyendo CO₂ y material particulado y una encuesta a 21 vecinos para conocer su percepción; en cuanto a los resultados de PM_{2.5}, la concentración promedio fue de 34.14 µg/m³ con un rango entre 4 µg/m³ y 506 µg/m³, los valores más altos se registraron los sábados en las mañanas, respecto a PM₁₀, la concentración promedio fue de 38.13 µg/m³ con un rango que osciló entre 5 µg/m³ y 547

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, los valores más altos se presentaron también los sábados en las mañanas y el CO₂ reportado fue de 2,384.04 ppm con un rango de ocurrencia entre 411 ppm y 7,992 ppm, los valores más altos se observaron entre martes y viernes cuando la producción de ladrillos era más intensa, las mediciones reportadas sobrepasaron los límites establecidos por la OMS y la normativa mexicana y se concluyó que las ladrilleras artesanales en la zona representan una fuente significativa de contaminación atmosférica, lo que perjudica tanto al estado de salud del personal como de los vecinos, sugiriendo la necesidad de revisar y ajustar las normativas nacionales para alinearse mejor con las recomendaciones internacionales y mitigar los riesgos a la salud pública.

Pérez et al. (2024) en su estudio realizado en México tuvo como meta el análisis de la contaminación atmosférica por partículas PM_{2.5} en la ciudad de Guanajuato, y el estudio de su composición fisicoquímica y su relación con variables meteorológicas; se utilizó una metodología cuantitativa, de tipo no experimental estudio también evaluó las posibles fuentes de emisión de estas partículas en diferentes zonas de la ciudad, para ello, se monitoreo continuamente en tres puntos de la ciudad, el centro, la colonia Dos Ríos y la zona sur y para el análisis de las partículas se utilizó un equipo de monitoreo por atenuación beta y muestreadores portátiles de aire; los resultados mostraron que las concentraciones de PM_{2.5} excedieron el límite anual permisible de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un promedio de $13.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023, y el análisis SEM-EDS reveló la presencia de elementos como carbono, oxígeno, flúor, silicio, aluminio, azufre, potasio y calcio, con una mayor concentración de azufre en la zona sur, atribuida a la industria ladrillera cercana; las conclusiones se centraron en que la actividad industrial, específicamente la fabricación de ladrillos, es una fuente importante de contaminación por PM_{2.5} en la ciudad de Guanajuato, afectando la calidad del aire y la salud de la población y que las condiciones meteorológicas como la precipitación y la velocidad del viento también influyeron significativamente en la dispersión y concentración

de las partículas, recomendándose implementar medidas de control de emisiones para mejorar la calidad del aire.

Zangana y Yusof (2024) realizaron un estudio en Malasia cuyo objetivo fue evaluar la variación de las emisiones de las ladrilleras y su repercusión en el ecosistema y el bienestar de las personas pública, así como categorizar los tipos de hornos de ladrillos, siendo un estudio de tipo cuantitativo, no experimental, donde se recopilaron datos de varias ladrilleras ubicadas en diferentes ciudades de Irak, dando como resultado que en Bagdad, ciudad que utiliza combustibles fósiles dio 0.76 ppm de SO₂ y 0.83 ppm de NO₂, en Babilonia, con uso de petróleo, se reportaron 0.45 ppm de SO₂ y 10.42 ppm de NO₂, en Basora, con leña como combustible, se midieron 0.6 ppm de SO₂, 1.7 ppm de NO₂ y 10.6 ppm de CO, en otra región de Basora, utilizando queroseno, las concentraciones fueron de 2.18 ppm de SO₂, 0.9 ppm de NO₂ y 15.3 ppm de CO, y en Al-Diwaneyha, con gas líquido, se midieron 9 ppm de SO₂, 1.15 ppm de NO₂ y 3 ppm de CO, se concluyó que la industria de fabricación de ladrillos es una fuente significativa de contaminación del aire, emitiendo una variedad de contaminantes dañinos, los cuales tienen impactos ambientales y en la salud pública, contribuyendo al cambio climático, la lluvia ácida y enfermedades respiratorias, ya que el carbón es el principal combustible utilizado en las ladrilleras tradicionales, cuya combustión genera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), siendo la modernización de las ladrilleras una alternativa ya que puede mejorar significativamente la eficiencia de la combustión, reducir el consumo de carbón y disminuir las emisiones, reduciendo hasta un 37% las emisiones de CO₂ y hasta un 40% las emisiones de CO, y el cambio de combustibles es una alternativa eficaz ya que las concentraciones de SO₂ y NO₂ variaron significativamente según el tipo de combustible utilizado, ya que aquellas que empleaban combustibles fósiles presentaron valores más bajos.

A nivel Nacional

Mamani (2020) en su estudio realizado en Tacna, tuvo como objetivo principal evaluar los niveles de gases que afectan la calidad del aire. El tipo de metodología de su investigación fue descriptivo, transversal y correlacional. Para la metodología utilizó equipos como: Estación meteorológica portátil, Pirómetro óptico y equipo medidor de gases Harvard. En sus resultados, el distrito de Calana está expuesto a gases contaminantes como: SO₂ (13.46 ug/m³), NO₂ (53.01 ug/m³) y CO (2178 ug/m³). Cabe señalar que estos tres gases se encuentran bajo por debajo del Estándar Límite Permisible, ya que en cuanto al SO₂ el límite es (80 ug/m³), el límite del NO₂ es de (200 ug/m³) y el límite permitido del CO es de (30,000 ug/m³). En cuanto a las concentraciones de material particulado (PM₁₀) estos ascendieron a (72.74 ug/m³) y aun así no alcanzaron los niveles del límite permisible (150 ug/m³). En sus conclusiones, la concentración de gases contaminantes en el distrito de Calana no superan el Estándar y el Límite Máximo Permisible; sin embargo, se debe monitorear las fuentes fijas del distrito de Calana.

Valdera (2019) realizó una investigación en Lambayeque cuya meta principal fue determinar la presencia de contaminantes particulados resultantes de la producción artesanal de ladrillos de arcilla y su impacto en la calidad del aire en el sector de Chacupe Alto. Se utilizó un diseño mixto cuantitativo y cualitativo, recopilando datos de calidad del aire mediante estaciones de monitoreo y analizadores de gases, y obteniendo información cualitativa mediante la interacción con los trabajadores, quienes hablaban sobre su percepción del impacto ambiental generado y se midieron contaminantes como PM₁₀, PM_{2.5}, que superaron los límites permisibles, con concentraciones de PM_{2.5} superiores a 50 µg/m³, siendo 66.99 µg/m³, 59.48 µg/m³, 74.91 µg/m³ y 85.69 µg/m³; el estudio concluyó que la producción artesanal de ladrillos afecta significativamente la calidad del aire, recomendando la adopción de tecnologías más limpias y regulaciones más estrictas, así

mismo la concentración de gases contaminantes como el CO, SO₂ o NO₂ son bajos debido a la velocidad del aire de la zona.

López (2020) realizó un estudio en Piura, que tuvo como objetivo comparar los niveles de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en distintas regiones del Perú durante el período de 2015 a 2019 con el fin de analizar su variabilidad y su relación con factores ambientales, económicos y geográficos, la investigación cuantitativa y no experimental; los resultados mostraron que las regiones más industrializadas, como Lima, Piura y Cusco, presentaban niveles elevados de PM₁₀ y PM_{2.5}, Sobrepasando los estándares internacionales definidos por la OMS y las normativas peruanas, en Cusco se tuvo PM₁₀ de 196.82 µg/m³ y PM_{2.5} de 221.28 µg/m³ el estudio concluyó que los niveles de material particulado varían significativamente entre las regiones debido a factores geográficos y económicos, en el caso de Cusco se identificó que las actividades desarrolladas y los factores geográficos, como su clima y su fisiografía influían en el resultado reportado, recomendando la implementación de políticas públicas que promuevan tecnologías más limpias y mejoras en la calidad del aire para proteger la salud pública.

Mendez & Urquia (2023) llevaron a cabo una investigación en Lima, cuyo objetivo tuvo como finalidad analizar la polución y el estado del aire asociado a la presencia de material particulado. (PM_{2.5} y PM₁₀), y su conexión con los indicadores climáticos en Lima Metropolitana entre los años 2017 y 2020. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental, longitudinal-correlacional. Se recopilaron datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), y se analizaron utilizando series temporales, distribución espacial y modelos aditivos generalizados (GAM). Los resultados mostraron que, en distritos como Villa María del Triunfo, Ate, Puente Piedra y Santa Anita, los niveles de PM_{2.5} y PM₁₀ superaron los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), con concentraciones promedio anuales que

excedieron los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo clasificados como “mala calidad” del aire según el Índice de Calidad del Aire (INCA). Se concluyó que la contaminación del aire en Lima Metropolitana excede los niveles permisibles en más del 60% del área evaluada, y que la dispersión de material particulado depende de factores meteorológicos como la velocidad del viento ($>3.4 \text{ m/s}$), la humedad relativa ($>77\%$) y la temperatura del aire ($<19^\circ\text{C}$).

Espinoza (2021) realizó una investigación en Lima, con el objetivo de analizar las repercusiones ecológicas provocadas por la actividad de producción de ladrillos de la empresa Muro Industrias Cerámicas S.A.C., ubicada en Chosica, la investigación utilizó un diseño no experimental transversal mixto, integrando técnicas cualitativas y cuantitativas para analizar aspectos como los niveles de ruido, las emisiones gaseosas y la calidad del aire, utilizando la metodología de Conesa (2010) para evaluar la relevancia del impacto ambiental, los resultados mostraron que la actividad ladrillera genera una variedad de impactos, desde leves hasta severos, afectando principalmente la calidad del aire y el suelo, particularmente las emisiones de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂) superaron los límites establecidos por las normativas ambientales peruanas, con concentraciones que oscilaron entre 50 y 100 mg/m^3 , se concluyó que, A pesar de las acciones preventivas establecidas, es necesario adoptar regulaciones más estrictas y tecnologías más limpias para reducir los impactos ambientales en la zona.

A nivel Regional y Local

Cahuantico (2019) en su trabajo de estudio titulada “*Evaluación de contaminantes atmosféricos CO₂, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} en la zona urbana de Cusco*” tuvo como objetivo establecer los niveles de contaminación el aire en tres distritos: Wánchaq, San Sebastián y San Jerónimo. Su investigación fue de tipo descriptiva, de enfoque cuantitativo y de diseño no experimental. En lo que respecta al PM 2.5 en el distrito de Wanchaq resultó con 73.401

ug/m³. En lo que respecta a San Sebastián se obtuvo 51.928 ug/m³ y para el distrito de San Jerónimo resultó con 137.134 ug/m³. Como se evidenció estos resultados excedieron el Estándar de Calidad Ambiental -ECA para material particulado 10, el cual establece (50 ug/m³). Para el PM₁₀ en el distrito de Wanchaq se obtuvo el nivel de 57.38 ug/m³, para San Sebastián se obtuvo 54.443 ug/m³ y para San Jerónimo resultó 95.027 ug/m³. Se evidencia que ninguno de ellos sobrepasa los ECA's del MINAM que es (100 ug/m³). Sin embargo, el ECA de la OMS exige (50 ug/m³). Los resultados para el CO resultaron para Wanchaq 6201.545 ug/m³, para San Sebastián 4379.706 ug/m³ y para San Jerónimo 4095.975 ug/m³. En cuanto al SO₂, Wanchaq es 2.705 ug/m³, para San Sebastián 3.048 ug/m³ y para San Jerónimo 2.612 ug/m³. Se evidencia contaminación del aire en el distrito de San Jerónimo por la presencia de ladrilleras y el parque automotor.

Dalens y Gallegos (2022) en su trabajo de estudio elaborada en la ciudad del Cusco, titulada "*Evaluación de la calidad del aire por emisiones de CO, PM_{2.5}, PM₁₀ generado por la industria ladrillera en Cusco*" tuvo como objetivo evaluar la calidad del aire en el sector de las ladrilleras. Su estudio, se caracterizó por ser descriptivo, de tipo aplicado y de enfoque cuantitativo. En su metodología realizó 02 monitoreos, en los cuales se estableció que, en el mes de mayo se registró una concentración menor, en comparación del registro del mes de junio; en el que la concentración de PM₁₀ superó los valores establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire. En sus resultados, en el primer momento del monitoreo, las concentraciones de PM_{2.5} fue de 30.3 ug/m³ y de 16.3ug/m³ y para el PM₁₀ fue de 85.4ug/m³ para el CO fue de 748 ug/m³ en los dos puntos. En el segundo monitoreo, en el mes de junio, las concentraciones ascendieron, para el PM_{2.5} fue de 49.3 ug/m³ y de 38.2 ug/m³, para el PM₁₀ la concentración fue de 115.4 ug/m³ y de 67.3 ug/m³ y de 38.2 ug/m², para el PM₁₀ fue de 125.4 ug/m³ y de 47.3 ug/m³ y para el CO fue de 5632

ug/m³ y de 4939 ug/m³. En sus conclusiones, se estableció que la calidad del aire es moderada, en el distrito de San Jerónimo.

Lechuga (2022) realizó un estudio en Quispicanchi, cuyo objetivo principal fue determinar la cantidad de combustible utilizado y la presencia de gases nocivos en el ambiente, así como evaluar la eficiencia energética de los hornos ladrilleros artesanales en Piñipampa, Cusco, y proponer estrategias para reducir las emisiones. La investigación utilizó un diseño correlacional de enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), y las mediciones incluyeron el uso del método EPA para determinar el flujo volumétrico, así como las emisiones de gases como SO₂, NO_x, CO, y CO₂. Los resultados indicaron que el consumo promedio de combustible era de 0.26 kg por cada kilogramo de cerámico producido, con emisiones anuales promedio de 1.77 TM de CO, 75.24 kg de NO_x, y 39.69 kg de SO₂ por horno. obteniendo resultados que mostraron emisiones anuales promedio de 1.77 toneladas métricas (TM) de monóxido de carbono (CO), 75.24 kilogramos (kg) de óxidos de nitrógeno (NO_x) y 39.69 kg de dióxido de azufre (SO₂) por horno. Estos valores reflejan niveles significativos de contaminación, y el estudio subrayó que estos hornos no solo contribuyen al deterioro de la calidad del aire, sino también al impacto ambiental en la región. La investigación concluyó que es urgente adoptar tecnologías más limpias y mejorar las normativas ambientales para reducir estas emisiones, se concluyó que los hornos artesanales generan impactos ambientales significativos, recomendándose la adopción de tecnologías más limpias y regulaciones más estrictas.

3.2. Bases teóricas

Aire

El aire está compuesto por diversos gases que integran parte esencial de la atmósfera, lo que explica por qué lo encontramos en varias dimensiones. Dichas características más comunes incluyen nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, neón y helio, entre otros. No tiene

un volumen definido y reacciona a los cambios de temperatura: se difunde cuando hace calor y se contrae con el frío. A simple vista, el aire es incoloro, inodoro, insípido y transparente en pequeñas cantidades. Sin embargo, cuando lo observamos desde lejos y en grandes volúmenes, puede verse con un tono azulado, un fenómeno causado por la forma en que los rayos del sol se dispersan al atravesarlo (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2018).

Atmósfera

La atmósfera es la capa de gases, con un grosor cercano a los 200 kilómetros, que envuelve al planeta Tierra. Actúa como un escudo protector fundamental para múltiples formas de vida y ha experimentado cambios durante miles de millones de años hasta adquirir su actual composición y organización, la cual permite la respiración de los seres vivos. Una de sus funciones esenciales es resguardar a los organismos vivos de los efectos dañinos de la radiación ultravioleta emitida por el Sol. (Inche, 2004).

Es la capa de materiales gaseosos que forma la corteza terrestre. Debido a las numerosas fluctuaciones verticales y horizontales en sus características físicas y químicas, es de naturaleza heterogénea y dinámica. La superficie terrestre, las zonas en contacto con la hidrosfera y la geosfera, y una elevación media de aproximadamente 800 km, que varía con la latitud, son sus límites generales. Parece estar separada en varias capas (García & Salcedo de Lara, 2003).

Uno de los compuestos gaseosos más relevantes del planeta es el oxígeno molecular (O₂), también conocido como dióxígeno. Representa el 21 % de la atmósfera, el 89 % del peso del agua salada y constituye al menos el 47 % de la corteza terrestre (Cárdenas-Rodríguez & Pedraza, 2018).

La Tierra está rodeada por una envoltura gaseosa conocida como atmósfera, que está separada en capas concéntricas con densidades y composiciones perfectamente distintas. Los

30 km más cercanos a la superficie terrestre contienen alrededor del 99 por ciento de su composición. La troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la ionosfera y la exosfera son las capas que componen la atmósfera (Cornare, 2024).

Troposfera

Es la capa ubicada más próxima a la corteza terrestre y en la que se generan los fenómenos meteorológicos. La troposfera contiene agua en proporciones que varían de forma constante. (vapor, gotas y cristales de hielo), 78,00 % de nitrógeno, 21,00 % de oxígeno, 0,90 % de argón y 0,03 % de anhídrido acético (Cornare, 2024).

A medio kilómetro sobre el nivel del suelo se encuentra la troposfera, y a media milla más allá está la ionosfera, dos capas de la atmósfera terrestre. La luz se ralentiza a medida que viaja a través de la ionosfera y la troposfera (Limo Ruiz, 2024).

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) de origen natural en la troposfera no contaminada se combinan con los óxidos de nitrógeno (NO) y el oxígeno (O) para formar O₂, aunque en niveles bajos, incluso en presencia de condiciones ambientales desfavorables (bajas temperaturas, poca luz solar y mucho viento), como ocurre en los meses de verano en Cusco durante los meses secos de mayo a octubre. Sin embargo, en zonas rurales aisladas, cuando las condiciones para la formación de ozono (O₃) son favorables, sus niveles aumentan (Cañada, 2021).

Consecuencias de la exposición a partículas

Repercusiones en la salud

El tamaño de las partículas que respiramos influye directamente en los posibles daños que pueden causar a nuestra salud. Las más pequeñas aquellas que miden menos de 10 micrómetros son especialmente peligrosas, ya que pueden llegar hasta las zonas más profundas de los pulmones y, en algunos casos, incluso pasar al torrente sanguíneo, afectando así distintas funciones del cuerpo. (Agencia de protección ambiental, 2025).

- Fallecimientos anticipados en personas que ya padecen enfermedades del corazón o de los pulmones.
- Ataques cardíacos que, aunque no causan la muerte, afectan gravemente la salud.
- Empeoramiento de los síntomas del asma en quienes la padecen.
- Mayor presencia de molestias respiratorias, como irritación en la garganta, tos constante o dificultad para respirar con normalidad.

Efectos en los ecosistemas terrestres:

Las partículas que quedan suspendidas en el aire no solo afectan nuestra salud, sino también al equilibrio de la naturaleza. Estas pequeñas sustancias pueden cambiar la composición del suelo y aumentar la acidez en ríos y lagos. Así, contribuyen a la aparición de la lluvia ácida, que daña gravemente a las plantas y pone en riesgo la vida de muchos animales. El viento, además, puede transportar estas partículas a grandes distancias — incluso a cientos de kilómetros— desde donde se originaron. Cuando finalmente caen sobre la tierra o el agua, alteran el delicado equilibrio químico de los ecosistemas, afectando la biodiversidad (Agencia de protección ambiental, 2025).

Cambio climático:

El cambio climático es una de las principales problemáticas ambientales globales, originado por el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes atmosféricos producto de diversas actividades humanas, entre ellas la producción industrial y artesanal. La actividad ladrillera en la comunidad de Sucso Aucaylle representa una fuente considerable de emisiones atmosféricas, debido al uso de combustibles como llantas, plástico y leña en hornos artesanales. Estas prácticas, además de deteriorar la calidad del aire local, aportan indirectamente al cambio climático al liberar contaminantes como CO, NO₂ y material particulado fino (PM_{2.5}), que afectan tanto a nivel local como global. Por ello, el estudio no solo se enmarca en la gestión de la contaminación del aire, sino también en la

necesidad de adoptar prácticas sostenibles que mitiguen el impacto ambiental de actividades productivas tradicionales.

La actividad ladrillera en Sucso Aucaylle aporta de manera considerable a la degradación de la calidad del aire y al calentamiento global, debido al uso de combustibles contaminantes en hornos artesanales. Esta situación genera emisiones como CO, NO₂ y PM2.5, que repercuten la salud local y el ambiente global. Por ello, el estudio enfatiza la necesidad de implementar prácticas sostenibles que reduzcan estos impactos negativos. (Ballester, 2005)

Daño Ambiental:

El viento puede arrastrar partículas a lo largo de extensas distancias, llevándolas mucho más allá del lugar donde se originaron. Con el tiempo, estas partículas terminan asentándose en el suelo o en cuerpos de agua. Según los compuestos que contengan, su acumulación puede provocar efectos negativos en el ambiente, afectando tanto a la tierra como a los ecosistemas acuáticos:

- Que los lagos y riachuelos se vuelvan más ácidos, afectando la vida que albergan.
- Alteraciones en el equilibrio de nutrientes en aguas costeras y grandes ríos, lo que impacta a las especies que dependen de esos entornos.
- Disminución de los nutrientes esenciales en el suelo, lo que debilita su fertilidad.
- Deterioro de bosques vulnerables y daños a los cultivos que alimentan a las personas.
- Consecuencias negativas para la variedad y equilibrio de los ecosistemas naturales.

Contaminación Ambiental

La agricultura fue la primera industria económica que sufrió el agotamiento de los recursos durante la Primera Revolución Industrial, que es cuando la contaminación ambiental comenzó a empeorar. Sin embargo, dado que la expansión demográfica descontrolada provocó la destrucción de varias áreas naturales y la escasez de recursos, las

organizaciones no pueden ser consideradas totalmente responsables. En respuesta a esta circunstancia, los estados comenzaron a asumir el papel de organismo regulador en un esfuerzo por proteger el medio ambiente, asegurándose de que las empresas utilizaran tecnología limpia para llevar a cabo sus operaciones (Salas Canales, 2020).

En términos generales, la contaminación se define como un exceso de sustancia o energía (calor) que perjudica a las personas, los animales, las plantas y los bienes, además de afectar negativamente a las actividades que a menudo se desarrollan dentro o cerca de una fuente contaminante. La contaminación es difícil de definir, pero es obvio que mata o agota a las plantas y los animales, impide que el agua se utilice en las ciudades o la industria y daña el ecosistema, incluido el paisaje (Jiménez, 2001).

Calidad de Aire

El seguimiento de las condiciones atmosféricas tiene dos objetivos principales. El primero es conocer en qué estado se encuentra el aire que respiramos y establecer metas que ayuden a las sociedades a aplicar medidas tanto con tecnología como sin ella para reducir las emisiones contaminantes y, con ello, proteger a las personas de una exposición peligrosa. El segundo propósito es estudiar cómo la exposición de la población a estos contaminantes está relacionada con probables repercusiones en la condición sanitaria, comprendiendo mejor las causas y consecuencias de respirar aire contaminado, con el fin de establecer límites de protección que sirvan posteriormente como base para la regulación ambiental. (Querol X. , 2008).

Las normas de calidad del aire son valores umbral establecidos para mitigar los impactos ambientales en la salud, derivados de la investigación toxicológica y epidemiológica. Estas normas, emitidas por los gobiernos, tienen en cuenta las concentraciones actuales de contaminantes, las tecnologías de cumplimiento, los costes de control y los factores socioeconómicos y culturales de la nación. En los últimos diez años,

al hablar de partículas en suspensión en el aire (conocidas como PTS), se ha establecido una clasificación que distingue a las PM10 como aquellas que miden 10 micras o menos, y a las PM2,5 como aún más pequeñas, de 2,5 micras o menos. Esta clasificación no es casual, ya que cuanto más diminutas son estas partículas, mayor es el riesgo que representan para la salud, pues pueden ingresar más fácilmente al cuerpo a través del sistema respiratorio, ya que pueden penetrar en las regiones inferiores de los pulmones (Inche, 2004).

Procesos de Combustión

Es la fase térmica que alcanza mayor relevancia práctica debido a su amplia aplicación mundial, al mismo tiempo que es sencillo de llevar a cabo, pero complejo de investigar, el proceso en el que ocurre una reacción química que libera calor de forma continua, gracias a la propagación del calor y la mezcla de sustancias. A este fenómeno se le conoce como combustión. (Ruiz, 2014).

La combustión se utiliza principalmente para la propulsión de motores (motores alternativos, turbinas de vapor y de gas), el procesamiento de materiales (reducción de óxidos, fundición y cocción), la eliminación de residuos (incineración de basura), la refrigeración (refrigeradores de absorción), el control de incendios (cortafuegos, materiales ignífugos) y la calefacción (chimeneas, estufas y calderas). Por lo cual, la combustión, o la quema de materiales, es un proceso fácil de llevar a cabo, pero que genera una gran cantidad de energía no utilizable, lo que implica una alta reactividad. Este fenómeno ocurre debido a la rápida liberación de energía térmica causada por cambios desordenados en los enlaces químicos de las partículas involucradas (Ruiz, 2014).

Tecnologías Limpias

La adopción de tecnologías sostenibles se reconoce como una alternativa efectiva para que las organizaciones disminuyan la contaminación generada desde las primeras etapas

de su proceso productivo, junto con otros progresos en sus métodos de fabricación. (Salas Canales H. J, 2020).

El uso de tácticas que incorporan métodos como el reciclaje, la sustitución, la recuperación y la revalorización conforman las tecnologías limpias. A continuación, se enumeran algunas de las ventajas de implementar tecnologías limpias: a) se obtienen mejores resultados al evitar la contaminación; b) los sistemas implementados son duraderos, fiables, eficientes, de alto rendimiento, rentables y casi siempre dan lugar a un aumento de la productividad; c) suponen un importante ahorro de tasas y cargos; y d) la prevención sugiere un claro beneficio financiero frente a la descontaminación (Marco & Reyes, 2003).

Efectos de la Contaminación en la salud humana

Las enfermedades respiratorias, como el asma y las alergias, están relacionadas con la contaminación atmosférica tanto externa como interna. La correlación entre la contaminación atmosférica y la salud es cada vez más reconocida. En las últimas décadas, la incidencia del asma y las alergias ha aumentado en toda Europa, y aproximadamente el 10 % de habitantes pediátricos se ve perjudicada por estas afecciones. Las situaciones climáticas podrían estar relacionadas con la frecuencia de manifestaciones clínicas de asma rinitis alérgica y eccema atópico dentro de la población infantil. Entre los factores ambientales involucrados se incluyen los óxidos de nitrógeno y azufre, las partículas suspendidas en el aire, el ozono, los metales, los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los hidrocarburos. (Vargas, 2005).

Si persiste el ritmo actual de agotamiento de la capa de ozono, se prevé que habrá repercusiones significativas a corto plazo para los organismos vivos, ya que la exposición a la radiación ultravioleta puede inducir cáncer de piel, cataratas y deficiencias del sistema inmunológico, además de disminuir el rendimiento agrícola y, lo que es más crítico, reducir

la productividad del fitoplancton, el principal productor en los ecosistemas marinos (Inche, 2004).

Material Particulado

La materia orgánica particulada (MOP) constituye una compleja mezcla de diversas sustancias químicas, las cuales forman parte del material particulado presente en la atmósfera urbana (aerosoles) y, en menor proporción, en los aerosoles de zonas rurales, este compuesto tiene un origen tanto antropogénico, que representa la fuente principal, como natural, adquiriendo relevancia cuando los procesos naturales se desarrollan a gran escala, entre las fuentes más significativas de la formación de la MOP se encuentran los procesos de combustión, el tamaño de las partículas suspendidas en la atmósfera puede distribuirse en modos fino y grueso, los cuales tienen orígenes, transformaciones y mecanismos de eliminación atmosférica distintos, asimismo, estos modos difieren en composición química, propiedades ópticas y patrones de deposición en el tracto respiratorio, lo que exige la implementación de técnicas de control diferenciadas (Sbarato & Sbarato, 2016).

Las partículas finas se subdividen en los modos de nucleación y acumulación, el primero incluye partículas con diámetros entre 0,005 y 0,1 μm , formadas principalmente por la condensación de vapores calientes en el transcurso de reacciones de combustión y formación por nucleación de especies presentes en la atmósfera, por su parte, las partículas del modo de acumulación, con diámetros entre 0,1 y 1 μm , se generan a partir de la coagulación de partículas del modo de nucleación y de la deposición de compuestos volátiles sobre núcleos particulados, lo que provoca un aumento de su tamaño; en contraste, las partículas gruesas, con diámetros entre 1 y 100 μm , se originan principalmente por procesos mecánicos, tanto de carácter natural como antropogénico (Sbarato & Sbarato, 2016).

Evaluación ambiental

La evaluación ambiental es un proceso que fue diseñado para definir, predecir y valorar las repercusiones en el entorno natural derivados de una variedad de proyectos, programas o políticas antes de su ejecución, para asegurar que las consideraciones ambientales sean tomadas en cuenta durante la fase de planificación y toma de decisiones, abarcando desde la identificación de los efectos potenciales hasta la implementación de medidas para mitigar impactos negativos y optimizar efectos positivos, promoviendo así un desarrollo más sustentable (Perevochtchikova, 2013).

El diagnóstico de afectaciones al medio ambiente (EIA) ha evolucionado como una herramienta clave en la política pública ambiental, para no solo en evitar daños ambientales, sino también en promover principios de sustentabilidad, prevención y precaución, mediante la incorporación de estudios de los factores sociales, económicos y ecológicos, permitiendo prever de manera anticipada los efectos adversos y maximizar los beneficios de los proyectos sobre el entorno, donde este proceso de evaluación ambiental fomenta la participación ciudadana y la transparencia, permitiendo que los distintos actores sociales contribuyan en el proceso de evaluación y en la creación de soluciones adaptadas a las necesidades locales y al contexto ambiental específico (Perevochtchikova, 2013).

Fiscalización ambiental

Es un proceso administrativo regulado y supervisado que asegura el acatamiento de las regulaciones ecológicas mediante los pasos del monitoreo, supervisión y, en algunos casos, la ejecución de castigos y ajustes necesarios para impedir impactos negativos en el ambiente, este proceso adopta un enfoque preventivo y de gestión de riesgos, al que se le da interés y prioridad la corrección de las infracciones y la subsanación voluntaria antes que la sanción, lo que a su vez permite que la fiscalización no se limite a imponer sanciones, sino

que incluya acciones orientativas y preventivas que promuevan el cumplimiento normativo (Grandez & Gamio, 2019).

Emisiones Atmosféricas

Las emisiones atmosféricas se definen como la liberación de diversos contaminantes al ambiente, las cuales están divididas en fuentes móviles (como los vehículos) y fuentes fijas (como industrias, sistemas de calefacción y actividades de eliminación de residuos). Estas emisiones pueden clasificarse en contaminantes primarios, emitidos directamente de las fuentes, y contaminantes secundarios, que se generan a través de reacciones químicas y físicas de los primarios dentro de la atmósfera, incluyendo fenómenos como las reacciones fotoquímicas en la atmósfera y acidificación del medio ambiente (Ballester, 2005).

Monitoreos Ambientales

La vigilancia ambiental es un instrumento esencial que posibilita el seguimiento constante de actividades, proyectos y obras en ejecución. Su finalidad es comprobar el grado de cumplimiento y la efectividad de las acciones ambientales definidas para evitar o reducir los efectos adversos sobre el entorno, este proceso se lleva a cabo mediante la observación, el muestreo, la evaluación y el estudio de variables ambientales concretas, como la calidad del agua, suelo y aire, para verificar que se mantengan dentro de los límites permisibles y que no afecten negativamente a los recursos naturales ni a la salud humana (Hernandez & Lopez, 2019).

Estas actividades son útiles para detectar posibles impactos que no hayan sido proyectados y permite ajustar las acciones de acuerdo con los resultados obtenidos, por lo que se convierte en un mecanismo de retroalimentación para la planificación y la formulación de acciones orientadas a la conservación y uso racional del patrimonio natural, siendo que la efectividad el éxito del control ambiental radica en la adecuada selección de

los indicadores y puntos de muestreo, así como de la periodicidad y precisión en el registro de datos (Hernandez & Lopez, 2019).

Monitoreo ambiental de aire

Es un proceso sistemático de medición y evaluación de los contaminantes presentes en la atmósfera, que tiene por finalidad generar información precisa y confiable sobre la concentración de sustancias contaminantes, permitiendo evaluar el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el aire y facilitando la toma de decisiones orientadas a la protección de la salud pública y el medio ambiente (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019)

El Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire establece criterios técnicos para el diseño de redes de monitoreo, la selección de métodos de medición y el establecimiento de unidades de seguimiento, asegurando que las operaciones sean eficaces y eficientes, proporcionando directrices para el tratamiento y presentación de la información obtenida, garantizando la comparabilidad y representatividad de los datos a nivel nacional ambiente (MINAM, 2019).

Estándares de Calidad Ambiental para Aire

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el Aire son límites superiores aceptables de concentración de compuestos o sustancias presentes en la atmósfera, que no implican un riesgo considerable para la salud humana ni para el entorno natural. Estos estándares constituyen un marco obligatorio de referencia en la formulación y desarrollo de metodologías para la conducción ambiental por parte de los responsables de diversas actividades productivas. (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017). Asimismo, los Límites Máximos Permisibles (LMP) para ladrilleras regulan las emisiones de material particulado (PM), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO) para preservar la integridad sanitaria y ecológica. Se aplican a todas las empresas ladrilleras

del país, desde las artesanales hasta las automatizadas, incluyendo actividades de procesamiento. La norma prohíbe la cocción de ladrillos a cielo abierto a partir del tercer año de vigencia y exige el uso de mejores técnicas disponibles para minimizar las emisiones (Decreto Supremo N° 111, 2021) .

Tabla 1*Estándares de Calidad Ambiental*

Parámetros	Período	Valor [µg/m ³]	Criterios de Evaluación	Método de Análisis
Benceno (C6H6)	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO ₂)	24 horas / 1 hora	250 / 200	NE más de 7 veces al año / NE más de 24 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Anual	100	Media aritmética anual	Quimioluminiscencia (Método automático)
PM _{2.5} (Material Particulado <2.5 µm)	24 horas / Anual	50 / 25	NE más de 7 veces al año / Media aritmética anual	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
PM ₁₀ (Material Particulado <10 µm)	24 horas / Anual	100 / 50	NE más de 7 veces al año / Media aritmética anual	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
Mercurio Gaseoso Total (Hg)	24 horas	2	No exceder	CVAAS / CVAFS / Espectrometría de absorción atómica Zeeman (Métodos automáticos)
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora / 8 horas	30,000 / 10,000	NE más de 1 vez al año / Media aritmética móvil	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
Ozono (O ₃)	1 hora / 8 horas	100	Máxima media diaria / NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM ₁₀	Mensual / Anual	1.5 / 0.5	NE más de 4 veces al año / Media aritmética de valores mensuales	Método para PM ₁₀ (Espectrometría de absorción atómica)
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

Fuente en base a (MINAM, 2017)

Directrices mundiales de la OMS sobre la Calidad del Aire

Desde 1987, “la OMS publica periódicamente directrices sobre la calidad del aire relacionadas con la salud para ayudar a los gobiernos y a la sociedad civil a reducir la contaminación del aire y sus efectos adversos. Las últimas directrices se publicaron en 2006.

En Air quality guidelines – global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide (de la Oficina Regional de la OMS para Europa, 2006) se publicaron niveles orientativos sobre los principales contaminantes atmosféricos perjudiciales para la salud, como la materia particulada (MP), el ozono (O₃), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el dióxido de azufre”.

Tabla 2

Directrices mundiales de la OMS en calidad de aire

Contaminante	Tiempo promedio	Meta intermedia 1	Meta intermedia 2	Meta intermedia 3	Meta intermedia 4	Nivel de las directrices sobre la calidad del aire
MP _{2.5} (µg/m ³)	Anual	35	25	15	10	5
MP _{2.5} (µg/m ³)	24 horas	75	50	37,5	25	15
MP ₁₀ (µg/m ³)	Anual	70	50	30	20	15
MP ₁₀ (µg/m ³)	24 horas	150	100	75	50	45
O ₃ (µg/m ³)	Temporada alta	100	70	–	–	60
O ₃ (µg/m ³)	8 horas	160	120	–	–	100
NO ₂ (µg/m ³)	Anual	40	30	20	–	10
NO ₂ (µg/m ³)	24 horas	120	50	–	–	25
SO ₂ (µg/m ³)	24 horas	125	50	–	–	40
CO (mg/m ³)	24 horas	7	–	–	–	4

Fuente en base a (OMS, 2021)

Objetivos de las directrices mundiales de la OMS sobre la Calidad del Aire

Proporcionar asesoramiento basado en pruebas y directrices, incluida la configuración de la gráfica de la función dosis-respuesta en relación con los principales efectos en la salud asociados a PM_{2,5}, PM₁₀, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono, considerando los respectivos períodos promedios establecidos. Estos contaminantes han sido seleccionados debido a su importancia global; sin embargo, esto no sugiere que otros contaminantes atmosféricos sean intrascendentes. (OMS, 2021).

Establecer hitos provisionales para ayudar a los países que ahora superan los niveles de referencia en la ejecución de métodos de reducción de la contaminación a cumplir con prontitud (OMS, 2021).

Ofrecer afirmaciones cualitativas sobre prácticas eficaces para gestionar categorías específicas de materia particulada, como el carbono negro o el carbono elemental (BC/EC), las partículas ultrafinas (UFP) y las partículas procedentes de tormentas de arena y polvo, para las que los datos existentes son inadecuados para determinar los niveles de referencia, pero que sugieren un riesgo potencial (OMS, 2021).

Buenas prácticas en materias primas.

Las prácticas recomendadas en el manejo de materias primas en la producción ladrillera se basan en identificar canteras de alta calidad que ofrezcan un rendimiento óptimo, asegurando así la procedencia confiable de los materiales empleados, centrándose sobre el origen de las materias primas permite no solo mejorar la calidad del producto, sino también optimizar su rendimiento y mantener áreas de almacenamiento separadas y organizadas para las materias primas, combustibles, productos terminados y residuos, facilita el control y administración de inventarios, lo que a su vez posibilita una programación efectiva de adquisiciones y un uso eficiente de los recursos (Programa Regional de Aire Limpio [PRAL], 2010).

Buenas prácticas en combustibles.

Se basan en evitar combustibles altamente contaminantes por los graves efectos negativos que producen en el medio ambiente y la salud y optar alternativas más limpias, tales como gas natural, diésel con reducido nivel de azufre, carbón mineral, material leñoso seco y subproductos agrícolas como aserrín o cáscara de arroz y generar menos emisiones de contaminantes; en cuanto la maximización de la eficiencia térmica, es importante implementar sistemas de medición y control de la dosificación del combustible, lo cual

reduce el riesgo de sobrecocción y permite una combustión más controlada y eficiente (PRAL, 2010). Según un informe de Swisscontact (2020), se utilizan materiales como leña, llantas y plásticos, los cuales aportan de manera considerable a la degradación del aire y a la pérdida de cobertura forestal, intensificando los factores que originan el cambio climático.

Buenas prácticas en Formulación y Preparación de mezcla

Se basan en la formulación adecuada de la mezcla y tamizar las materias primas, eliminando impurezas como piedras y raíces y la adición de rellenos orgánicos, reducir el consumo de materias primas, que otorgan mayor consistencia y resistencia al ladrillo y definir proporciones precisas para cada componente y así mantener la uniformidad de la mezcla, evitando así variaciones en la consistencia y propiedades de los ladrillos (PRAL, 2010).

Buenas prácticas en cocción y quema

Se basa en el uso de combustibles de bajo impacto ambiental para minimizar las emisiones atmosféricas y cumplir con las normativas ambientales y aumentar la densidad estructural de las paredes del horno y aplicar mejoras en su diseño estructural para maximizar la retención de calor, lo que reduce el consumo de combustible y permite una cocción más uniforme, teniendo personal involucrado debe recibir capacitación en el manejo seguro y eficiente del horno para que se realice de forma ordenada y controlada (PRAL, 2010).

Buenas prácticas en Gestión de Residuos

La gestión de residuos ha adquirido una gran relevancia en varios países, abordando las demandas globales de sostenibilidad medioambiental y salvaguardando la salud pública. Sin embargo, en el contexto de la economía de los bienes ambientales, un aspecto característico de la administración convencional de los residuos urbanos es la secuencia de eliminación final dentro de su gestión integral, haciendo hincapié en la priorización de las distintas etapas y las soluciones potenciales para el reaprovechamiento de insumos

reciclables o utilizables. La eliminación final, ya sea en depósitos de residuos o en rellenos sanitarios, suele ser la principal opción considerada para la eliminación o erradicación de los residuos generados (Barradas, 2009).

La recuperación de residuos se considera cada vez más una opción cara y altamente especializada. La conducción estándar de los residuos sólidos generados en áreas urbanas pasa por alto que el principal impulso para el intercambio comercial de materiales reciclables procedentes de basureros o residencias es la demanda existente de estos materiales. Todas las proyecciones destinadas a minimizar su generación o mejorar su calidad de recuperación garantizan su utilidad futura, que va desde la reutilización básica hasta su aplicación como materias primas durante las etapas de procesamiento industrial (Barradas, 2009).

Marco legal

Norma Legal de los ECAS AIRE

Mediante esta normativa, se establecen los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el Aire, los cuales constituyen instrumentos técnicos y legales que regulan las concentraciones máximas admitidas de niveles de presencia de compuestos, materiales, y parámetros físicos, químicos y biológicos en la atmósfera, considerados como parte de un medio receptor del medio ambiente. Estos valores de referencia han sido determinados con base en estudios científicos, criterios toxicológicos y epidemiológicos, y tienen como finalidad garantizar que la presencia de dichos contaminantes en la atmósfera no represente un riesgo significativo para la salud de las personas ni para los ecosistemas (Decreto Supremo 003-2017- [MINAM], 2017).

Los ECA para Aire se aplican en todo el territorio nacional y son de cumplimiento obligatorio para las autoridades ambientales, gobiernos regionales, locales y todos los Personas naturales o jurídicas que desarrollan actividades económicas o de servicios y que puedan generar emisiones atmosféricas. Estos estándares permiten examinar el nivel de

pureza del aire atmosférico en diferentes zonas del país, establecer zonas de atención prioritaria, y diseñar estrategias de control y prevención de la contaminación atmosférica. Asimismo, sirven como base para la elaboración de políticas públicas orientadas a la protección sanitaria de la población y la conservación ecológica y el desarrollo sostenible de las actividades económicas, especialmente en sectores de alto impacto como la industria ladrillera. (Decreto Supremo 003-2017- [MINAM], 2017).

Norma Legal que aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire

Mediante el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, se aprueba el “Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire”, el cual constituye un instrumento normativo de carácter técnico que tiene por finalidad estandarizar los procedimientos, metodologías y referencias metodológicas empleadas en la evaluación del aire en el territorio nacional. Este protocolo permite garantizar que la recolección de datos se realice bajo condiciones homogéneas, rigurosas y sistemáticas, asegurando así la generación de información de calidad, comparable, compatible, confiable y representativa.

El protocolo establece las pautas para el diseño y operación de redes de monitoreo, la selección de ubicaciones estratégicas para la instalación de estaciones de muestreo, la periodicidad de las mediciones, el tipo de instrumentos a utilizar, así como los métodos de análisis y tratamiento de datos. Todo lo mencionado se sustenta en la necesidad de construir una base consistente de información ambiental que permita comprobar la observancia de las normas de calidad ambiental (ECA) para Aire, identificar zonas críticas, establecer tendencias en la calidad del aire y apoyar en la formulación de políticas públicas y medidas de gestión ambiental. (Decreto Supremo 010-2019 [MINAM]).

1) Objetivos y alcance del protocolo

Con la finalidad particular, este documento normativo tendrá la función de definir las técnicas de medición reconocidas y métodos comparables con la medición de las concentraciones de los indicadores de composición atmosférica regulados por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire. Su aplicación está orientada a todo sujeto, sea individual o colectivo, ya sea del ámbito público o privado, y se lleva a cabo en espacios exteriores, evaluando la calidad del aire en escalas micro, media, local y urbana.

2) Diseño de redes para el monitoreo

Es determinante la importancia de identificar, de forma precisa y optimizada, los niveles de contaminantes presentes en el aire dentro de una zona específica, con el objetivo de disponer de información veraz y oportuna que respalde el proceso de toma de decisiones, permitiendo así guiar la elaboración de acciones preventivas, correctivas o de perfeccionamiento continuo.

3) Métodos de monitoreo de calidad de aire según su tecnología

Según las Directrices sobre Calidad del Aire emitidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), los costos y niveles de eficiencia asociados pueden agruparse en cuatro categorías generales: métodos manuales pasivos, métodos manuales activos, equipos automáticos y tecnologías de sensores a distancia.

4) Procesamiento de reporte de la información del monitoreo

El tratamiento de la información consiste en recopilar los datos obtenidos en campo y efectuar los cálculos requeridos hasta obtener la información o conjunto de valores que servirán para evaluar el estado de la calidad del aire, mediante operaciones realizadas en gabinete o a través de herramientas y algoritmos automatizados.

5) Aseguramiento y control de la calidad del monitoreo

De acuerdo con lo establecido en la norma ISO 9000, la garantía de calidad se refiere al conjunto de actividades planificadas y sistemáticas orientadas a brindar la seguridad de que el monitoreo cumplirá con los estándares de calidad establecidos. Por su parte, el control de calidad comprende las acciones operativas destinadas a verificar el cumplimiento de los requisitos relacionados con la calidad del monitoreo. En este contexto, el aseguramiento implica las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento, mientras que el control abarca todas aquellas acciones que permiten comprobar que dicho cumplimiento se ha llevado a cabo correctamente.

Norma Legal de los LMP de las Actividades Ladrilleras

Valores Máximos Permitidos (VMP) para emisiones al aire derivadas de las actividades de producción de ladrillos, cuyo propósito es regular las emisiones de partículas en suspensión (PM), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO), así como definir los criterios para el monitoreo de los procesos involucrados en dicha fabricación. Esto contribuye a la supervisión y disminución de las emisiones atmosféricas, así como a la mitigación de los posibles efectos adversos en la salud pública y el entorno ambiental. (Decreto Supremo N.º 111-2021-MINAM).

3.3. Definición de términos

Avance ambiental

El avance ambiental se define como el progreso en la implementación de estrategias, políticas, tecnologías y prácticas dirigidas a la conservación, protección y recuperación del entorno natural, garantizando un desarrollo sostenible que equilibre las necesidades actuales con la protección de recursos para las futuras generaciones (Rodríguez, 2019).

El avance ambiental también depende de innovaciones tecnológicas en energías limpias, economía circular, y procesos industriales sostenibles, destacando la importancia de políticas públicas que impulsen inversiones en estos sectores (Rodríguez, 2019).

Ladrilleras.

Las ladrilleras son instalaciones dedicadas al proceso de moldeo y cocción del barro para la producción de ladrillos empleados en la construcción. Las emisiones contaminantes generadas en estas actividades están influenciadas por factores como la temperatura, el tiempo de cocción, el tipo de combustible y la tecnología del horno utilizado. En los países con menor desarrollo, esta industria suele emplear tecnologías poco eficientes, las cuales producen emisiones visibles, como humos negros, y dependen de combustibles de baja calidad. Entre los materiales comúnmente utilizados se encuentran neumáticos, aserrín, cenizas, aceite usado, plásticos, y residuos como basura electrónica (Gonzales & Cordova, 2019).

CO

El monóxido de carbono (CO) es un gas venenoso, sin color, olor ni sabor, que se origina como resultado de la combustión incompleta de sustancias que contienen carbono. Este gas es altamente inflamable y, al no provocar irritación, su presencia puede no ser detectada fácilmente. Al ser menos denso que el aire, tiende a concentrarse en las partes altas del ambiente (lo que explica la recomendación de desplazarse agachado durante incendios). El CO representa un grave riesgo para la salud, ya que interfiere con la función de la hemoglobina al impedir el adecuado transporte de oxígeno en la sangre, lo que puede provocar hipoxia en los tejidos, así como daños neurológicos y cardiovasculares (Zamora & Moreira, 2023).

Su composición química es CO, resultado de la combinación de un átomo de carbono con uno de oxígeno a través de un enlace covalente. Este gas presenta una afinidad

significativamente mayor que el oxígeno por la hemoglobina presente en la sangre, dando lugar a la formación de un compuesto llamado carboxihemoglobina, el cual bloquea el transporte de oxígeno hacia las células. Como consecuencia, el organismo se ve impedido de obtener la energía necesaria para su funcionamiento y supervivencia. (Zamora & Moreira, 2023).

Combustibles fósiles.

Los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, son recursos fundamentales en la vida cotidiana debido a su capacidad para satisfacer la mayor parte de las necesidades energéticas actuales, reciben el nombre de "fósiles" porque se originaron a partir de organismos que vivieron y murieron hace cientos de millones de años, cuyos restos quedaron sepultados bajo múltiples capas de tierra y sedimento (Rice, 2018).

El petróleo proviene principalmente de organismos microscópicos que habitaron los océanos en épocas remotas, en contraste, el carbón se formó a partir de restos de plantas y animales terrestres, mientras que el gas natural puede originarse tanto en ambientes marinos como terrestres, aunque difieren en su origen, todos comparten un proceso de formación que los clasifica como recursos no renovables, esto significa que su regeneración es extremadamente lenta, ya que requiere millones de años para reproducirse de manera natural; estos combustibles fósiles son esenciales para el suministro energético mundial, pero su carácter no renovable subraya la necesidad de gestionarlos con cuidado, dado que su reposición no ocurre en un tiempo compatible con las demandas humanas actuales (Rice, 2018).

Contaminación Atmosférica.

Es el resultado de una interacción compleja entre diversos contaminantes, originados tanto por fuentes antrópicas como naturales. Entre las fuentes antrópicas se destacan el tráfico vehicular, los medios de transporte aéreo y marítimo, la generación de energía, las

actividades industriales, la incineración de residuos, los sistemas de calefacción doméstica y las prácticas agrícolas. Por su parte, las fuentes naturales también contribuyen a la presencia de contaminantes en el aire, se estima que el 23% de las muertes a nivel global están relacionadas con factores ambientales, entre ellos la contaminación del aire (Semjen, 2020).

Un contaminante atmosférico es cualquier sustancia química que, al liberarse a la atmósfera, modifica la composición natural del aire y puede tener consecuencias perjudiciales para los seres humanos, la flora, los animales o los materiales. La composición del aire puro sigue sin identificarse. Los seres humanos han habitado el planeta durante milenios, y sus diversas actividades han alterado la composición de la atmósfera antes de la aparición de las técnicas de medición de sus elementos constituyentes. (Inche, 2004).

Dióxido de Azufre

Puede presentarse como un sólido sin color, un líquido de tonalidad amarilla o un gas de color rojo parduzco. Al entrar en contacto con el agua, se descompone generando ácidos nítrico y nitroso, además de óxido nítrico (NO); también reacciona con sustancias alcalinas para formar nitratos y nitritos. El dióxido de nitrógeno (NO₂) está presente en el entorno tanto por procesos naturales como por actividades humanas. Aunque su producción como sustancia final es limitada, su uso como compuesto intermedio, especialmente en la fabricación de ácido nítrico y fertilizantes, es considerablemente alto. (Instituto Geoambiental, 2018).

Dióxido de Nitrógeno

Se presenta como un sólido incoloro, un líquido de tono amarillento o un gas de aspecto rojizo. Al disolverse en agua, se descompone generando ácidos nítrico y nitroso, así como óxido nítrico (NO); además, al reaccionar con compuestos alcalinos, produce nitratos y nitritos. El dióxido de nitrógeno es liberado principalmente por vehículos motorizados

como resultado de la combustión en sus motores. Tal como se indicó anteriormente, durante la temporada de verano, la capa de mezcla atmosférica se reduce, lo que favorece una mayor concentración de contaminantes cerca de la superficie terrestre (Ministerio del ambiente [MINAM], 2014).

Efecto ambiental grave

El efecto ambiental grave se define como un daño significativo, muchas veces irreversible, causado por actividades humanas o eventos accidentales, que alteran considerablemente el equilibrio natural y afectan negativamente a la biodiversidad, los ecosistemas y la salud pública (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2016)

Así como también se refiere a alteraciones significativas en el medio ambiente, generalmente causadas por actividades humanas, que resultan en daños considerables a los ecosistemas, la biodiversidad y la salud humana (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2016).

Entorno físico

El ambiente físico constituye el componente del entorno humano que abarca los elementos materiales o concretos que lo rodean. Un espacio físico educativo de calidad es aquel que respalda los programas de enseñanza y aprendizaje, así como metodologías pedagógicas variadas e inclusivas, incorporando las tecnologías actuales. También es aquel que demuestra eficiencia constructiva, funcionalidad y sostenibilidad a lo largo del tiempo; que se integra de manera respetuosa y coherente con el medio ambiente; y que fomenta la participación social, brindando un entorno saludable, acogedor, seguro, libre de peligros y estimulante para quienes lo utilizan (Pantoza & Pardo, 2022).

Hace alusión al medio geográfico o al paisaje como entidad; es decir, se considera un objeto con existencia propia que posee su propia finalidad. El entorno, por tanto, tiene dos significados: por un lado, representa un sistema integral, y por otro, el espacio en el que se llevan a cabo las actividades de las comunidades humanas. Asimismo, se vincula con el

contexto escolar, ya que actúa como un elemento que despierta el interés y la motivación de los estudiantes, al constituir una realidad tangible de la cual ellos forman parte. (Pantoza & Pardo, 2022).

Gestión ambiental.

Se refiere a los sistemas administrativos, políticos, sociales y económicos diseñados para resolver problemas medioambientales. En torno a esta noción han surgido varios paradigmas que examinan los enfoques estatales al respecto (Melo-Brito & Rey-Galindo, 2022).

Es un campo que examina la conservación de los recursos naturales y promueve el desarrollo ambientalmente sostenible. Esta técnica organiza actividades que afectan al medio ambiente para lograr una calidad de vida satisfactoria, al tiempo que previene o mitiga los problemas ambientales. El objetivo principal de la gestión ambiental es mitigar y evitar las consecuencias ambientales (Vidal & Asuaga, 2021).

Material particulado

El material particulado (también conocido como contaminación por partículas) se refiere a una combinación de fragmentos sólidos y microgotas líquidas presentes en la atmósfera. Algunas de estas partículas, como el polvo, la tierra, el hollín o el humo, son lo suficientemente grandes y densas como para ser visibles sin ayuda. Otras, en cambio, son tan diminutas que solo pueden observarse mediante un microscopio electrónico. (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022).

La contaminación por material particulado representa uno de los problemas ambientales más críticos en zonas urbanas e industriales. Particularmente, las partículas finas (PM2.5) son preocupantes debido a su capacidad para ingresar a las zonas profundas de los pulmones y provocar impactos negativos en la salud de las personas y en el entorno natural. (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022).

Ozono

El ozono es un gas presente de manera natural en la atmósfera, cuya molécula está formada por tres átomos de oxígeno, a diferencia del oxígeno molecular habitual que contiene solo dos, y se simboliza como O₃. Se trata de un gas poco estable y muy propenso a descomponerse al entrar en contacto con compuestos naturales que poseen átomos de nitrógeno, cloro y/o bromo en su composición. El ozono actúa como un agente contaminante que genera diversos inconvenientes, al formar parte del smog fotoquímico y de la precipitación ácida. Sin embargo, en la estratósfera, a altitudes comprendidas entre los 15 y 50 kilómetros sobre la superficie terrestre, este gas de tonalidad azulada y olor penetrante resulta tan esencial para la vida como el propio oxígeno (Federación Bioquímica, 2012).

El ozono es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno. Es una sustancia relativamente inestable y se localiza en dos capas de la atmósfera: la estratósfera, que se extiende entre los 10 y 50 kilómetros de altitud, y la troposfera, que abarca desde el nivel del suelo hasta los 10 kilómetros de altura. Aunque representa solo una fracción mínima del aire atmosférico, el ozono presente en la estratósfera desempeña un papel fundamental para la existencia de vida en el planeta (Federación Bioquímica, 2012).

Partículas

Las partículas son los constituyentes básicos de la materia y las fuerzas en el universo. No todas las partículas tienen la misma función: algunas constituyen la materia (fermiones), mientras que otras median las interacciones fundamentales (bosones). Estas partículas obedecen las leyes de la mecánica cuántica y presentan comportamientos que desafían la intuición clásica. Una partícula es una manifestación discreta de un campo cuántico, cuya existencia y movimiento deben interpretarse dentro del marco probabilístico de la mecánica cuántica. (Feynman, 2015).

Plomo

Elemento químico representado por el símbolo Pb (proveniente del latín *plumbum*) y con número atómico 82 en la Tabla Periódica. Se trata de un metal con propiedades singulares, debido a su alta maleabilidad y notable reactividad química, lo que lo hace ampliamente utilizado en diversas industrias. El plomo es un metal dúctil que se funde con facilidad (su punto de fusión es de 327,4 °C y su punto de ebullición de 1725 °C), y presenta comúnmente valencias de 2 y 4. Posee cierta resistencia frente al ácido sulfúrico y al ácido clorhídrico, y tiene la capacidad de bloquear el paso de partículas subatómicas emitidas por materiales radiactivos, motivo por el cual se emplea tanto para su almacenamiento como para el recubrimiento protector en industrias que manipulan sustancias radiactivas. (Ondarse, 2024).

El plomo es un metal de tonalidad gris azulada, con brillo en las superficies recién expuestas, extremadamente blando al grado de poder ser marcado con la uña, altamente maleable y con la menor tenacidad entre los metales. Presenta una elevada densidad, un bajo punto de fusión, cristaliza en forma de octaedros y deja una marca gris al frotarse sobre papel. (Ondarse, 2024).

PM10

Las PM10 se definen como partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, que pueden estar compuestas por polvo, ceniza, hollín, fragmentos metálicos, cemento o polen, con un diámetro que oscila entre 2,5 y 10 micrómetros (un micrómetro equivale a una milésima de milímetro). Estas partículas están constituidas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, así como por metales pesados y material orgánico adherido a partículas carbonosas (como el hollín). Se distinguen por presentar un pH alcalino, resultado de la combustión inadecuada de diversos materiales (Querol & Alastuey, 2004).

Las PM10 pueden originarse tanto de fuentes naturales como antrópicas. Entre las fuentes naturales se incluyen la erosión del suelo, incendios forestales, erupciones volcánicas y aerosoles marinos, mientras que las fuentes antropogénicas incluyen la combustión de combustibles fósiles, la industria, el tráfico vehicular y la construcción (Querol & Alastuey, 2004).

PM10 se refiere a material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (μm). Estas partículas son lo suficientemente pequeñas para ser inhaladas y pueden afectar la salud respiratoria y cardiovascular. Asimismo, El PM10 se refiere a partículas atmosféricas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (μm). Estas partículas son lo suficientemente pequeñas para ser inhaladas y pueden penetrar en el sistema respiratorio humano, llegando hasta los bronquios y bronquiolos (Querol & Alastuey, 2004).

PM 2,5

Las Partículas en Suspensión Menores a 2,5 Micras (PM2,5) son una fracción más fina del material particulado presente en la atmósfera. Estas partículas tienen un diámetro aerodinámico igual o inferior a 2,5 micras (μm) y se consideran especialmente peligrosas para la salud humana debido a su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio, alcanzando los alvéolos pulmonares e incluso ingresando al torrente sanguíneo (Linares & Díaz, 2008).

Las PM 2,5 son de proveniencia principal de procesos de combustión de fuentes naturales como incendios forestales y erupciones volcánicas, así como de erupciones volcánicas asimismo como de antropogénicas entre las cuales se encuentran el tráfico vehicular, la quema de biomas y la producción de energía en base a combustible fósil. Por lo tanto, su composición química varía según la fuente de emisión e incluyen sulfato, nitrato, carbono orgánico e inorgánico entre otras sustancias tóxicas (Linares & Díaz, 2008)

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

La investigación fue aplicada porque se centró en generar aportes teóricos y descubrimientos para generar beneficios y bienestar entre la actividad ladrillera y la calidad del aire. Según con Ñaupas (2018) La investigación aplicada está estrechamente relacionada con la investigación fundamental, ya que se apoya en sus hallazgos y fundamentos teóricos para generar beneficios y mejoras para la sociedad. Su propósito específico es utilizar las teorías existentes en la elaboración de normas o en el desarrollo de procesos tecnológicos.

Nivel de investigación

El nivel de este estudio fue descriptivo correlacional, ya que se describió el tipo y el nivel de contaminación existente en la zona de las ladrilleras en el distrito de San Jerónimo, y se verificó si existía relación entre dichas variables, esto se sustenta bajo Hernández-Sampieri y Mendoza (2023) que indica que los estudios de nivel descriptivo se encargan de describir las características de las variables. Así mismo, Hernández-Sampieri y Mendoza (2023), menciona que una investigación correlacional es aquella que tiene como propósito medir el grado de relación que existe entre dos o más variables sin manipularlas.

Diseño de investigación

El diseño de la investigación fue no experimental, dado que solo se determinaron los gases presentes, mas no se intervino en estos, así como indica Hernández-Sampieri y

Mendoza (2018), dichas investigaciones de diseño no experimentales no manipulan deliberadamente las variables, es decir, no generan cambios en ellas.

4.2. Ámbito temporal y espacial

Temporal

El estudio se llevó a cabo durante un período de cuatro meses, abarcando dos temporadas climáticas diferenciadas. La primera fase se desarrolló durante la época de estiaje, en los meses de mayo y junio del 2023, mientras que la segunda fase se realizó en la temporada de lluvias, específicamente entre enero y febrero del 2024. Durante este período, se llevaron a cabo los monitoreos siguiendo los lineamientos establecidos en el Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM, garantizando así el cumplimiento de los estándares técnicos y normativos aplicables.

Espacial

Este estudio se realiza en la Ciudad de Cusco, en el distrito de San Jerónimo, específicamente en las áreas comprometidas por la actividad ladrillera (comunidad campesina de Sucso Aucaylle, Las APV que están ubicadas en esta zona de investigación).

4.3. Población y muestra

El presente estudio se enfoca en el análisis de la calidad del entorno en zonas de impacto tanto directo como indirecto, tomando en cuenta los lineamientos definidos en el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad del Aire.

Población

La población está constituida por la zona de la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, en el distrito de San Jerónimo. Las APV que se encuentran dentro del área de estudio. La población o universo hace alusión al total de personas que poseen determinadas características comunes y que son consideradas para ser analizadas en una investigación (Vizcaino et al ., 2023).

Muestra

La muestra tomó en cuenta tres puntos seleccionados tras la observación inicial durante el trabajo de campo, la muestra se define como un subconjunto representativo de la población o universo que se selecciona para participar en un estudio de investigación (Vizcaino et al ., 2023). Y a través de la rosa de viento mencionada como figura 6 y al Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad del Aire; estos puntos corresponden a las coordenadas de ubicación de monitoreo, las cuales se detallan a continuación:

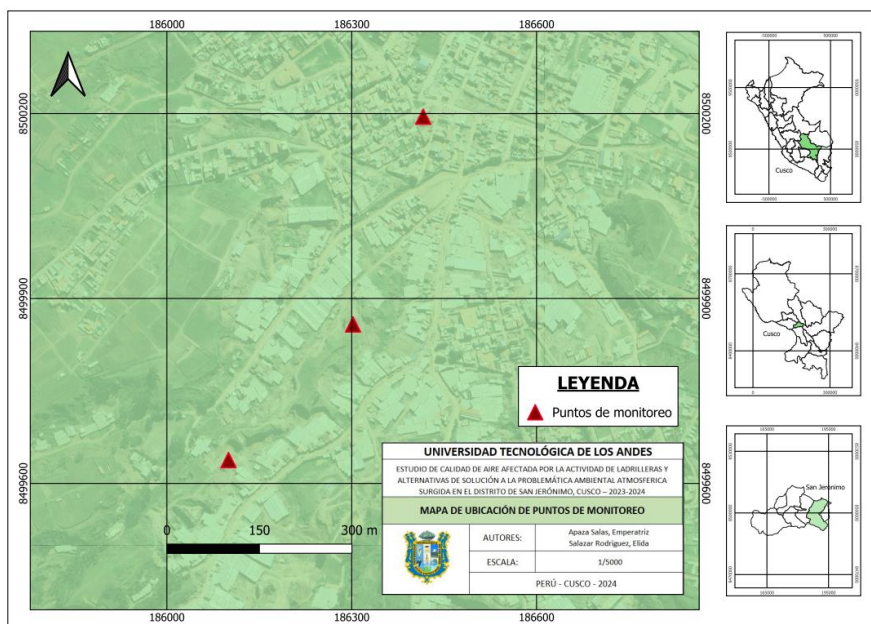
Tabla 3

Coordenadas de ubicación de monitoreos.

Punto	Coordenadas		Zona
	X (Este)	Y (Norte)	
01	186302.00	8499858.00	19 L
02	186100.00	8499638.00	
03	186416.00	8500195.00	

Figura 1

Ubicación de los puntos de monitoreo



El área de influencia se analizó considerando las condiciones meteorológicas, como la dirección y velocidad del viento, evaluadas a través de la rosa de viento figura 6 y 7.

La figura 1 muestra la distribución de los puntos de monitoreo en relación con las coordenadas del área de estudio, lo que respalda la estrategia de muestreo y garantiza que los datos derivados sean representativos de las circunstancias ambientales en la zona de estudio.

4.4. Instrumentos

Técnicas de Recolección de datos

El procedimiento central de obtención de información correspondió al enfoque cuantitativo, compuesta por el monitoreo, ya que permitió obtener datos de los gases contaminantes, este procedimiento, así como la determinación de los puntos de muestreo se establecieron siguiendo las bases señaladas por el Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de Aire.

Así mismo, la información recopilada se complementó con información procedente de la estación meteorológica Granja Kayra, la cual se encuentra en el distrito de San Jerónimo.

Tabla 4

Datos de la estación meteorológica Granja Kayra.

Estación GRANJA KAYRA					
Departamento	CUSCO	Provincia	CUSCO	Distrito	SAN JERONIMO
Latitud	13°33'24.29"	Longitud	71°52'30.61"	Altitud	3214 msnm.
Tipo	MAP	-	Código	100044	
	Meteorológica				

De la información recopilada, se realizó un análisis tomando en cuenta la dirección del viento, y su efecto en el punto de monitoreo muestreado. Cabe resaltar que, las fechas de salida para la medición de la calidad del aire fueron en la época de estiaje los meses de mayo - junio y en la época de lluvia los meses de enero- febrero y que la rosa de viento se realizó

con datos de 5 años. Por último, se realizó un análisis de los resultados de los monitoreos en comparación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA – Aire) y las Directrices de la OMS para aire.

Instrumentos de recolección de datos

Para el monitoreo, se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Aeroqual (monitor portátil de calidad de aire) series 500

Cabe señalar que, sus especificaciones se encuentran en anexos de este estudio.

Para establecer la dirección del viento, se hará uso del software: WRPlot

WRPlot es un software utilizado para la creación y análisis de rosas de viento, representaciones gráficas que muestran la dirección y velocidad predominante del viento en un área específica, este programa permite procesar datos meteorológicos de estaciones locales o globales para generar diagramas visuales que ayudan a comprender los patrones de dispersión atmosférica, facilita la interpretación de las dinámicas del viento y su influencia en la distribución de contaminantes en el entorno.

Para cumplir con el protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, se dé anexos.

4.5. Procedimientos

Según el Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad del Aire y las normativas establecidas por el Ministerio del Ambiente (MINAM), se inició delimitando el Área de Influencia Directa (AID) (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019). Esta área incluyó todas las ladrilleras dentro del perímetro identificado, considerando tanto las fuentes de emisión de contaminantes como su proximidad a la comunidad campesina de Sucso Aucaylle. La delimitación permitió establecer los límites geográficos precisos para evaluar el monitoreo de calidad del aire y medir las emisiones de contaminantes atmosféricos, con énfasis en los puntos de mayor impacto ambiental y sanitario.

Posteriormente, se seleccionó la localización de las estaciones de control, de forma que se pudiese medir los resultados y determinar la incidencia de dirección y velocidad del viento en la concentración de los contaminantes atmosféricos. Se tuvo en cuenta las zonas con mayor densidad de ladrilleras y aquellas áreas donde las emisiones podrían tener mayor impacto en la salud pública y el medio ambiente.

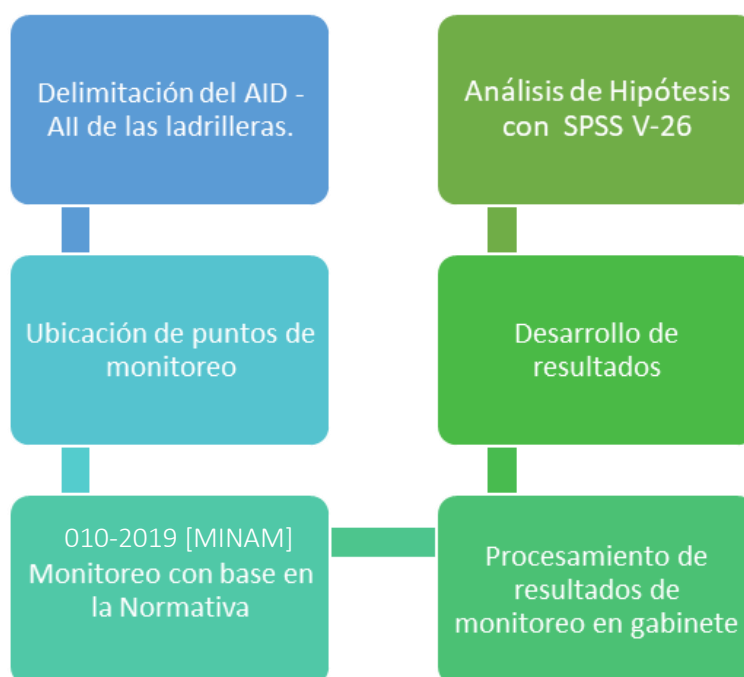
Posteriormente, se realizó el monitoreo de las emisiones de gases y partículas en los puntos previamente ubicados. El monitoreo se llevó a cabo conforme a las normativas nacionales e internacionales en materia de calidad del aire, para ello, se utilizó la ficha base de estación de monitoreo de la calidad de aire establecida por el Ministerio del Ambiente para la determinación de la Calidad del Aire, encontrándose en el apartado de anexos. Este proceso implicó la medición de contaminantes específicos, como el material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO).

Posterior a la finalización de los monitoreos, se trasladó la información a un procesamiento previo al análisis, donde se verificó los datos, y se los compiló en Microsoft Excel para realizar el procesamiento descriptivo de los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos se analizaron con el software SPSS versión 26 para realizar el análisis estadístico. Para el análisis de la información, se tendrá presente el DS 003-2017-MINAM, que contiene los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el aire determinan los valores máximos permisibles de concentración de elementos, compuestos, y parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en la atmósfera, sin que estos impliquen un peligro considerable para la salud humana ni para el entorno natural.

Figura 2

Diagrama de flujo del procedimiento para la recolección y análisis de información



En la figura N°2 se muestra el proceso metodológico de monitoreo de calidad del aire, el bloque “Monitoreo con base en la Normativa” hace referencia al uso de normativa oficial para la medición de contaminantes atmosféricos.

El monitoreo se realizó con base en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire, aprobados mediante el:

- **Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM**, que establece los niveles máximos permisibles de contaminantes como PM10, PM2.5, NO₂, SO₂ y CO en el aire ambiente.

Para la planificación y ejecución del monitoreo, también se emplea:

- Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire, aprobado por Decreto Supremo N.º 015-2022-MINAM, que estandariza los criterios técnicos para la ubicación de puntos, frecuencia y métodos de medición.

4.6. Análisis de datos

Este análisis tuvo como finalidad evaluar de manera exhaustiva la calidad del aire en la zona afectada por la actividad ladrillera en el distrito de San Jerónimo, Cusco. A través del análisis estadístico, donde se empleó la prueba estadística T de Student, se estimó la existencia de diferencias significativas mediante la comparación de la media de los resultados de los monitoreos realizados.

Se buscó determinar la densidad de los principales agentes tóxicos como PM10, PM2.5, NO2, CO y SO2, producidos por la actividad ladrillera, representan un peligro considerable para la salud pública, así mismo, se buscó determinar la incidencia de los factores meteorológicos en los resultados obtenidos, por medio del análisis de la información meteorológica procedente de la estación “Granja Kayra”. Durante el procesamiento estadístico, se evaluó la distribución normal y la existencia de diferencias significativas en los datos recopilados, utilizando el programa estadístico SPSS. Se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, dado que el número de casos (n) era inferior a 50.

4.7. Consideraciones éticas

Para la realización de esta investigación, la recolección de información se llevó a cabo de manera presencial en las ladrilleras, de acuerdo a un análisis previo para garantizar la integridad y representatividad de los datos. Asimismo, el presente trabajo de investigación se realizó citando adecuadamente todas las fuentes utilizadas, garantizando la transparencia y la honestidad académica.

Durante la fase de procesamiento de datos, se aseguró la veracidad de la información obtenida, no alternado o modificando los datos, y realizando el análisis de manera objetiva, manteniendo altos estándares de rigor científico. Por último, este estudio se fundamenta en los principios de la investigación ética y la preservación del medio ambiente, con el propósito de generar conocimientos sobre la relación entre la actividad ladrillera y la calidad del aire

en el sector de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo. Su objetivo es contribuir a la identificación de alternativas que mitiguen el impacto ambiental de esta actividad y promuevan medidas para mejorar la calidad del aire en la zona afectada.

V. Resultados y discusión

Determinación del área de influencia Directa e Indirecta

Para desarrollar el primer objetivo de esta investigación, se determinó el área de influencia directa e indirecta. Para ello se usó el software Qgis, en el cual se introdujo las ladrilleras inventariadas en la zona de estudio. Cada ladrillera es una fuente potencial de emisiones contaminantes al ambiente, especialmente de partículas y gases tanto como el dióxido de azufre y el monóxido de carbono.

Tabla 5

Puntos principales de las ladrilleras en la zona de estudio.

Punto	X (Este)	Y (Norte)
M -01	186302.00	8499858.00
M - 02	186100.00	8499638.00
M - 03	186416.00	8500195.00

Fuente. Datos obtenidos con el uso de software Qgis referente a las ladrilleras

principales en la zona de estudio.

Área de Influencia Directa – AID

En la delimitación del Área de Influencia Directa (AID) e Indirecta (AII), se consideraron criterios técnicos establecidos en normativas ambientales, como el Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad Ambiental del Aire y la Guía para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental del Ministerio del Ambiente (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019).

Los criterios tomados para el desarrollo del mapa del área de influencia directa e indirecta fueron los siguientes:

- Fuentes de emisión.
- Dispersión de contaminantes.
- Condiciones meteorológicas locales.
- Distancia de las fuentes emisoras.
- Zonas receptoras sensibles.

- Topografía y uso del suelo
- Normativa ambiental.

Representa la zona donde los efectos de las emisiones de las ladrilleras se perciben con mayor intensidad. Esto se determina en función de elementos como la concentración de emisiones, la dispersión de contaminantes y la proximidad a las fuentes. Para delimitar esta área, se utilizaron criterios, como la ubicación de los puntos de emisión, en las cuales se realizó un buffer de 50 m puesto que esta distancia es considerada representativa para el alcance inmediato de los contaminantes emitidos por las fuentes, que representaban el alcance de los contaminantes a las residencias cercanas, y a las que las condiciones meteorológicas locales (como la dirección y velocidad del viento) estaban ligadas. En el mapa, el área de influencia directa está resaltada alrededor de las ladrilleras y representa el espacio donde la calidad del aire puede estar más afectada y los niveles de contaminación son mayores.

Área de Influencia Indirecta (AII)

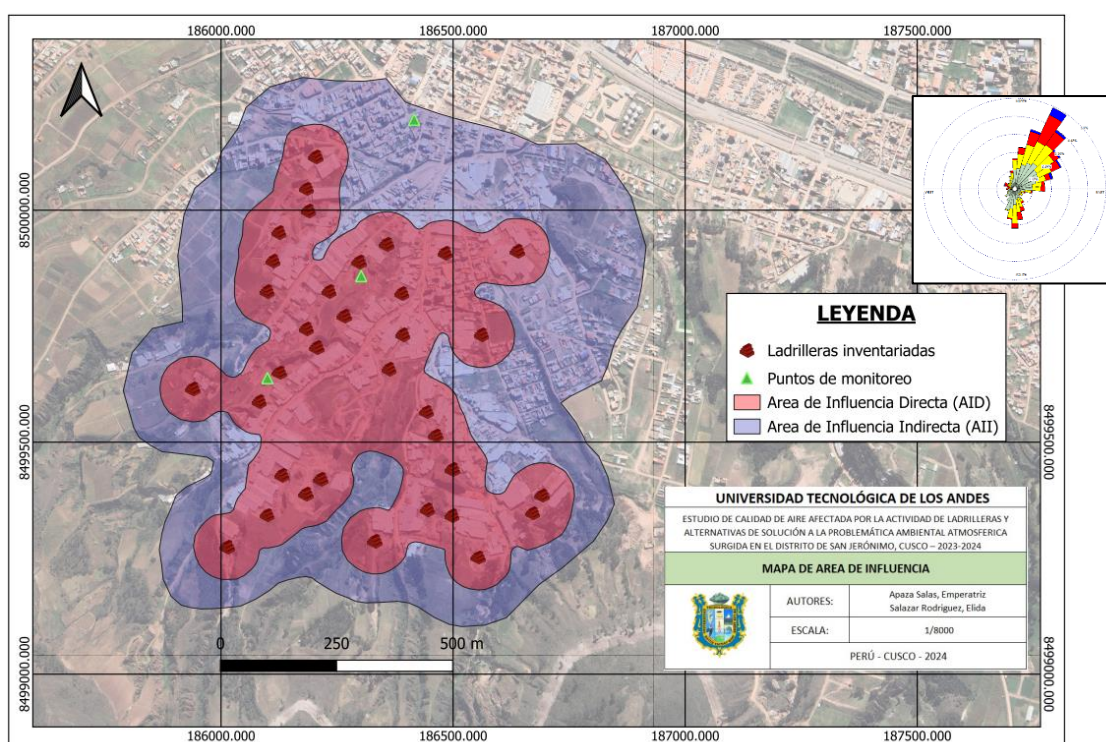
El área de influencia indirecta es la zona donde las emisiones tienen un impacto, aunque de menor intensidad. Esto generalmente incluye una franja que rodea el área de influencia directa y considera que, aunque los contaminantes aún son detectables, sus efectos son menos severos y están más dispersos. Esta área se define al ampliar el radio de dispersión, considerando la posibilidad de que los contaminantes se transporten a través del viento, la distribución de los predios y la topografía, por lo que se utilizó el modelo de rosa de viento para determinar cuál sería el área indirectamente afectada.

La AII abarcó un rango mayor, extendiéndose hasta 5 km, donde la dispersión de contaminantes es más diluida, pero aún significativa (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019).

El área de influencia fue calculada integrando los criterios previamente mencionados en un sistema de información geográfica (SIG), lo que permitió generar un mapa preciso del AID y AII. Este mapa incluye las fuentes de emisión principales, las zonas de mayor impacto directo y las áreas periféricas afectadas de manera indirecta (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019).

Figura 3

Área de influencia directa e indirecta



El AID, representado en color rojo en el mapa, abarca las zonas más cercanas a las ladrilleras, donde se espera que la concentración de contaminantes sea máxima debido a su proximidad a las fuentes emisoras. Este criterio incluye áreas dentro de un radio aproximado de 250 metros desde las fuentes de emisión contaminante, es decir las productoras ladrilleras (distancia estimada con base en estudios de dispersión de contaminantes que indican que en este rango las concentraciones suelen ser más altas debido a la cercanía y al efecto limitado

de dispersión inicial), considerando las condiciones topográficas y las velocidades promedio del viento.

El AII, representado en color azul, comprende las áreas más alejadas de las fuentes emisoras pero que aún están expuestas a el esparcimiento de contaminantes debido a las condiciones meteorológicas predominantes. Este criterio incluyó un radio adicional de hasta 500 metros desde las fuentes emisoras (distancia basada en modelos de dispersión atmosférica que muestran cómo los contaminantes se diluyen significativamente a esta distancia, pero todavía pueden impactar la calidad del aire), considerando menores concentraciones de contaminantes en comparación con el AID.

Los criterios tomados para el desarrollo del mapa del área de influencia directa e indirecta fueron los siguientes:

Fuentes de emisión. Se identificaron las ladrilleras y otras actividades industriales dentro de la zona de estudio como las fundamentales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, estas fuentes fueron localizadas geográficamente y consideradas como el núcleo de la AID.

Dispersión de contaminantes. Se utilizó el análisis de la rosa de viento (figura adjunta) para determinar las direcciones predominantes del viento, lo que permitió identificar las áreas a barlovento (donde se transportan los contaminantes desde las fuentes emisoras) y a sotavento (donde los contaminantes tienden a acumularse), este análisis fue clave para delimitar las zonas más afectadas por las emisiones.

Condiciones meteorológicas locales. Se analizaron datos sobre la velocidad y dirección del viento, así como factores climáticos como temperatura, humedad y estabilidad atmosférica, los cuales influyen en la dispersión y concentración de contaminantes en el área.

Distancia de las fuentes emisoras. La AID se delimitó considerando una distancia de hasta 1 km desde las fuentes de emisión (valor basado en modelos de dispersión atmosférica

y estudios ambientales que indican que dentro de este rango los contaminantes presentan sus mayores concentraciones debido a su proximidad a la fuente y a una menor dilución inicial), donde se espera la mayor concentración de contaminantes (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019).

Zonas receptoras sensibles. Se incluyeron áreas residenciales, escuelas, centros de salud y espacios públicos cercanos, donde la exposición a los contaminantes puede representar un riesgo para la salud pública.

Topografía y uso del suelo. Se consideró la topografía del terreno, identificando barreras naturales como montañas o ríos que podrían influir en la dispersión de contaminantes. También se analizaron los tipos de uso del suelo para evaluar la interacción entre las actividades humanas y la calidad del aire.

Normativa ambiental. La delimitación se realizó de acuerdo con los lineamientos establecidos por el MINAM, asegurando que el análisis cumpla con los estándares técnicos requeridos.

Análisis de los datos meteorológicos y elaboración de rosa de viento

Para esta investigación, es importante conocer las variables meteorológicas dentro del área de influencia directa e indirecta. Para ello, se evaluó la temperatura (°C), la humedad (%), velocidad del viento (m/s) y dirección del viento, durante los meses donde se realizó el monitoreo para un adecuado contraste de resultados, en un periodo de cinco años.

Tabla 6

Datos meteorológicos Estación Kayra – 5 años (mes enero, febrero)

<i>Año</i>	<i>Nivel</i>	<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Humedad</i> (%)	<i>Velocidad del</i> <i>viento (m/s)</i>	<i>Dirección</i> <i>del viento</i>	<i>Presión</i> <i>Bar</i>
2019	Min	19.4	35	1.3	NW	795
	Media	21.7	33	1.3	NE	794.2
	Máx	23.4	33	1.3	NNW	793.9
2020	Min	18.8	44	1.3	NW	793.6
	Media	20.9	49	1.3	NNW	793.7

	Máx	22.8	62	0.4	WSW	794.3
	Min	14.6	66	0	WSW	795.2
2021	Media	15.5	69	0	SSE	795.6
	Máx	16.9	68	0.4	ESE	796
	Min	12.3	70	0.4	ESE	796.1
2022	Media	13.1	72	0.4	SE	796.2
	Máx	13.7	74	0	N	796.3
	Min	11.0	76	0.4	SE	796.4
2023	Media	11.4	75	0.4	ESE	796.4
	Máx	11.7	75	0.9	ENE	796.2
	Mínimo	9.9	33	0		793.6
	Máximo	23.4	77	1.3		797.1
	Promedio	14.5	63.2	0.6		795.6

Tabla 7

Datos meteorológicos – 5 años (mes mayo, junio).

Año	Hora	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad de viento (m/s)	Dirección de viento	Presión atmosférica (mmHg)
	Min	15.7	46	2.6	N	678.6
2019	Media	17.1	40	1.9	WSW	677.6
	Máx	18.9	33	2.8	WSW	677.3
	Min	18	32	3.2	SSW	675.6
2020	Media	18.9	32	3.7	NW	675.2
	Máx	19.4	33	5.3	NW	678.3
	Min	12.4	40	2.2	NNW	678.3
2021	Media	14.1	46	1.3	NNW	678.3
	Máx	16.2	54	0.7	NNW	678.3
	Min	9.9	62	0.9	NNW	678.3
2022	Media	18.2	32	3.2	SSW	675.6
	Máx	19.4	40	2.2	NW	675.2
	Min	15.4	32	3.2	NW	678.3
2023	Media	16.1	32	3.7	NNW	678.3
	Máx	19.1	46	1.3	NNW	678.3
	Min	9.9	33	5.3	NW	675.2

Media	14.1	40	2.2	NW	678.3
Máx	19.4	46	1.3	NNW	678.3

Figura 4

Humedad promedio de la zona de estudio (mes enero, febrero)

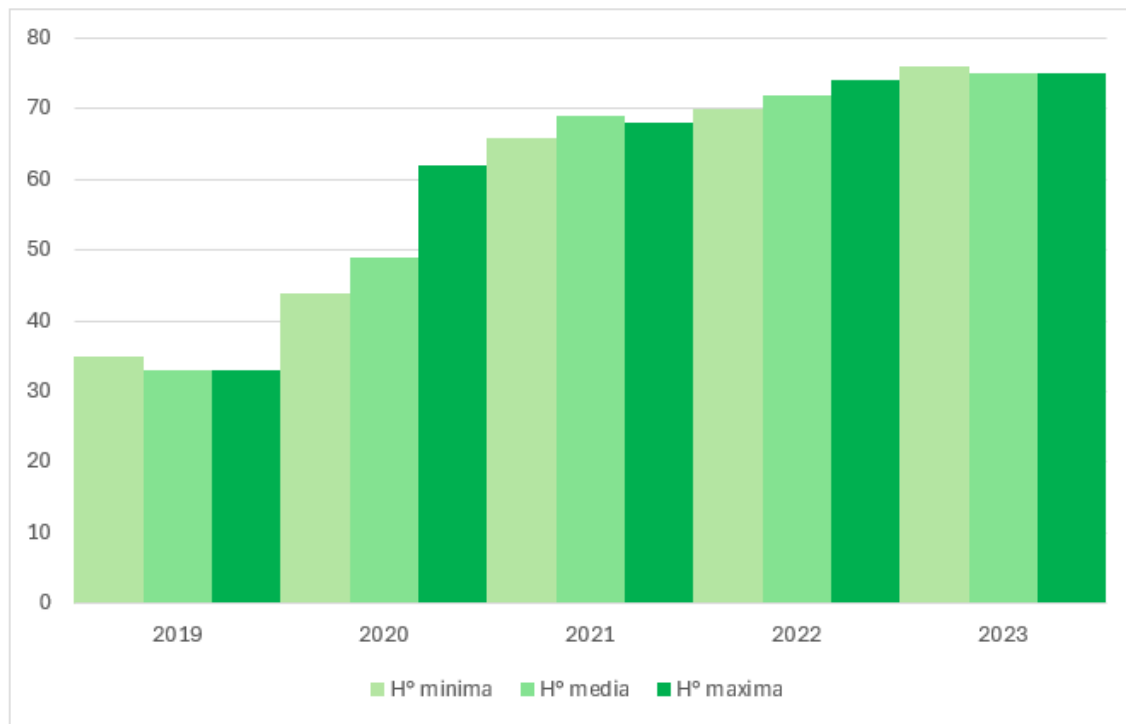
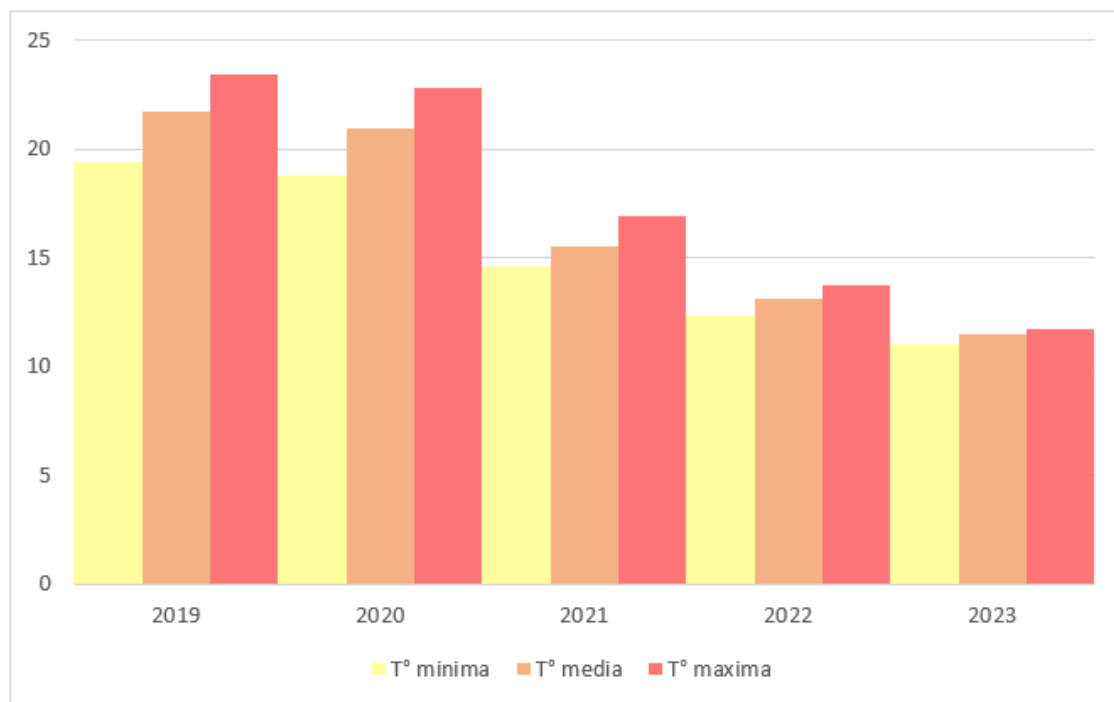


Figura 5

Temperatura promedio en la zona de estudio (mes mayo, junio)

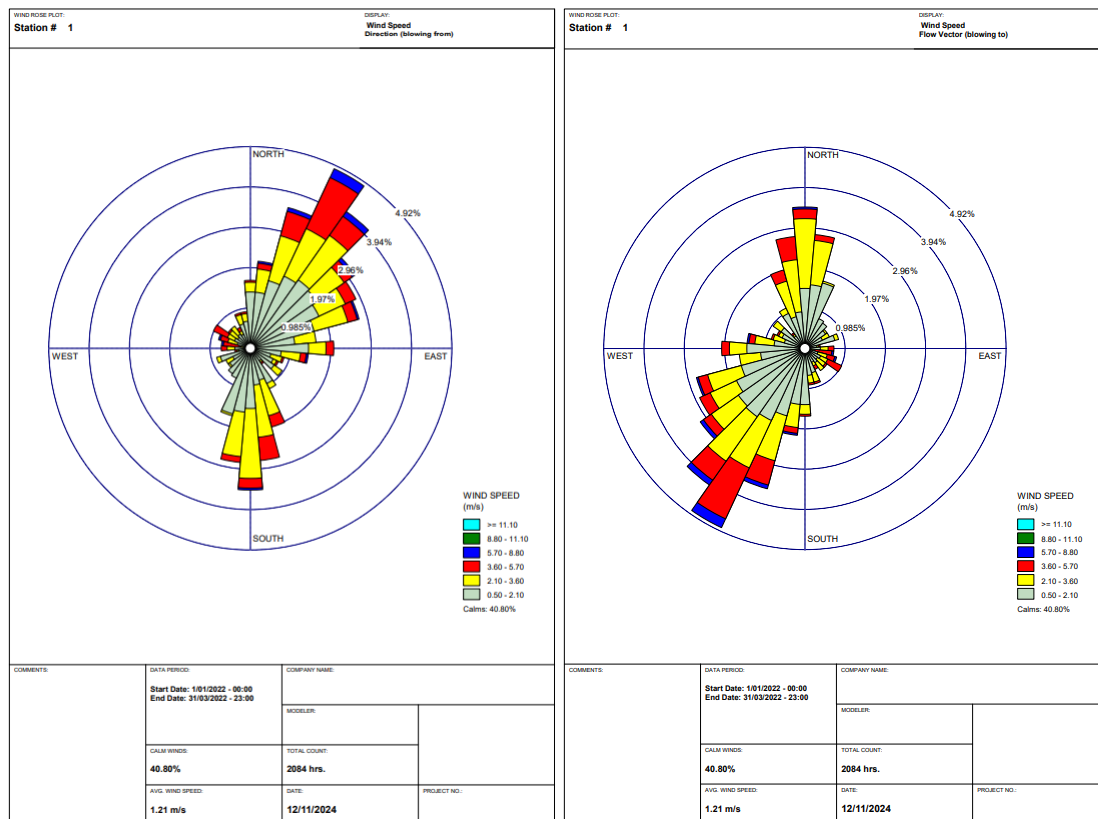


Rosa de viento

En este estudio, es imprescindible conocer la dirección del viento. Para analizar el comportamiento de las emisiones se utilizaron los datos obtenidos de la estación meteorológica de Kayra durante los meses de estiaje (mayo y junio) y lluvia (enero, febrero). Estos datos se recopilaron mediante la solicitud de información de la estación meteorológica al SENAHMI, y posteriormente fueron introducidos al software WRplot.

Figura 6

Rosa de viento – Temporada Húmeda (mes de enero-febrero)



La primera rosa de viento, que muestra la dirección desde donde sopla el viento, revela que el flujo predominante proviene del Norte-Noroeste, con una frecuencia significativa en comparación con otras direcciones; este patrón sugiere que los vientos, en la mayor parte del periodo analizado, se originan desde esa dirección, lo que es crucial para identificar las fuentes potenciales de emisión que podrían estar impactando el área de estudio. Además, las velocidades predominantes se encuentran en el rango de 2.10–3.50 m/s las cuales en el grafico están representadas de color amarillo, con una contribución notable en el rango superior de 3.50–5.70 m/s identificada de color naranja, cabe destacar que las condiciones de vientos calmos representan un 40.80% del tiempo total, indicando períodos prolongados de estabilidad atmosférica, lo cual influye directamente en la acumulación de contaminantes en el área.

Por otro lado, la segunda rosa de viento, que representa la dirección hacia donde se dirige el viento, complementa el análisis al mostrar que el flujo del viento se dispersa mayoritariamente hacia el Sur-Sureste, esto implica que las partículas y contaminantes transportados por el viento tienden a concentrarse en esa dirección, afectando principalmente las zonas ubicadas en el sector Sur-Sureste del área de estudio. Al igual que en la primera gráfica, las velocidades predominantes oscilan entre 2.10–3.50 m/s, con vientos más rápidos en menor proporción, los vientos calmos mantienen la misma incidencia, representando un 40.80% del periodo total.

En conjunto, ambas rosas de viento ofrecen un análisis detallado de la dinámica del viento en el área de estudio, la primera gráfica identifica que los vientos predominan desde el Norte-Noroeste, mientras que la segunda evidencia que estos fluyen hacia el Sur-Sureste, lo cual es fundamental para comprender la dispersión de contaminantes. Esta información es clave para delimitar el área de influencia directa e indirecta, establecer los puntos de monitoreo estratégicos (a barlovento y sotavento) y evaluar el impacto de las emisiones en la calidad del aire y en las comunidades cercanas.

Figura 7

Rosa de viento – Temporada Seca (mes mayo- junio)

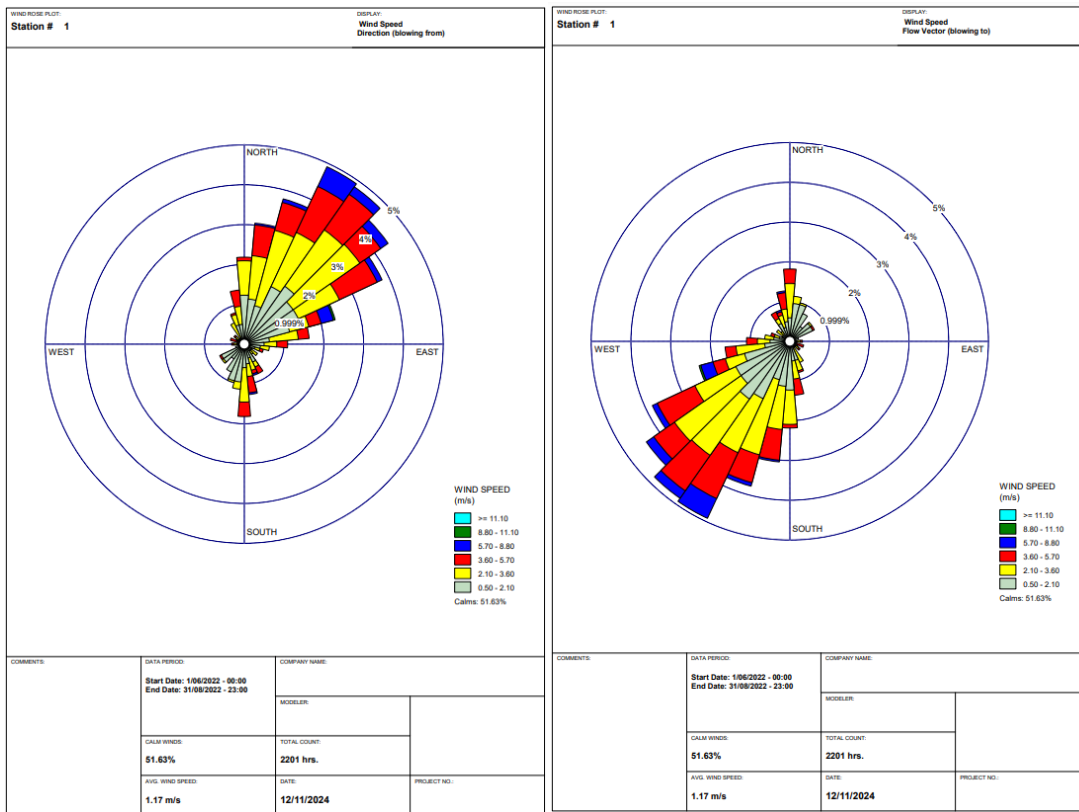
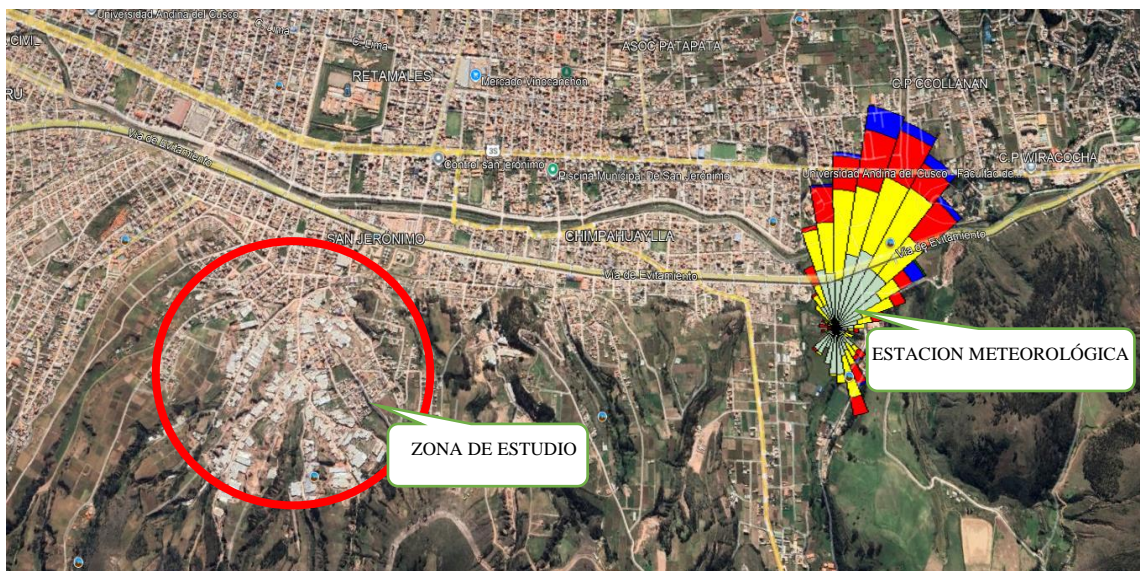


Figura 8

Roseta de viento en la zona de estudio



Fuente. Elaboración en base a la información de SENAMHI

La figura 8 presentada, es una versión simplificada de la figura 3, siendo el círculo rojo el punto del estudio y el punto en donde se encuentra al rosa de viento la estación. Diseñada para destacar de manera más directa y clara el área de estudio en San Jerónimo, aunque contiene la misma información fundamental, esta representación se enfoca en resaltar la relación entre las ladrilleras, las zonas de influencia y las condiciones meteorológicas, como la dirección predominante del viento indicada por la rosa de viento superpuesta sobre el mapa. Esto permite una visualización más accesible de las áreas afectadas por las emisiones.

Concentración de contaminantes producidos por la actividad ladrillera

Para la determinación de la concentración de contaminantes, se realizaron 02 monitoreos en 02 épocas del año (lluvias y estiaje), siendo la duración total del monitoreo 24 horas, de acuerdo con lo establecido en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, cada monitoreo tuvo una duración de 24 horas utilizando el equipo Aeroqual (monitor portátil de calidad de aire) series 500, cumpliendo con los requisitos técnicos definidos para asegurar representatividad y confiabilidad en los resultados.

El protocolo establece que, para obtener datos representativos de las condiciones ambientales, deben realizarse al menos tres monitoreos en cada temporada, permitiendo calcular una media confiable de las concentraciones de contaminantes y evaluar adecuadamente los niveles de exposición de las áreas de influencia directa e indirecta.

Los resultados obtenidos reflejan las condiciones ambientales en el área de estudio durante los períodos monitoreados, a continuación, se indica a continuación la ubicación de los puntos de monitoreo.

Tabla 8 Coordenadas de los puntos de monitoreo.

Punto	Coordenadas		Zona
	E	N	
M -01	186302.00	8499858.00	19 L
M - 02	186100.00	8499638.00	
M - 03	186416.00	8500195.00	

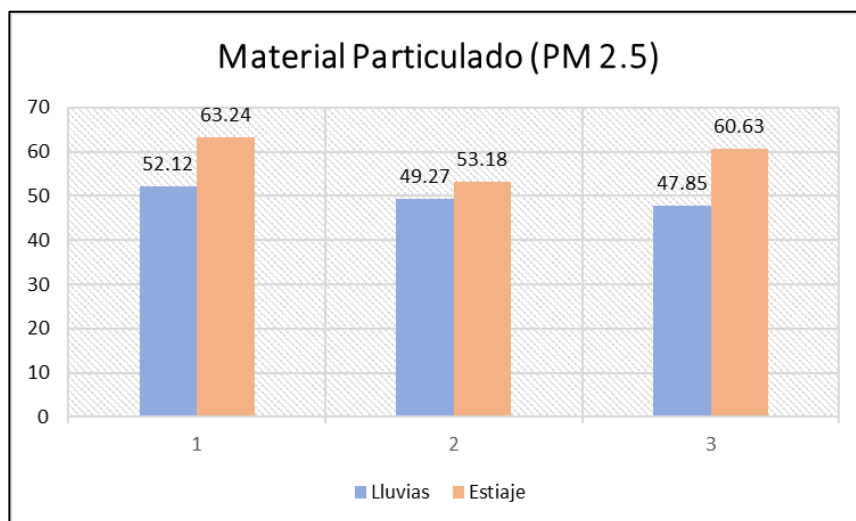
Figura 9

Ubicación de puntos de monitoreo

**Material Particulado $PM_{2.5}$** **Tabla 9**Promedios de Monitoreo para el $[[PM]]_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Punto	Época		Promedio de concentración
	Lluvias	Estiaje	
M -1	52.12	63.24	57.68
M-2	49.27	53.18	51.23
M -3	47.85	60.63	54.24

En la tabla 9 se evidencia que, el promedio de concentración mínima es 51.23 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $PM_{2.5}$. Mientras que, el promedio del nivel medio es de 54.24 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el promedio del nivel máximo de concentración de $PM_{2.5}$ es de 57.68 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 10Niveles obtenidos de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

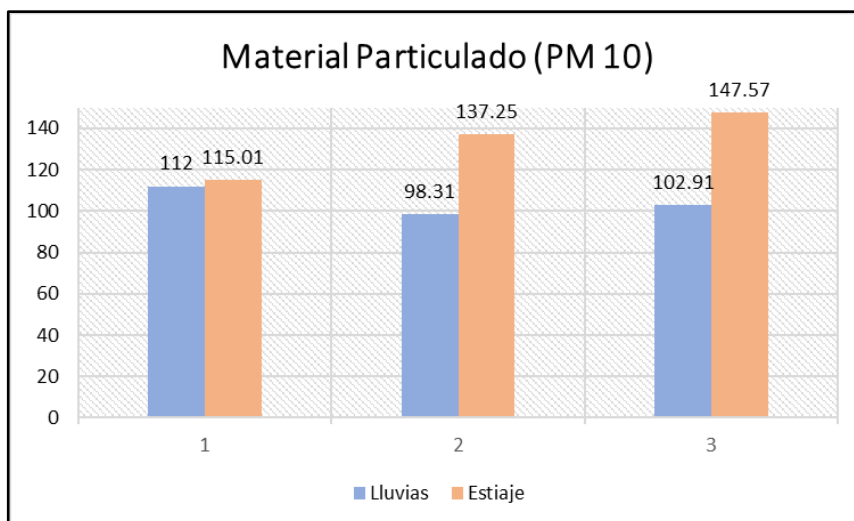
En la figura 10, en el punto que se obtuvo mayor concentración fue en el 1, donde hubo 63.24 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $PM_{2.5}$ (época de estiaje) y el punto donde hubo menor concentración fue en el 3, donde se evidenció 47.85 de $PM_{2.5}$ (época de lluvias).

Material Particulado PM_{10}

Tabla 10Promedios de Monitoreo para el PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Punto	Época		Promedio de concentración
	Lluvias	Estiaje	
M -1	112	115.01	113.50
M-2	98.31	137.25	117.78
M -3	102.91	147.57	125.24

En la tabla 10 se evidencia que, el promedio de concentración mínima de PM_{10} es 113.50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Mientras que, el promedio del nivel medio es de 117.78 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el promedio del nivel máximo de concentración de PM_{10} es de 125.24 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 11Niveles obtenidos de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

En la figura 11, en el punto que se obtuvo mayor concentración fue en el 3, donde hubo 147.57 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} (época de estiaje) y el punto donde hubo menor concentración fue en el 2, donde se evidenció 98.31 de PM_{10} (época de lluvias).

CO- Monóxido de carbono

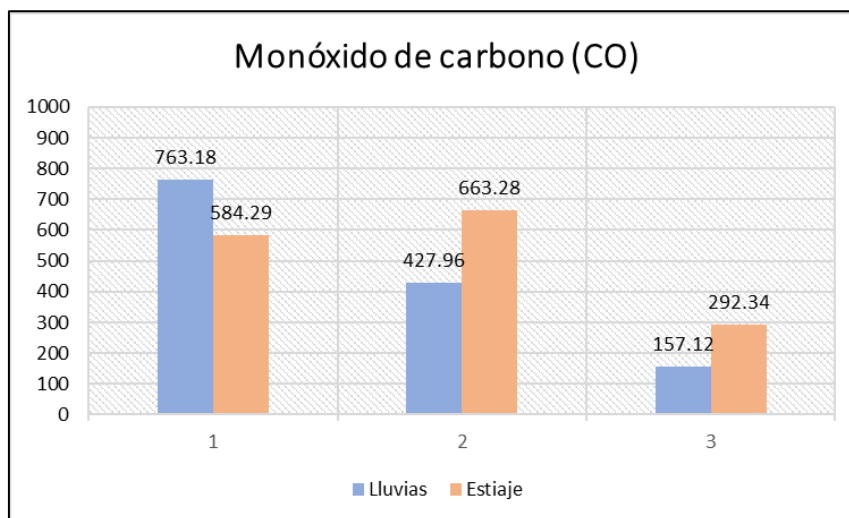
Tabla 11Promedios de Monitoreo para el CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Punto	Época		Promedio de concentración
	Lluvias	Estiaje	
M -1	763.18	584.29	673.74
M-2	427.96	663.28	545.62
M -3	157.12	292.34	224.73

En la tabla 11 se evidencia que, el promedio de concentración mínima de Monóxido de carbono es 224.73 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Mientras que, el promedio del nivel medio es de 545.62 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el promedio nivel máximo de concentración CO es de 673.74 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 12

Niveles obtenidos de CO (ug/m3)



En la imagen 12, en el punto que se obtuvo mayor concentración fue en el 1, donde hubo 763.18 (ug/m3) de Monóxido carbono (época de Lluvias) y el punto donde hubo menor concentración fue en el 3, donde se evidenció 157.12 de Co (época de lluvias).

SO₂ – Dióxido de azufre

Tabla 12

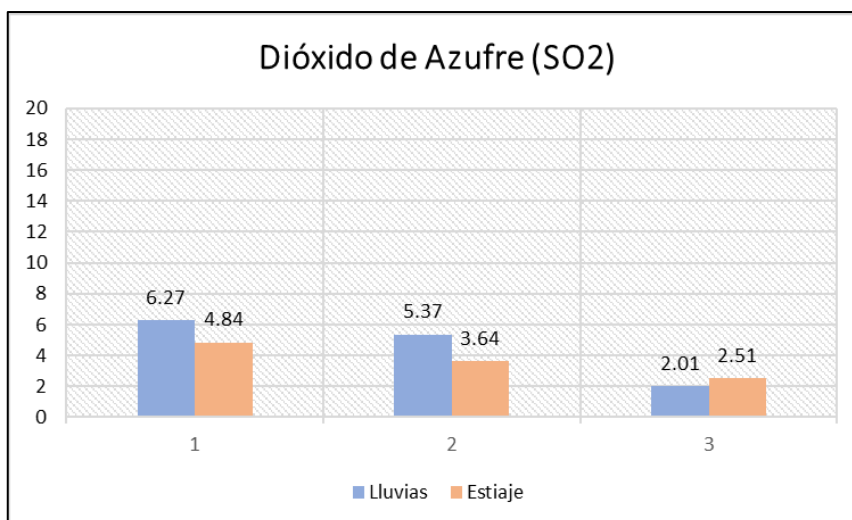
Promedios obtenidos para el Dióxido de azufre (ug/m3).

Punto	Época		Promedio de concentración
	Lluvias	Estiaje	
M -1	6.27	4.84	5.56
M-2	5.37	3.64	4.51
M -3	2.01	2.51	2.26

En la tabla 12 se evidencia que, el promedio de concentración mínima de Dióxido de azufre es 2.26 (ug/m3). Mientras que, el promedio del nivel medio es de 4.51 (ug/m3) y el promedio nivel máximo de concentración CO es de 5.56 (ug/m3).

Figura 13

Niveles obtenidos para el Dióxido de Azufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



En la imagen 13, en el punto que se obtuvo mayor concentración fue en el 1, donde hubo 6.27 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de Dióxido de azufre (época de Lluvias) y el punto donde hubo menor concentración fue en el 3, donde se evidenció 2.01 de SO_2 (época de lluvias).

***NO₂* – Dióxido de nitrógeno**

Tabla 13

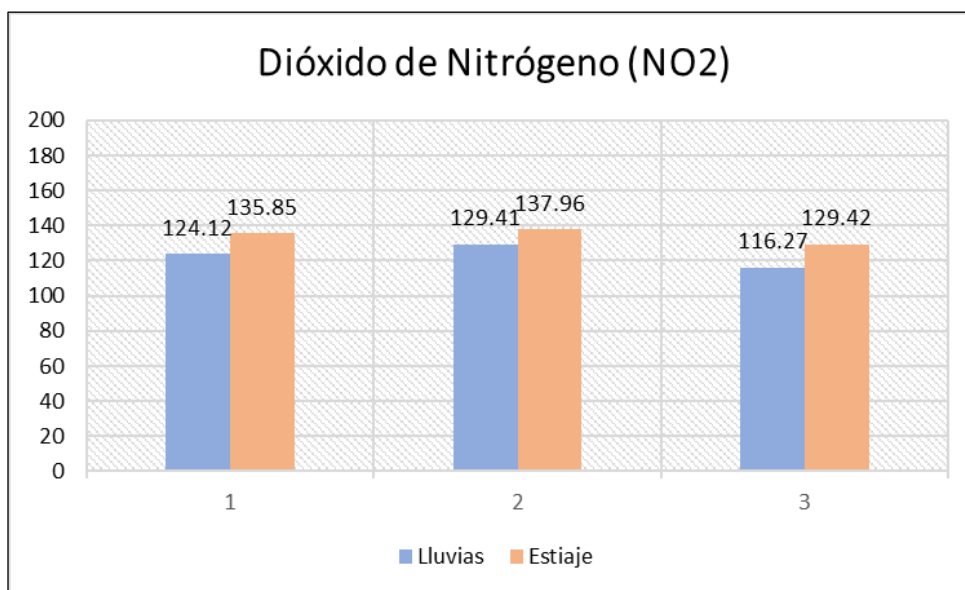
Promedios obtenidos para el Dióxido de Nitrógeno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Punto	Época		Promedio de concentración
	Lluvias	Estiaje	
M -1	124.12	135.85	129.98
M-2	129.41	137.96	133.68
M -3	116.27	129.42	122.84

La tabla 13 demuestra que, el promedio de concentración mínima de Dióxidos de nitrógeno es 122.84 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Mientras que, el promedio del nivel medio es de 129.98 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el promedio del nivel máximo de concentración NO_2 es de 133.68 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 14

Niveles obtenidos para el Dióxido de Nitrógeno (ug/m3)



En la imagen 14, en el punto que se obtuvo mayor concentración fue en el 2, donde hubo 137.96 (ug/m³) de Dióxido de nitrógeno (época de estiaje) y el punto donde hubo menor concentración fue en el 3, donde se evidenció 116.27 de NO₂ (época de lluvias).

Características de las empresas ladrilleras

La actividad ladrillera en la comunidad de Sucso Aucaylle ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de prácticas rudimentarias y altamente contaminantes a un modelo de producción más tecnificado y con mayor conciencia ambiental. A través de las entrevistas realizadas a distintos productores de ladrillos, se pudo identificar patrones en el desarrollo de esta industria, sus desafíos y las acciones implementadas para mitigar su impacto en la calidad del aire.

Entrevista 1: Empresa LATER SAC – Propietario: Ascencio Auccapure

LATER SAC inició sus operaciones en 1984, en un contexto de informalidad y con el uso de un horno abierto de forma circular. La elección del combustible en los primeros años refleja la falta de regulación ambiental y de alternativas menos contaminantes: ramas de eucalipto, aserrín, neumáticos y plásticos fueron utilizados indiscriminadamente, generando emisiones altamente contaminantes.

En la actualidad, la empresa ha realizado esfuerzos por mejorar su tecnología. Han implementado un horno tradicional mejorado con cúpulas y ductos verticales y horizontales con chimeneas más largas, lo que permite una mayor decantación de contaminantes antes de ser liberados a la atmósfera. Este cambio no solo ha sido impulsado por la necesidad de reducir la contaminación, sino también por la búsqueda de mayor eficiencia en la combustión.

Además, han adoptado el horno paulista, una tecnología que permite reducir significativamente las emisiones. Otras estrategias incluyen el reaprovechamiento de residuos como ladrillos rotos y la implementación de termocuplas para el monitoreo de la temperatura de combustión, lo que ha optimizado el proceso de producción.

Las mejoras en la producción han sido notables en los últimos 15 años, con la mecanización y el uso de equipos especializados que han permitido una producción más uniforme y eficiente. No obstante, pese a estos avances, la actividad ladrillera sigue generando contaminación, lo que evidencia la necesidad de adoptar tecnologías aún más limpias para mitigar su impacto en la calidad del aire en la zona.

Figura 15

Horno paulista

**Figura 16**

Horno tradicional mejorado con cúpula



Entrevista 2: Empresa LATESA SAC – Propietario: Iván Cruz y Ascencio

Auccapure

Esta empresa comenzó su producción en 1988 y, al igual que LATER SAC, inició de manera informal con un horno de tiro vertical abierto. En los primeros años, el uso de combustibles contaminantes como plásticos, llantas, ramas de eucalipto y cáscara de café fue común, lo que generó una significativa afectación en la calidad del aire del sector.

A lo largo de los años, LATESA SAC ha modernizado su infraestructura, implementando un horno de tiro vertical adaptado con una chimenea con ductos horizontales subterráneos y tapas metálicas. Esta adaptación ha permitido un mejor control de los gases emitidos, aunque no los ha eliminado por completo.

Las medidas implementadas para reducir la contaminación incluyen la construcción de chimeneas más altas, el uso de ventiladores para mejorar la quema del combustible y la implementación de buenas prácticas de manufactura. Estas acciones han mejorado la eficiencia del proceso, reduciendo los residuos y optimizando el uso de los recursos. Entre las mejoras más importantes en los últimos 15 años destacan la mecanización de la producción y la introducción de otros tipos de bloques en el Cusco, una innovación en la industria ladrillera local. A pesar de estos avances, la producción sigue generando emisiones contaminantes, lo que sugiere que la transición hacia hornos más ecológicos es un desafío pendiente.

Figura 17

Horno de tiro vertical adaptado con una chimenea con ductos horizontal



Entrevista 3: Empresa Aceros Ccollana SAC – Propietario: Wilfredo Rumacca

Huamán

Aceros Ccollana SAC es una empresa relativamente nueva en el sector, pues comenzó su producción en 2018. A diferencia de las empresas con mayor trayectoria, esta inició con hornos tradicionales y el uso de palos rollizos, aserrín y chamizas como combustibles.

En la actualidad, han implementado el horno paulista con ducto subterráneo y una chimenea de gran magnitud, lo que representa un esfuerzo por reducir el impacto ambiental. Además, han cerrado las cúpulas de los hornos y extendido los ductos hasta 24 metros, con chimeneas de 12 metros de altura. Estas modificaciones han mejorado el proceso de combustión y han reducido la dispersión de partículas contaminantes en el aire. Un aspecto interesante de esta empresa es su uso de ventiladores para optimizar la combustión, evitando que la leña se ahogue y mejorando la eficiencia del proceso. Aunque estas medidas han

significado avances, la empresa sigue dependiendo de combustibles sólidos, lo que indica que aún hay oportunidades para mejorar en términos de sostenibilidad ambiental.

Figura 18

Horno paulista con ducto subterráneo y chimenea



Entrevista 4: Empresa Faraón – Propietario: Tomás Paredes Huamán

Con una trayectoria que se remonta a 1980, la empresa Faraón comenzó con un horno tradicional de tiro abierto y el uso de ramas y aserrín como combustibles.

En la actualidad, han modernizado su producción adoptando un horno de forma romana con cúpula y tapas metálicas, lo que permite una mejor combustión.

La transición hacia el uso de palos trozados y leña ha logrado una reducción parcial en la emisión de contaminantes, aunque sin eliminarlos por completo. Para mitigar el impacto ambiental, se han implementado ventiladores, extractores y un lavador de gases, medidas que han contribuido a mejorar la calidad del aire en la zona. Además, han mecanizado la producción y han implementado campañas de reforestación en la comunidad, lo que representa un esfuerzo adicional para compensar su impacto ambiental.

Figura 19

Horno de forma romana con cúpula con tapas metálicas

**Entrevista 5: Empresa Persona Natural – Propietaria: Yovana Quispe**

Esta productora inició su actividad en 2004 con hornos tradicionales abiertos y combustibles como ramas, chamizas, llantas, plásticos y aserrín. Con el tiempo, ha implementado hornos con cúpula de cono y chimeneas, mejorando la eficiencia en la combustión.

Para reducir las emisiones, han optado por el uso de ventiladores y han modificado la manera en que se manipulan los combustibles, cortando los palos rollizos a dimensiones más pequeñas. Asimismo, participan en campañas de reforestación, contribuyendo a la recuperación de los espacios verdes afectados por la contaminación de la industria.

Figura 20

Hornos con cúpula de cono con chimeneas



Entrevista 6: Empresa Doctor Patrón San Jerónimo – Propietario: Walter Atayupanqui Pacheco

Desde su inicio en 1988, esta empresa utilizó hornos circulares de cúpula abierta, lo que generaba altas emisiones contaminantes. En los primeros años, utilizaban ramas de eucalipto, aserrín y llantas como combustible.

Hoy en día, han implementado un horno rectangular con cúpula metálica, un ducto subterráneo de 70 metros y una chimenea de 14 metros de altura. Estos cambios han permitido reducir la emisión de gases contaminantes al decantar metales pesados dentro del ducto antes de ser expulsados. Entre las medidas adoptadas destacan el reciclaje de ladrillos rotos, el uso de tapas metálicas y la instalación de un ventilador de 15 HP, que optimiza el proceso de combustión. Además, se han incorporado termocuplas para medir con precisión la temperatura, lo que ha permitido mejorar la calidad del producto final.

Figura 21*Horno rectangular con cúpula y chimenea*

La figura anterior muestra la fotografía de un Horno rectangular con cúpula con tapas de metal con manto cerámico con ducto subterráneo de 70 metros con una altura de 14 metros de chimenea.

Nivel de cumplimiento de la calidad del aire con los ECA - Aire

Se compararon los resultados obtenidos con los resultados de los Estándares de Calidad Ambiental de Aire, y se utilizaron las Directrices Mundiales de la OMS sobre la calidad de aire. Para observar el nivel de cumplimiento con dichas directrices.

Material Particulado - *PM*2.5

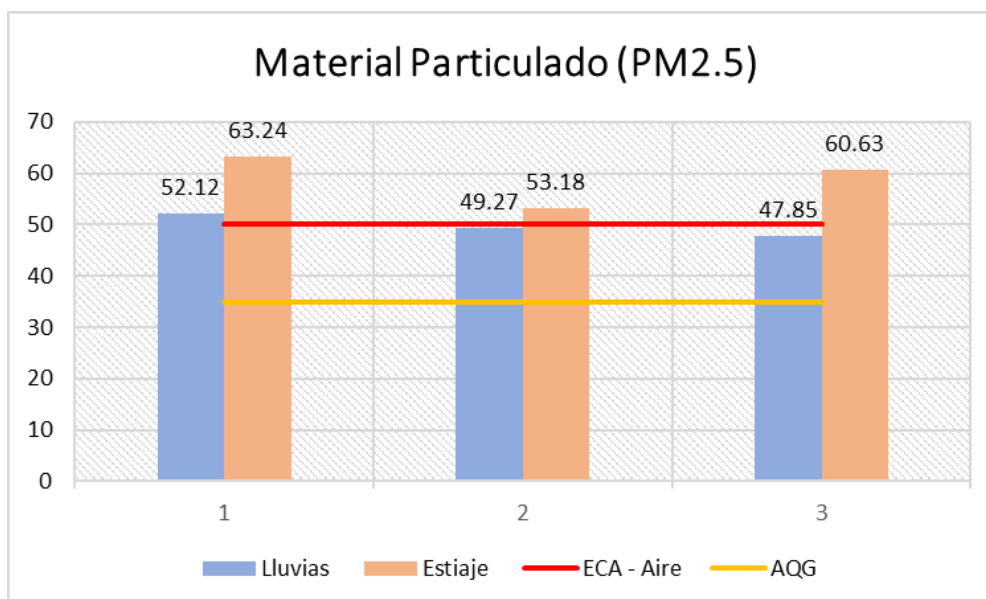
Tabla 14

Comparación de resultados del $[[PM]]_{2.5}$ con los ECA- Aire Y AQG (OMS).

Punto	Época		Concentración	ECA – aire (ug/m3)	Directrices OMS (ug/m3)
	Lluvias	Estiaje			
M -1	52.12	63.24	57.68		
M-2	49.27	53.18	51.23	50	35
M -3	47.85	60.63	54.24		

Figura 22

Comparación de niveles de $PM_{2.5}$ con los ECA -Aire y AQG (OMS)



Fuente: Elaboración propia en base a la comparación de niveles de $PM_{2.5}$ con los ECA -Aire y AQG (OMS).

Como se observa, todos los resultados obtenidos del $PM_{2.5}$ en el monitoreo exceden los Estándares de Calidad Ambiental para Aire; así como también las directrices de la OMS para la calidad de aire; esto se convierte en una amenaza para la salud poblacional.

Material Particulado - PM_{10}

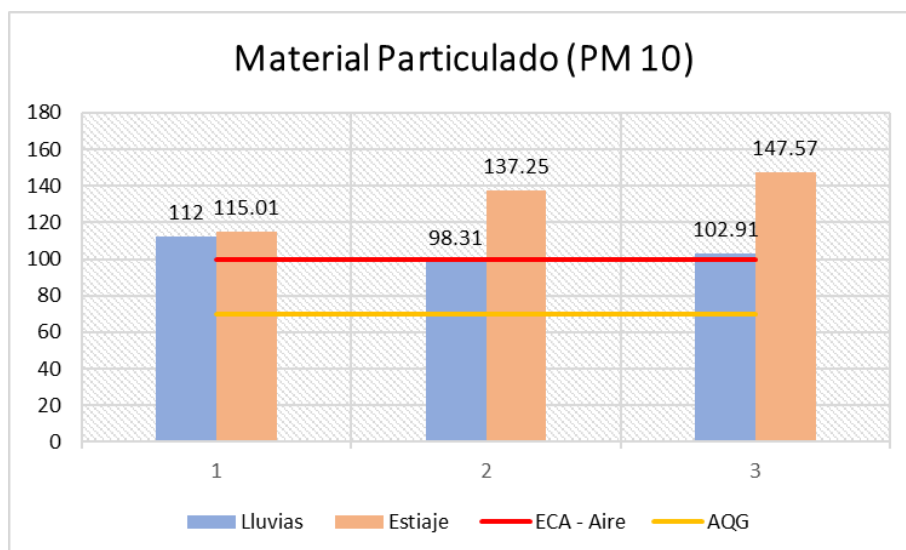
Tabla 15

Comparación de Resultados $[PM]_{10}$ con los ECA -Aire Y AQG (OMS).

Punto	Época		Concentración	ECA - aire ($\mu g/m^3$)	Directrices OMS ($\mu g/m^3$)
	Lluvias	Estiaje			
M -1	112	115.01	113.50		
M-2	98.31	137.25	117.78	100	70
M -3	102.91	147.57	125.24		

Figura 23

Comparación de niveles de PM_{10} con los ECA -Aire Y AQG (OMS)



Como se observa cinco de los promedios obtenidos para el PM_{10} en el monitoreo, exceden los Estándares de Calidad Ambiental para Aire. Solo el segundo promedio, realizado en época de lluvia resultó estar dentro de los parámetros exigidos. Sin embargo, realizando la comparativa con las Directrices de la OMS sobre la calidad de aires, todos los resultados exceden el nivel establecido. Así que, de igual modo este elemento, también se convierte en un peligro para las poblaciones cercanas.

CO- Monóxido de carbono

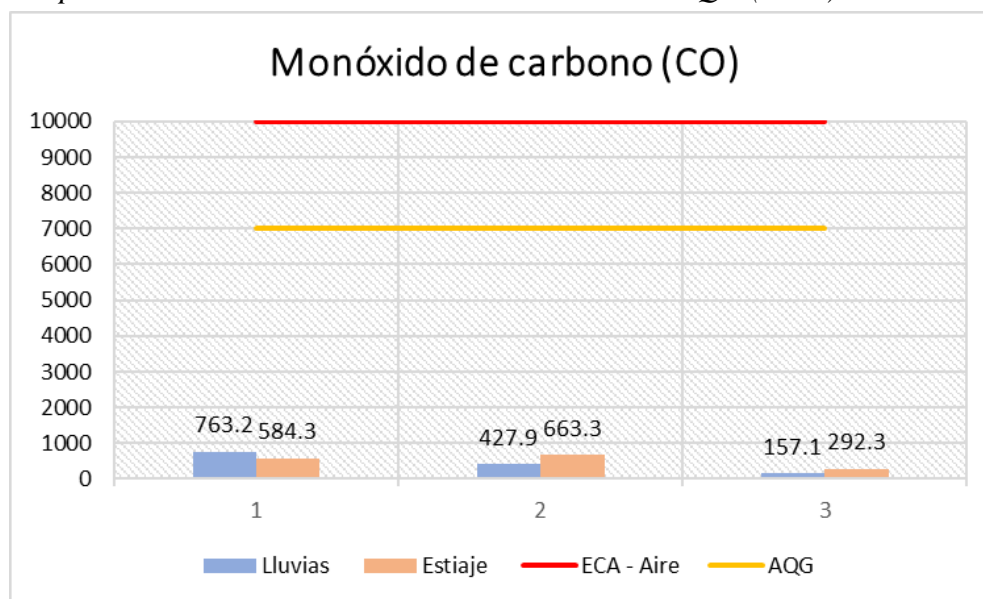
Tabla 16

Comparación de Resultados de CO con ECA -Aire Y AQG (OMS).

Punto	Época		Concentración	ECA- aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Directrices OMS (mg/m^3)
	Lluvias	Estiaje			
M -1	763.18	584.29	673.74		
M-2	427.96	663.28	545.62	10000	700
M -3	157.12	292.34	224.73		

Figura 24

Comparación de niveles de CO con los ECA -Aire Y AQG (OMS)



Como se evidencia, los resultados para el Monóxido de carbono, no exceden los Estándares de Calidad Ambiental para este parámetro. De igual modo, tampoco se excede el nivel establecido en las directrices de calidad de aire por la OMS. Por lo tanto, este elemento no sería sinónimo de peligro para la población cercana.

SO₂ – Dióxido de azufre

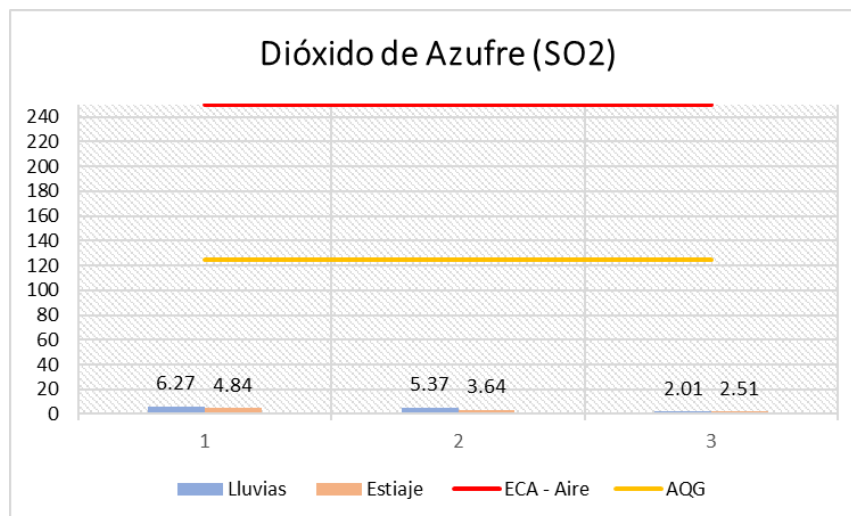
Tabla 17

Comparación de Resultados de SO_2 con los ECA -Aire.

Punto	Época		Concentración	ECA-aire (ug/m3)	Directrices OMS (mg/m3)
	Lluvias	Estiaje			
M -1	6.27	4.84	5.56		
M-2	5.37	3.64	4.51	250	125
M -3	2.01	2.51	2.26		

Figura 25

Comparación de niveles de SO_2 con los ECA – Aire



De igual modo, los resultados para el Dióxido de azufre, no exceden los Estándares de Calidad Ambiental. Tampoco exceden las directrices de calidad de aire establecido por la OMS. Por lo tanto, este elemento tampoco sería sinónimo de peligro para la población cercana.

NO_2 – Dióxidos de nitrógeno

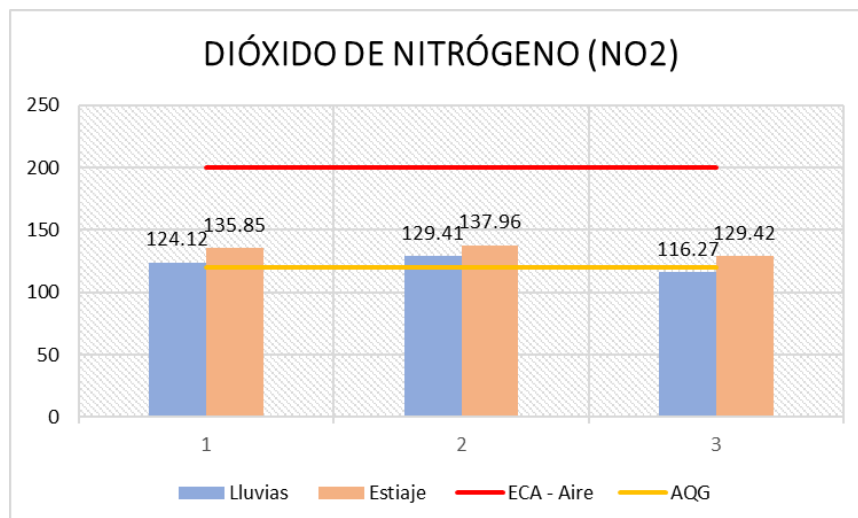
Tabla 18

Comparación de resultados del NO_2 con los ECA – Aire.

Punto	Época		Concentración	ECA – aire (ug/m ³)	Directrices OMS (mg/m ³)
	Lluvias	Estiaje			
M -1	124.12	135.85	129.98		
M-2	129.41	137.96	133.68	200	120
M -3	116.27	129.42	122.84		

Figura 26

Comparación de niveles de NO₂ con los ECA – Aire



Los resultados del Dióxido de nitrógeno, se encuentran dentro del rango establecido en los Estándares de Calidad Ambiental para aire. Sin embargo, comparando los resultados con las directrices para la calidad de aire de la OMS, estos si exceden los niveles establecidos. Por lo tanto, este parámetro sería parcialmente un peligro para las poblaciones cercanas.

Análisis estadístico

Prueba de Shapiro-Wilk

El test de Shapiro-Wilk plantea la hipótesis nula de que una muestra sigue una distribución normal. Se elige un nivel de significancia $\alpha=0.05$, y se formula una hipótesis alternativa que sugiere que la distribución no es normal. Se realizarán pruebas de normalidad para cada contaminante, incluyendo PM10, PM2.5, NO₂, CO y SO₂, con el fin de evaluar si los datos de cada uno de estos contaminantes siguen una distribución normal antes de proceder con análisis estadísticos adicionales. Se tendrá para cada análisis de contaminante.

– **Para $PM_{2.5}$:**

H_0 : Los datos de $PM_{2.5}$ siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos de $PM_{2.5}$ no siguen una distribución normal.

– **Para PM_{10} :**

H_0 : Los datos de PM_{10} siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos de PM_{10} no siguen una distribución normal.

– **Para CO:**

H_0 : Los datos de CO siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos de CO no siguen una distribución normal.

– **Para SO_2 :**

H_0 : Los datos de SO_2 siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos de SO_2 no siguen una distribución normal.

– **Para NO_2 :**

H_0 : Los datos de NO_2 siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos de NO_2 no siguen una distribución normal.

Tabla 19

Pruebas de normalidad.

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov - Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
PM2.5	,319	3	.	,885	3	,338
PM10	,339	3	.	,851	3	,243
CO	,296	3	.	,918	3	,446
SO2	,340	3	.	,849	3	,237
NO2	,265	3	.	,953	3	,585

En la tabla 19, se observa que los p-valores son mayores a 0.05. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que los datos recolectados para cada uno de los contaminantes (PM10, PM2.5, NO2, CO y SO2) siguen una distribución normal.

Con el fin de determinar la presencia de diferencias significativas en datos pareados, se empleará el método t de Student para datos pareados. En este contexto, se aplicará esta prueba para evaluar posibles diferencias en los niveles de los contaminantes del aire, incluyendo PM10, PM2.5, NO2, CO y SO2, entre las épocas de lluvia y estiaje en la zona afectada por la actividad ladrillera en el distrito de San Jerónimo, Cusco. Este enfoque permitirá identificar si las concentraciones de los contaminantes varían significativamente entre ambas estaciones.

Prueba T de Student

El método T de Student para datos pareados se trata de un análisis estadístico paramétrico aplicado para contrastar los promedios de dos conjuntos de datos vinculados o emparejados. Esta prueba analiza si hay variaciones significativas entre dos situaciones o periodos de medición, comprobando si las discrepancias entre cada par de observaciones se ajustan a una distribución normal. En el presente estudio, este método se empleará para comparar los niveles de los contaminantes del aire (PM10, PM2.5, NO2, CO y SO2) entre las épocas de lluvia y estiaje en la zona afectada por la actividad ladrillera en el distrito de San Jerónimo, Cusco. Para llevar a cabo este análisis, se formulan las siguientes hipótesis:

– Para $PM_{2.5}$:

H_0 : No existen diferencias significativas en los niveles de $PM_{2.5}$ entre la época de lluvia y la de estiaje.

H_1 : Existen diferencias significativas en los niveles de $PM_{2.5}$ entre la época de lluvia y la de estiaje.

– Para PM_{10} :

H_0 : No existen diferencias significativas en los niveles de PM_{10} entre la época de lluvia y la de estiaje.

H_1 : Existen diferencias significativas en los niveles de PM_{10} entre la época de lluvia y la de estiaje.

– Para CO:

H_0 : No existen diferencias significativas en los niveles de CO entre la época de lluvia y la de estiaje.

H_1 : Existen diferencias significativas en los niveles de CO entre la época de lluvia y la de estiaje.

– Para SO_2 :

H_0 : No existen diferencias significativas en los niveles de SO_2 entre la época de lluvia y la de estiaje.

H_1 : Existen diferencias significativas en los niveles de SO_2 entre la época de lluvia y la de estiaje.

– Para NO_2 :

H_0 : No existen diferencias significativas en los niveles de NO_2 entre la época de lluvia y la de estiaje.

H_1 : Existen diferencias significativas en los niveles de NO_2 entre la época de lluvia y la de estiaje.

Tabla 20*Pruebas de pruebas emparejadas.*

Prueba de muestras emparejadas									
		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig.
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de confianza de diferencia	intervalo de la			(bilateral)
					Inferior	Superior			
Par 1	PM2.5_E PM2.5_L	- 9,27000	4,71552	2,72250	-2,44399	20,98399	3,405	2	,076
Par 2	PM10_E PM10_L	- 28,87000	22,57730	13,03501	-27,21511	84,95511	2,215	2	,157
Par 3	CO_E CO_L	- 63,88333	216,12305	124,77870	- 472,99608	600,76274	,512	2	,660
Par 4	SO_E SO2_L	- -,88667	1,21022	,69872	-3,89302	2,11969	-1,269	2	,332
Par 5	NO2_E NO2_L	- 11,14333	2,35545	1,35992	5,29208	16,99459	8,194	2	,015

En la tabla 20 se evidencia que el p-valor para NO_2 es menor a 0.05, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula. Esto sugiere que existen diferencias significativas en los niveles de NO_2 entre la época de lluvia y la de estiaje, lo que respalda la preocupación por la calidad del aire en la zona afectada por la actividad ladrillera. Sin embargo, para los demás contaminantes analizados $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO y SO_2 los p-valores son mayores a 0.05, lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula. Esto sugiere que no hay diferencias significativas en los niveles de estos contaminantes entre las dos épocas.

Es importante señalar que, a pesar de que $PM_{2.5}$ y PM_{10} presentan p-valores que indican una falta de significancia estadística, ambos se encuentran por encima de las directrices de la OMS, lo que plantea un riesgo para la salud pública. Por otro lado, los niveles de CO y SO_2 están por debajo de las directrices de la OMS, lo que sugiere que, en términos de estos contaminantes, la calidad del aire es aceptable. En conjunto, estos resultados proporcionan una visión integral sobre la calidad del aire en la zona afectada y

subrayan la necesidad de estrategias de mitigación para los contaminantes que superan las recomendaciones de la OMS.

Discusión

La delimitación del área de influencia directa (46 ha) e indirecta (98.93 ha) en el distrito de San Jerónimo permitió identificar la comunidad de Sucso Aucaylle como una de las más expuestas a la contaminación producida por la actividad ladrillera, debido a las condiciones meteorológicas locales, donde la velocidad del viento promedio es de apenas 0.6 m/s. Este factor disminuye la dispersión de los contaminantes, ocasionando que se concentren en las zonas cercanas a las fuentes de emisión, especialmente en la comunidad de Sucso Aucaylle. Esta situación ha sido evidenciada en estudios anteriores, como el de Cahuatico (2019), quien observó que áreas cercanas a ladrilleras con bajas velocidades de viento suelen tener una mayor acumulación de partículas, lo cual incrementa la exposición y el riesgo para los pobladores cercanos.

Los datos obtenidos en las entrevistas con los productores ladrilleros confirman la persistencia de fuentes de emisión contaminantes, con una modernización parcial de las técnicas de combustión. Empresas como LATER SAC y LATESA SAC han implementado hornos mejorados con ductos subterráneos y chimeneas más largas, lo que ha contribuido a una mejor decantación de contaminantes. Sin embargo, el uso de carbón mineral y otros combustibles sigue siendo una fuente significativa de emisiones. Por otro lado, empresas más recientes como Aceros Ccollana SAC han adoptado el horno paulista, con mejoras en la reducción de partículas contaminantes, aunque sin una eliminación completa de las emisiones. Estos esfuerzos muestran una tendencia hacia la optimización de la combustión, pero aún sin un cambio hacia fuentes de energía completamente limpias.

En estudios de ciudades con mayor circulación de aire, como Piñipampa (Lechuga, 2022), se evidencia que las áreas adyacentes a ladrilleras experimentan menor concentración

de contaminantes debido a una mejor dispersión, en el caso de San Jerónimo, la falta de viento limita esta dispersión, aumentando la permanencia de partículas en el área de influencia directa, y coincide con los resultados presentados por Martínez-Abarca et al. (2022) en Tonalá, México, donde se reportaron niveles elevados de contaminación en comunidades cercanas a ladrilleras artesanales situadas en zonas de baja velocidad de viento. Así, las condiciones meteorológicas en San Jerónimo resultan un factor determinante en la acumulación de partículas y gases, incrementando el riesgo de exposición para los residentes de la comunidad de Sucso Aucaylle y otras áreas adyacentes.

Además, los resultados de monitoreo indican que las concentraciones de PM_{2.5} registradas en el estudio exceden tanto los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), que en un periodo de 24 horas el estándar deber ser de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (El Peruano, 2017), como las directrices de la OMS, como se evidencia en la Tabla 14. En la época de estiaje, los valores más altos se observaron en los puntos M-1 (63.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y M-3 (60.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que excede ampliamente los límites de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecidos por los ECA y los 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendados por la OMS. Esta situación se ve agravada por el tipo de combustibles empleados por algunas empresas ladrilleras, como el uso de llantas y plásticos, que fue una práctica común en los inicios de empresas como LATER SAC y LATESA SAC, aunque actualmente han migrado a combustibles menos contaminantes como el carbón mineral. Incluso durante la época de lluvias, las concentraciones permanecen elevadas, siendo el promedio en el punto M-1 de 52.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este exceso representa un riesgo significativo para la salud pública, especialmente en niños y ancianos, quienes son más vulnerables a enfermedades respiratorias y cardiovasculares (OMS, 2024).

En cuanto al material particulado PM₁₀, se observa un comportamiento similar, donde las concentraciones también superan los límites establecidos tanto en estiaje como en lluvias. Durante el estiaje, el punto M-3 alcanzó un valor crítico de 147.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando

los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de los ECA y los $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendados por la OMS, solo un resultado en época de lluvias ($98.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en M-2) se ajustó a los ECA, pero aún excede las directrices de la OMS. En este contexto, las mejoras implementadas por empresas como Doctor Patrón San Jerónimo, que han desarrollado ductos de gran longitud para decantar contaminantes antes de su liberación, representan un avance importante, pero aún insuficiente para cumplir con los estándares ambientales.

Estas superaciones reflejan un panorama crítico para la calidad del aire en la región, ya que la persistencia de concentraciones elevadas de PM10 y PM2.5, incluso en condiciones de lluvia, evidencia la influencia directa de las actividades ladrilleras, las figuras 15 y 16 permiten observar con claridad cómo estas concentraciones superan ampliamente los límites permisibles y suponen un riesgo grave para las comunidades cercanas. Las estrategias de mitigación adoptadas por algunas ladrilleras, como la implementación de extractores y ventiladores en Faraón y Aceros Ccollana SAC, han permitido reducir parcialmente el impacto ambiental, pero no han eliminado las emisiones en su totalidad.

Los resultados de monitoreo identificaron la presencia de PM10 correspondiente a la figura 11 y PM2.5 correspondiente a la figura 10, tuvieron correspondientemente mayor concentración fue en el punto 1 y punto 3, ambas en época de estiaje, estos PM, son considerados como los principales contaminantes atmosféricos en San Jerónimo, ya que rebasaban los Estándares de Calidad Ambiental para Aire, con promedios de concentración de $118.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $54.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, superando de igual forma las recomendaciones de la OMS y adicionalmente, el NO_2 alcanzó un promedio de $128.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sobrepasando las recomendaciones de la OMS de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El hecho de superar estas recomendaciones tiene graves implicancias, ya que conlleva un incremento significativo en el riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias, como el asma y la bronquitis crónica, así como enfermedades cardiovasculares y enfermedades Pulmonares

Obstructivas Crónicas (Galvis et al., 2021). La exposición prolongada a concentraciones elevadas de estos contaminantes puede causar problemas de salud y aumentar la mortalidad prematura, particularmente en poblaciones vulnerables como niños, ancianos y personas con condiciones preexistentes (OMS, 2024).

Al comparar los valores de PM₁₀ y PM_{2.5} con las recomendaciones de la OMS, se observa que ambas partículas exceden consistentemente los límites recomendados, incluso en condiciones climáticas menos críticas, lo cual incrementa significativamente el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en los habitantes (OMS, 2021). Los niveles de CO y SO₂ se mantuvieron dentro de los límites permitidos por los ECA, sin embargo, la presencia de estos contaminantes también indica los tipos de materiales que podrían estar siendo empleados en los procesos de combustión de forma informal, como llantas, plásticos y carbón mineral, que incrementan la emisión de partículas finas y otros gases tóxicos.

Estos resultados son consistentes con investigaciones en otras zonas de ladrilleras artesanales, como el estudio de Álvarez y Benítez (2020) en Cogua, Cundinamarca, donde se hallaron altos niveles de PM_{2.5} y PM₁₀ derivados de la combustión de materiales no regulados. En San Jerónimo, la informalidad de las ladrilleras y el uso de combustibles contaminantes incrementan significativamente la concentración de material particulado y gases tóxicos, al igual que en Basora, Irak (Zangana y Yusof, 2024), donde el uso de combustibles como el petróleo y la leña genera concentraciones similares de partículas contaminantes. La composición de gases observada en San Jerónimo también refleja la situación documentada en Tonalá y Basora, donde la combinación de combustibles de baja calidad y la falta de tecnologías de control aumentan las emisiones de partículas y gases.

Cabe mencionar que en Piñipampa, Lechuga (2022) reportó menores niveles de material particulado y gases debido a la adopción de algunas tecnologías de control y combustibles menos contaminantes, lo que resalta la importancia de implementar prácticas

similares en San Jerónimo. La comparación con estudios en otras regiones permite concluir que los materiales utilizados en la cocción de ladrillos en San Jerónimo agravan el problema de contaminación, lo cual genera una mayor acumulación de material particulado y NO₂ en el área de estudio, afectando gravemente la calidad del aire y la salud de los residentes.

Al comparar los resultados de los contaminantes identificados con los límites establecidos por los ECA y las recomendaciones de la OMS, se observa que en San Jerónimo los niveles de PM₁₀ y PM_{2.5} exceden los límites tanto en la época de estiaje como en la de lluvias, aunque con picos de 147.57 µg/m³ para PM₁₀ y 63.24 µg/m³ para PM_{2.5} durante la temporada seca. Esto representa una amenaza importante para la salud de los pobladores, debido a que, en época de estiaje, la precipitación es realmente poca o nula y no contribuye significativamente a reducir las partículas en el aire. Estos hallazgos coinciden con el estudio de Mamani (2020) en Calana, Perú, donde las concentraciones de material particulado son elevadas en la temporada seca, evidenciando que la falta de lluvias contribuye a la permanencia de partículas en suspensión.

Adicionalmente, estudios internacionales como el de Zangana y Yusof (2024) en Basora, Irak, también identificaron que la exposición al material particulado es mayor durante las temporadas secas, especialmente en áreas con velocidad de viento limitada. La investigación de Valdera (2019) en Chacupe Alto, Lambayeque, apoya estos resultados, documentando que en épocas de lluvia las concentraciones de PM disminuyen significativamente. Sin embargo, en San Jerónimo, aunque se observa una reducción en los niveles de material particulado en la época de lluvias, los valores se mantienen elevados debido a la constante actividad ladrillera y el uso de materiales de combustión contaminantes. Esta comparación refuerza la importancia de controlar las emisiones, ya que las condiciones meteorológicas y los patrones de emisión actuales no permiten que la calidad

del aire cumpla con los límites establecidos en los ECA y las recomendaciones de la OMS, lo que representa un riesgo de salud continua para los habitantes.

Los resultados de esta investigación evidencian que la implementación de tecnologías limpias y la transición a combustibles menos contaminantes contribuiría a la reducción del impacto de la actividad ladrillera en la calidad del aire en el sector de Sucso Aucaylle, distrito de San Jerónimo. Estudios previos en otras regiones con ladrilleras artesanales, como el de Lechuga (2022) en Piñipampa y el de Álvarez y Benítez (2020) en Cogua, Colombia, sugieren que la adopción de tecnologías de control y la sustitución de combustibles contaminantes pueden reducir las emisiones de PM10 y PM2.5. En Piñipampa, la implementación de hornos con menor emisión de contaminantes y el uso de combustibles menos nocivos ha mostrado resultados positivos en la reducción de los niveles de partículas y gases.

Por otra parte, la instalación de quemadores de baja emisión y la transición a combustibles más sostenibles pueden ser alternativas viables que acercarían los niveles de material particulado y NO₂ a los límites de los ECA y las recomendaciones de la OMS, así como la implementación de un proyecto piloto en la zona permitiría evaluar la efectividad de estas tecnologías bajo las condiciones locales antes de hacerlo en toda la zona, lo que ha sido exitoso en lugares como Tonalá según Martínez-Abarca et al., (2022) donde la modernización de hornos y el cambio de combustibles mejoró la calidad del aire en áreas con alta densidad de ladrilleras artesanales.

Estas soluciones no solo contribuirían a mejorar la calidad del aire en San Jerónimo, sino también a reducir los efectos negativos en la salud pública, como lo evidenció Espinoza (2021) en su estudio en Chosica, Lima, donde la modernización de los procesos de combustión y la disminución del uso de combustibles contaminantes resultaron en una reducción de las enfermedades respiratorias en las comunidades cercanas a las ladrilleras.

Finalmente, los resultados de esta investigación resaltan la necesidad de implementar alternativas tecnológicas más limpias en San Jerónimo, como la transición a hornos ecológicos y combustibles menos contaminantes. Las mejoras ya implementadas por algunas empresas, como el uso de termocuplas en LATER SAC y Doctor Patrón San Jerónimo, muestran avances en el control térmico del proceso de combustión, lo que podría optimizarse aún más con tecnologías de reducción de emisiones. Estas soluciones no solo contribuirían a mejorar la calidad del aire en San Jerónimo, sino también a reducir los efectos negativos en la salud pública.

VI. Conclusiones

PRIMERO. Se confirmó que la calidad del aire en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle está directamente afectada por la actividad ladrillera. Los altos niveles de material particulado registrados en la zona evidencian que las emisiones de los hornos ladrilleros contribuyen a la contaminación atmosférica, afectando la salud pública y el medio ambiente.

SEGUNDO: Se determinó que el Área de Influencia Directa (AID) comprende un radio de 250 metros alrededor de las ladrilleras, donde la concentración de contaminantes es más alta. Por otro lado, el Área de Influencia Indirecta (AII) se extiende hasta 500 metros, donde los contaminantes aún son detectables, pero con menor intensidad

TERCERO: Se identificó que los contaminantes predominantes en la zona son PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂, cuyos valores superan los límites permitidos por la normativa nacional y los estándares internacionales. La concentración de PM₁₀ alcanzó 118.84 µg/m³ y la de PM_{2.5} fue de 54.38 µg/m³, valores considerablemente superiores a los establecidos en el ECA. Asimismo, la presencia de NO₂ con una concentración de 128.83 µg/m³ superó los valores recomendados, lo que indica una alta exposición a este contaminante, que contribuye a la formación de ozono troposférico y lluvia ácida. Aunque las concentraciones de CO y SO₂ estuvieron dentro de los rangos permitidos, su presencia en la atmósfera sugiere que la actividad ladrillera es una fuente constante de emisiones tóxicas que afectan la calidad del aire.

CUARTO: La actividad ladrillera en Sucso Aucaylle ha evolucionado en las últimas décadas, pasando de prácticas rudimentarias y altamente contaminantes a un modelo de producción más tecnificado con ciertas mejoras ambientales. Las entrevistas con los productores indicaron que muchas ladrilleras han implementado hornos con cúpulas, chimeneas más largas y ductos subterráneos que permiten una mejor decantación de

contaminantes antes de ser liberados a la atmósfera. Algunas han incorporado hornos paulista y sistemas de termocuplas para perfeccionar la combustión y minimizar emisiones.

QUINTO: Los resultados mostraron que Indicadores de partículas contaminantes y óxidos de nitrógeno superan los límites permitidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), lo que confirma que la actividad ladrillera no cumple con las regulaciones establecidas. Se observó que las ladrilleras no cuentan con sistemas de filtrado ni con medidas para reducir sus emisiones.

VII. Recomendaciones

Primero. Se recomienda al alcalde de la Municipalidad Distrital de San Jerónimo la implementación de un sistema de monitoreo continuo de la calidad del aire en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, a través de la instalación de estaciones de medición que permitan registrar y analizar las variaciones en los niveles de contaminantes a lo largo del tiempo. Asimismo, se plantea la demanda de promover iniciativas de concientización ambiental dirigidas tanto a los productores ladrilleros como a los habitantes en su conjunto, con el objetivo de fortalecer el conocimiento sobre las repercusiones de la contaminación ambiental atmosférica en la salud pública y en el ecosistema, fomentando así la adopción de prácticas más sostenibles en el sector ladrillero.

Segundo. Se recomienda al alcalde de la Municipalidad Distrital de San Jerónimo establecer zonas de amortiguamiento entre las ladrilleras y las áreas residenciales, con el fin de minimizar la exposición de la población a los contaminantes generados por esta actividad. Para ello, resulta fundamental evaluar la viabilidad de reubicar algunas ladrilleras hacia zonas con menor densidad poblacional o, en su defecto, implementar barreras naturales, como cinturones verdes con especies vegetales que contribuyan a la retención de partículas contaminantes y a la mejora de la calidad del aire en la zona.

Tercero. Se recomienda la implementación de medidas urgentes para mitigar la emisión de material particulado y óxidos de nitrógeno en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle. Para ello, es esencial promover el uso de combustibles menos contaminantes, como el gas natural o biomasa controlada, así como optimizar los procesos de combustión en los hornos ladrilleros para reducir la generación de gases nocivos. Adicionalmente, se sugiere la instalación de filtros de partículas y sistemas de captación de gases en los hornos, lo que permitiría una reducción significativa de la contaminación atmosférica. Asimismo, se destaca la importancia de fortalecer la regulación ambiental a través de inspecciones

periódicas y la aplicación de sanciones a los productores que no cumplan con los límites de emisión establecidos en la normativa vigente.

Cuarto. Se recomienda al presidente de la Asociación de Ladrilleros impulsar la adopción de tecnologías más limpias y eficientes en la producción de ladrillos en Sucso Aucaylle, facilitando el acceso a financiamiento y capacitación técnica para los productores. Para ello, es fundamental diseñar programas de apoyo que permitan la modernización de los hornos y la implementación de sistemas que optimicen la combustión, reduciendo así las emisiones contaminantes. Asimismo, se sugiere establecer incentivos tributarios para aquellas ladrilleras que adopten prácticas sostenibles, promoviendo una transición gradual hacia un modelo de producción más respetuoso con el medio ambiente.

Quinto. Se recomienda al alcalde de la Municipalidad Distrital de San Jerónimo fortalecer la fiscalización y supervisión ambiental en la comunidad campesina de Sucso Aucaylle, con el objetivo de garantizar el cumplimiento de la normativa vigente sobre emisiones atmosféricas. Para tal fin, resulta fundamental implementar programas de auditoría ambiental que permitan evaluar el desempeño de cada ladrillera y aplicar sanciones a aquellas que no adopten las medidas correctivas correspondientes. Asimismo, se plantea la elaboración de un plan integral de reconversión tecnológica, orientado a promover la transición hacia métodos de producción más sostenibles, brindando soporte técnico y facilitando la adaptación progresiva de los productores a tecnologías menos contaminantes.

VIII. Referencias

- Instituto Nacional de Estadística [INEI]. (2017). *Resultados Definitivos del Censos Nacionales 2017*. Lima. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1559/
- Agencia de protección ambiental. (2025). Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Alvarez, C., & Benitez, C. (2020). *Propuesta de medida de mitigación para emisiones de PM2.5 de la ladrillera Ceranova constructora Lomalinda Ltda. en Congua - Cundinamarca*. [Tesis de grado; Universidad El Bosque]. <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/2d8336e6-1eb5-4c52-b7a2-c53bf617c5ba>
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Rev Esp Salud Pública*, 159-175. <https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v79n2/colaboracion3.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID] y Organización Internacional del Trabajo [OIT]. (2020). *El empleo en un futuro de cero emisiones netas en América Latina y el Caribe*. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/El-empleo-en-un-futuro-de-cero-emisiones-netas-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Barradas, A. (2009). *Gestión integral de residuos sólidos municipales*. Instituto Tecnológico de Minatitlán, Veracruz. <https://oa.upm.es/1922/>
- Cahuantico, R. (2019). Evaluación de contaminantes atmosféricos CO₂, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} en la zona urbana de Cusco. Arequipa, Perú: Universidad Nacional de San Agustín. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4862629>

- Cañada, M. (2021). El riesgo de contaminación por ozono en dos ciudades españolas [Madrid y Sevilla]. *Dialnet*, 195 - 212. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8043777.pdf>
- Cárdenas-Rodríguez, N., & Pedraza, J. (2018). Especies reactivas de oxígeno y sistemas antioxidantes: aspectos básicos. *Universidad Nacional Autónoma de México - Facultad de Química*, 1. <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2006.2.66056>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2018). *El aire: elemento de vida en la Tierra*. <https://www.gob.mx/conanp/articulos/el-aire-elemento-de-vida-en-la-tierra>
- Cornare. (2024). *Calidad del aire*. https://www.cornare.gov.co/SIAR/aire/CALIDAD_DE_AIRE/Boletines/Boletin_2_3_Calidad_del_Aire.pdf
- Dalens, R. Z., & Macedo, G. T. (2022). *Evaluación de la calidad del aire por emisiones de CO, PM2.5, PM10 generado por la industria ladrillera en Cusco*. Lima - Perú: Universidad Cesar Vallejo.
- Decreto Supremo 001-2020-MINAM. (s.f.). <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-limites-maximos-permisibles-emisiones-atmosfericas-plantas>
- Decreto Supremo 003-2017- [MINAM]. (2017). <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones>
- Decreto Supremo 010-2019 [MINAM]. (s.f.). <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-que-aprueba-protocolo-nacional-monitoreo-calidad>
- Decreto Supremo N.º 111-2021-MINAM. (s.f.). <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1990170/PROYECTO%20DE%20DECRETO%20SUPREMO%20LMP%20LADRILLOS.pdf.pdf?v=1625248449>

- Decreto Supremo N° 111 (2021).
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1990170/PROYECTO%20DE%20DECRETO%20SUPREMO%20LMP%20LADRILLOS.pdf.pdf>
- El Peruano. (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias. *Normas legales*.
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/estandares-calidad-ambiental>
- Espinoza, I. (2021). *Evaluación de los impactos ambientales en la actividad ladrillera de la empresa muro industrias cerámicas S.A.C. -2020*. [Tesis de grado, Universidad Nacional José Faustino Sanchez Carrión].
<https://repositorio.unjpsc.edu.pe/handle/20.500.14067/5277>
- Federación Bioquímica. (2012). EL OZONO ESTRATOSFÉRICO.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53559383005>
- Feynman, M. (2015). *LA FÍSICA DE LAS PALABRAS*.
<https://labiblioteca.mx/llyfrgell/0250.pdf>
- Gallardo-Vázquez, , D. (2019). Escala de medida de responsabilidad social en el contexto universitario: una triple visión basada en competencias, formación y participación del estudiante. *EG: Estudios Gerenciales*, 159-177.
https://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/estudios_gerenciales/article/view/3138/3704
- Galvis et al., S. (2021). Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa. *Rev Asoc Esp Med Trab.*
- García, J. M., & Salcedo de Lara, C. (2003). Las esferas terrestres: Revisión de 16 conceptos usados en la enseñanza de las ciencias de la Tierra. *nseñanza de las Ciencias de la Tierra, VOL 11, N° 01*, 22-27. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/88857>.

- Gonzales, E., & Cordova, F. (2019). Determinacion de los ecoindicadores de una ladrillera de la Ribera de Cupia, Chiapa de Corzo, Chiapas. *Vivienda y comunidades sustentables*. <https://www.redalyc.org/journal/6651/665170444003/html/>
- Grandez, P., & Gamio, P. (2019). LA FISCALIZACIÓN AMBIENTAL EN EL PERÚ: SITUACIÓN ACTUAL Y RETOS PARA SU EFECTIVIDAD. *Círculo de Derecho Administrativo*.
https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrEsvFamTJnXpMFFit7egx.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzQEbnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1732578907/RO=10/RU=https%3a%2f%2fdialnet.unirioja.es%2fdescarga%2farticulo%2f7810850.pdf/RK=2/RS=H7zF4ZwVj2RiwgXXIb9RSa7qMJM-
- Hernandez, Y., & Lopez, D. (2019). Monitoreo ambiental como herramienta para el seguimiento continuo previsto en la evaluacion de impacto ambiental. *Revista Espacios*. <https://www.revistaespacios.com/a19v40n03/19400317.html>
- Hernandez-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la Investigación. Las rutas de la investigacion cuantitativa cualitativa y mixta. México, México: Mc Graw Hill.
<https://biblioteca.ucuenca.edu.ec/digital/s/biblioteca-digital/ark:/25654/2140#?c=0&m=0&s=0&cv=0>
- Hernandez-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2023). *Metodologia de la Investigacion*. <https://www.libreria-universomedico.com/products/hernandez-sampieri-roberto-metodologia-de-la-investigacion-las-rutas-cuantitativas-cualitativas-y-mixtas-2a-edi-2023-novedad-novedad-novedad>
- Inche, J. L. (2004). *Gestión de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones*. Lima: Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial-UNMSM.
https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/libros/geologia/gestion_calidad/ficha.htm

- Instituto Geoambiental. (2018). DIÓXIDO DE NITRÓGENO.
<https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-azufre-so2/>
- Jiménez, B. E. (2001). *La Contaminación Ambiental en México*. México D.F.: Editorial Limusa S.A. De C.V.
https://www.google.com.pe/books/edition/La_Contaminaci%C3%B3n_Ambiental_en_M%C3%A9xico/8MVxlyJGokIC?hl=es&gbpv=0
- Lechuga, W. (2022). *Determinación de gases contaminantes y de efecto invernadero del sector ladrillero artesanal de Piñipampa - Cusco - año 2020*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Federico Villareal].
<https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/6630>
- Limo Ruiz, A. G. (2024). *Revisión Bibliográfica del uso de Sistemas Global de Navegación por Satélite para medir la precisión*. [Tesis de Grado-Universidad de Sipán, Pimentel]. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/12725>
- Linares, C., & Díaz, J. (2008). ¿Qué son las PM_{2,5} y cómo afectan a nuestra salud? *Reevista el ecologista*. <https://issuu.com/ecologistasenaccion/docs/ee58/46>
- López, E. (2020). *Estudio comparativo de niveles de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} según regiones en Perú período 2015–2019*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59365>
- Maldovan, J. (2018). Ladrilleros. Proceso y condiciones de trabajo en el Municipio de Florencio Varela, Argentina. *Revista Latinoamericana de Antropología del Trabajo*, 02(03).
- Mamani, G. (2020). Evaluación de gases contaminantes de la Ladrillera de Calana. Tacna, Perú, Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
<https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/b275f1f6-f2ec-4846-9e0e-e423462ed993>

- Marco, O., & Reyes, R. (2003). Tecnologías limpias aplicadas a la agricultura. *INCI* v.28 n.5, 252-259. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000500002&script=sci_abstract&tlng=es
- Martinez-Abarca, J., Sanchez, M., Orozco, M., & Figueroa-Montaña, A. (2022). Contaminación del aire y percepción de riesgos a la salud por exposición al humo de ladrilleras en una colonia en Tonalá, Jalisco, México. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierias del ICBI*, 10(19), 99-107. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v10i19.8691>
- Melo-Brito, N. B., & Rey-Galindo, R. (2022). Perspectivas de la gestión ambiental: un análisis crítico. *Gestión y Ambiente* VOL.25,N°02, 1-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/ga.v25n2.105292>
- Mendez, R., & Urquia, A. (2023). *Evaluación de la contaminación y calidad del aire por material particulado vinculado a las variables meteorológicas en Lima Metropolitana entre 2017-2020*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/133970>
- Ministerio del ambiente [MINAM]. (2014). Calidad del aire. [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/6CC0FAA6BF62623E05257CCA00529AD4/\\$FILE/57_EvalCalidadAireLima2011.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/6CC0FAA6BF62623E05257CCA00529AD4/$FILE/57_EvalCalidadAireLima2011.pdf)
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2016). EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL. *informes sectoriales*. <https://www.minam.gob.pe/informessectoriales/wp-content/uploads/sites/112/2016/02/10-Evaluaci%C3%B3n-del-impacto-ambiental.pdf>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2017). *DS - 003-2017-MINAM - Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones*

- Complementarias*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2019). *Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/protocolo-nacional-monitoreo-calidad-ambiental-aire>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2020). *Cartilla de sobre la actualización de las Metas Climáticas del Perú al 2030*. Lima: Ministerio del Ambiente. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1451276/2.%20Cartilla%20de%20a ctualizaci%C3%B3n%20de%20las%20NDC.pdf.pdf>
- Ñaupas, H. (2018). *Metodología de la investigación*. Bogotá. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/archivos/materiales_de_consulta/drogas_de_abuso/articulos/metodologiainvestigacionnaupas.pdf
- OEFA. (2019). *Informe de Evaluación Ambiental*. Perú.
- OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. Alemania: Centro Europeo de la OMS para el Medio Ambiente y la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/who-global-air-quality-guidelines>
- OMS. (2024). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*.
- Ondarse, D. (2024). Plomo. *Enciclopedia*. <https://concepto.de/plomo/>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022). *Material particulado*. *Instituto para la salud Geoambiental*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Pantoza, Á., & Pardo, A. (2022). LA RELACIÓN ENTRE EL ENTORNO FÍSICO Y LAS CONDUCTAS DISRUPTIVAS. UNAD.

file:///D:/2024/Emperatriz%20y%20Elida%20Ing%20Ambiental/Memoria+Tomo+II.pdf

- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, 22(2), 283-312. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001
- Pérez, A., Barajas, M., Rodriguez, L., Ramirez, C., Acosta, K., Zamorategui, A., & Villalobos, S. (2024). Analisis Fisicoquimico de las particulas PM2.5 presentes en el aire de la ciudad de Guanajuato. *Verano de la Ciencia*, 28. <https://doi.org/https://doi.org/10.15174/jc.2024.4423>
- Programa Regional de Aire Limpio [PRAL]. (2010). *Guia para las buenas practicas para ladrilleras artesanales*. <https://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2010/abril/21/RM-102-2010-PRODUCE.pdf>
- Querol, & Alastuey. (2004). Especiación y origen de PM10 y PM2,5 en España. *Revista de ciencia de aerosoles*, 9(35), 1152-1172. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850204000643
- Querol, X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Rev. Esp. Salud Publica* VOL.82 N°05, 447-453. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272008000500001
- Quito, J. (2023). *Estudio de la calidad de aire en los sectores de influencia directa de las ladrilleras artesanales de la Parroquia Sinincay, Cantón Cuenca, Ecuador*. [Tesis de grado, Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/cfa4fc79-9951-4637-8286-85dcad56d1e0>

- Rice, W. B. (2018). *La historia de los combustibles fósiles*. Huntington Beach: Teacher Created Materials.
https://books.google.com.pe/books?id=hlEuDgAAQBAJ&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Rodríguez, M. (2019). *Nuestro planeta, nuestro futuro*. Colombia.
https://reader.digitalbooks.pro/book/preview/123101/book_0001.xhtml?1742405689265
- Ruiz, M. (2014). Cinética de procesos de combustión in situ: Una discusión de los modelos cinéticos. *Revista Fuentes: El reventón Energético*.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4811202.pdf>
- Salas Canales, H. J. (2020). Tecnologías limpias como fuente de ventaja competitiva empresarial. *Acad. (Asunción) VOL.7 N°01*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.30545/academo.2020.ene-jun.10>
- Sbarato, V., & Sbarato, D. (2016). Análisis y caracterización del material particulado atmosférico.
https://www.academia.edu/35808371/An%C3%A1lisis_y_Caracterizaci%C3%B3n_del_Material_Particionado_Atmosf%C3%A9rico
- Semjen, R. (2020). Contaminación atmosférica y medioambiental y patología respiratoria. *EMC - Tratado de Medicina*, 1-9. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1636-5410\(20\)44024-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1636-5410(20)44024-3)
- Swisscontact. (2020). *Ladrilleras artesanales de San Jerónimo, Cusco, Perú*.
https://www.cooperacionsuiza.pe/wp-content/uploads/2019/06/eela_esp_brochure.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Valdera, W. (2019). *Evaluación de los niveles de contaminación del material macro particulado generado en la producción de ladrillo artesanal de arcilla en el sector*

- Chacupe Alto carretera Chiclayo a Monsefú*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/6045>
- Vargas, F. (2005). La contaminación ambiental como factor determinante de la salud. *Rev. Esp. Salud Publica* VOL.79 N°02, 117-127. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200001
- Vidal, A., & Asuaga, C. (2021). Gestión ambiental en las organizaciones: Una revisión de la literatura. *Revista del Instituto Internacional de Costos* 18., 84-122. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9115902>
- Vizcaino, P., Cedeño, R., & Maldonado, I. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina*. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/7658/11620>
- Zamora, I., & Moreira, G. (2023). Contaminación del aire y sus efectos en la salud y ecosistema. *Artículo de Revisión*. <https://revistafdm.uleam.edu.ec/wp-content/uploads/2023/04/Contaminacion-del-aire-y-sus-efectos-en-la-salud-y-ecosistema.pdf>
- Zangana, S., & Yusof, N. (2024). Variabilidad de las emisiones de los hornos de ladrillos y su impacto en el medio ambiente y la salud. *Investigación en ingeniería, tecnología y ciencias aplicadas*, 14(5), 17350–17356. <https://doi.org/https://doi.org/10.48084/etasr.8598>