

Modelación de dispersión de partículas suspendidas totales generado por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante la herramienta Aermod View

Modeling of the dispersion of total suspended particles generated by fixed industrial sources in the municipality of Sucre using the Aermod View tool

CHAVARRÍA - Eymi¹

¹ *Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.*

Recibido abril,20, 2025 Aceptado mayo,30,2025

Resumen

La contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas ambientales que afectan a las ciudades, impactando directamente en la salud de la población. En Sucre, aunque se han realizado esfuerzos para monitorear la calidad del aire, la información sobre las emisiones provenientes de fuentes industriales fijas sigue siendo insuficiente. Este estudio tiene como objetivo modelar la dispersión de partículas suspendidas totales (PST) en la ciudad mediante la herramienta AERMOD View, utilizando datos meteorológicos procesados con AERMET y datos topográficos obtenidos con AERMAP. Se identificaron 20 industrias representativas, clasificadas en sectores como industrias que utilizan calderos, ladrilleras, yeserías, caleras y cementeras, aplicando los factores de emisión de la EPA (AP-42). Los resultados muestran que las mayores concentraciones de PST se originan en las yeserías y la cementera, alcanzando picos de hasta 218 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante 24 horas, sin superar los límites establecidos por el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica. Sin embargo, estos valores evidencian episodios críticos en áreas urbanas cercanas a las fuentes emisoras. Ante esta situación, se recomienda ampliar la red de monitoreo continuo y establecer un protocolo de alerta temprana que permita mitigar los efectos de la contaminación sobre la salud pública y fortalecer la gestión ambiental en Sucre.

Palabras clave: Calidad del aire, contaminantes atmosféricos, gestión ambiental, red de monitoreo, alertas sanitarias.

Abstract

Air pollution is one of the major environmental problems affecting cities, directly impacting public health. In Sucre, although efforts have been made to monitor air quality, information regarding emissions from fixed industrial sources remains insufficient. This study aims to model the dispersion of total suspended particles (TSP) in the city using the AERMOD View modeling tool, incorporating meteorological data processed with AERMET and topographic data obtained through AERMAP. A total of 20 representative industries were identified and classified into sectors such as boiler-based industries, brick kilns, gypsum plants, lime kilns, and a cement plant, applying EPA (AP-42) emission factors. The results indicate that the highest TSP concentrations originate mainly from gypsum plants and the cement industry, reaching peak values of up to 218 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ over a 24-hour period, without exceeding the limits established by the Atmospheric Pollution Regulation. However, these values reveal critical episodes in urban areas located near emission sources. In response, it is recommended to expand the continuous air quality monitoring network and to establish an early warning protocol aimed at mitigating the effects of air pollution on public health and strengthening environmental management in Sucre.

Keywords: Air quality, atmospheric pollutants, environmental management, monitoring network, health alerts.

Citación: Chavarría E. (2025). Modelación de dispersión de partículas suspendidas totales generado por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante la herramienta Aermod View, *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(4), 129-136

Introducción

La calidad del aire es un factor determinante para la salud de la población y para el mantenimiento de condiciones ambientales adecuadas en las ciudades. En los últimos años, la contaminación atmosférica se ha consolidado como una de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial, debido a su relación directa con el incremento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares y al deterioro de la calidad de vida (Jasarevic, 2014). En América Latina, esta situación se ve intensificada por el crecimiento urbano e industrial y por la limitada implementación de mecanismos efectivos de control ambiental (Ocampo & Martínez, 2020).

En la ciudad de Sucre, la contaminación atmosférica se ha vuelto un problema cada vez más visible. Si bien el municipio cuenta con una Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, la información disponible presenta limitaciones en cuanto a cobertura y representatividad, lo que dificulta comprender la distribución espacial de los contaminantes y evaluar el impacto de las fuentes fijas industriales (Informe Anual, 2023). Además, la ausencia de inventarios de emisiones y de estudios de modelación de dispersión restringe la formulación de medidas preventivas y de políticas públicas orientadas a la gestión de la calidad del aire (Compendio Normativo de Gestión Ambiental, 2021).

En este contexto, los modelos de dispersión atmosférica se han consolidado como herramientas clave para evaluar el comportamiento de los contaminantes, integrando información de emisiones, meteorología y topografía. El modelo AERMOD View ha sido ampliamente aplicado en estudios desarrollados en ciudades de Latinoamérica para identificar zonas de mayor impacto ambiental y analizar la influencia de las condiciones meteorológicas en la dispersión del material particulado (Reyes Ureta, 2020; Rodríguez & Guerrero, 2022; Vera & Quispe Chávez, 2023).

En ese marco, el presente estudio tiene como objetivo modelar la dispersión de partículas suspendidas totales (PST) generadas por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante AERMOD View, comparar los resultados con la normativa nacional vigente y aportar información técnica que contribuya al fortalecimiento de la gestión ambiental y a la protección de la salud de la población.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con un diseño no experimental de corte transversal y un alcance descriptivo–explicativo. El área de estudio correspondió al municipio de Sucre, Bolivia, considerando zonas urbanas y periurbanas con presencia de fuentes fijas industriales.

La población estuvo conformada por todas las fuentes fijas industriales con potencial de emisión de partículas suspendidas totales (PST) en el municipio. La muestra se seleccionó mediante un muestreo no probabilístico por criterio e incluyó 20 establecimientos industriales, priorizando aquellos con información técnica completa y confiable. La muestra estuvo conformada por ocho industrias que utilizan calderos a gas natural, tres ladrilleras, siete fábricas artesanales de cal y yeso, una calera y una cementera.

La información primaria se obtuvo mediante entrevistas estructuradas dirigidas a los responsables de las industrias, complementadas con revisión documental de registros ambientales e informes técnicos. Se recopilaron datos sobre consumo de combustible, horas de operación, procesos productivos y características de las chimeneas, tales como altura y diámetro.

Las emisiones de PST se estimaron aplicando los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), establecidos en el compendio AP-42.

Los datos meteorológicos utilizados correspondieron a registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y fueron procesados mediante el preprocesador AERMET. La información topográfica se procesó utilizando AERMAP.

La modelación de la dispersión de PST se realizó con el software AERMOD View, generando concentraciones horarias, promedios de 24 horas y promedios anuales, así como mapas de isoconcentraciones. Los resultados obtenidos se compararon con los límites establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica vigente, con el fin de evaluar el cumplimiento normativo y proponer lineamientos preventivos para la gestión ambiental en la ciudad de Sucre

Resultados

Inventario y distribución espacial de las fuentes fijas industriales

Se identificaron 20 fuentes fijas industriales con potencial de emisión de partículas suspendidas totales (PST) en el municipio de Sucre. Las fuentes fueron clasificadas en puntuales y de área, en función del tipo de proceso productivo y del mecanismo de liberación de emisiones a la atmósfera.

Las fuentes puntuales incluyeron ocho industrias con calderos a gas natural, tres ladrilleras y una industria cementera, cuyas emisiones se canalizan principalmente a través de chimeneas. Las fuentes de área correspondieron a siete yeserías artesanales y una calera, caracterizadas por emisiones difusas asociadas a procesos de cocción, molienda y manipulación de materiales a cielo abierto.

La ubicación espacial de las fuentes industriales consideradas se presenta en la Figura 1, mientras que el inventario codificado de las industrias se resume en la Tabla 1.

Figura 1. Ubicación geográfica de las fuentes fijas industriales consideradas en el estudio.

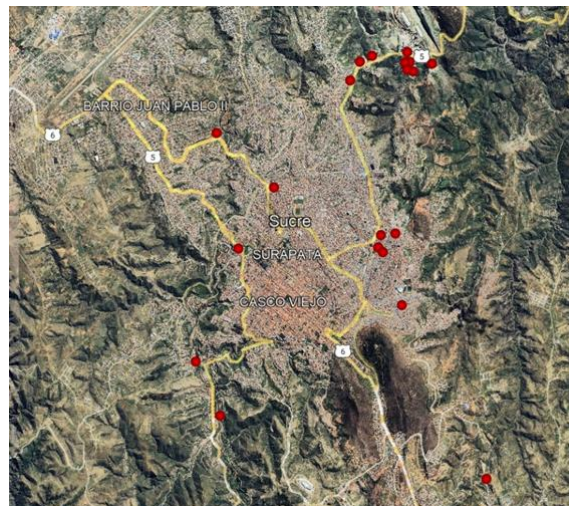


Tabla 1. Fuentes fijas industriales consideradas en la modelación de PST.

Código	Nombre de la empresa	Tipo de fuente
CAL-01	Empresa 1	Puntual
CAL-02	Empresa 2	Puntual
CAL-03	Empresa 3	Puntual
CAL-04	Empresa 4	Puntual
CAL-05		
CAL-06	Empresa 5	Puntual
CAL-07		
CAL-08	Empresa 6	Puntual
CAL-09		
CAL-10	Empresa 7	Puntual
CAL-11		
CAL-12	Empresa 8	Puntual
LAD-01	Empresa 9	Puntual
LAD-02	Empresa 10	Puntual
LAD-03	Empresa 11	Puntual
YES-01	Empresa 12	Área
YES-02	Empresa 13	Área
YES-03	Empresa 14	Área
YES-04	Empresa 15	Área
YES-05	Empresa 16	Área
YES-06	Empresa 17	Área
YES-07	Empresa 18	Área
CA-01	Empresa 19	Área
CEM-01		
CEM-02		
CEM-03		
CEM-04		
CEM-05	Empresa 20	Puntual
CEM-06		
CEM-07		
CEM-08		

Parámetros operativos y estimación de emisiones

Los parámetros técnicos de las fuentes fueron obtenidos mediante entrevistas estructuradas a los responsables de las industrias y verificación documental. La información recopilada incluyó coordenadas geográficas, altura y diámetro de las fuentes, tipo y consumo de combustible, horas de operación, velocidad de salida de los gases y temperatura, constituyendo la base de entrada para el modelo AERMOD View.

La estimación de emisiones de PST se realizó aplicando los factores de emisión AP-42 de la EPA, relacionando el nivel de actividad con el factor de emisión correspondiente. Debido a la ausencia de información confiable sobre sistemas de control de emisiones, se asumió una eficiencia de control nula. Los parámetros representativos utilizados en la modelación se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros operativos representativos de las fuentes fijas industriales.

Cód	Tipo de fuente	A*	D*	Vs* (m/s)	Temp (°K)
CAL-01	Caldera	8	0,4	6,12	328,2
LAD-01	Ladrillera	3,7	0,4	3,50	1173,1
YES-01	Yesería	3,5	2,5	2,50	1173,1

A*: Altura de la fuente (m)

D*: Diámetro de la fuente (m)

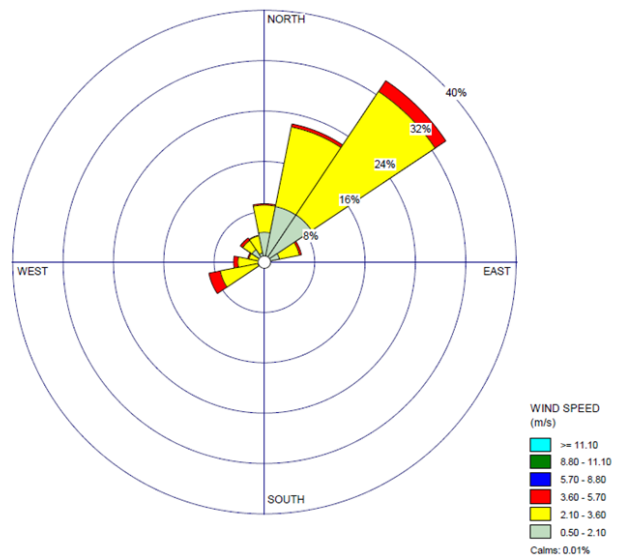
Vs*: Velocidad de salida de gases

Condiciones meteorológicas y patrón de dispersión

Los datos meteorológicos correspondientes al periodo enero–diciembre de 2024 fueron procesados mediante el programa AERMET. El análisis evidenció un predominio de vientos provenientes del noreste (NE), seguido por direcciones NNE y N, concentrando aproximadamente el 70 % de los registros horarios anuales.

Las velocidades predominantes se ubicaron en el rango de 2,10 a 3,60 m/s, lo que indica un régimen de viento moderado y relativamente estable. Este patrón condiciona la dispersión de contaminantes hacia los sectores sur y suroeste del área urbana de Sucre. La caracterización del viento se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Rosa de vientos del municipio de Sucre (enero–diciembre 2024).



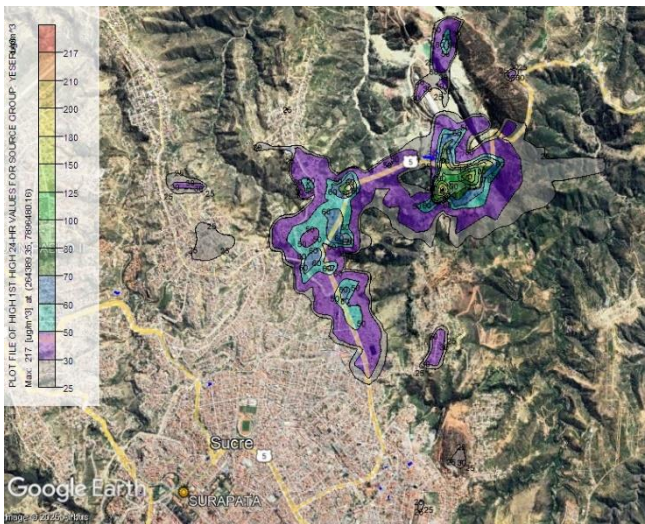
La rosa de vientos muestra la frecuencia y dirección predominante del viento durante el periodo analizado.

Modelación de la dispersión de PST

La modelación de la dispersión de PST se realizó con el software AERMOD View, integrando datos de emisiones, meteorología y topografía. Se evaluaron escenarios de promedio de 24 horas y promedio anual, tanto por tipo de fuente como de forma conjunta.

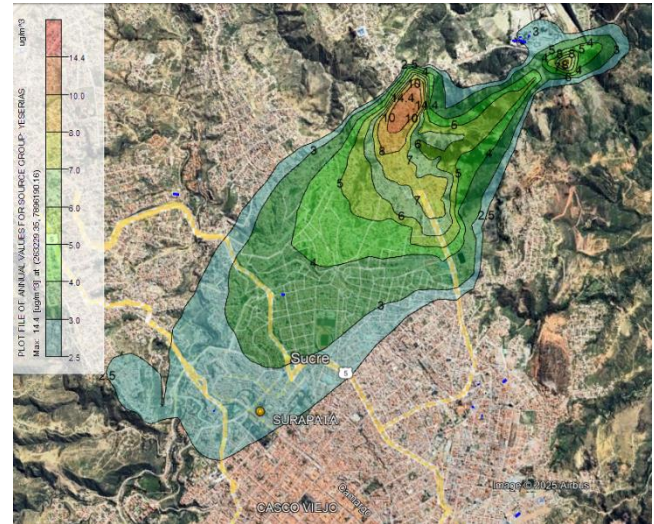
Las yaserías y la calera presentaron los valores más elevados de concentración. En el escenario de 24 horas, las concentraciones máximas alcanzaron 217 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, localizadas principalmente en áreas cercanas a las zonas de producción, con una dispersión amplia hacia sectores urbanos. En el escenario anual, las concentraciones máximas se redujeron a 14,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, manteniéndose de forma persistente sobre áreas pobladas. Estos resultados se presentan en las Figuras 3 y 4.

Figura 3. Concentración de partículas suspendidas totales (PST) modelada para yaserías y calera (promedio 24 h).



Las concentraciones se expresan en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor máximo modelado fue de 217 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con dispersión predominante hacia el sur y suroeste del municipio. PST: partículas suspendidas totales.

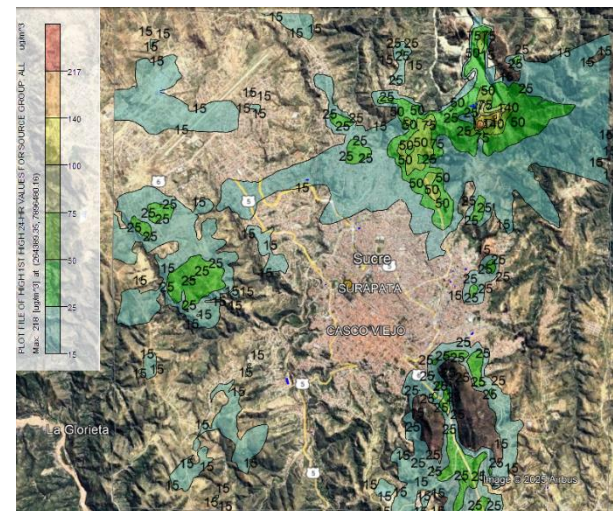
Figura 4. Concentración anual de partículas suspendidas totales (PST) modelada para yaserías y calera.



Las concentraciones corresponden al promedio anual, con valores máximos de 14,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ distribuidos sobre áreas urbanas del municipio. PST: partículas suspendidas totales.

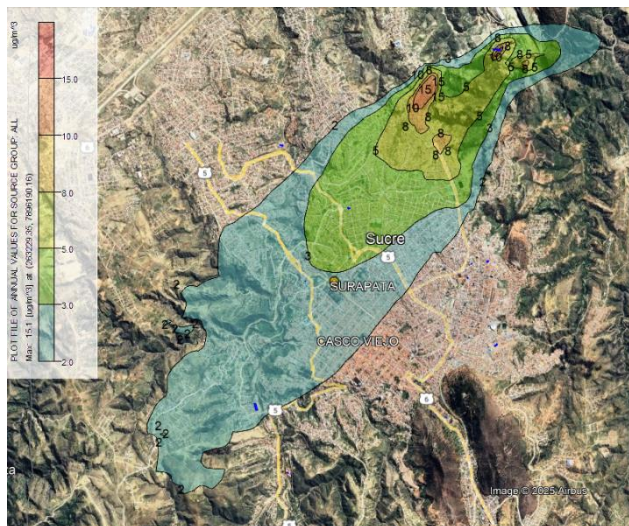
En el escenario conjunto que integra todas las fuentes industriales, las concentraciones máximas alcanzaron 218 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio de 24 horas y 15,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual, con mayores niveles en el norte y noreste del municipio. La dispersión conjunta se presenta en las Figuras 5 y 6.

Figura 5. Concentración de PST modelada para todas las fuentes industriales (promedio 24 h).



Chavarría E. Modelación de dispersión de partículas suspendidas totales generado por fuentes fijas industriales en el municipio de Sucre mediante la herramienta Aermod View

Figura 6. Concentración anual de PST modelada para todas las fuentes industriales.



Las concentraciones anuales alcanzaron valores máximos de $15,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con dispersión hacia el sur del área urbana. PST: partículas suspendidas totales.

Comparación con la normativa vigente

Las concentraciones modeladas fueron comparadas con los límites máximos permisibles establecidos por el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica (RMCA), que fija valores de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio de 24 horas y $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual de PST. La comparación se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de concentraciones modeladas de PST con los límites máximos permisibles del RMCA.

Fuente	T*	N*	Concentración según modelo	Cumplimiento
Calderos	24 horas	260	0,43	No excede
Ladrilleras			4,09	No excede
Yeserías			217	No excede
Cementera			35,8	No excede
Todas las fuentes			218	No excede
Calderos	Anual	75	No modelado	No excede
Ladrilleras			No modelado	No excede
Yeserías			14,4	No excede
Cementera			9,42	No excede
Todas las fuentes			15,1	No excede

T* Tiempo de exposición

N*Nivel máximo permisible

Discusión

La modelación de partículas suspendidas totales (PST) en Sucre permitió identificar que las yeserías y la industria cementera son los principales focos de impacto sobre la calidad del aire.

Los resultados muestran picos de concentración de hasta $218 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en periodos de 24 horas, localizados principalmente en las zonas norte y noreste de la ciudad. Aunque estos valores no superan el límite de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la normativa nacional (Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica, 2021), su proximidad al umbral confirma que estas son las áreas de mayor riesgo industrial. El aporte de este trabajo radica en que constituye una de las primeras aplicaciones del modelo AERMOD View en Sucre, utilizando datos procesados con AERMET y AERMAP para generar una línea base técnica sobre el comportamiento de contaminantes industriales (US EPA, 2024).

Estos resultados son consistentes con investigaciones realizadas en la región andina. En Cusco, Perú, se evidenció que las fuentes artesanales generaban concentraciones de PM10 condicionadas por la dirección y velocidad del viento (Vera & Quispe Chávez, 2023), un patrón idéntico al observado en Sucre. Asimismo, la relevancia de las industrias de materiales de construcción coincide con lo reportado en el Valle del Cauca (Ocampo & Martínez, 2020) y en Cúcuta (Rodríguez & Guerrero, 2022), donde las fuentes fijas mantienen un peso crítico en la degradación del aire urbano. Por otro lado, la problemática de las fuentes artesanales situadas cerca de áreas habitadas en Sucre refuerza lo observado en Cuenca, Ecuador, donde la falta de control en este sector aumenta la exposición directa de la población (Orellana, 2020).

Un resultado que se aparta de las expectativas iniciales fue el bajo aporte de las industrias que utilizan calderos a gas natural, cuyas emisiones resultaron mínimas ($0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en comparación con el resto de las fuentes analizadas.

En contraste, las yaserías artesanales mostraron un impacto significativamente mayor al previsto; a pesar de ser instalaciones de menor escala que la cementera, su contribución acumulada y su capacidad de dispersión hacia barrios urbanos las convierten en focos críticos de atención.

Este fenómeno de impacto elevado por fuentes pequeñas ya ha sido documentado en estudios similares donde las variaciones del viento jugaron un papel clave en el alcance de las emisiones (Ocampo & Martínez, 2020; Rodríguez & Guerrero, 2022).

La principal limitación del estudio fue la inexistencia de un inventario oficial de emisiones actualizado en el municipio de Sucre, lo que obligó al uso de factores de emisión AP-42 de la agencia estadounidense (US EPA, 2016). Aunque este es un recurso válido y aceptado en investigaciones de este tipo, puede introducir diferencias respecto a mediciones directas in situ. Asimismo, la falta de datos específicos sobre los ciclos operativos de los hornos artesanales obligó a trabajar con estimaciones promedio, lo cual simplifica la complejidad real de los procesos productivos locales.

Se recomienda que futuros estudios profundicen en la creación de inventarios detallados con mediciones directas en las chimeneas industriales. Es prioritario ampliar la red de monitoreo con sensores ópticos láser en las zonas críticas identificadas para medir partículas más finas como PM2.5. Finalmente, la implementación de un protocolo de alerta temprana, basado en las experiencias exitosas de ciudades con problemáticas similares (Rodríguez & Guerrero, 2022; Vera & Quispe Chávez, 2023), permitirá mitigar los impactos sanitarios y fortalecer la gestión de la calidad del aire en la ciudad de Sucre.

Conclusiones

El estudio permitió identificar que las yeserías y la cementera representan las principales fuentes fijas de partículas suspendidas totales (PST) en la ciudad de Sucre, con concentraciones elevadas en periodos de 24 horas, aunque sin superar los límites establecidos por la normativa vigente. Las ladrilleras presentan un impacto localizado, mientras que los calderos a gas natural muestran una contribución mínima. La aplicación del modelo AERMOD View, integrando información meteorológica y topográfica, demostró ser una herramienta adecuada para evaluar la dispersión de contaminantes en el ámbito urbano. Los resultados alcanzados cumplen los objetivos del estudio y constituyen un aporte relevante para la comprensión de la contaminación atmosférica industrial en Sucre, sirviendo como base técnica para futuros trabajos y para el fortalecimiento de la gestión de la calidad del aire.

Referencias

Gobierno Autónomo Municipal de Sucre. (2023). *Informe anual Red de Monitoreo de la Calidad del Aire Sucre (p. 34)*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:29af4aba-50ad-484c-9eb9-99548237084a>

Jasarevic, T. (2014, marzo 25). 7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica. *Organización Mundial de la Salud*. <https://www.who.int/es/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>

Ocampo, M. M., & Martínez, A. M. O. (2020). *Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado (PM10) a través de la herramienta AERMOD VIEW*. UNAD CEAD Palmira.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2021). *Reglamento en materia de contaminación atmosférica*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:b58465af-76b0-4f26-a545-2cabf85c5325>

Orellana, J. E. O. (2020). *Inventario de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes fijas de la zona urbana del cantón Chordeleg*.

Prashant, K., Morawska, L., & Martani, C. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>

Reyes Ureta, G. M. (2020). *Evaluación del Transporte y Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por la Refinería "La Libertad" Mediante el Modelo Aermod View*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:8c8e6274-0675-4a6f-8578-ed7c36e1a9a0>

Rodríguez, J. T. Y., & Guerrero, S. S. (2022). *Plan de Prevención, Reducción y Control de la Contaminación del Aire Cúcuta-Región (p. 42)*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:c8b58240-ee52-4395-809d-26cee45f1ea3>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2016, septiembre 26). *AP-42: Recopilación de factores de emisión atmosférica de fuentes estacionarias* [Other Policies and Guidance]. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *Modelado de la dispersión de la calidad del aire* [Other Policies and Guidance]. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling>

Vera, V., & Quispe Chávez, E. H. (2023). Modelamiento de la dispersión de PM10 de las ladrilleras del distrito de San Jerónimo, Cusco. *Revista de Ciencias Ambientales*, 40(5), 2. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.40.5.2>