ARTÍCULO ORIGINAL
10.23670/RC.2026.01.01

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL DEPARTAMENTO DE SANTA CRUZ (BOLIVIA) DURANTE 2024

DIAGNOSIS OF AIR QUALITY IN THE DEPARTMENT OF SANTA CRUZ (BOLIVIA) DURING 2024

Abraham Medardo Montaño Suarez1; María Graciela Quevedo Cataño2; Cirilo Severich Froilan3; Rodrigo Augusto Ferreira de Souza4.
[1,2,3]Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, Facultad Ciencias Exactas y Tecnología, Laboratorio académico y de investigación de ingeniería ambiental.
[4]Universidad del Estado de Amazonas, EST/UEA – Escola Superior de Tecnología
***Correspondencia:** gracielaquevedo@gmail.com https://orcid.org/0000-0001-7749-5724

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo analizar las concentraciones de partículas finas ($PM_{2,5}$) durante la gestión 2024, mediante un enfoque mixto y un diseño longitudinal. Los resultados evidencian que el monitoreo gubernamental presenta limitaciones en su cobertura y ha experimentado fallas técnicas persistentes desde 2022 en la estación de referencia de Santa Cruz de la Sierra. El acceso a información oficial para el presente estudio se limitó a documentos disponibles hasta la gestión 2023. A partir de estos hallazgos, se creó el Centro de Investigación y Monitoreo de la Calidad del Aire (CIMCA), con fines académicos y de investigación, se logró implementar una red de monitoreo en seis puntos: tres en el área urbana y dos en zonas periurbanas de Santa Cruz de la Sierra y uno en el municipio de Camiri. Adicionalmente, se generaron siete puntos virtuales mediante modelación matemática en municipios con alta incidencia de incendios forestales. Los resultados muestran que las concentraciones de $PM_{2,5}$ durante 2024 superaron el límite diario recomendado por la normativa nacional (NB 62011:2018) y por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En particular, entre julio y octubre, los niveles registrados alcanzaron valores hasta 18 veces superiores al límite diario recomendado (15 $\mu g/m^3$). El análisis de varianza (Kruskal-Wallis) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los puntos de monitoreo, siendo las zonas periurbanas las más afectadas. En conclusión, existe la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo y estandarizar metodologías de medición para mitigar los impactos en la salud pública y el medio ambiente.

Palabras claves: Calidad del aire; contaminación del aire; vigilancia del medio ambiente; índice de calidad del aire.

ABSTRACT

This study aimed to analyze fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentrations during 2024 using a mixed-methods approach and a longitudinal design. The results show that government monitoring has limitations in its coverage and has experienced persistent technical failures since 2022 at the reference station in Santa Cruz de la Sierra. Access to official information for this study was limited to documents available up to 2023. Based on these findings, the Air Quality Research and Monitoring Center (CIMCA) was created for academic and research purposes. A monitoring network was implemented at six points: three in the urban area and two in peri-urban areas of Santa Cruz de la Sierra, and one in the municipality of Camiri. Additionally, seven virtual points were generated using mathematical modeling in municipalities with a high incidence of forest fires. The results show that $PM_{2.5}$ concentrations during 2024 exceeded the daily limit recommended by national regulations (NB 62011:2018) and by the World Health Organization (WHO). Specifically, between July and October, recorded levels reached values up to 18 times higher than the recommended daily limit (15 $\mu g/m^3$). Analysis of variance (Kruskal-Wallis) revealed statistically significant differences between monitoring points, with peri-urban areas being the most affected. In conclusion, there is a need to strengthen monitoring systems and standardize measurement methodologies to mitigate the impacts on public health and the environment.

Keywords: air quality; air pollution; environmental monitoring; air quality index.

Recepción: 03/12/25 **Aprobado:**07/04/2026

INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es representada con las concentraciones de contaminantes presentes en la atmósfera, las cuales permiten caracterizar el aire de una determinada región en relación con los valores de referencia, con el propósito de preservar la salud y bienestar de las personas (RMCA, 1995).

El aumento de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, tiene relación con el incremento de la población urbana, según datos del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, la previsión a nivel mundial es que en 2050 el 66% de la población viva en las grandes ciudades. Este incremento de la población llevará a un aumento del consumo energético, a su vez contribuyendo a las emisiones atmosféricos, acentuados por el número de vehículos a motor (Querol, 2018).

En el caso del parque automotor de Santa Cruz de la Sierra, ha tenido un incremento de 333% desde el 2003 (102.265 vehículos) al 2016 (340.086 vehículos), representando el 59% del total a nivel departamental.

De acuerdo con el estudio de Evaluación de Huella de Carbono y Huella Hídrica de la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra en 2014, realizado por la empresa consultora Servicios Ambientales con el apoyo del Banco de Desarrollo para América Latina (CAF), Climate and Development Knowledge Network (CDKN), en el cual, establecieron un inventario de las emisiones de Gases de efecto invernadero (GEI), identificando entre los principales precursores al parque automotor como responsable del 42%, seguido de un 23% a la operación del Relleno Sanitario, un 16% del sector industrial, un 13% del sector residencial, 7% del sector comercial y 0,1% asociado a la emisión de disolventes en procesos industriales.

Otro factor que contribuye al deterioro de la calidad del aire son los incendios forestales. En el departamento de Santa Cruz se registra la mayor incidencia a nivel nacional: según datos del INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Brasil), en el período 2003–2020, el 46% de los focos de quema de vegetación del país se concentró en este departamento (Quevedo Cataño, 2021). Además, estudios atmosféricos han demostrado que el transporte transfronterizo de humo procedente de incendios en Brasil puede desplazar grandes columnas de aerosoles hacia Bolivia, contribuyendo significativamente al incremento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la región (Freitas *et al*., 2005).

En el 2004 la Red MoniCA Santa Cruz inició sus operaciones bajo un Convenio Interinstitucional entre COSUDE - Swisscontact, el Gobierno Municipal de Santa Cruz y la Universidad Privada de Santa Cruz (UPSA), con una duración hasta el 2017 (Contraloría General del Estado, 2015; Swisscontact, 2018; Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2022).

Esta red realiza mediciones de los parámetros de Monóxido de carbono (CO), Ozono (O_3), Dióxido de nitrógeno (NO_2) y Material particulado (PM_{10}). El Municipio de Santa Cruz de la Sierra, cuenta con siete puntos de monitoreo: CEA Municipal, Santos Dumont, Plan 3000, Ex Terminal, Av. Banzer, UPSA y Fidalga. Entre los cuales en tres sitios monitorea el PM_{10} con dos equipos móviles y una estación de referencia en la Ex terminal, la cual se encuentra temporalmente sin operación (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2022).

Sin embargo, ante las limitaciones de cobertura espacial y operatividad de algunas estaciones tradicionales, ha cobrado relevancia el uso de equipos de última generación para el monitoreo de la calidad del aire a nivel global, se ha vuelto cada vez más común, especialmente con el desarrollo de sensores compactos de bajo costo. Estos dispositivos permiten una monitorización accesible y en tiempo real de los niveles de contaminación del aire, facilita la toma de decisiones informadas para mitigar los efectos negativos de la contaminación en la salud humana y el medio ambiente (Europea, 2024).

Los sensores compactos de bajo costo incorporan la interconexión de dispositivos físicos a través del Internet de las Cosas (IoT), permite el monitoreo en tiempo real de material particulado. Los datos recopilados resultan fundamentales para generar informes instantáneos, llenando vacíos espaciales y temporales de las redes de monitoreo municipal regulado, y ofreciendo información valiosa sobre la calidad del aire. Estos avances en la tecnología de sensores compactos están siendo aplicados en diversos contextos geográficos para evaluar la calidad del aire. Se han realizado estudios en diferentes países que demuestran la efectividad de estos dispositivos (Barkjohn, Holder, Frederich G., & Clements L., 2022).

En Perú, por Canturin *et al*. (2021), realizó la "Evaluación de la concentración de las partículas atmosféricas PM_{10} y $PM_{2.5}$, utilizando sensores compactos para la formulación de un plan de acción ambiental en Huancayo Metropolitano". En Colombia por Buitrago *et al*. (2022), "Estado del arte del uso de sensores de bajo costo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire por Material Particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$)". Fueron implementados en diferentes ciudades tales como Medellín, Cartagena, Cali, Bucaramanga, como un monitoreo suplementario e informativo, mostraron un rendimiento satisfactorio en comparación con instrumentos de referencia.

El uso de tecnologías de sensores en Bolivia se implementó en el municipio de Pando en 2017. El estudio realizado por Brown *et al*. (2019) de la Universidad Federal de Acre de Brasil, "Monitoreo del material particulado en tiempo real usando sensores compactos de bajo costo instalados en el sudoeste de la Amazonía", abarca la región trinacional amazónica de Madre de Dios (Perú), Acre (Brasil) y Pando (Bolivia). También existen puntos monitoreados con sensores en la Ciudad de La Paz (Universidad Privada Boliviana-UPB), Sucre (Gobierno Autónomo Municipal de Sucre - Red MoniCA) y Cochabamba (CleanAIRE).

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo realizar un diagnóstico de la calidad del aire en el Departamento de Santa Cruz, posteriormente, se ha implementado una red preliminar para la medición de partículas finas menores a 2.5 micrómetros de diámetro aerodinámico ($PM_{2.5}$), capturando información desde febrero y cubriendo principalmente durante la época de chaqueos críticos en el 2024.

Fueron instalados cinco sensores compactos en tiempo real, de los cuales tres en el área urbana y dos en el área periurbana en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, un sensor en provincia localizado en Camiri y creado siete puntos virtuales generados con el Modelo (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service) de la ECMW (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) para Santa Cruz de la Sierra, San Ignacio de Velasco, Yapacaní, San Julián, Ascensión de Guarayos, Camiri y Roboré.

La investigación es información útil para avanzar en el desarrollo de modelos matemáticos de dispersión y previsión de partículas finas, y los efectos en la salud pública. Así mismo, los resultados son valiosos para los gestores públicos del área de gestión de la calidad del aire y la información a la población sobre el estado de la contaminación del aire. De esta forma, se busca fomentar la ejecución de políticas públicas que promuevan la mejora de la calidad del aire y salud pública.

MATERIAL Y MÉTODOS

Tipo de Estudio

De acuerdo al nivel a diseño es no experimental de tipo longitudinal (Hernández Sampieri *et al*., 2006), con la recopilación y observación de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ en el 2024.

Área de estudio

La selección de ubicación y número puntos de muestreo para el área de estudio fue a partir de un criterio técnico siguiendo los lineamientos del Manual de Diseño, Implementación y Operación de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire para ciudades de Bolivia, dirección predominante de vientos y municipios más afectados por los incendios forestales en el Departamento de Santa Cruz. Dio lugar a la creación del Centro de Investigación y Monitoreo de la Calidad del Aire (CIMCA, 2025).

a) Sensores en superficie

El monitoreo del área urbana y periurbana del Municipio de Santa Cruz de la Sierra, se ha seleccionado cinco puntos de medición, de acuerdo al Manual de Diseño, Implementación y

Operación de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire para ciudades de Bolivia, se añadió un punto de medición en área provincial (Camiri) para contrastar entre área urbana (Santa Cruz de la Sierra) con mayor afluencia vehicular e industrias y un área sin esa perturbación.

El sensor en superficie utilizado en el monitoreo fue el modelo Flex y Sen del fabricante estadounidense PurpleAir. Los datos empleados para el análisis corresponden a lecturas de material particulado ($PM_{2.5}$) obtenidas mediante la plataforma de este fabricante, utilizando la opción de valores corregidos disponible en el sistema de descarga.

Específicamente, se trabajó con datos previamente ajustados mediante la corrección recomendada por la *United States Environmental Protection Agency*, basada en el modelo desarrollado por Barkjohn *et al*. (2022) el cual proporciona una ecuación empírica para mejorar la comparabilidad de las mediciones de sensores de bajo costo con métodos de referencia. En este sentido, no se aplicó directamente la ecuación de corrección, sino que se utilizaron los datos ya procesados bajo dicho modelo.

Cabe señalar que no fue posible realizar una calibración local mediante comparación con estaciones de referencia, debido a que la estación de monitoreo del municipio no se encontraba operativa durante el periodo de estudio. No obstante, los sensores utilizados eran equipos nuevos y calibrados de fábrica, lo que garantiza condiciones iniciales adecuadas para su desempeño en campo.

Adicionalmente, se realizaron inspecciones periódicas durante las campañas de monitoreo cada tres meses, incluyendo verificación del funcionamiento general del equipo, limpieza externa y revisión de posibles obstrucciones en las entradas de aire. Asimismo, se aplicaron procedimientos básicos de control de calidad de datos (Boxplot), mediante la identificación de valores atípicos o inconsistentes en las series registradas.
La utilización de la corrección EPA permite mejorar la calidad de los datos obtenidos; sin embargo, se reconocen las limitaciones asociadas a la ausencia de calibración local, propias de las condiciones operativas del estudio.

En la Figura 1 se observa los puntos de monitoreo del $PM_{2.5}$, en (Figura 1A) corresponde al área urbana y periurbana de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, cuenta con cinco puntos de monitoreo, (Figura 1B) un punto en provincia, es decir, en la ciudad de Camiri.



Figura 1. Localización de puntos de monitoreo en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra (A) y Camiri (B)

Nº	Puntos de medición	Código	Coordenadas UTM	Clasificación por tipo de zona (tráfico Vehicular)	Clasificación por tipo de actividad	Altura de toma de muestra	Inicio de medición
1	Módulo 251	LIA_UAGRM (251) _S1	X= 479228 Y= 8034854	Medio	Residencial/ Universitaria	5 m	21/02/2024
2	Museo Noel Kempff Mercado	LIA_UAGRM (Museo)_S2	X= 480723 Y=8032741	Alto	Zona Comercial	5 m	28/02/2024
3	Laboratorio de Electromecánica	LIA_UAGRM (LAB)_S3	X= 484125 Y=8036137	Alto	Zona Universitaria/ Industrial.	3 m	13/03/2024
4	Instituto de Investigación de Vallecitos	LIA_UAGRM (IIAV)_S4	X= 484387 Y=8042075	Bajo	Zona Universitaria/Agrícola	6 m	22/08/2024
5	Usuri	LIA_UAGRM (USURI)_S5	X= 483969 Y=8019162	Bajo	Zona residencial - periurbana	2 m	4/10/2024
6	Facultad Integral del Chaco	LIA_UAGRM (FICH)_S6	X= 444776 Y=7784779	Medio	Zona Universitaria provincia	4 m	12/08/2024

Cuadro 1. Puntos de medición de $PM_{2.5}$ sensores en superficie

b) Puntos virtuales

Para municipios asociado a chaqueos y quemas de la vegetación, fueron localizados en diferentes puntos cardinales referentes a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra (Figura 2 y Cuadro 2). referido al departamento de Santa Cruz, Zona Norte: Ascensión de Guarayos; Sur: Camiri; Noreste: San Julián y San Ignacio de Velasco; Este: Roboré; Noroeste: Yapacaní; Centro: Santa Cruz de la

Sierra. Los datos corresponden de satélites y aplicación de modelación matemática (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*) con el apoyo técnico del Proyecto Selva de la Universidad del Estado de Amazonas (Ribeiro & Souza, 2025). Los datos están disponibles desde septiembre de 2024.

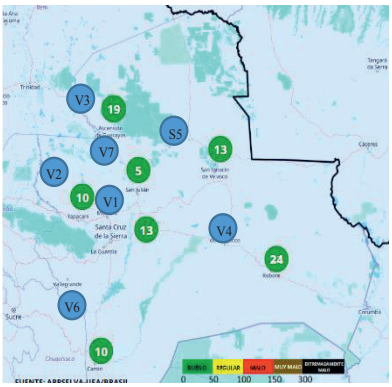


Figura 2. Localización de los puntos de monitoreo del material particulado de Puntos virtuales

Nº	Puntos de medición	N° Habitantes (Censo 2024)	Código	Coordenadas
1	Santa Cruz de la Sierra (Quinta Municipal)	1 606 671	LIA_UAGRM_V1	X= 476884 Y= 8034126
2	Yapacaní	57 683	LIA_UAGRM_V2	X= 406390 Y= 8075663
3	Ascensión de Guarayos	34 002	LIA_UAGRM_V3	X= 479815 Y= 8242758
4	Roboré	18 701	LIA_UAGRM_V4	X= 208980 Y= 7970869
5	San Ignacio de Velasco	67 610	LIA_UAGRM_V5	X= 717464 Y= 8188171
6	Camiri	32 656	LIA_UAGRM_V6	X= 445021 Y= 7784049
7	San Julián	44 635	LIA_UAGRM_V7	X= 540732 Y= 8130597

Cuadro 2. Puntos de medición de $PM_{2.5}$ puntos virtuales

En las fotografías 1 y 2 se muestra la implementación de los sensores en el Laboratorio de electromecánica y en la Facultad Integral del Chaco.



Foto 1. Instalación del sensor en el Lab. Electromecánica



Foto 2. Instalación del sensor en la Facultad Integral del Chaco

Análisis de los datos

Se realizó el estudio exhaustivo a los informes anuales de monitoreo publicados por el Ministerio de Medio Ambiente de Bolivia, siguiendo las Directrices Mundiales de Calidad de aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) y el Manual de Diseño, Implementación y Operación de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire para ciudades de Bolivia. Parte de la investigación situacional, se realizó una entrevista estructurada mediante Google forms a un especialista en monitoreo de la calidad del aire, además de reuniones con técnicos ambientales del Municipio de Santa Cruz de la Sierra y de la Gobernación de Santa Cruz.

Posteriormente, se realizó un diseño preliminar de una red de monitoreo de la calidad del aire a nivel departamental, con la determinación de puntos de medición representativos, se instalaron sensores en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra en el área urbana (tres sensores), periurbana (dos sensores) y provincia (un sensor en Camiri). Además, se creó siete puntos virtuales con modelación matemática.

Los datos de las concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron analizadas respecto a la NB 62018:2018 de Calidad del aire - Índice de la contaminación atmosférica diario y la NB 62011:2018 de los Límites permisibles de contaminantes atmosféricos del Exterior y se realizó la comparación con las directrices de la OMS 2021.

Para el cálculo del índice de calidad de aire fue utilizado la fórmula matemática (Ecuación 1) de la NB 62018/2018 y se comparó con el método de cálculo del EPA de EE.UU. (Ecuación 2), los valores límites superiores e inferiores fueron extraídos de la misma normativa (U.S. Environmental Protection Agency, 2024).

Ecuación 1. NB 62018/2018

$$\mathbf{ICA} = \mathbf{Máx}(\mathbf{I_{i1}}, \mathbf{I_{i2}})$$

$$\mathbf{I_i} = \frac{(\mathbf{C_i}) * \mathbf{100}}{\mathbf{VLP_i}}$$

Donde:

ICA = Índice de calidad del aire

I_{i1} = Índice del contaminante i1

I_{i2} = Índice del contaminante i2

VLP_i = Valor límite del contaminante i

Ecuación 2. EPA EEUU

$$\mathbf{I_p} = \frac{\mathbf{I_{hi}} - \mathbf{I_{Lo}}(\mathbf{C_p} - \mathbf{BP_{Lo}}) + \mathbf{I_{Lo}}}{\mathbf{BP_{hi}} - \mathbf{BP_{Lo}}}$$

I_p = Valor del índice para el contaminante p

C_p = Concentración del contaminante

BP_{hi} = Límite superior de concentración del índice de calidad del aire según contaminante y período de permanencia

BP_{Lo} = Límite inferior de concentración del índice de calidad del aire según contaminante y periodo de permanencia

I_{hi} = Valor de ICA (índice de calidad del aire) superior según el rango de concentración

I_{lo} = Valor de ICA (índice de calidad del aire) inferior según el rango de concentración

También se analizó estadísticamente los datos, se aplicó normalidad a las concentraciones diarias Kolmogorov Smirnov. Para el análisis de la variación entre puntos se utilizó gráfico de Box Plot y Kruskal Wallis. Se aplicó el estadístico de Bland-Altman para determinar si el uso de ambos métodos de cálculo de ICA es indistinto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del sistema de monitoreo actual

El monitoreo de la calidad del aire en el Departamento de Santa Cruz es realizada únicamente en el municipio de Santa Cruz de la Sierra. Los hallazgos mediante la observación documental de los informes anuales del Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra (2022- 2023), del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2010-2021) y del informe de Auditoría de la Contraloría general del Estado (2015). Se realizó tomando como referencia el Manual Técnico para el Diseño, Implementación y Operación de Redes de Monitoreo de Calidad de Aire en Bolivia (2016) del Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Directrices de la OMS (2021).

Según la auditoria gubernamental (Estado, 2015) de desempeño ambiental (2015), en resumen, indica que:

Los resultados del examen, muestran que las entidades sujeto de examen no realizaron acciones suficientes y adecuadas que permitan reducir la contaminación atmosférica que genere el parque

automotor, las ladrilleras artesanales y las unidades industriales por tanto, se puede concluir que por un lado la ausencia de acciones y por otra las deficiencias durante la realización de la auditoría afectaron negativamente el desempeño ambiental de las entidades examinadas y no permitieron asegurar que la mitigación de las fuentes mencionadas, contribuya a la protección del medio ambiente y la salud pública.

En ese contexto del informe de la auditoría ambiental realizada en el área metropolitana de Santa Cruz, entre ellas al municipio de Santa Cruz de la Sierra. El municipio requiere la mejora de la implementación para la verificación de emisiones vehiculares, mejorar el control a las unidades industriales del parque industrial, así como unidades industriales dispersas en la ciudad, ya que es mediante los procesos de Licenciamiento Ambiental y Control de los Informes de Monitoreo para asegurar el cumplimiento del control de la calidad ambiental.

Por otro lado, el informe de auditoría, las causas de la contaminación del aire fueron destacado el parque automotor, unidades industriales y ladrilleras artesanales, sin embargo, no incluyó un análisis del aporte de la contaminación por incendios forestales debido a que los datos de incendios generados en el departamento de Santa Cruz, corresponden en su mayoría a municipios que no se encuentran dentro del área metropolitana. Cabe destacar sobre las causas de las elevadas concentraciones de algunos parámetros como $PM_{2.5}$, PM_{10} y CO, en épocas de chaqueos y quemas de la vegetación, entre los meses de julio a octubre, no fueron abordados.

Asimismo, de acuerdo a informes y artículos publicados por el Programa Aire Limpio, desarrollado por la Swisscontac el informe menciona que hasta el 75 % de la contaminación atmosférica en la ciudad sería atribuible a fuentes móviles; sin embargo, esta información no pudo ser verificada documentalmente en el marco del presente estudio. No obstante, los resultados obtenidos evidencian que los aportes exógenos asociados a incendios forestales, chaqueos y quemas de vegetación pueden generar incrementos sustanciales en las concentraciones de material particulado fino ($PM_{2.5}$), particularmente durante la temporada seca. Estos eventos, vinculados al transporte regional de contaminantes, pueden superar el impacto de las fuentes locales en determinados periodos, configurando episodios críticos de deterioro de la calidad del aire.

Respecto a los informes anuales de monitoreo, se observa que, si bien el Gobierno Municipal de Santa Cruz de la Sierra realiza mediciones técnicas de $PM_{2.5}$, estos datos no son integrados ni publicados en sus reportes oficiales de calidad del aire. También se refleja a nivel nacional (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2022), podría atribuirse a las limitaciones de la legislación vigente: el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica no regula este parámetro, mientras que la norma NB 62011:2018, que sí lo contempla, es de cumplimiento voluntario y no obligatorio para los entes fiscalizadores.

Así mismo, el Municipio no cuenta con suficientes números de sitios de monitoreo para partículas finas, ya que se realiza en tres sitios la medición del PM_{10}, no obstante, según el número de población expuesta en el área urbana y periurbana, entre uno a cuatro millones de habitantes debe contar con cinco estaciones de monitoreo como lo establece el Manual técnico de diseño de red de monitoreo de la calidad del aire del Ministerio de Medio Ambiente y Aguas (Ministerio de Medio Ambiente y Aguas, 2016).

Por otro lado, desde el 2022 a 2024, la estación de referencia (Ex Terminal) no estuvo operando de manera normal, debido a problemas técnicos de acuerdo al informe anual (Gobierno Municipal de Santa Cruz de la Sierra 2023 y 2024). Sin embargo, este problema es crítico debido a la importancia de recolectar información en tiempo real y en las 24 horas, para ser comparable con la normativa nacional y analizar las concentraciones a las cuales la población está expuesta.

De acuerdo a los estándares de la OMS 2021, directrices actualizadas, indica la necesidad y prioridad el monitoreo del parámetro $PM_{2.5}$, debido al mayor impacto en la salud de la población al tener mayor capacidad de ingreso al sistema respiratorio en comparación al PM_{10}.

Para complementar la investigación cualitativa – descriptiva se realizó una entrevista estructurada al especialista Ing. Pablo Aldunate, quien trabajó en las operaciones de Red MoniCA La Paz en el Gobierno Municipal, y desde 2014 a la fecha es CEO de la empresa Étnica, especializada en gestión, evaluación, control y monitoreo de la calidad del aire con diversos trabajos ejecutados para el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia.

A la pregunta sobre los desafíos en la gestión de la calidad del aire en el Departamento de Santa Cruz, Aldunate afirma tres aspectos como: 1. La falta de presupuesto para la contratación y capacitación del personal, adquisición y mantenimiento de equipos para el monitoreo del aire. Podría estar asociado al problema del funcionamiento de equipos como se indica en el informe de monitoreo municipal (Sierra, 2025). *2*. El incumplimiento de la legislación y 3. Dificultades para controlar las diversas fuentes de contaminación. La legislación nacional referente a calidad del aire está vigente desde hace 30 años, el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica del año 1995, a partir del cual no se ha tratado la actualización e incorporación de parámetros necesarios como el $PM_{2.5}$ para un cumplimiento obligatorio para tomar en cuenta en los monitoreos ambientales de actividades, obras o proyectos a nivel nacional.

Sobre la educación de la población respecto a los problemas de la calidad del aire, Aldunate percibe que la educación de la población respecto a la conciencia de los problemas de calidad de aire es escasa y deficiente, en muchos casos sugiere que los problemas de salud asociados a la contaminación del aire son atribuidos a otras causas.

Variabilidad de las concentraciones de PM $_{2.5}$ medidos por sensores en superficie

Para el análisis estadístico de normalidad y varianza se utilizaron datos diarios correspondientes al periodo en que los seis sensores estuvieron operativos de manera simultánea, comprendido entre septiembre y diciembre de 2024. Este intervalo fue seleccionado por representar un conjunto común de datos entre todos los sensores.

En la Figura 3 se presentan los gráficos de distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ para los seis puntos de monitoreo: cinco ubicados en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y uno en el municipio de Camiri. Para evaluar la normalidad de los datos, se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S), utilizando un nivel de significancia del 5%.

Los resultados indican que ninguno de los conjuntos de datos se ajusta a una distribución normal. En todos los casos, el valor p fue significativamente inferior a 0.05, lo cual conlleva el rechazo de la hipótesis nula de normalidad. Específicamente, se obtuvieron los siguientes valores: S1 Módulo 251 (K-S = 0.35; $p = 3.8\times10^{-9}$), S2 Museo Noel Kempff (K-S = 0.33; $p = 2.6\times10^{-8}$), S3 Laboratorio Electromecánica (K-S = 0.35; $p = 3.1\times10^{-9}$), S4 Instituto de Vallecito (K-S = 0.36; $p = 9.2\times10^{-10}$), S5 Usuri (K-S = 0.33; $p = 4.3\times10^{-8}$) y S6 Camiri (K-S = 0.32; $p = 1.3\times10^{-7}$).

Estos resultados reflejan que las concentraciones de material particulado fino ($PM_{2.5}$) no siguen un comportamiento estadístico normal, lo cual es consistente con la naturaleza de los datos ambientales, que suelen presentar asimetrías o picos relacionados con eventos atípicos como incendios forestales o condiciones meteorológicas adversas.

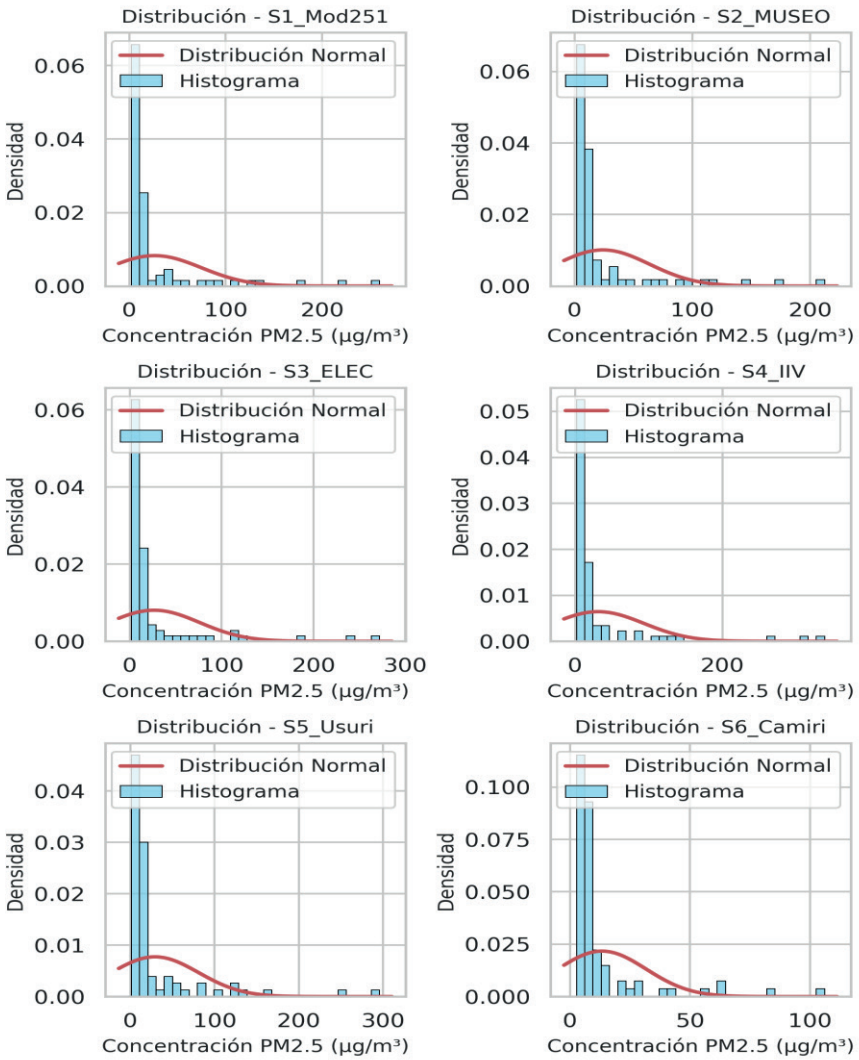


Figura 3. Test de normalidad de los datos de $PM_{2.5}$ de cuatro puntos de monitoreo

En la Figura 4 se muestra la distribución estadística de las concentraciones diarias de material particulado fino ($PM_{2.5}$) registradas en seis puntos de monitoreo: cinco ubicados en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y uno en el municipio de Camiri. El gráfico tipo box plot permite visualizar la mediana, los rangos intercuartílicos (Q1–Q3), y los valores atípicos (outliers).

Se pueden observar una distribución asimétrica y presencia de valores extremos, en todos los sensores se evidencian valores atípicos muy elevados, algunos superiores a los 300 $\mu g/m^3$.

El sensor S6 Camiri, ubicado fuera del área urbana, muestra concentraciones medianas y variabilidad relativamente más bajas, aunque también presenta algunos valores extremos. El resto

de los sensores (S1, S2, S3 y S4) muestran una distribución similar en cuanto a la mediana y amplitud intercuartílica, aunque con diferencias en la frecuencia y magnitud de los valores atípicos.

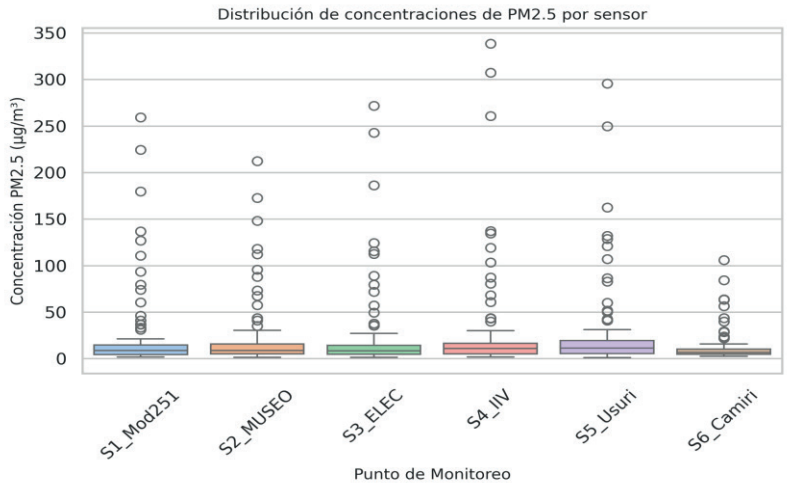


Figura 4. Box Plot de los puntos de monitoreo con sensores en supeficie

Adicionalmente, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para comparar las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas en los seis puntos de monitoreo. El resultado obtenido fue un estadístico $H(5) = 7.847$ con un valor $p = 0.164$. Dado que el valor p es mayor al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, esto indica que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones de concentraciones de $PM_{2.5}$ de los seis sensores evaluados. Por lo que se concluye que sus resultados corresponden a poblaciones con características similares, esto puede sugerir que los niveles de contaminación por $PM_{2.5}$ son similares en magnitud y distribución entre los diferentes sitios de monitoreo durante el periodo analizado.

En la Figura 5 se muestra las concentraciones promedio de los 5 puntos monitoreados en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, en el cual en fecha 8 de octubre se tuvo el mayor registro llegando a 276 *ug*/m^3. Respecto a los límites permisibles de la NB 62011 y la OMS 2021, se observa que desde el mes de julio un incremento de las concentraciones llegando a sobrepasar los límites respectivos. En apéndice se encuentra gráficos mensuales por punto de monitoreo (Figura 9).

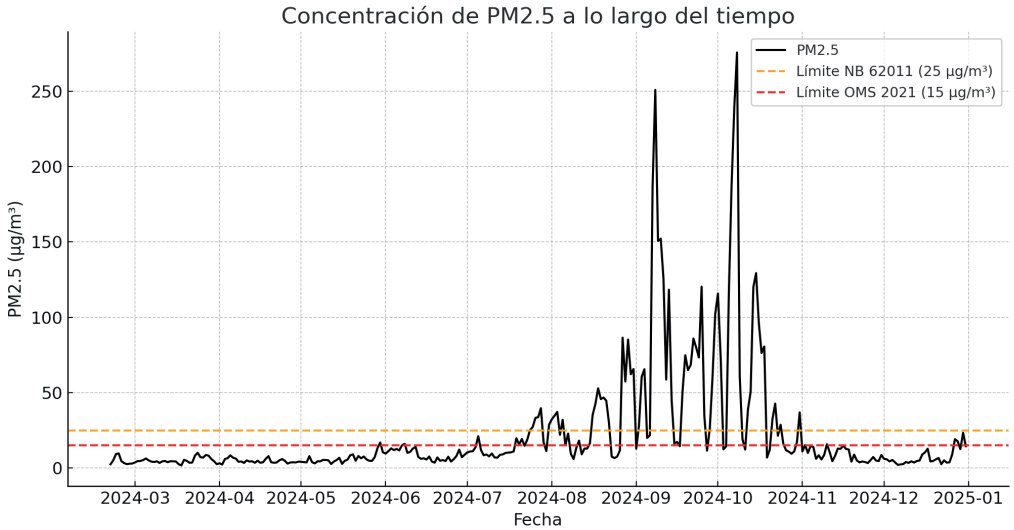


Figura 5. Promedio de la concentración de $PM_{2.5}$ (basado en 5 puntos de medición) en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra

Así mismo se ha analizado la variación espacial de las concentraciones mediante interpolación de los cinco puntos en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. En el cual, mayores concentraciones fueron detectadas en el punto de monitoreo de la zona del Norte en el área periurbana, esto podría estar asociado a la dinámica de la circulación atmosférica durante episodios de chaqueos y las diferentes barreras que tiene el centro de la ciudad por edificaciones, túneles de viento por la circulación de vehículos en avenidas principales, así como variables como temperatura de la superficie y presión atmosférica.

En la Figura 6 se muestra el índice de calidad del aire determinado según la NB 62018:2018 y el EPA de los EE.UU. Se observa diferencias entre ambos valores. Esto de debe a que ambos métodos utilizan criterios diferentes, por un lado, la ecuación de la NB 62018 toma en cuenta únicamente el valor límite permisibles y el EPA utiliza rangos superiores e inferiores, conlleva a una diferencia de los valores del ICA. De modo que, el ICA calculado con la NB según el estadístico Bland-Altman podría subestimar o sobreestimar la calidad del aire en ciertos niveles de concentración (media de las diferencias>0), mientras que el EPA, al usar rangos más detallados, puede reflejar con mayor precisión las variaciones en la contaminación atmosférica. Por lo tanto, la elección del método influye directamente en la interpretación de los resultados y en las decisiones relacionadas con la gestión ambiental y la salud pública. Al mismo tiempo se observa que ambos métodos identifican una variabilidad temporal de la calidad del aire en el área de estudio.

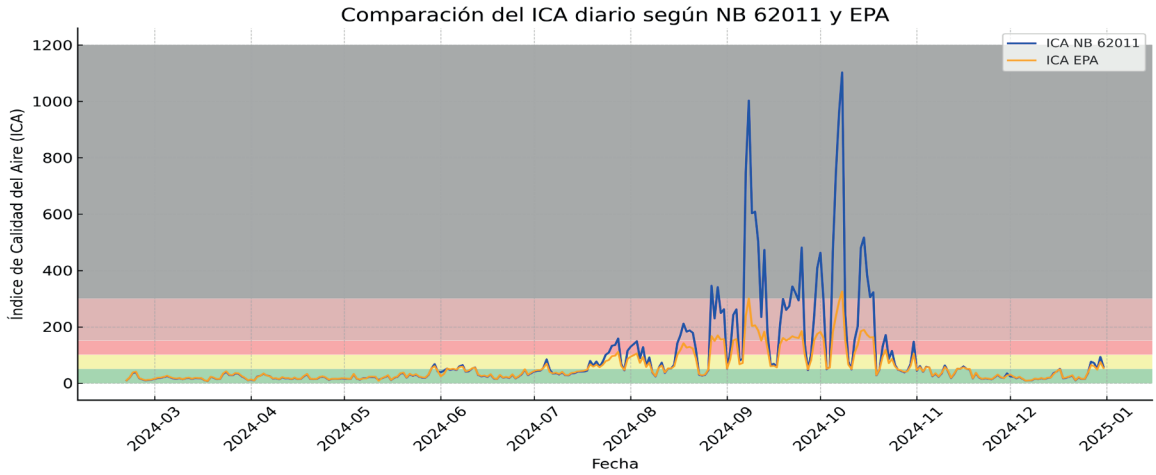


Figura 6. Índice de calidad del aire a partir del promedio de 5 puntos de medición de $PM_{2.5}$ NB 62018/2018. Los rangos de colores de fondo significan el índice de calidad del aire.

En la Figura 7 se presenta el gráfico de episodios críticos, elaborado a partir del promedio de los cinco puntos de monitoreo. Para su clasificación se adoptaron los umbrales establecidos en la normativa de Colombia (Resolución N.° 02840) para material particulado fino ($PM_{2.5}$), que define los siguientes niveles: Prevención (>55 $\mu g/m^3$), Alerta (>150 $\mu g/m^3$) y Emergencia (>250 $\mu g/m^3$). Esta referencia fue utilizada debido a que en Bolivia la Norma Técnica de Planes de Contingencia para Estados de Alerta por Contaminación del Aire (Resolución Administrativa VMABCCGDF N.° 041/2018) establece niveles únicamente para PM_{10} y no contempla valores específicos para $PM_{2.5}$.

Por tanto, en dos ocasiones se registró el episodio Emergencia el 8/09/2024 y 8/10/2024, cuatro estados de alerta y 27 episodios de prevención.

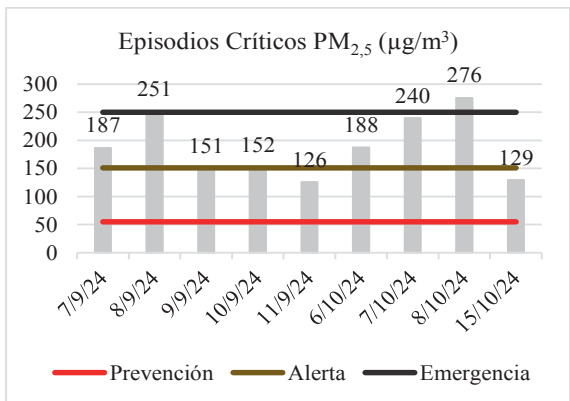


Figura 7. Episodios críticos de $PM_{2.5}$ Variabilidad de los datos monitoreados de $PM_{2.5}$ en puntos virtuales

Se realizó el monitoreo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ mediante la creación de puntos virtuales mencionados en el cuadro 2. Se inició desde el 1 de septiembre del año 2024, esto con el apoyo de la universidad del Estado del Amazonas de Brasil - UEA, quien proporciona información en la plataforma App Selva (Lima, y otros, 2025). Los datos son generados a partir de sensores en superficie, datos de satélite de la NASA y del modelo CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*) de la ECMW (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Este modelo es reconocido por ser el más preciso en monitoreo de la calidad del aire (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, 2024).

En la Figura 8 se muestra las concentraciones del $PM_{2.5}$ de los municipios monitoreados, respecto a la NB 62011:2018. Concentraciones atípicas fueron observadas en el Municipio de Ascensión de Guarayos con 1451 ug/m^3, seguido del Municipio de San Julián con 382 ug/m^3. Generalmente en los meses de septiembre y octubre en todos los municipios monitoreados se observan concentraciones por encima del límite permisible, representó un riesgo para la salud de la población expuesta.

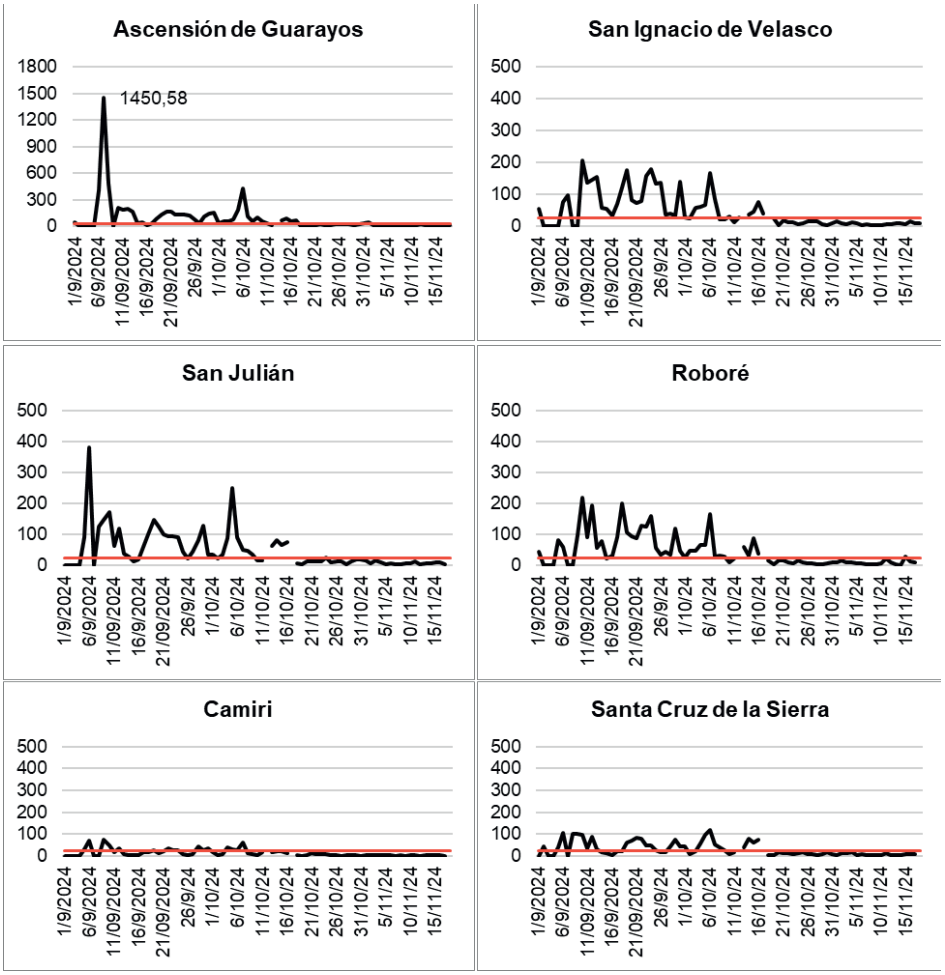


Figura 8. Concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ en los municipios con datos del modelo CAMS

Diversos estudios han demostrado que la exposición a concentraciones elevadas de $PM_{2.5}$ tiene efectos adversos sobre la salud humana, incluyendo un aumento en las enfermedades respiratorias, cardiovasculares y un incremento en la mortalidad prematura (Orellano *et al*., 2020; Zhongqi *et al*., 2021). En particular, los episodios de contaminación asociados a incendios forestales pueden aumentar el riesgo de hospitalizaciones por enfermedades respiratorias agudas y exacerbar condiciones preexistentes (Jie & Gerard, 2020).

Los sensores compactos de bajo costo utilizados en este estudio demostraron ser una herramienta eficaz para evaluar la calidad del aire en tiempo real, coincide con investigaciones previas que validan su precisión y utilidad en contextos de monitoreo ambiental (Barkjohn *et al*., 2022). La incorporación de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) permite no solo una recopilación de datos detallada, si no también permite informar a la población en tiempo real para fines de salud pública y difundir riesgos a la exposición de la contaminación (Europea, 2024).

El monitoreo suplementario mediante puntos virtuales con modelación CAMS, donde no existe una red de monitoreo en superficie, permitió identificar concentraciones atípicas en municipios con alta incidencia de chaqueos, como Ascensión de Guarayos y San Julián. Este enfoque innovador ha sido utilizado con éxito en otros países para complementar redes físicas de monitoreo y proporcionar una cobertura más amplia de la variabilidad espacial de la contaminación (Buitrago Mesa & Rodríguez Rodríguez, 2022).

Es así que el Centro Investigación y Monitoreo de la Calidad del Aire, inició la divulgación de los resultados a la población con el objetivo de informar el estado de la calidad del aire, en tiempo real y el promedio diario según la NB62018/18 (CIMCA, 2025).

Este estudio proporciona evidencia sólida de la necesidad de fortalecer el sistema de monitoreo de la calidad del aire en Santa Cruz, ampliar la red de estaciones fijas y virtuales, e implementar políticas públicas que prioricen la mitigación de los impactos de la contaminación atmosférica en la salud pública y el medio ambiente. Además, resulta fundamental difundir esta información entre la población general, fomentando la conciencia ambiental y promoviendo la participación ciudadana para prevenir y reducir los incendios y quemas de vegetación.

CONCLUSIONES

El diagnóstico de la calidad del aire en el departamento de Santa Cruz evidencia una infraestructura limitada para el monitoreo atmosférico a nivel departamental. Actualmente, la única red de monitoreo municipal formal es gestionada por el Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz

de la Sierra. Cabe señalar que, durante el periodo de recopilación y análisis de información para el presente artículo, únicamente se tuvo acceso a reportes oficiales hasta la gestión 2023, en los cuales no se evidenciaba la publicación sistemática de resultados correspondientes al parámetro $PM_{2.5}$. No obstante, es importante precisar que el municipio ha emitido reportes que incluyen este contaminante en las gestiones posteriores. La consideración del $PM_{2.5}$ resulta fundamental, dado que la Organización Mundial de la Salud lo reconoce como uno de los contaminantes atmosféricos más perjudiciales para la salud humana. Además, la cantidad de estaciones de monitoreo es insuficiente para la población, ya que se requieren al menos cinco puntos de medición.

En respuesta a esta limitación, se implementó una red de monitoreo con sensores compactos en tiempo real en tres puntos del área urbana y dos en periurbana, además de un punto en provincia, es decir en Camiri. Los registros mostraron concentraciones alarmantes de $PM_{2.5}$, con episodios críticos de emergencia entre septiembre y octubre, destacándose el 8 de octubre de 2024 con un valor máximo diario de 276 $\mu g/m^3$. Estos niveles superan ampliamente los límites establecidos por la NB 62011:2018 (25 $\mu g/m^3$) y las directrices de la OMS (15 $\mu g/m^3$) equivalente a 18 veces superior, un índice de calidad extremadamente malo, representa un riesgo grave para la salud pública.

El análisis estadístico (Kruskal-Wallis) no identificó diferencias significativas entre los seis puntos de monitoreo para el periodo analizado entre septiembre a diciembre, sin embargo, recalcando que las concentraciones más altas se registraron en áreas periurbanas. Esto resalta la influencia de factores como las barreras en el área urbana por edificaciones, túneles de viento por circulación vehicular, temperatura de la superficie y otras variables, implica la necesidad de una cobertura de monitoreo más amplia y representativa.

Los sensores compactos de bajo costo utilizados en este estudio demostraron ser herramientas eficaces para medir las concentraciones de $PM_{2.5}$ en tiempo real. Estos dispositivos ofrecen una solución viable para complementar las redes de monitoreo referenciales, proporcionando datos oportunos que facilitan la toma de decisiones para implementación de acciones de mitigación.

Los resultados destacan la necesidad de adoptar políticas públicas integrales para abordar las fuentes de contaminación atmosférica, fortalecer el monitoreo, regular los límites permisibles de calidad del aire en el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica y concienciar a la población y actualizar planes de contingencia para episodios críticos. La creación del Centro de Investigación y Monitoreo de la Calidad del Aire (CIMCA) es un paso clave para mejorar la vigilancia continua e investigación académica. Este estudio contribuye a la comprensión de la dinámica de la contaminación atmosférica en la región y proporciona una base sólida para futuras intervenciones que mitiguen los impactos negativos en la salud pública y el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIAGRÁFICAS

Barkjohn, K. K., Holder, A., Frederich G., S., & Clements L., A. (2022). Correction and Accuracy of PurpleAir PM2.5 Measurements… Sensors.' El artículo existe en Sensors, 22(24), 9669. DOI: 10.3390/s22249669

Brown, Foster & Duarte, Alejandro & Torres, Marta & Ascorra, Cesar & Reyes, Juan & Rioja-Ballivian, Guillermo & Reis, Vera & Melo, Antonio & Silva, Sonaira & Acho, Carmen. (2019). Monitoramento de fumaça em tempo real mediante sensores de baixo custo instalados na Amazônia sul-ocidental.

Buitrago Mesa, D., & Rodríguez Rodríguez, R. (2022). Publicación: Estado del arte del uso de sensores de bajo costo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire por Material Particulado (PM10 y PM2.5) en el territorio colombiano. Obtenido de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/e404fd13-39c2-4a17-b4ff-4d871a18e392

Canturin Cabrera, C., & Camayo Oré, A. (2021). Evaluación de la concentración de las partículas atmosféricas PM10 y PM2,5 para la formulación de su plan de acción en Huancayo Metropolitano.

CIMCA. (2025). *Centro de Investigación y Monitoreo de la Calidad del Aire*.

Copernicus Atmosphere Monitoring Service. (2024). Obtenido de https://atmosphere.copernicus.eu/

Estado, C. G. (2015). *Auditoría de desempeño ambiental sobre la contaminación atmosférica en el área metropolitana de Santa Cruz*.

Europea, C. (25 de enero de 2024). *Research and Innovation*. Obtenido de https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/es/projects/success-stories/all/sensores-de-bajo-coste-para-vigilar-mejor-la-calidad-del-aire

Freitas, S. R., Longo, K. M., Silva Dias, M. A. F., Silva Dias, P. L., Chatfield, R., Prins, E., Artaxo, P., Grell, G. A., & Recuero, F. S. (2005). Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. Environmental Fluid Mechanics, 5(1-2), 135–167. https://doi.org/10.1007/s10652-005-0243-7

Jie , C., & Gerard , H. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974.

Lima, G., Ribeiro, I., Filho, M., Trevisan, R., Andreoli, R., Lacerda, A., . . . Sauza, R. (2025). Uma Aplicação de Internet da Natureza para Monitoramento de Queimadas e da Qualidade do Ar na Amazônia. *Sociedade Brasilera de Computacao*. Porto Alegre. https://doi.org/10.5753/wcama.2025.8825.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2022). *informe nacional de calidad del aire Bolivia gestiones 2019, 2020 y 2021*. La Paz.

Ministerio de Medio Ambiente y Aguas. (2016). *Diseño, Implementación y Operación de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire para ciudades de Bolivia*.

Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$), nitrogen dioxide (NO_2), and ozone (O_3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. Environment International, 142, 105876. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876

Querol, X. (2018). *La calidad del aire en las ciudades*. Madrid: Fundación Gas Natural Fenosa.

Quevedo Cataño, M. G. (Diciembre de 2021). *Repositorio INPA*. Obtenido de https://repositorio.inpa.gov.br/

Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica (RMCA). (1995). Decreto Supremo No. 24176, 8 de diciembre de 1995. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. Recuperado de https://bolivia.infoleyes.com/norma/2227/reglamento-en-materia-de-contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9ricarmca

Ribeiro, I., & Souza, R. (2025). *Sistema Electrónico de Vigilancia Ambiental*. Obtenido de https://appselva.com.br/

Sierra, G. M. (enero de 2025). *Sistema de información ambiental*. Obtenido de http://snia.mmaya.gob.bo/web/modulos/PNGCA/

Swisscontact, F. S. (2018). *Informe 2003-2017*. La Paz, Bolivia.

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *https://document.airnow.gov*. Obtenido de https://document.airnow.gov/technical-assistance-document-for-the-reporting-of-daily-air-quailty.pdf

Zhongqi , L., Xiaona , L., Huan , S., Bilin , T., Beibei , Q., & Dan , T. (2021). Effects of short-term ambient PM2.5 exposure on the blood cell count and hemoglobin concentration among 82,431 people in eastern China. *Science of The Total Environment*. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972101113X. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146046