

Estudio de la contaminación ambiental y calidad del aire por emisiones del dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) del volcán Concepción durante el periodo 2024-2025, mediante el uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG)

STUDY OF ENVIRONMENTAL POLLUTION AND AIR QUALITY DUE TO SULFUR DIOXIDE (SO₂), CARBON MONOXIDE (CO), AND NITROGEN DIOXIDE (NO₂) EMISSIONS FROM CONCEPCIÓN VOLCANO DURING THE 2024–2025 PERIOD, USING REMOTE SENSING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS)

Hugo Otoniel Munguía*

hugo.munguia@uam.edu.ni; <https://orcid.org/0009-0005-0098-6951>

Universidad Americana*

<https://doi.org/10.62407/hb839539>

Recibido: 6/6/2026 | Aceptado: 20/6/2026

Palabras clave:

Teledetección, Resolución espacial, Datos vectoriales, Análisis espacial, Sentinel-5P.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la contaminación ambiental y la calidad del aire en el área del volcán Concepción, ubicado en la Isla de Ometepe, Nicaragua, durante el periodo 2024–2025, mediante el análisis de las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, utilizando datos satelitales obtenidos del sensor Sentinel-5P, los cuales fueron procesados en la plataforma Google Earth Engine y posteriormente analizados mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizando el software ArcGIS Pro (Agencia Espacial Europea [ESA], 2023; Google Earth Engine, 2024). La metodología incluyó la delimitación de la región de interés, la adquisición y procesamiento de imágenes satelitales, la generación de productos ráster y la elaboración de mapas temáticos que permitieron representar la distribución espacial de los contaminantes. Se concluye que la integración de técnicas de teledetección y SIG constituye una herramienta eficaz para el monitoreo de la calidad del aire en entornos volcánicos, aportando información relevante para la gestión ambiental, la salud de los pobladores locales, la planificación territorial, el tipo de construcción habitacional local, la planificación agropecuaria y la evaluación del riesgo en zonas pobladas cercanas.



Munguía, H. O. (2026). Estudio de la contaminación ambiental y calidad del aire por emisiones del dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) del volcán Concepción durante el periodo 2024-2025, mediante el uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG). *Revista de Estudios Socioambientales Gaia*, 2(2). <https://doi.org/10.62407/hb839539>

Keywords:

Remote Sensing, Spatial Resolution, Vector Data, Spatial Analysis, Sentinel-5P.

Abstract

This research aims to evaluate environmental pollution and air quality in the area of Concepción Volcano, located on Ometepe Island, Nicaragua, during the 2024–2025 period, through the analysis of sulfur dioxide (SO₂), carbon monoxide (CO), and nitrogen dioxide (NO₂) emissions. The study was conducted under a quantitative approach, using satellite data obtained from the Sentinel-5P sensor, which were processed on the Google Earth Engine platform and subsequently analyzed using Geographic Information Systems (GIS) with ArcGIS Pro software (European Space Agency (ESA), 2023; Google Earth Engine, 2024). The methodology included the delimitation of the study area, the acquisition and processing of satellite imagery, the generation of raster products, and the development of thematic maps that allowed the representation of the spatial distribution of atmospheric pollutants. It is concluded that the integration of remote sensing and GIS techniques constitutes an effective tool for monitoring air quality in volcanic environments, providing valuable information for environmental management, public health, territorial planning, local housing development, agricultural planning, and risk assessment in nearby populated areas.

Introducción

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales a nivel global, debido a sus impactos directos sobre la salud humana, los ecosistemas y las actividades socioeconómicas. En este contexto, las emisiones de gases como el dióxido de azufre (SO₂), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) representan contaminantes clave que pueden alterar significativamente la calidad del aire, especialmente en zonas influenciadas por fuentes naturales activas como los volcanes (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021; Seinfeld & Pandis, 2016). El volcán Concepción, ubicado en la Isla de Ometepe, Nicaragua, es uno de los volcanes más activos del país, caracterizado por su emisión continua de gases volcánicos. Estas emisiones, aunque

de origen natural, pueden generar efectos adversos en las poblaciones cercanas, la vegetación, los cuerpos de agua y los sistemas productivos locales. Sin embargo, la limitada disponibilidad de información sistemática sobre la distribución espacial y temporal de estos contaminantes dificulta la evaluación precisa de su impacto ambiental y sanitario en la región.

En los últimos años, el uso de tecnologías de teledetección ha permitido avanzar significativamente en el monitoreo atmosférico, proporcionando datos continuos, de alta cobertura espacial y temporal. En particular, el sensor Sentinel-5P del programa Copernicus ha demostrado ser una herramienta eficaz para la estimación de concentraciones de gases traza en la atmósfera. Asimismo, la integración de estos datos con plataformas como Google

Earth Engine y su análisis mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite una mejor comprensión de los patrones de dispersión de contaminantes (Agencia Espacial Europea [ESA], 2023; Google Earth Engine, 2024). En este sentido, la presente investigación tiene como propósito evaluar la contaminación ambiental y la calidad del aire en el área de influencia del volcán Concepción durante el periodo 2024–2025, mediante el análisis de las emisiones de SO_2 , CO y NO_2 . A través de un enfoque cuantitativo, se busca caracterizar la distribución espacial y temporal de estos gases, identificar zonas con mayor nivel de exposición y aportar información relevante para la gestión ambiental y la toma de decisiones en contextos volcánicos.

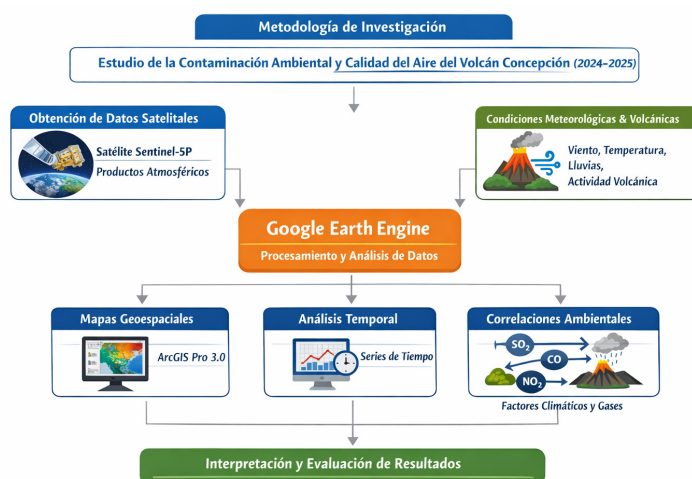
Finalmente, este estudio contribuye al fortalecimiento del conocimiento científico sobre la dinámica de contaminantes atmosféricos en entornos volcánicos,

destacando la importancia del uso integrado de herramientas de sensores remotos y SIG como soporte para el monitoreo ambiental, la planificación territorial y la reducción de riesgos en comunidades vulnerables (Jensen, 2015; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2022).

Metodología y materiales

La investigación es de carácter no experimental, las variables de estudio, se analizan tal como se presentan en su contexto natural a partir de datos satelitales. Desde la perspectiva temporal, el estudio es longitudinal, ya que examina la variación de las concentraciones de gases atmosféricos a lo largo de un periodo determinado. Adicionalmente, se adopta un enfoque espacial, al integrar herramientas de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la evaluación geoespacial de la calidad del aire en el área

Figura 1: Diagrama metodológico con los pasos generales realizados en la investigación.



Nota. Elaboración propia.

de influencia del volcán Concepción (Google Earth Engine, 2024; Jensen, 2015; Servicio de Monitoreo Atmosférico de Copernicus [CAMS], 2023).

El diagrama de la figura 1 podemos observar un resumen de la metodología utilizada para los datos de entrada y salida en la investigación:

Resultados

Fase 1. Adquisición de datos satelitales: En esta fase se realizó la recopilación de información mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando productos atmosféricos del satélite Sentinel-5P, perteneciente al programa Copernicus. Como primer paso, se definió la región de interés (ROI) correspondiente al área de influencia del volcán Concepción, ubicada en la Isla de Ometepe y el departamento de Rivas, delimitando espacialmente el área de estudio mediante coordenadas geográficas dentro del entorno de GEE.

En la tabla 1 se aprecia la implementación de scripts en lenguaje JavaScript, donde se desarrolló el código necesario para acceder, filtrar y procesar las colecciones de datos satelitales. En este proceso se aplicaron filtros específicos por rango temporal (periodo 2024–2025), tipo de contaminante atmosférico (SO_2 , CO y NO_2) y cobertura espacial, garantizando la selección de información relevante y de alta calidad (ver tabla 1).

Fase 2. Inicialmente, se aplicaron procesos de depuración y filtrado de datos, eliminando valores atípicos y registros con baja calidad, lo que permitió mejorar la confiabilidad de la información (Jensen, 2015; European Space Agency [ESA], 2023).

Posteriormente, se realizaron composiciones temporales, mediante el cálculo de promedios mensuales de las concentraciones de los gases analizados (SO_2 , CO y NO_2), con el fin de reducir la variabilidad diaria y obtener representaciones más estables del comportamiento atmosférico. Seguidamente, se procedió a la normalización y estandarización de los datos, asegurando que todas las capas ráster mantuvieran consistencia en unidades (mol/m^2), resolución espacial y sistema de referencia geográfica. Este proceso es fundamental para garantizar la comparabilidad entre diferentes periodos y variables analizadas.

Fase 3. Integración y análisis geoespacial en SIG: En esta fase se realizó la integración y análisis geoespacial de los datos previamente procesados, utilizando el software ArcGIS Pro 3.0, con el objetivo de representar, interpretar y evaluar la distribución espacial de los gases contaminantes (SO_2 , CO y NO_2) en el área de estudio.

El Mapa 1 presenta la distribución espacial de la concentración de dióxido de azufre (SO_2) correspondiente a agosto de 2024. Este mes fue seleccionado debido a que registra una de las concentraciones más elevadas de SO_2 durante

Tabla 1: Script para obtener datos del SO₂.

Procesamiento SO2 Sentinel5P Rivas Ometepe Enero2024
<pre>// 1. Definir Región de Interés (ROI) var roi = ee.Geometry.Polygon([[[-85.59906314482599, 11.63479410268895], [-85.40498865323717, 11.426053971997545], [-85.84239245009334, 11.152630876862418], [-86.0334626973966, 11.35100709768579], [-85.59906314482599, 11.63479410268895]]], null, false); // 2. Definir periodo de análisis var startDate = '2024-01-01'; var endDate = '2024-02-01'; // Incluye todo enero (31 días) // 3. Cargar datos Sentinel-5P SO2 var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2') .select('SO2_column_number_density') .filterBounds(roi) .filterDate(startDate, endDate); // 4. Parámetros de visualización var visParams = { min: 0.0, max: 0.0005, palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red'], opacity: 0.7 }; // 5. Cálculo de media temporal var so2Mean = collection.mean().clip(roi); // 6. Visualización Map.setCenter(-85.75, 11.45, 9); Map.addLayer(so2Mean, visParams, 'SO2 Mean Enero 2024'); // 7. Exportación Export.image.toDrive({ image: so2Mean, description: 'SO2_raster_Enero_2024', folder: 'Proyecto_Volcan_concepcion', region: roi, scale: 1000, crs: 'EPSG:4326' });</pre>

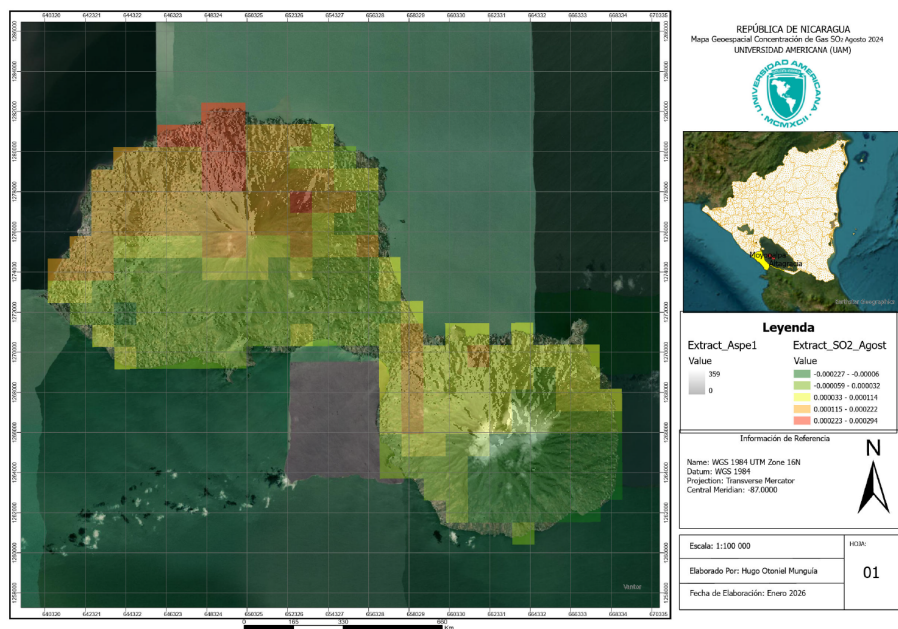
Nota. Elaboración propia.

el período de estudio 2024–2025, alcanzando valores cercanos a 0.000323 mol/m², por lo que constituye un caso representativo de condiciones de alta emisión volcánica.

El Mapa 1 presenta la distribución espacial de la concentración de dióxido de azufre (SO₂) correspondiente a agosto de 2024. Este mes fue

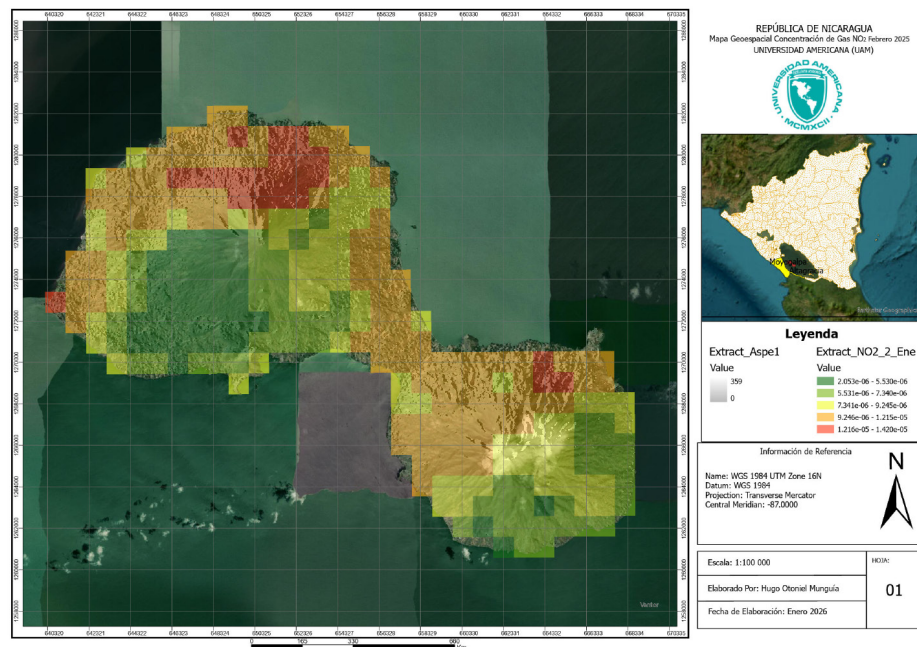
seleccionado debido a que registra una de las concentraciones más elevadas de SO₂ durante el período de estudio 2024–2025, alcanzando valores cercanos a 0.000323 mol/m², por lo que constituye un caso representativo de condiciones de alta emisión volcánica.

Mapa 1: Se muestra Mapa Geoespacial de SO₂ agosto 2024



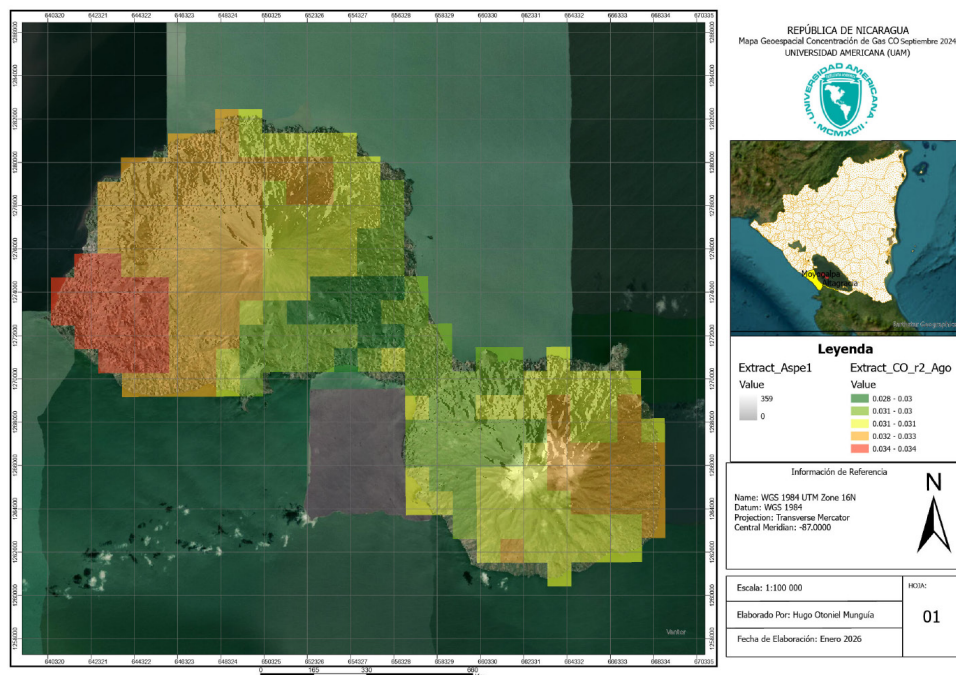
Nota. Elaboración propia.

Mapa 2: Se muestra Mapa Geoespacial de CO 2024



Nota. Elaboración propia.

Mapa 3: Se muestra Mapa Geoespacial de NO₂ enero 2025.



Nota. Elaboración propia.

El Mapa 2 presenta la distribución espacial de la concentración de monóxido de carbono (CO) correspondiente a enero de 2025. Este mes fue seleccionado debido a que registra una de las concentraciones más elevadas de CO observadas durante el período de estudio 2024–2025, alcanzando valores máximos cercanos a 0.034 mol/m². Por esta razón, constituye un escenario representativo de alta acumulación atmosférica de CO dentro del área de influencia del volcán Concepción.

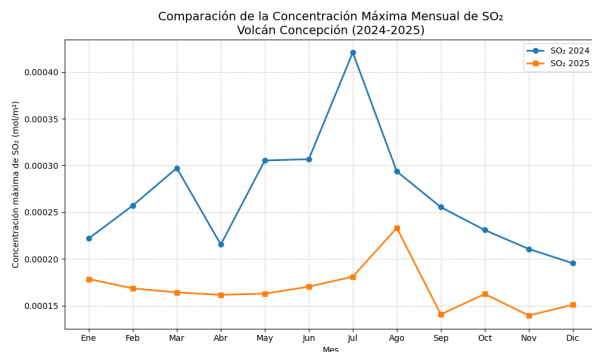
El Mapa 3 presenta la distribución espacial de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) correspondiente a enero de 2025. Este mes fue seleccionado debido a que muestra uno de los patrones espaciales más definidos de concentración de NO₂ observados durante

el período de estudio 2024–2025, permitiendo identificar con claridad las áreas de mayor acumulación del contaminante en el entorno del volcán Concepción.

Las concentraciones registradas oscilan entre 2.053×10^{-6} y 1.420×10^{-5} mol/m², siendo este último valor el máximo observado en el mapa. Las zonas de mayor concentración se localizan principalmente en el sector norte y noreste del volcán Concepción, evidenciando la influencia de factores atmosféricos y topográficos en la dispersión del contaminante.

Fase 4. Evaluación e interpretación de resultados: En esta fase se realizó la evaluación e interpretación integral de los resultados obtenidos a partir del análisis de las

Gráfico 1: Se muestra el comparativo de SO₂ durante el 2024 y 2025.



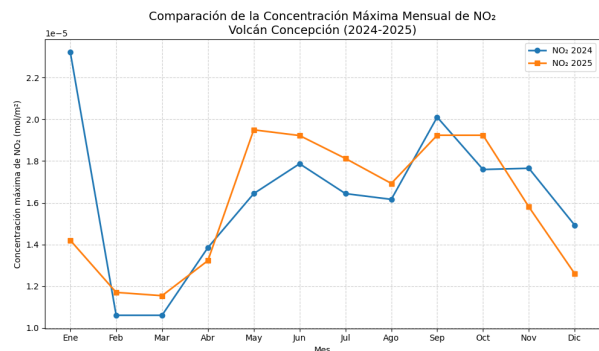
Nota. Elaboración propia.

concentraciones de dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO), utilizando datos satelitales del sensor Sentinel-5P durante los periodos 2024 y 2025 en el área de influencia del volcán Concepción.

Comportamiento del SO₂ (dióxido de azufre)

El gráfico 1 se muestra el comparativo de las concentraciones máximas mensuales de dióxido de azufre (SO₂) evidencia que durante 2024 se registraron valores significativamente superiores a los observados en 2025. El máximo de toda la serie se presentó en julio de 2024 con una concentración de 0.000420903 mol/m², mientras que en 2025 el valor más alto se registró en agosto con 0.000233070 mol/m². En términos generales, las concentraciones de SO₂ durante 2025 fueron inferiores a las de 2024, lo que sugiere una reducción aproximada del 44.6 % en los valores máximos observados. Asimismo, ambas series muestran

Gráfico 2: Se muestra el comparativo de NO₂ durante el 2024 y 2025.



Nota. Elaboración propia.

una disminución de las concentraciones hacia los últimos meses del año, aunque el descenso es más pronunciado en 2025. Estos resultados indican una menor intensidad de emisiones o una mayor dispersión atmosférica durante el segundo año de estudio.

Comportamiento del NO₂ (dióxido de nitrógeno)

El gráfico 2 se muestra el comparativo de las concentraciones máximas mensuales de dióxido de nitrógeno (NO₂) muestra un comportamiento relativamente similar entre 2024 y 2025, con variaciones moderadas a lo largo del periodo analizado. Durante 2024, la concentración máxima se registró en enero con un valor de 2.32×10^{-5} mol/m², seguido de un segundo pico en septiembre (2.01×10^{-5} mol/m²). En contraste, durante 2025 los valores más elevados se observaron entre mayo y octubre, alcanzando máximos de 1.95×10^{-5} mol/m² en mayo y 1.92×10^{-5} mol/m² en septiembre y octubre.

Comportamiento del CO (monóxido de carbono)

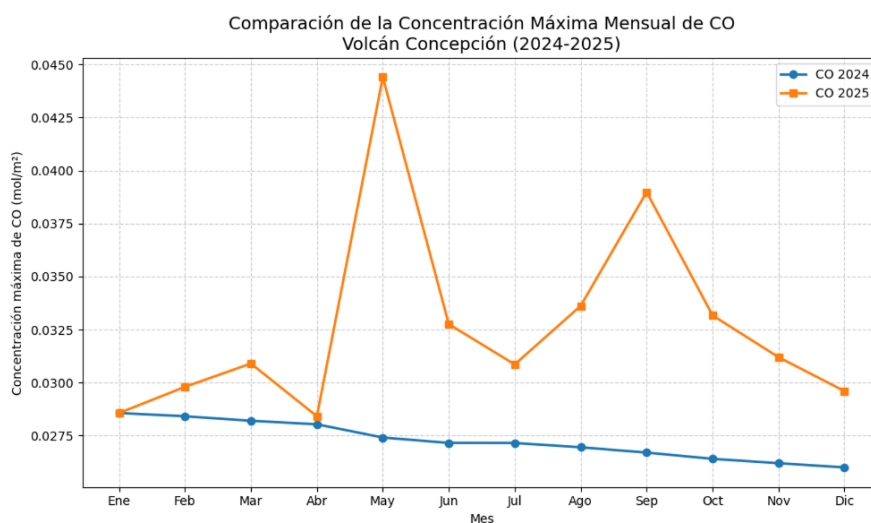
El gráfico 3 se muestra el comparativo de las concentraciones máximas mensuales de monóxido de carbono (CO) evidencia diferencias significativas entre los años 2024 y 2025. Durante 2024 se observa una tendencia descendente relativamente uniforme, con concentraciones que disminuyen gradualmente desde 0.02857 mol/m² en enero hasta 0.02600 mol/m² en diciembre. Este comportamiento refleja una baja variabilidad temporal y una distribución relativamente estable de las concentraciones máximas de CO a lo largo del año. Por el contrario, durante 2025 se registran concentraciones considerablemente más elevadas y una mayor variabilidad temporal.

El valor máximo de toda la serie se presentó en mayo de 2025, alcanzando 0.04441 mol/m², seguido por concentraciones elevadas en septiembre (0.03899 mol/m²) y agosto (0.03362 mol/m²). Estos resultados indican un incremento sustancial en la presencia de CO respecto al año anterior, particularmente durante el período comprendido entre mayo y septiembre.

Conclusiones

La presente investigación permitió estimar la contaminación ambiental y evaluar la calidad del aire en el área de influencia del volcán Concepción durante el período 2024–2025 mediante el uso de datos satelitales Sentinel-5P, procesados en Google Earth Engine

Gráfico 3: Concentración máxima mensual de CO registrada por Sentinel-5P durante el año 2024 y 2025,



Nota. Elaboración propia.

e integrados en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los resultados evidenciaron que las concentraciones de dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO) presentan una distribución espacial y temporal diferenciada, influenciada por la actividad volcánica, las condiciones meteorológicas y los patrones predominantes de dispersión atmosférica, aspectos ampliamente documentados en estudios de química atmosférica y monitoreo ambiental (Seinfeld & Pandis, 2016).

El análisis temporal mostró una disminución de aproximadamente 44.6 % en las concentraciones máximas de SO_2 entre 2024 y 2025, así como una reducción cercana al 17 % en los valores máximos de NO_2 . En contraste, el CO presentó incrementos significativos durante 2025, alcanzando concentraciones máximas superiores en aproximadamente 55 % respecto a los valores observados al inicio del período analizado. Estos resultados demuestran la importancia de mantener un monitoreo continuo de la calidad del aire, ya que la dinámica de los contaminantes atmosféricos puede variar significativamente entre años, aun dentro de una misma zona volcánica (CAMS, 2023; ESA, 2023).

La elaboración de mapas geoespaciales permitió identificar que las áreas con mayor exposición potencial a los contaminantes se localizan principalmente hacia los sectores norte, noreste, noroeste y centro-occidental de la Isla de Ometepe, así como en municipios

del departamento de Rivas como Belén, Tola, Potosí y Buenos Aires. Esta información constituye una herramienta valiosa para la gestión ambiental, ya que permite priorizar zonas para el monitoreo atmosférico, fortalecer los sistemas locales de vigilancia ambiental y orientar estrategias de prevención y mitigación frente a episodios de mayor emisión volcánica (PNUMA, 2022).

Desde la perspectiva de la salud pública, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de fortalecer los programas de vigilancia epidemiológica y prevención de enfermedades respiratorias en las comunidades con mayor exposición. Aunque las concentraciones observadas corresponden a emisiones de origen natural, la exposición prolongada a gases como el SO_2 , NO_2 y CO puede incrementar la vulnerabilidad de grupos sensibles, particularmente niños, adultos mayores y personas con afecciones respiratorias preexistentes (OMS, 2021).

En materia de planificación territorial y gestión del riesgo, la identificación de patrones espaciales de dispersión de contaminantes proporciona criterios técnicos que pueden incorporarse en los instrumentos de ordenamiento territorial y en los planes municipales de gestión del riesgo. Asimismo, los resultados sugieren la conveniencia de considerar la dirección predominante de los vientos y las zonas recurrentemente expuestas a emisiones volcánicas en la localización de nuevos asentamientos humanos, infraestructura crítica, centros educativos y establecimientos de salud (PNUMA, 2022).

De igual forma, los resultados aportan información relevante para la planificación agropecuaria, ya que la exposición recurrente a gases volcánicos puede afectar la productividad de determinados cultivos, la calidad de los suelos y el bienestar del ganado en áreas cercanas a las zonas de mayor concentración (Seinfeld & Pandis, 2016). En consecuencia, la información generada puede servir como insumo para la definición de prácticas productivas adaptadas a las condiciones ambientales locales.

Finalmente, se concluye que la integración de sensores remotos, Google Earth Engine y Sistemas de Información Geográfica constituye una metodología eficiente, de bajo costo y alta cobertura espacial para el monitoreo de la calidad del aire en entornos volcánicos (Jensen, 2015; Google Earth Engine, 2024; ESA, 2023). Esta herramienta proporciona información estratégica para la toma de decisiones en materia ambiental, sanitaria, territorial y de gestión del riesgo, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la reducción de la vulnerabilidad de las comunidades ubicadas en el área de influencia del volcán Concepción.

Declaración de conflicto de interés

El autor declara que no existe conflicto de interés en la realización ni en la publicación de este artículo.

Referencias

- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). Directrices mundiales sobre la calidad del aire de la OMS: Material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Agencia Espacial Europea (ESA). (2023). Descripción general de la misión Sentinel-5P. Agencia Espacial Europea. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
- Servicio de Monitoreo Atmosférico de Copernicus (CAMS). (2023). Productos y servicios de monitoreo de la composición atmosférica. Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo. <https://atmosphere.copernicus.eu>
- Google Earth Engine. (2024). Catálogo de datos y guía para desarrolladores de Google Earth Engine. Google LLC. <https://developers.google.com/earth-engine>
- Jensen, J. R. (2015). Procesamiento digital de imágenes: Una perspectiva de teledetección (4.^a ed.). Educación Pearson.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). Directrices mundiales sobre la calidad del aire de la OMS: Material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Organización

Mundial de la Salud. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2022). Informe sobre la brecha de emisiones 2022: La ventana que se cierra: La crisis climática exige una rápida transformación de las sociedades. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022>

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Química y física atmosférica: De la contaminación del aire al cambio climático (3.^a ed.). John Wiley e Hijos.