

Modelación de las concentraciones del contaminante dióxido de azufre emitido por dos calderas industriales en Santiago de Cali (Colombia)

Concentrations modeling of sulfur dioxide pollutant emitted by two industrial boilers in Santiago de Cali (Colombia)

Gisell M. Jiménez-Ramírez¹  Deisy N. Castillo-Torres²  Yohén Cuéllar-Álvarez¹ 

¹Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Cúcuta, Colombia.

Resumen

En el presente artículo aborda la modelación de las concentraciones de Dióxido de Azufre (SO₂) emitidas por dos industrias ubicadas en la ciudad Santiago de Cali. Estas industrias emplean distintos tipos de combustible en sus calderas: la caldera 1 utiliza Fuel Oil y la caldera 2 utiliza Diésel. Con el objetivo de evaluar y comparar el comportamiento de las concentraciones de SO₂, se propone la sustitución de estos combustibles por Gas natural. Mediante el uso de Aermom View se realizó la modelación de la dispersión de este contaminante y se obtuvo que para un tiempo de exposición de una hora la concentración máxima SO₂ proveniente de las calderas con Fuel Oil y Diésel fue de 1440.32 µg/m³. Para un tiempo de exposición de 24 horas se alcanzó una concentración de SO₂ de 178.56 µg/m³. Estos niveles, exceden los límites establecidos en la resolución 2254 de 2017, donde el valor máximo permisible para una hora es 100 µg/m³ y para 24 horas es 50 µg/m³. En contraste al usar Gas natural como combustible se observa que las concentraciones son considerablemente más bajas. Para un tiempo de exposición de una hora la máxima concentración es de 0.74 µg/m³ y para un tiempo de exposición de 24 horas, de 0.04 µg/m³. Estos resultados cumplen con la normatividad vigente. Se puede concluir que el Gas natural se presenta como una alternativa más favorable, generando concentraciones significativamente menores de SO₂. Este cambio en el tipo de combustible no solo favorecerá el cumplimiento de las normativas ambientales, sino que también contribuirá de manera efectiva a la reducción de la concentración de SO₂ en el aire.

Abstract

This article deals with modeling sulfur dioxide (SO₂) concentrations emitted by two industries in Santiago de Cali. These industries use different fuel types in their boilers: Boiler 1 uses Fuel Oil, and Boiler 2 uses Diesel. To evaluate and compare the behavior of SO₂ concentrations, the substitution of these fuels by natural gas is proposed. Using Aermom View, this pollutant's dispersion was modeled and obtained that the maximum SO₂ concentration from the boilers with Fuel Oil and Diesel was 1440.32 µg/m³ for an exposure time of one hour. For a 24-hour exposure time, the SO₂ concentration reached 178.56 µg/m³. These levels exceed the limits established in resolution 2254 of 2017, where the maximum permissible value for one hour is 100 µg/m³, and for 24 hours is 50 µg/m³. In contrast, when using Natural Gas as fuel, it is observed that the concentrations are considerably lower. The maximum concentration is 0.74 µg/m³ for a one-hour exposure time, and for a 24-hour exposure time, 0.04 µg/m³. These results comply with current regulations. It can be concluded that natural gas is a more favorable alternative, generating significantly lower SO₂ concentrations. This change in the fuel type will favor compliance with environmental regulations and effectively contribute to reducing SO₂ concentration in the air.

Palabras clave: calidad del aire, Contaminación atmosférica, Dispersión, Espacialización de las emisiones, Aermom View.

Keywords: air quality, Air pollution, Dispersion, Emission spatialization, Aermom View.

¿Cómo citar?

Jiménez-Ramírez, G.M., Castillo-Torres, D.N., Cuéllar-Álvarez, Y. Concentrations modeling of sulfur dioxide pollutant emitted by two industrial boilers in Santiago de Cali (Colombia). Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(1): e-20713337.

<https://doi.org/10.25100/iyv.26i1.13337>

Recibido: 08-11-23

Aceptado: 02-26-2024

Correspondencia:

gisellmercedesjr@ufps.edu.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses:
Ninguno declarado



¿Por qué se llevó a cabo?

Determinar el combustible más adecuado para su implementación en las industrias, con el objetivo de contribuir positivamente a la reducción de emisiones atmosféricas y minimizar el impacto ambiental.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

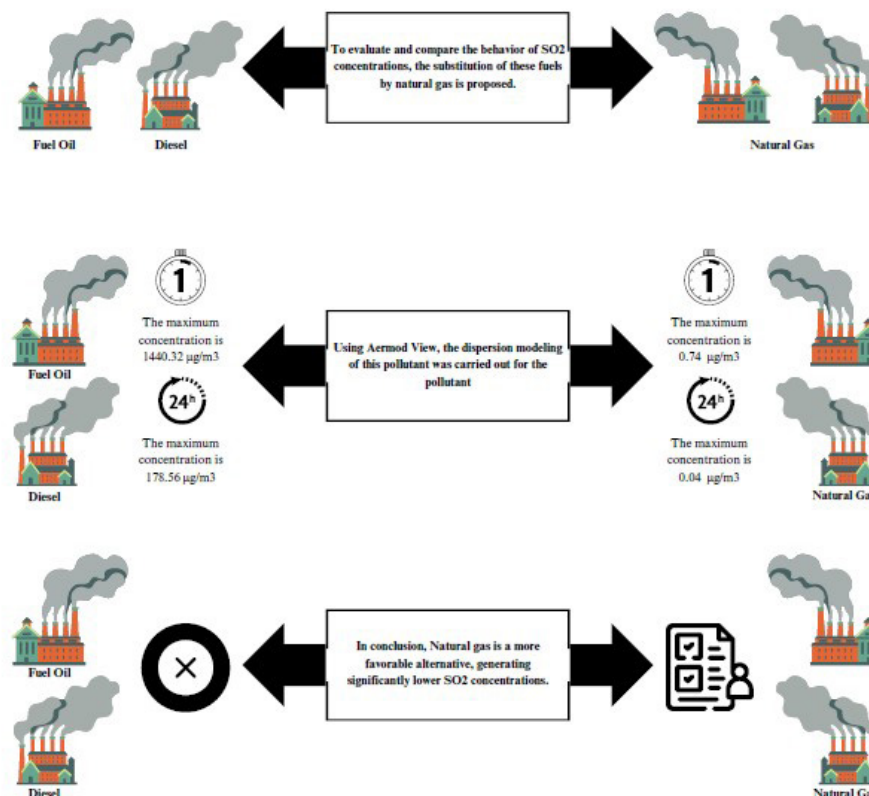
Se ha demostrado que los combustibles Fuel Oil y Diesel generan una mayor concentración de Dióxido de Azufre (SO₂) alcanzando una concentración máxima de 1440,32 µg/m³ para un tiempo de exposición de una hora. Asimismo, su concentración máxima para un tiempo de exposición de 24 horas es de 178,56 µg/m³.

Sin embargo, cuando se cambia el combustible a Gas Natural, estas concentraciones disminuyen significativamente. Para un tiempo de exposición de una hora la concentración máxima es de 0,74 µg/m³ y para un tiempo de exposición de 24 horas alcanza una concentración máxima de 0,04 µg/m³.

¿Qué aportan estos resultados?

Su aporte es de gran importancia porque es evidente que los combustibles contienen un alto porcentaje de azufre, lo que genera emisiones de SO₂, afectando tanto al medio ambiente como a la salud de las personas. Además, se destaca que el cambio de combustible a Gas Natural es ideal para ser implementado por las industrias, contribuyendo de esta manera a la reducción de emisiones de SO₂.

Graphical Abstract



Introducción

La contaminación del aire tiene un alto impacto ambiental (1), graves consecuencias sobre los ecosistemas (1) y a la salud humana (1), causando enfermedades cerebrovasculares, infecciones respiratorias, alergias y cáncer de pulmón (1). Gran parte de estas enfermedades pueden ocasionar un desenlace prematuro por la exposición a esta contaminación, aún en concentraciones bajas (1).

Las fuentes de contaminación que causan estos problemas son diversas. Una de las principales está asociada a la quema de combustibles fósiles que son utilizados como una fuente de energía para los sectores industriales, el transporte y la construcción (1). Todo esto ha provocado un incremento de las emisiones, siendo un problema de gran relevancia que demanda atención por parte de la sociedad (1). A nivel mundial ha provocado alrededor de 7 millones de muertes cada año (2). Además, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) indican que los costos por muertes y enfermedades relacionadas por la calidad del aire ascendieron a \$12.3 billones de pesos, representando el 1.5 % del Producto Interno Bruto (PIB) del año 2015, asociados alrededor de 8000 muertes (2).

Entre los principales contaminantes del aire se encuentran los gases, como el dióxido de azufre (SO_2), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Ozono (O_3) y el Monóxido de Carbono, además del Material Particulado ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} y PST) (3). Estos contaminantes son transportados (4) y trasladados por los vientos a largas distancias (5), principalmente por la estabilidad atmosférica, que depende del balance radiativo y la velocidad del viento en la zona (4). Diversos estudios han considerado la relación entre el incremento de los niveles de inmisión y la incidencia de enfermedades respiratorias (6).

En Colombia la resolución 2254 de 2017, establece los estándares de calidad del aire, con el propósito de asegurar el bienestar de la población y reducir el riesgo de la salud humana debido al grado de exposición presente (7).

Los niveles más elevados de contaminación del aire en Colombia se producen en las zonas urbanas y los principales sectores industriales. En estas zonas vive, aproximadamente el 74% de la población. Principalmente estos contaminantes provienen de combustibles fósiles, usados por fuentes móviles, fijas o de área. El 41% de las emisiones totales de Colombia se ubican en Bogotá, Medellín y Cali (8).

Santiago de Cali es una de las ciudades principales del país y tiene diversas industrias que contribuyen a la generación de emisiones atmosféricas. Algunos de los combustibles usados comúnmente en estas industrias emiten dióxido de azufre (SO_2), el cual reacciona con oxidantes fotoquímicos de la atmósfera para formar trióxido de azufre, que se combina con el agua para formar ácido sulfúrico y partículas de sulfato lo cual contribuye al proceso de generación de la lluvia ácida (9).

El presente estudio se centra en la ciudad de Santiago de Cali, teniendo en cuenta 4 receptores, con el objetivo de modelar las concentraciones del contaminante dióxido de azufre (SO_2) emitido por dos calderas industriales, realizando una comparación en la variación de las concentraciones debido al cambio de los combustibles líquidos (Fuel Oil y Diésel) por Gas natural. La caldera 1 pertenece a una industria se dedica a la elaboración y tinturado de prendas textiles, mientras que la caldera 2 se encuentra en una industria que realiza procesos de incineración de residuos (10).

Metodología

A continuación, se detalla el área de estudio, los escenarios considerados, la ubicación de los receptores, y los parámetros empleados para la modelación de la dispersión del contaminante.

Área de estudio

La ciudad de Cali, Capital del departamento Valle del Cauca, se encuentra ubicada en el suroccidente del país, conformada por 22 comunas y 15 corregimientos, con una altitud promedio de 1000 msnm y abarca una superficie de 619 km² (11). El sistema de vigilancia de la calidad del aire de Santiago de Cali, cuenta con 9 estaciones fijas de monitoreo, las cuales miden contaminantes criterio, 3 estaciones fijas y 1 unidad móvil para la medición del ruido ambiental (12).

Los valores máximos permisibles para la concentración de contaminantes criterio se establecen de acuerdo con la resolución 2254 de 2017, como se detalla en la tabla 1.

Tabla 1. Límites máximos permisibles contaminantes criterio

Contaminante	Nivel máximo permisible $\mu\text{g.m}^3$	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
	75	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	37	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora

Fuente: Adaptado de (7).

En la tabla 2 se describe de manera detallada los tres combustibles de interés: Fuel Oil, Diésel y Gas Natural.

Tabla 2. Características de los diferentes combustibles.

Combustible	Descripción	Poder Calorífico	Contenido de Azufre (S)
Fuel Oil	Se produce en el refinamiento fraccionado del petróleo. Este combustible es de color negro, muy oscuro. Se utiliza principalmente en centrales eléctricas, hornos y calderas, puede refinarse para producir asfalto y lubricantes (13).	150204 BTU/Gal	1.8%
Diésel	Hidrocarburo compuesto de parafinas, que es utilizado principalmente en motores diésel y como combustible para calderas. (13). Generan altas temperaturas de calor; este combustible no puede ser expuesto a bajas temperaturas debido a que las parafinas podrían solidificarse (13).	140000 BTU/Gal	0.0015%
Gas Natural	El gas natural es una mezcla gaseosa de hidrocarburos ligeros, cuyos principales componentes son el metano, etano y en menor medida el propano, butano, pentano y varios hidrocarburos pesados (14).	136.35 BTU/Gal	1.4364E-6 Lb/ft ³

Fuente: Adaptado de (14)

En el anexo 1 se detalla el dominio de la modelación, la ubicación de receptores y las fuentes de modelación.

Escenarios

Este estudio se realiza en dos escenarios. En el escenario 1 se tiene en cuenta las dos calderas industriales de interés con su respectivo tipo de combustible, en la caldera 1 el tipo de combustible utilizado es el Fuel Oil y en la caldera 2 es el Diésel. Para el escenario 2 se realiza el cambio de combustible a Gas Natural.

En la tabla 3 se puede observar el inventario de las características de las chimeneas de cada una de las fuentes fijas puntuales seleccionadas. Estos parámetros se obtienen a través de un muestreo isocinético si las fuentes son existentes o si son proyectadas son establecidos en el diseño de las chimeneas.

Tabla 3. Características de las dos fuentes fijas puntuales.

Parámetros	Caldera 1	Caldera 2
Combustible	Fuel Oil	Diesel
Ubicación	Carrera 1 No. 39 – 55 Comuna 4	Av. 4N #7N-81 Comuna 2
Ubicación UTM	X: 331909.52 m Y: 383386.48 m	X: 329243.78 m Y: 381987.57 m
Diámetro de la chimenea	0.60 m	0.30 m
Altura de la chimenea	15.0 m	44.8 m
Área salida	3.043 ft ²	0.761 ft ²
Potencia Caldera	350 BHP	150 psi
Capacidad Caldera	17.700 libras/hora	-----
Velocidad promedio del gas en la chimenea	19.06 ft/S	8.77 ft/S
Temperatura de salida de los gases	387.594 K	313.15 K

Fuente: Adaptado de (15).

Ubicación de los receptores



Figura 1. Ubicación de las fuentes y los receptores, Santiago de Cali – Google Earth.

Se seleccionan 4 receptores en la ciudad Santiago de Cali, teniendo en cuenta como factor principal, los puntos con alta afluencia de personas o si existe población vulnerable la cual es más propensa a presentar efectos en la salud ante la exposición de la emisión



del contaminante SO₂. En la Figura 1, se evidencia la ubicación de las dos fuentes fijas puntuales y de los receptores.

En la tabla 4. Se pueden observar los receptores seleccionados, con su respectiva coordenada geográfica.

Tabla 4. Ubicación de los receptores en UTM Zona 18N.

Puntos	Receptores	X (m)	Y (m)
1	Hospital San Juan de Dios	330288.84	381999.86
2	Parque Barrio Versalles	330411.83	383040.39
3	Acuaparque de la Caña	332512.31	382040.27
4	ICBF Centro Zonal Nororiental	331876.62	383500.37

Fuente: Google Earth.

En el anexo 1 se puede apreciar la cuadrícula de receptores para estimar el campo de concentraciones.

Modelación mediante el Aermod View

El software AERMOD VIEW es, un modelo gaussiano de pluma, estacionario (16), utilizado para determinar la dispersión de contaminantes procedentes de fuentes de emisión existentes o para modelar la dispersión de contaminantes (17).

Para la modelación es necesario tener en cuenta lo siguiente:

Emisiones atmosféricas

El inventario de las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), se realiza mediante los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (AP-42) capítulo 1, de los diferentes combustibles de interés, como lo son el Fuel Oil, el Diésel y el Gas Natural. En la tabla 3 se encuentran los parámetros del diseño de las chimeneas.

El cálculo de la emisión del SO₂, se realiza de la siguiente manera: E: Emisión, FE: Factor de emisión y P: Potencia de la caldera.

$$E = FE \times P \quad (1)$$

Se procede a realizar el cálculo de emisión para cada uno de los escenarios.

Escenario 1

A continuación, se describe detalladamente, los cálculos realizados para obtener la emisión de cada una de las calderas industriales.

Caldera 1

Teniendo en cuenta el Factor de Emisión de SO₂, según el AP-42 Fuel Oil Combustion Calderas <100 millones BTU/h N°6. Poder calorífico 150204 BTU/Gal y Azufre (S) 1.8%.

$$FE : 1575 \frac{Lb}{1000 \text{ gal}} = 157 \times 1.8 \frac{Lb}{1000 \text{ gal}}$$

$$FE: 283 \frac{Lb}{1000 \text{ gal}} \times \frac{\text{gal}}{150204 \text{ BTU}} \times \frac{3412.14 \text{ BTU}}{1 \text{ Kw-h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ S}} \times \frac{453.592 \text{ g}}{1 \text{ Lb}}$$



$$FE: 8.1002 \times 10^{-4} \frac{g}{1KW-s}$$

$$P: 3433.33 Kw$$

Se procede a calcular la emisión de SO₂.

$$E: FE \times P = 8.1002 \times 10^{-4} \frac{g}{1KW-s} \times 3433.33 Kw$$

$$E: 2.78 \frac{g}{s}$$

De esta manera, se realiza cada uno de los cálculos correspondientes para la caldera 2, teniendo en cuenta que el poder calorífico es de 140000 BTU/Gal y el porcentaje de azufre de 0.0015% (18).

Escenario 2

En el escenario 2 se realiza un balance de masa para conocer cuál es su factor de emisión para las dos calderas industriales operando con el combustible Gas Natural, teniendo en cuenta que el poder calorífico de este es de 136.35 BTU/Gal y el contenido de Azufre es de 1.4364 x 10⁻⁶ Lb/ft³.

Balance de Masa

$$FE: \text{Contenido de Azufre} \times 2 \text{ (2)}$$

$$FE: 1.4364 \times 10^{-6} \frac{Lb}{ft^3} \times 2 = 2.87 \times 10^{-6} \frac{Lb}{ft^3}$$

$$FE: 2.87 \times 10^{-6}$$

$$- 6 \frac{Lb}{ft^3} \times \frac{1 ft^3}{7.48 Gal} \times \frac{1 Gal}{136.35 BTU} \times \frac{3412.14 BTU}{1 Kw-h} \times \frac{1h}{3600 S} \\ \times \frac{453.592 g}{1 Lb}$$

$$FE: 1.2108 \times 10^{-6} \frac{g}{1KW-s}$$

Como se mencionó anteriormente mediante la ecuación (1), a partir del factor de emisión y la actividad se calcula la emisión de SO₂. En la tabla 5 se especifican para las calderas en los dos escenarios los factores de emisión (g/KW-s), la actividad (kW) y la emisión de SO₂ (g/s).

Tabla 5. Emisión de SO₂ para los dos escenarios.

Escenario	ID	Factor de Emisión (g/KW-s)	Actividad (KW)	SO ₂ (g/s)
1	CAL1	8.10E-04	3433.33	2.78E+00
	CAL2	6.91E-07	490.48	4.16E-03
2	CAL3	1.21E-06	3433.33	3.39E-04
	CAL4	1.21E-06	490.48	5.94E-04

Fuente: Autores.

Meteorología

Para el presente estudio se utiliza la meteorología para el año 2022, obtenida a partir de WRF (18), en un periodo comprendido entre el 01 de enero hasta el 31 de diciembre. En la figura 2, se evidencia la rosa de los vientos de la ciudad Santiago de Cali, donde se puede observar vientos con direcciones predominantes hacia el sureste, principalmente se debe a los vientos que provienen del interior del país, con una velocidad entre el 0.50 a 2.10 m/s. De igual manera, predominan vientos hacia el noroeste, debido a los vientos provenientes del pacífico, con una velocidad de 3.60 a 5.70 m/s. Por ende, la dirección del viento es importante para estimar la dispersión de los contaminantes. En el anexo 2 se puede apreciar los datos meteorológicos en superficie y en altura (perfil) del año 2022 empleados en la modelación.

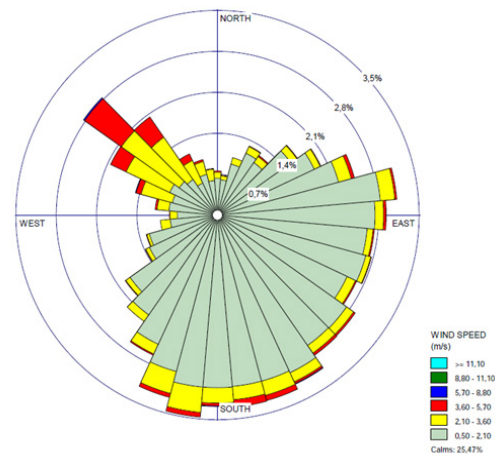


Figura 2. Rosa de los vientos

Topografía

Se utiliza el conjunto de datos del Modelo de Elevación Digital (DEM) conocido como GTOPO30/ SRTM30, el cual se obtuvo mediante la recopilación de información durante la misión topográfica de radar Shuttle (SRTM) elaborada en febrero del 2 000 con el conjunto de datos GTOPO30 suministrado por el servicio geológico de los estados Unidos (19).

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados de la modelación en los dos escenarios para una hora y 24 horas de acuerdo con lo establecido en la norma de calidad del aire de Colombia.

Escenario 1

En la figura 3 se muestran los resultados de la modelación de una hora, su mayor concentración es de $495.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual no cumple con los valores límites máximos permisibles establecidos en la resolución 2254 de 2017, dado que para 1 hora el valor máximo permisible es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la figura 4, se puede apreciar la modelación de 24 horas alcanzando una concentración máxima de $26.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ cumpliendo con la normatividad vigente que establece para 24 horas un valor máximo permisible de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para las dos modelaciones su punto de mayor concentración son las zonas residenciales de la comuna 4 (coordenadas 383344.56N; 331663.4E). Cabe destacar, que la caldera 2 utiliza como combustible el Diésel, su concentración de SO_2 se encuentra

entre los valores permisibles, principalmente se debe al menor porcentaje de azufre comparado en el Fuel Oil. Se debe mencionar que en el caso de Diésel con el transcurso del tiempo, la reducción es de 99.67% entre los años 1999 a 2023 (20), lo cual contribuye a la disminución de emisiones de SO₂.

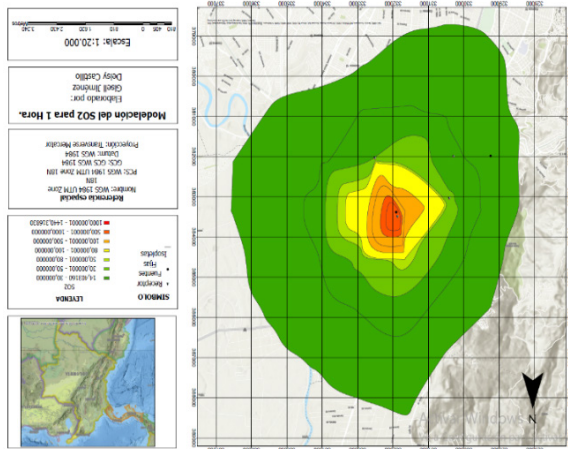


Figura 3. Modelación del SO₂ para 1 Hora.

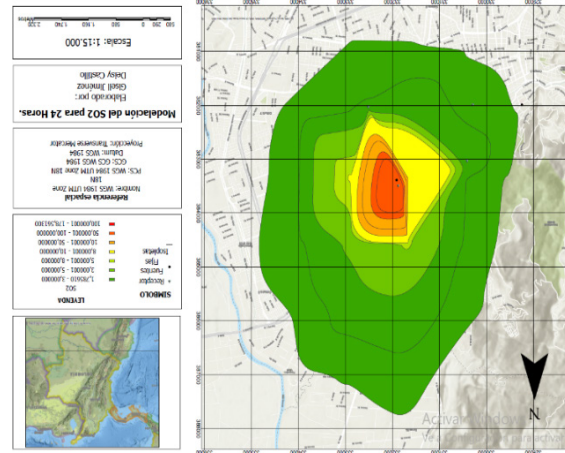


Figura 4. Modelación del SO₂ para 24 Horas.

Escenario 2

Se puede observar que en la figura 5, la modelación de una hora alcanza su mayor concentración de 0.74 µg/m³, y en la figura 6, se evidencia la modelación de 24 horas, con una concentración máxima de 0.04 µg/m³; cumpliendo este escenario con lo establecido por la normatividad vigente. Para ambas modelaciones el punto de mayor concentración son las zonas residenciales de la comuna 4 (coordenadas 383344.56N; 331663.4E).

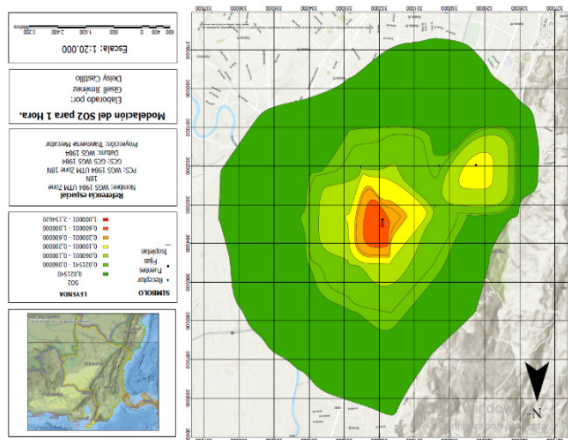


Figura 5. Modelación del SO₂ para 1 Hora.

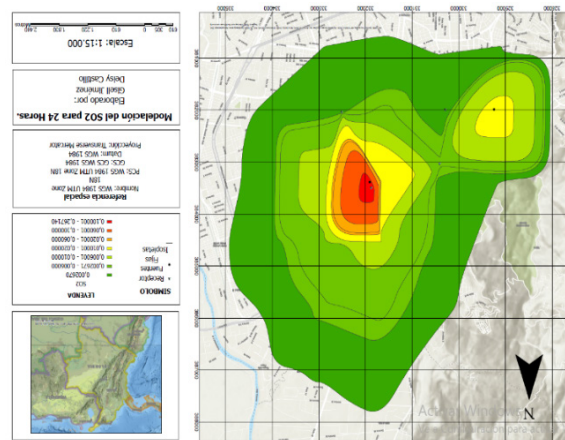


Figura 6. Modelación del SO₂ para 24 Horas.

Comparación de los receptores

En la figura 7 y 8 se evidencia la comparación de los escenarios dependiendo del tiempo de exposición según los receptores.

El receptor que presenta mayor impacto por la emisión de SO₂ es el Instituto Colombiano

de Bienestar Familiar (ICBF), en el escenario 1 no se cumple con los valores límites máximos permisibles según la normatividad vigente para ambas modelaciones, para 1 hora alcanza una concentración de 1440.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para 24 horas alcanza una concentración de 178.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este resultado afecta a la población del sector debido a que principalmente son niños y se ven más perjudicados por los efectos nocivos que traen consigo la exposición de altas concentraciones del SO_2 con ciertas enfermedades respiratorias para la salud de cada individuo. En el escenario 2 se cumple con los valores límites máximos permisibles según la normatividad vigente, para ambas modelaciones, para 1 hora alcanza una concentración de 2.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para 24 horas alcanza una concentración de 0.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por ello, es importante que las industrias implementen un combustible que genere menores emisiones como lo es el Gas natural, donde se evidencia la reducción de la concentración de las emisiones de SO_2 , impactando positivamente al ambiente y a la salud de la población.

Diversos estudios realizados indican que el combustible Gas natural es un combustible idóneo para ser usado en calderas, hornos, entre otros, contribuyendo a que sus procesos productivos sean eficientes a comparación de los otros tipos de combustibles, variando de acuerdo al sector industrial, un ejemplo es el sector textil en el cual hay una disminución energética y de esta manera disminuir los costos de producción (21).

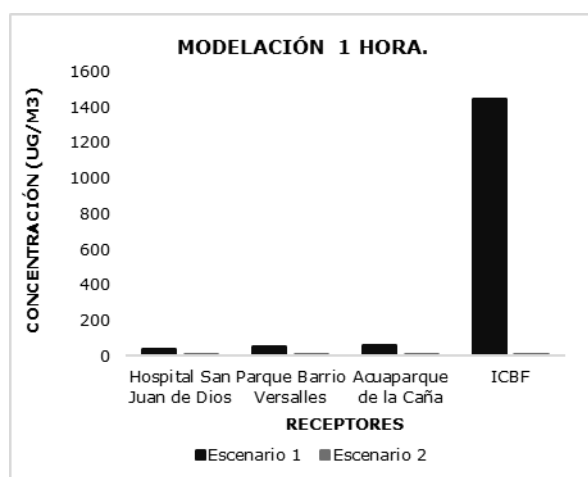


Figura 7. Modelación del SO_2 para 1 Hora.

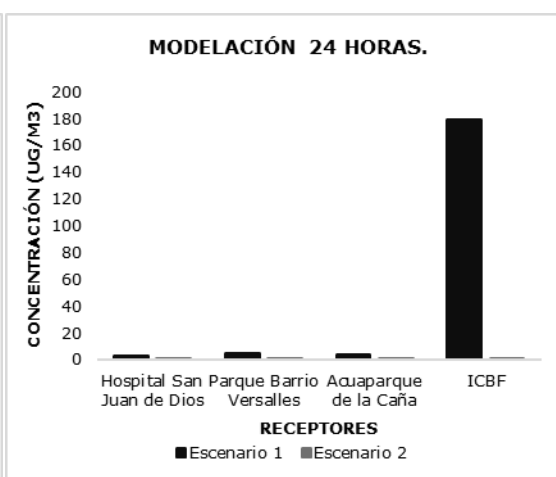


Figura 8. Modelación del SO_2 para 24 Horas.

En la figura 9 y 10 se puede apreciar el porcentaje de diferencia de los dos escenarios según la modelación del SO_2 para 1 hora y 24 horas.

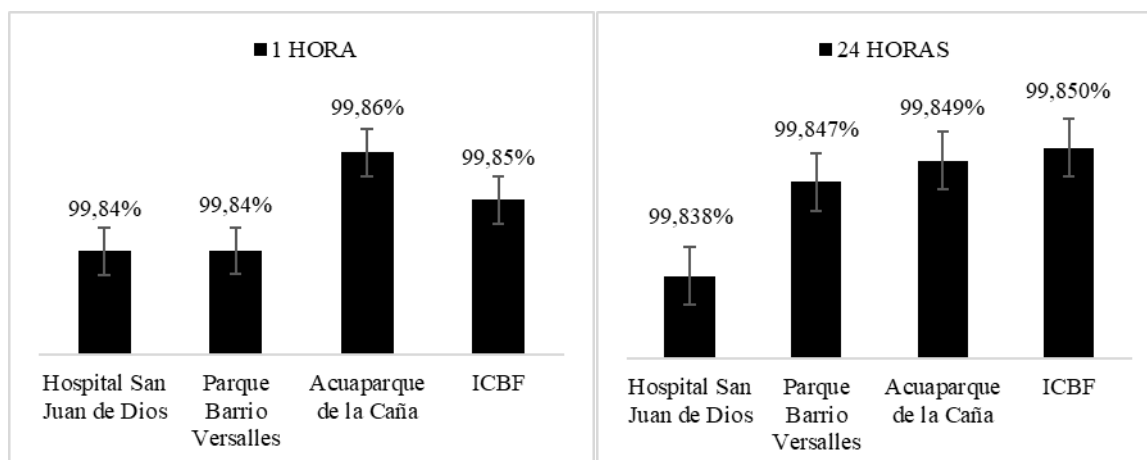


Figura 9. Diferencia de porcentaje del SO_2 para 1 Hora.

Figura 10. Diferencia de porcentaje del SO_2 para 24 Horas.

La validación de los resultados de la modelación es de gran importancia para la comparación de estos con los datos medidos por las estaciones de monitoreo. En este caso, debido al alcance del estudio, no se llevó a cabo dicha validación; sin embargo, se enfatiza la necesidad de realizar este análisis.

Conclusiones

En este trabajo se realizó la evaluación y modelación de la concentración de SO_2 para dos industrias que utilizan (Fuel Oil y Diésel) como combustibles para calderas. Se obtuvo que el combustible Fuel Oil es aquel que genera mayores concentraciones de SO_2 , las cuales no se encuentran dentro de los valores máximos permisibles establecidos por la resolución 2254 de 2017. Por ende, se realizó la comparación por medio de la modelación con el cambio de combustible a Gas natural para las dos industrias, donde se evidenció que este genera menores concentraciones de SO_2 , siendo una de las opciones que impacta positivamente el medio ambiente, por ello se recomienda hacer este cambio de combustible y así poder contribuir con la mejora de la calidad del aire urbano.

El software Aermid View permite identificar cuáles son las zonas con mayor concentración de SO_2 , no solo en los receptores seleccionados para este estudio, sino también en otros puntos, como es el caso de la zona residencial de la Comuna 4 de la ciudad, alcanzando una concentración de $495.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual no cumple con la resolución 2254 de 2017.

Es importante que las industrias utilicen combustibles líquidos con bajo contenido de azufre e implementen programas para la protección de la calidad del aire y de esta manera contribuir a la disminución de concentraciones de emisiones atmosféricas.

La validación de la modelación es crucial para la comparación efectiva con los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo, este estudio no se ejecutó dicha validación por las limitaciones del alcance, siendo de gran importancia realizar en futuras investigaciones.

Referencias

1. Valencia Zapata LM. Variation of atmospheric emissions generated by fixed sources within the jurisdiction of the Regional Autonomous Corporation of the Black River and Nare Basins - CORNARE: A strategy for efficient control and monitoring. 2019;
2. Grisales Vargas SC. Guidance report on the link between air pollution and climate change,
 mitigation strategies for short-lived climate pollutants and their incorporation into regional planning processes. 2021;(2500238039).

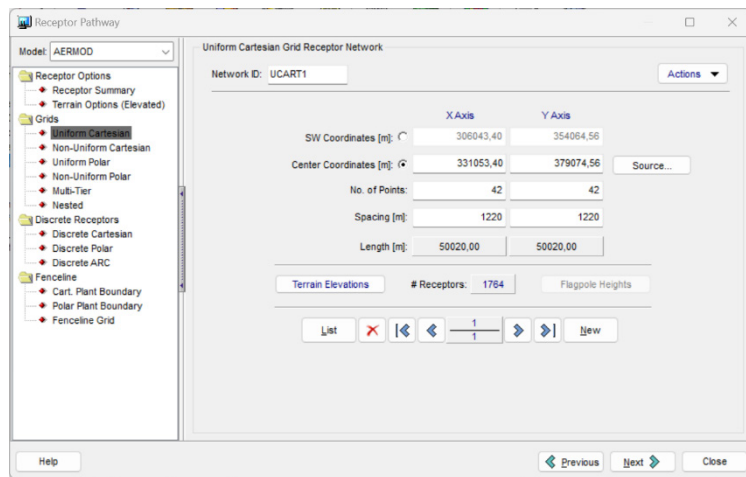
3. Acosta Santos MC. Formulation of a Modeling Protocol for Dispersion of Atmospheric Pollutants By Means of a Mathematical Model, Gaussian Model. 2021;
4. Núñez V, Rodríguez R, Gómez L, Herrera I, Morales M. Influence on air quality of sulfur dioxide emissions from fixed agricultural sources in Villa Clara. 2019; Available from: <http://cagricola.uclv.edu.cu>
5. Córdova Mendoza P, Barrios Mendoza TO, Córdova Barrios IC. First characterization of pollutant emissions and air quality in Ica, Peru. *Rev Cuba Química* [Internet]. 2021;33(1):138–53. Available from: [file:///C:/Users/Godoy/Desktop/Primera caracterización de emisiones contaminantes y calidad del aire en Ica.pdf](file:///C:/Users/Godoy/Desktop/Primera%20caracterizaci3n%20de%20emisiones%20contaminantes%20y%20calidad%20del%20aire%20en%20Ica.pdf)
6. Sandoval Menses JX. Evaluation of the concentration of particulate matter (PM 2.5) and its relationship with respiratory diseases in the municipality of Sogamoso-Boyacá. 2020;
7. Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Res 2254 De 2017. 2017. p. 11.
8. Vidal Daza OA, Perez Vidal A. Estimation of Dilution of Atmospheric Contaminants from Paper Factory Using the AERMOD Model. *Ingeniería*. 2017;
9. Frías López A, Barcia Sardiñas S. Atmospheric emissions inventory from main fixed source of Cienfuegos city. *Rev Cuba Meteorol* [Internet]. 2019;25. Available from: <http://opn.to/a/LRird>
10. Alcaldía de SaOperativos de control de emisiones atmosféricas generadas por fuentes fijas (chimeneas) en el area urbana del municipio de Santiago de Calintiago de Cali. Operations to control atmospheric emissions generated by fixed sources (chimneys) in the urban area of the municipality of Santiago de Cali. 1999;
11. Galvis Morales K, Torres García TM. Comparative analysis of PM2.5 concentrations in air quality monitoring stations in Bogota, Medellin and Cali, during the pre-pandemic and pandemic period August 2019 August 2020. 2020;
12. DAGMA. Monthly Bulletin of Air Quality and Environmental Noise of Santiago de Cali. 2019;1–34.
13. Intriago Panchano AJ, Gomez Andrade CX. Business plan on the import and sale of additives for petroleum products in the industrial sector. 2020;
14. Ecopetrol. Natural Gas. *New York Times*. 2020;
15. Alcaldía de Santiago de Cali. Operations to control atmospheric emissions generated by fixed sources (chimneys) in the urban area of the municipality of Santiago de Cali. 1999;
16. EPA. Air Quality Dispersion Modeling [Internet]. 2017 [cited 2023 Sep 30]. Available from: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models#aermod>
17. Silva A, Arcos D. Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de PM10 emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. *Obras y Proy*. 2011;(9):4–10.
18. Ecopetrol. Diésel. 2021;
19. SRTM30 [Internet]. [cited 2023 Nov 8]. Available from: https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/tools/SRTM30_Documentation.html

20. Ecopetrol. Fuel quality. [Internet]. 2022 [cited 2023 Nov 8]. Available from: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/aire-limpio/calidad-combustibles>
21. Rangel Jiménez AE, Portilla Salazar CJ. The process of substitution of heavy fuels by natural gas in the industrial sector of Valle del Cauca and Cauca - Colombia 2004-2012. *Apunt del Cenes*. 2016;35(61):237–66.

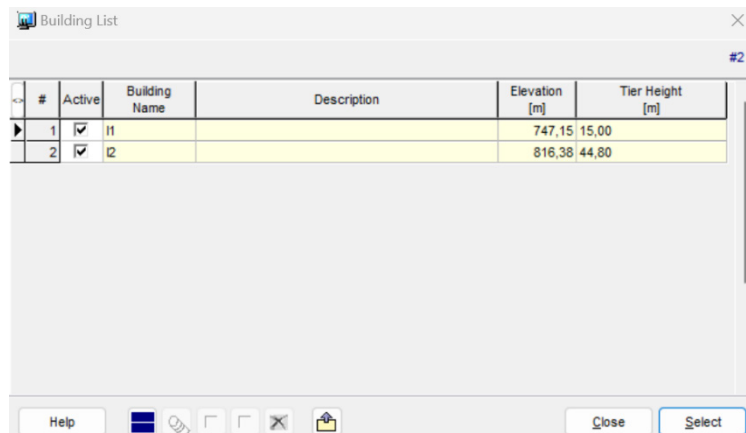
Anexo 1.

Guía para la modelación mediante el software Aermol View.

Como primer paso las coordenadas de Santiago de Cali son las siguientes: X: 330866.7 Y: 380055.41 UTM 18 Zone y el radio del dominio es de 25.00 Km.



Se estableció una cuadrícula de receptores la cual es la siguiente para estimar el campo de concentraciones.

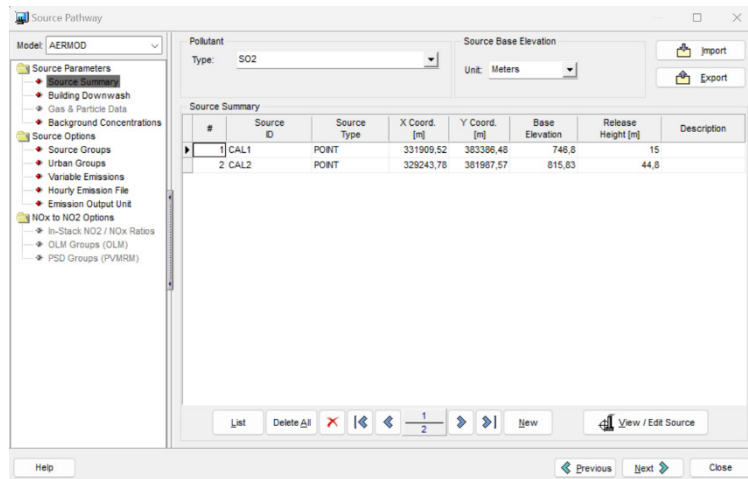


#	Active	Building Name	Description	Elevation [m]	Tier Height [m]
1	<input checked="" type="checkbox"/>	I1		747,15	15,00
2	<input checked="" type="checkbox"/>	I2		816,38	44,80

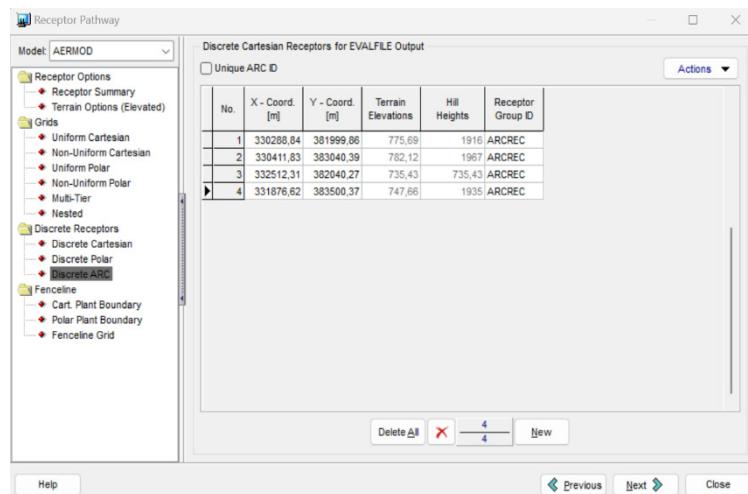
Se identifico las coordenadas de cada una de las industrias con su respectiva, elevación y altura.

Se estableció el contaminante criterio que va a hacer modelado, en este caso es SO₂ a 1 hora y 24 horas en zona urbana. Además, se procede a agregar cada una de las fuentes de emisión teniendo en cuenta los parámetros obtenidos a través de un muestreo isocinético si las fuentes son existentes o si son proyectadas son establecidos en el diseño de chimeneas y las emisiones de SO₂ se realizaron mediante

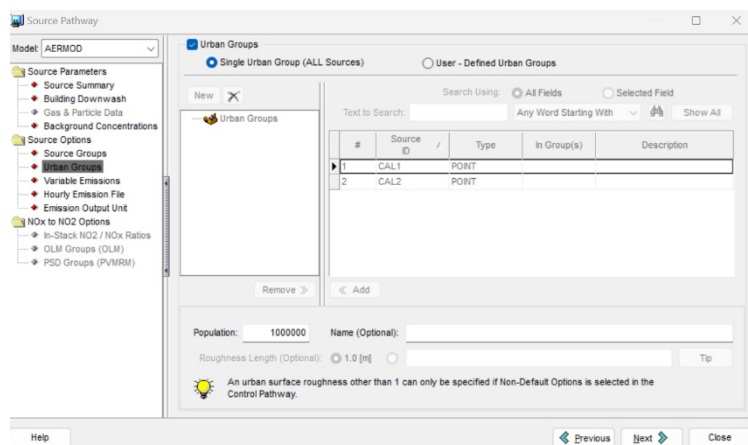
los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (AP-42).

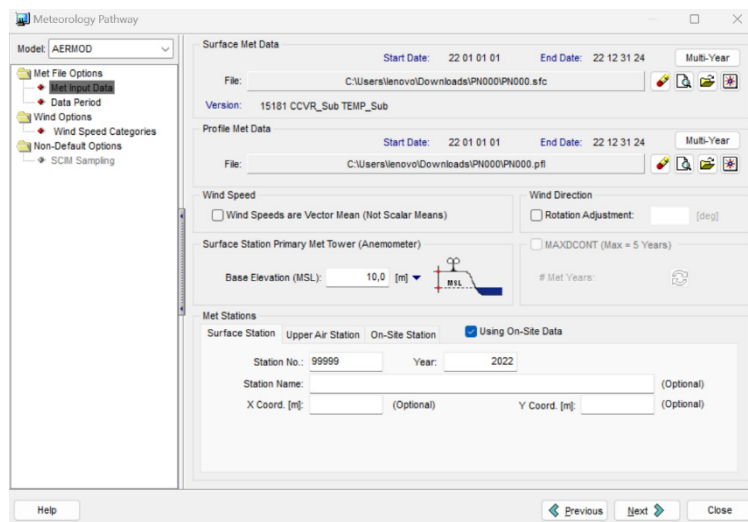


Se procede a agregar las coordenadas de cada uno de los receptores discretos.



Se agrupa las fuentes de la siguiente manera teniendo en cuenta una población de 1 000 000 habitantes.





Se procede a correr el BPIP del software si esta es exitosa se continua con el respectivo proceso, el cual se le agrega la meteorología del año 2022, obtenida a partir de WRF en un periodo comprendido entre el 01 de enero hasta el 31 de diciembre y su topografía en este caso es GTOPO30/SRTM30. Por último, el modelo empieza a correr para obtener los resultados de dicha modelación.

Anexo 2.

En el siguiente enlace se encuentra los datos meteorológicos del año 2022. <https://drive.google.com/drive/folders/1OMiDfBc8SC72Gcs-Uxkf8GYTwnVqthEH?usp=sharing>