

## Modelado de PM<sub>2.5</sub> mediante AERMOD e IA: caso de estudio en la Cañada de la Virgen, Guanajuato

PM modeling using AERMOD and AI: a case study in Cañada de la Virgen, Guanajuato

Alexa Abigail Rosales G., Alejandro De La Peña T.

División de Ingenierías, Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.  
aa.rosalesgonzalez@ugto.mx, a.delapena@ugto.mx

### Resumen

El material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) constituye una de las principales amenazas para la salud pública y el medio ambiente, debido a su capacidad de ingresar al sistema respiratorio profundo y su persistencia en la atmósfera. En el presente estudio se aborda el análisis de la dispersión de PM<sub>2.5</sub> generada por el incendio ocurrido en la zona protegida de la Cañada de la Virgen, en el estado de Guanajuato, México. Para ello, se implementó el modelo de dispersión atmosférica AERMOD View en conjunto con herramientas de inteligencia artificial, con el propósito de simular el comportamiento de los contaminantes en diversos escenarios meteorológicos. Los resultados mostraron concentraciones máximas de hasta 236.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , superando ampliamente los límites de la NOM-025-SSA1-2014 (45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 horas) y las guías de la Organización Mundial de la Salud. La pluma de dispersión se extendió principalmente hacia el noreste y sureste, alcanzando localidades como San José de los Barcos, La Quemada y Santa Rosa de Lima, lo que confirma un riesgo considerable para la calidad del aire y la salud pública. Estos hallazgos evidencian la utilidad de combinar modelación atmosférica e inteligencia artificial como apoyo en la gestión ambiental ante emergencias por incendios forestales.

**Palabras clave:** PM<sub>2.5</sub>, dispersión de contaminantes, incendios forestales, AERMOD View, inteligencia artificial, calidad del aire, modelación atmosférica, cambio climático, medio ambiente.

### Abstract

Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) constitutes one of the main threats to public health and the environment, due to its ability to enter the deep respiratory system and its persistence in the atmosphere. This study analyzes the dispersion of PM<sub>2.5</sub> generated by the fire that occurred in the Cañada de la Virgen protected area, in the state of Guanajuato, Mexico. To this end, the AERMOD View atmospheric dispersion model was implemented in conjunction with artificial intelligence tools to simulate the behavior of pollutants in various meteorological scenarios. The results showed maximum concentrations of up to 236.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , far exceeding the limits of NOM-025-SSA1-2014 (45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours) and the World Health Organization guidelines. The dispersal plume extended mainly northeastward and southeastward, reaching towns such as San José de los Barcos, La Quemada, and Santa Rosa de Lima, confirming a considerable risk to air quality and public health. These findings demonstrate the usefulness of combining atmospheric modeling and artificial intelligence to support environmental management in the event of wildfire emergencies.

### Introducción

La contaminación atmosférica por partículas finas, especialmente las PM<sub>2.5</sub> (aquellas con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros), constituye un grave problema de salud pública a nivel mundial. Su diminuto tamaño les permite penetrar profundamente en el sistema respiratorio humano, ocasionando enfermedades cardiovasculares, respiratorias e incluso mortalidad prematura (Pope *et al.*, 2002). Una de las principales fuentes de estas partículas son los incendios forestales, que durante cortos periodos pueden liberar grandes volúmenes de contaminantes. Este tipo de eventos afecta no solo al ecosistema inmediato, sino también a comunidades ubicadas a kilómetros de distancia debido a la amplia dispersión de los contaminantes (Naeher *et al.*, 2007).

En el estado de Guanajuato, la frecuencia e intensidad de los incendios forestales ha incrementado en los últimos años, lo cual ha generado impactos significativos en zonas de alto valor ambiental y cultural. La Cañada de la Virgen, un sitio reconocido por su importancia ecológica y arqueológico, fue escenario de un incendio de gran magnitud que liberó considerables cantidades de contaminantes atmosféricos, entre ellos PM 2.5. Estos eventos no solo amenazan la biodiversidad local, sino también la calidad del aire y la salud de las poblaciones cercanas. Por esta razón, resulta urgente analizar cómo se dispersan estos contaminantes en escenarios reales y complejos como el ocurrido en dicha región.



Figura 1 y 2. Visualización del incendio en la Cañada de la Virgen.

La dispersión de contaminantes atmosféricos depende de múltiples factores, entre ellos las condiciones meteorológicas (viento, temperatura, humedad) y las características topográficas del terreno. En este contexto, el uso de modelos de simulación atmosférica se vuelve fundamental para predecir el comportamiento de estos contaminantes. Uno de los modelos más utilizados es AERMOD View, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, 2022), el cual permite simular concentraciones de contaminantes bajo distintos escenarios, con base en los datos meteorológicos, geográficos y de emisión.

Paralelamente, la Inteligencia Artificial (IA) ha ganado relevancia en el análisis ambiental debido a su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos y encontrar patrones complejos (Bishop, 2006). En el ámbito de la calidad del aire, la IA puede complementar los modelos físicos, optimizando sus resultados y aumentando la precisión de las predicciones. Esta sinergia entre modelado tradicional y técnicas de IA resulta especialmente útil en contextos de emergencia, como los incendios forestales, donde es necesario generar información confiable en poco tiempo. Así, el uso conjunto de estas herramientas permite tomar decisiones más informadas y estratégicas para proteger la salud pública.

En el estado de Guanajuato se han desarrollado instrumentos regulatorios como el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire Guanajuato 2021-2030), que plantea acciones para mitigar y controlar la contaminación atmosférica, incluyendo la proveniente de incendios forestales. Sin embargo, aún existen limitaciones en la aplicación de estos lineamientos, especialmente cuando no se integran con tecnologías avanzadas de análisis. Por ello, el uso de herramientas de simulación como AERMOD View, en conjunto con algoritmos de IA, se vuelven esencial para fortalecer los procesos de planificación, prevención y respuesta ante eventos contaminantes.

Asimismo, en México, la calidad del aire está regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, la cual establece los límites máximos permisibles para la concentración de partículas suspendidas P10 y PM2.5 en el ambiente. Esta norma señala que, para PM2.5 el valor límite es de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en promedio 24 horas y  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual, con el fin de proteger la salud humana frente a enfermedades asociadas a la contaminación del aire. Estos valores normativos sirven como criterio de referencia en el presente estudio, permitiendo contextualizar los resultados obtenidos e identificar si los niveles estimados de concentración superan los límites establecidos para una exposición segura.

Para el presente estudio, se utilizó el módulo AERMET View para procesar los datos meteorológicos necesarios en el funcionamiento de AERMOD, lo cual permitió simular con mayor precisión la dispersión de las partículas PM 2.5. Además, se emplearon plataformas de georreferenciación como QGIS y Google Earth Pro para visualizar espacialmente el área afectada y comprender los patrones de dispersión. Esta visualización espacial ayuda a identificar con mayor claridad las zonas de mayor impacto, así como a delimitar los perímetros de riesgo. Se recurrió también a bases de datos confiables de clima local para asegurar la calidad del modelo.

Esta combinación metodológica de modelación física, análisis espacial y herramientas de IA ofrece una perspectiva integral del fenómeno, permitiendo analizar con mayor rugosidad las fuentes de emisión, la influencia de la topografía y las condiciones atmosféricas. El caso del incendio en la Cañada de la Virgen ofrece una oportunidad real y representativa para evaluar estas herramientas en un contexto práctico. Con base en este análisis, se pretende contribuir a una mejor gestión ambiental en la región y aportar evidencia científica para futuras estrategias de prevención, control y mitigación de la contaminación atmosférica.

### Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es investigar y modelar la dispersión de partículas finas PM 2.5 generadas por el incendio ocurrido en la Cañada de la Virgen, utilizando una combinación de herramientas de simulación de dispersión de contaminantes (AERMOD View) y técnicas de Inteligencia Artificial (IA). Se busca comprender mejor cómo se propagaron las partículas contaminantes en el área afectada y evaluar el potencial impacto en la calidad del aire y la salud pública.

### Objetivos específicos

- 1.- Simular la dispersión de PM 2.5:** Utilizar el software AERMOD View para modelar la dispersión de partículas PM 2.5 emitidas durante el incendio en la Cañada de la Virgen, considerando factores meteorológicos, topográficos y las características del incendio.
- 2.- Evaluar el alcance espacial y temporal de la dispersión:** Determinar las áreas geográficas y los periodos de tiempo que fueron más afectados por la dispersión de PM 2.5 originadas por el incendio.
- 3.- Integrar técnicas de Inteligencia Artificial (IA):** Explorar y aplicar técnicas de IA, como algoritmos de aprendizaje automático, para mejorar el análisis de los resultados de las simulaciones de AERMOD View. Esto podría incluir la identificación de patrones de dispersión no evidentes, la optimización de parámetros de simulación o la predicción de concentraciones de contaminantes en áreas no modeladas directamente.
- 4.- Desarrollar un caso de estudio detallado:** utilizar el incendio en la Cañada de la Virgen como un caso de estudio específico para aplicar y validar la metodología propuesta, generando un análisis concreto y relevante para la región.

## Metodología

Se recopiló información detallada sobre el incendio ocurrido en la Cañada de la Virgen, en el municipio de San Miguel de Allende, Guanajuato, cuyo desarrollo se extendió del 24 al 29 de marzo de 2024, afectando una superficie aproximada de 2,334 hectáreas. Para este fin, se consultaron reportes oficiales, notas de prensa y plataformas de observación satelital, a fin de determinar la localización geográfica precisa y la dimensión del área siniestrada. En ausencia de mediciones directas de emisiones, se utilizaron factores de emisión estandarizados para incendios forestales, conforme a la metodología propuesta por la EPA (Environmental Protection Agency) y estudios recientes de modelado atmosférico.

La información fue georreferenciada mediante la plataforma Google Earth Pro, delimitando los polígonos de las áreas afectadas. Posteriormente, este polígono fue digitalizado en QGIS 3.44.0, generando archivos vectoriales con terminación .shp, los cuales representaron espacialmente la zona impactada por el incendio.



Figura 3. Integración de archivos .Shp al mapa geográfico de Guanajuato por QGIS.

Además, se trazó un perímetro de estudio en la zona afectada dentro del estado de Guanajuato, haciendo uso de la aplicación de AERMET, la cual proyecta los datos proporcionados en la aplicación de Google Earth Pro como se observa en la figura 2. El perímetro se hizo en base a las 3 coordenadas clave localizadas en la Sierra de Santa Rosa en la Cañada de la Virgen, en el Estado de Guanajuato con las coordenadas 21.210654, -101.183766; 21.169511, -101.21222; 20.991857, -101.143702. Estas coordenadas sirvieron como base para definir el área de modelación en AERMOD View.

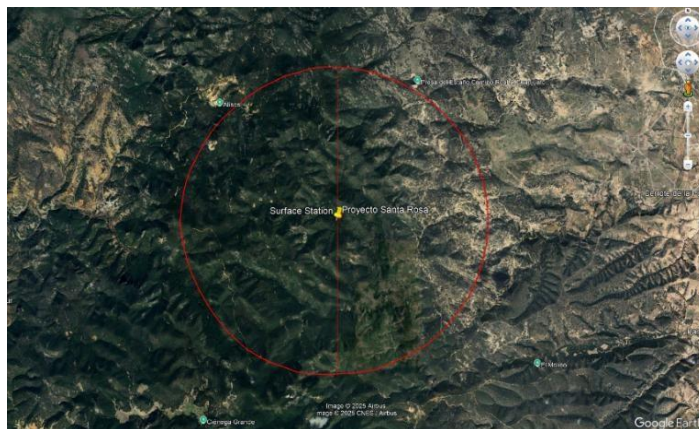


Figura 4. Área de estudio visión Google Earth.

Para caracterizar las condiciones atmosféricas, se construyó un archivo Excel con los datos extraídos del geo portal climático de la NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer Enhanced (DAVe). El conjunto de datos comprendió el periodo del 1 de enero de 2023 al 1 de junio de 2025, con registros horarios que generaron un total de 21,193 datos. Se incluyeron variables como año, mes, día, hora, cobertura nubosa, temperatura de bulbo seco (°C), humedad relativa (%), presión atmosférica (Kpa), dirección y velocidad del viento (a 2 metros), altura sobre el mar (m), precipitación (mm) y radiación solar (W/m<sup>2</sup>). Este archivo fue cargado en el procesador meteorológico AERMET para la generación del archivo (.SFC).

Asimismo, se integraron datos topográficos de alta resolución, obtenidos de plataformas geoespaciales públicas los cuales se incorporaron en AERMOD View para simular la influencia del relieve sobre la dispersión de contaminantes. Una vez integrados los datos meteorológicos, topográficos y geográficos, se realizó la ejecución del modelo de dispersión en AERMOD, generando mapas de concentración de partículas PM 2.5 para diferentes momentos del evento. Estos resultados fueron exportados y visualizados en QGIS, donde se superpusieron sobre capas de uso de suelo, elevación y zonas pobladas cercanas, lo que permitió una interpretación espacial más precisa de las zonas con mayor exposición.

Para estimar el factor de emisión utilizado en AERMOD View, se aplicó la metodología establecida por la EPA (AP-42, capítulo 13.1). Primero se calculó la biomasa consumida con la fórmula:

$$B = FL \times CF$$

Donde B es la biomasa consumida (kg/m<sup>2</sup>), FL la carga de combustible (1.5 kg/m<sup>2</sup>) y CF el factor de combustión (0.45), resultando en 0.675kg/m<sup>2</sup>. Posteriormente, se calculó la tasa de emisión en gramos por segundo y por metro cuadrado con la fórmula:

$$T = \frac{B \times 1000}{\Delta t}$$

Donde T es la tasa de emisión (g/s·m<sup>2</sup>), 1000 convierte a kg a g, y Δt es la duración del incendio en segundos (432,000s), obteniendo un valor de 0.000156g/s·m<sup>2</sup>. Este valor fue utilizado como entrada para la fuente emisora en el modelo AERMOD View.



Con el objetivo de completar y enriquecer los resultados obtenidos por el modelo físico, se aplicaron técnicas de Inteligencia Artificial (IA) para el análisis avanzado de los datos. Se seleccionaron algoritmos de aprendizaje supervisado como regresión lineal múltiple y redes neuronales, empleando software en Python con librerías como scikit-learn y TensorFlow. Los modelos fueron entrenados con los resultados de concentración de PM 2.5 generados por AERMOD, junto con variables meteorológicas y espaciales, para identificar patrones y comportamientos no lineales en la dispersión.

La validación de los modelos de IA se realizó mediante técnicas de validación cruzada, así como métricas de rendimiento como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación R2. Esta evaluación permitió verificar la capacidad predictiva de los modelos frente a los datos simulados y determinar su grado de precisión. La aplicación de IA permitió detectar zonas críticas, estimar concentraciones en puntos sin receptor definido, y anticipar escenarios bajo diferentes condiciones climáticas, fortaleciendo así el enfoque preventivo en la gestión de la calidad del aire.

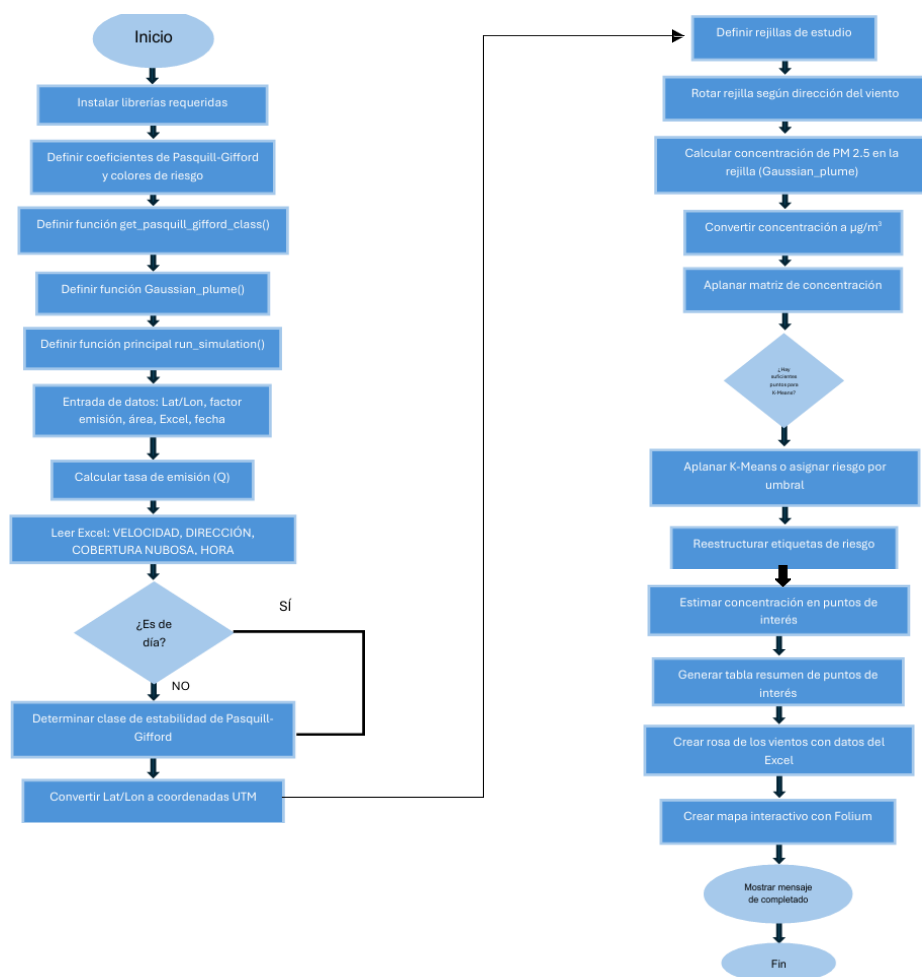


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo de simulación de dispersión de partículas PM 2.5 e identificación de niveles de riesgo utilizando un modelo gaussiano e Inteligencia Artificial.

Este diagrama muestra las etapas clave del algoritmo implementado en Python, que integra la simulación de plumas de dispersión con el modelo gaussiano, el análisis de condiciones meteorológicas y la clasificación de riesgo mediante técnicas de aprendizaje automático (K-Means). Incluye desde la entrada de datos (coordenadas, tasa de emisión, condiciones climáticas) hasta la visualización en mapas interactivos, con la estimación de concentraciones de contaminantes en puntos de interés y la generación de un sistema de alerta por nivel de exposición.

## Resultados

Análisis de dispersión de las partículas PM 2.5, en el Estado de Guanajuato, del periodo de 1 de enero de 2023 al 1 de junio de 2025.

Los resultados obtenidos fueron compilados en las figuras 6.1 y 6.2, las cuales representan las simulaciones de un periodo específico de tiempo comprendido entre el 24 de marzo al 29 de marzo de 2024. Se muestran las imágenes obtenidas mediante el software AERMOD View y Google Earth Pro para una interpretación más completa. El propósito de este estudio es analizar la relación entre los niveles de concentración de PM 2.5 y la ubicación del incendio. Para ello, se ha elaborado una tabla (tabla 1), en la que se representan los colores correspondientes a cada nivel de concentración.

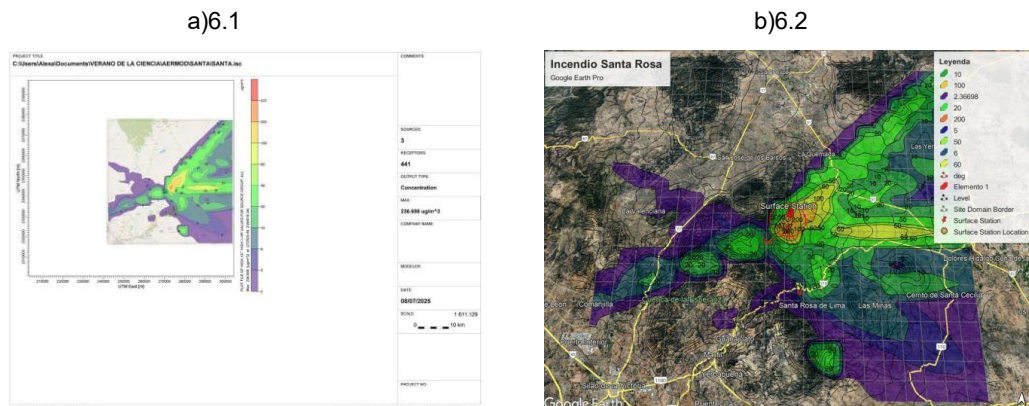


Figura 6.1. Simulación anual en AERMOD View para la dispersión de partículas PM 2.5 del periodo de 24 de marzo al 29 de marzo de 2024, (figura 6.2), integración del espectro de dispersión de partículas PM 2.5 en Google Earth.

**Tabla 1:** Interpretación colorimétrica de las concentraciones de partículas PM 2.5 en la simulación de AERMOD View.

| #  | Level    | Color |
|----|----------|-------|
| 1  | 236.6982 |       |
| 2  | 200      |       |
| 3  | 100      |       |
| 4  | 60       |       |
| 5  | 50       |       |
| 6  | 20       |       |
| 7  | 10       |       |
| 8  | 6        |       |
| 9  | 5        |       |
| 10 | 2.36698  |       |

El análisis de la progresión cromática de la tabla, aplicada sobre el mapa base de Google Earth Pro, permite identificar con claridad la pluma de dispersión y las zonas geográficas con mayor impacto del incendio de Santa Rosa. La Cañada de la Virgen se localiza en el epicentro de las concentraciones más significativas, desempeñando un rol esencial como punto de referencia para la dispersión.

Se observa que las concentraciones más elevadas (representadas en rojo y naranja, con valores superiores a  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  e incluso alcanzando los  $236.6982\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se concentran inmediatamente alrededor de la Cañada de la Virgen y se extiende predominantemente hacia el noreste y sureste. Hacia el noreste, esta pluma de alta concentración afecta áreas cercanas a San José de los barcos y se extiende ligeramente hacia La Quemada. Hacia el sureste, la influencia de estas concentraciones críticas se dirige hacia Santa Rosa de Lima y las Minas, afectando zonas adyacentes a la carretera 110 en esa dirección. Es importante destacar que estas concentraciones diarias exceden significativamente los límites máximos permitidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA1-2014) para PM 2.5 y las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que implica un riesgo considerable para la salud pública.

Las zonas con concentraciones altas a moderadas (colores amarillos y verdes claros, en el rango de  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se expanden considerablemente desde el núcleo del impacto. Estas concentraciones se extienden notablemente hacia el noroeste, cubriendo varias áreas en la Cuenca de la Esperanza y acercándose a localidades como La Valenciana y la parte sur de San Felipe. Hacia el sur y suroeste, la pluma se dirige hacia marfil, Guanajuato y Yerbabuena, aunque con concentraciones progresivamente menores. Se aprecian "islas" de concentración alrededor de los  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el área de Silao de la Victoria y Puerto Interior, lo que sugiere una dispersión residual o presencia de otros factores locales.

Finalmente, las concentraciones bajas a muy bajas (tonos de verde oscuro, azul y morado, de  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta  $2.36698\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) delimitan la extensión total del impacto de la pluma de PM 2.5. Estas áreas se encuentran en la periferia de la zona de estudio, como hacia Comanjilla al oeste, Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia al este, y San Martín de Terreros al sur, indicando una calidad del aire significativamente mejor en comparación con las zonas cercanas al foco del incendio. El valor de  $2.36698\mu\text{g}/\text{m}^3$  representa el nivel más bajo modelado, sugiriendo áreas con mínima influencia directa del incendio.

Este análisis cartográfico resalta la capacidad de la capacidad de la modelación AERMOD View para identificar con precisión las áreas geográficas más vulnerables a la dispersión de contaminantes atmosféricos, lo cual es fundamental para la implementación de medidas de mitigación y gestión de riesgos en eventos como el incendio de Santa Rosa.

Con el objetivo de respaldar la dirección y el comportamiento de la dispersión simulada en AERMOD View, se procedió a analizar los patrones de viento predominantes durante el periodo del estudio. Para ello, se generó una rosa de los vientos utilizando el software WRPLOT View, basada en los registros meteorológicos horarios. Esta herramienta permitió visualizar la frecuencia y dirección de los vientos, proporcionando un contexto adicional para interpretar las trayectorias predominantes de las partículas PM 2.5 simuladas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos (Figura 7).

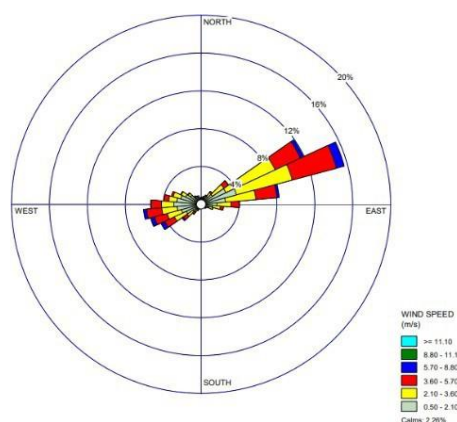


Figura 7. Rosa de los vientos generada con WRPLOT View para el periodo de enero de 2023 al 1 de junio de 2025, con datos horarios.

La figura 7 muestra la rosa de los vientos obtenida con el software WRPLOT View, utilizando un total de 21,191 horas de datos meteorológicos correspondientes al área de estudio. Los resultados indican que las direcciones predominantes del viento provienen del sector este y sureste, con una velocidad media de 2.48 m/s. Estos patrones de dirección y velocidad del viento son constantes con los resultados de dispersión generados en AERMOD View, donde la pluma de contaminantes PM 2.5 se extendió principalmente hacia el noroeste y occidente del punto de emisión. La baja frecuencia de vientos (2.26%) indica una alta movilidad de la masa contaminante durante el periodo modelado. Esta información fue esencial para orientar el diseño de la rejilla de estudio y validar las zonas de mayor impacto en el modelo gaussiano.

## Resultados del análisis con Inteligencia Artificial

### Análisis de dispersión de las partículas PM 2.5, en el Estado de Guanajuato, del periodo de 1 de enero de 2023 al 1 de junio de 2025 con Inteligencia Artificial (IA).

Para complementar la modelación física realizada con AERMOD View, se desarrolló un algoritmo en lenguaje Python, denominado FirePlume AI, con el objetivo de clasificar las zonas afectadas por la dispersión de partículas PM 2.5. Según su nivel de riesgo. Este modelo empleó el algoritmo K-Means, utilizando como variables de entrada datos meteorológicos horarios, incluyendo año, mes, día, hora, cobertura nubosa, temperatura de bulbo seco, humedad relativa, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, precipitación y radiación solar.

El modelo aplicó el enfoque de clasificación no supervisada para identificar tres niveles de riesgo (bajo, medio y alto), en función de la concentración estimada en cada celda de la rejilla simulada. Las áreas con concentraciones superiores a  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  fueron analizadas y agrupadas en segmentos de riesgo, generando una matriz de etiquetas que fue posteriormente reestructurada sobre la grilla espacial original. Esta clasificación permitió visualizar de manera más clara las zonas críticas en la trayectoria del penacho de contaminación.

El análisis evidenció que las zonas con mayor concentración de partículas se alinearon con las direcciones predominantes del viento, lo cual coincide con la dispersión modelada previamente en AERMOD View. Asimismo, el sistema permitió estimar la concentración en puntos de interés específicos, como localidades cercanas, y determinar si estas se encontraban dentro de la trayectoria del penacho. Finalmente, los resultados fueron representados visualmente mediante un mapa interactivo, donde se integraron capas de calor (HeatMap), polígonos de riesgo y marcadores por nivel de exposición, lo que facilitó una interpretación geoespacial más precisa del impacto del incendio.

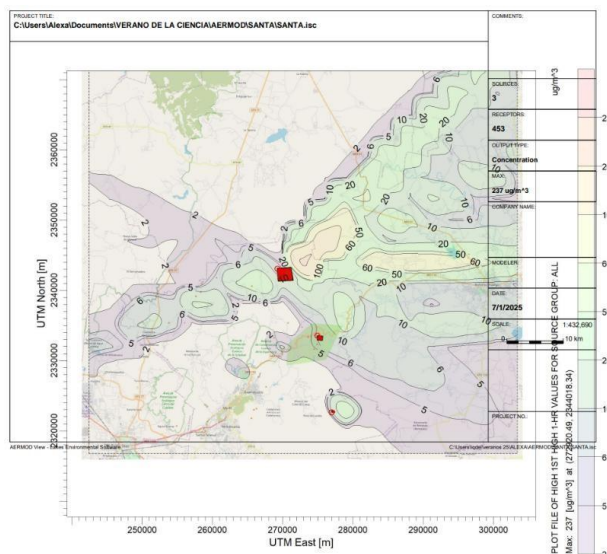


Figura 8. Mapa interactivo generado por el modelo FirePlume AI, mostrando la concentración estimada de PM 2.5, clasificación de riesgo (bajo, medio, alto) y trayectoria del penacho. Las zonas rojas representan los incendios.

Como parte del análisis de dispersión y clasificación de riesgo, se generó una rosa de los vientos utilizando código desarrollado en Python con datos meteorológicos simulados. Esta herramienta permitió representar visualmente la frecuencia y dirección del viento, uno de los factores más determinantes en la trayectoria del penacho contaminante. La dirección predominante del viento fue del este y noreste, lo cual refuerza la validez de los resultados obtenidos tanto en la simulación de AERMOD View como en la clasificación de riesgo generada por IA. Las velocidades de viento más frecuentes se ubicaron entre 2.0 y 6.0 m/s, lo que indica una dispersión activa, pero moderada.

Esta visualización sirvió para verificar la orientación del modelo de riesgo y fortalecer el análisis espacio-temporal de los contaminantes emitidos durante el incendio.



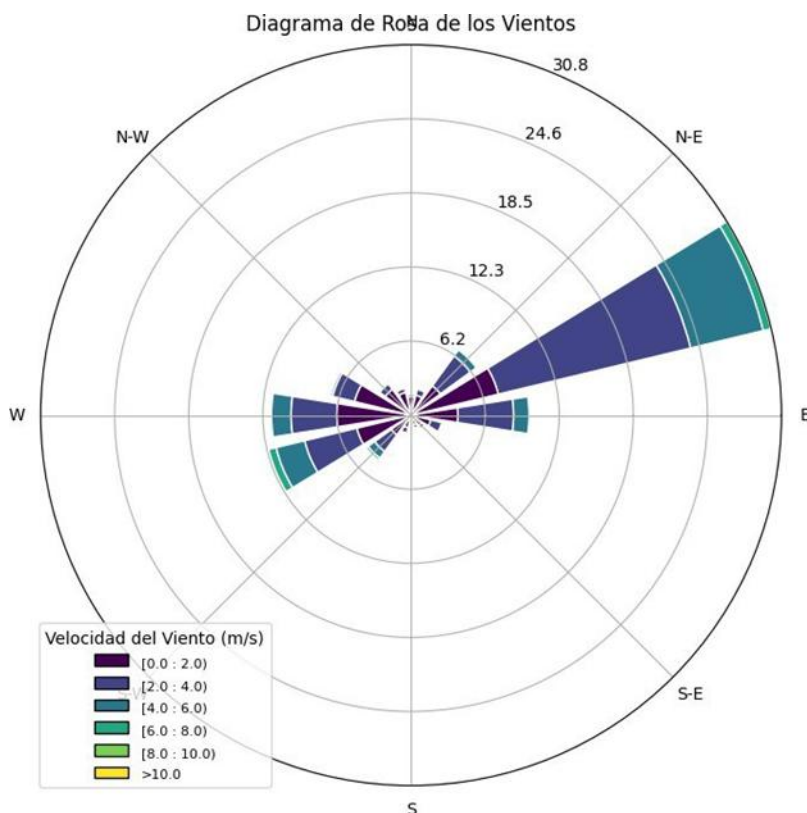


Figura 9. Rosa de los vientos generada mediante el algoritmo FirePlume AI, utilizando datos meteorológicos procesados para representar la dirección y frecuencia de los vientos durante el periodo de análisis.

### Informe de modelado y condiciones meteorológicas asociadas.

Antes de presentar los resultados de clasificación de riesgo, se resumen las condiciones de entrada empleadas para ejecutar el modelo FirePlume AI. La figura 10 muestra los parámetros clave definidos en la simulación, incluyendo latitud, longitud, coordenadas, tasa de emisión, área de emisión, emisión total, fecha de estudio y zona horaria, velocidad y dirección del viento. Estos valores fueron empleados como insumos directos para la generación de la pluma de dispersión y la posterior clasificación de zonas de riesgo.

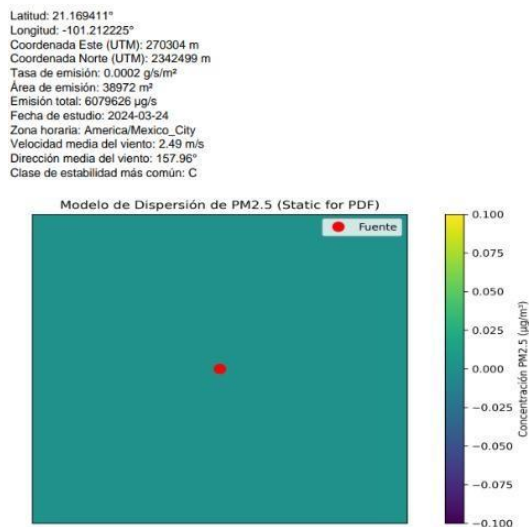


Figura 10. Parámetros de entrada configurados en el modelo FirePlume AI para el análisis de incendio en la Cañada de la Virgen.

En el cuadro 1 (tabla 2) se resumen las principales métricas extraídas del modelo, incluyendo variables operativas utilizadas para el modelado, tales como la tasa de emisión, duración del evento y dimensiones de la pluma.

**Tabla 2:** Métricas clave obtenidas del modelo FirePlume AI para la simulación del evento de dispersión.

| Metric                                   | Value      | Units             |
|--|------------|-------------------|
| Maximum concentration                    | 0.0000     | µg/m <sup>3</sup> |
| Location of max concentration (easting)  | 265304.04  | M                 |
| Location of max concentration (northing) | 2337498.92 | M                 |
| Predominant plume direction              | Southwest  |                   |
| Distance to max concentration            | 7071.07    | m                 |

## Conclusiones

El presente estudio abordó de manera integral la problemática de la dispersión atmosférica de contaminantes generados por incendios forestales, con un enfoque técnico aplicado al evento ocurrido en la Cañada de la Virgen, en el estado de Guanajuato. Mediante la combinación de herramientas de modelación física, como el modelo AERMOD View, y técnicas de Inteligencia Artificial desarrolladas a través del algoritmo FirePlume AI, se logró simular, analizar y visualizar el comportamiento del contaminante PM 2.5 bajo condiciones meteorológicas reales, generando resultados de alto valor técnico y práctico para la gestión ambiental y la evaluación de riesgos.

Desde el plano científico, el proyecto significó la generación de nuevo conocimiento aplicado en el análisis espacio-temporal de partículas finas. La simulación con AERMOD permitió identificar trayectorias de dispersión que fueron consistentes con los patrones de viento obtenidos a través de rosas generadas con WRPLOT View y FirePlume AI. Las salidas del modelo incluyeron mapas de isocontaminación, perfiles de concentración y análisis en puntos de interés, lo que proporcionó una base sólida para comprender la dinámica del penacho de contaminación y su interacción con la topografía y las condiciones atmosféricas de la región.

En una segunda etapa, la implementación del modelo FirePlume AI, desarrollado en Python, permitió incorporar técnicas de clasificación no supervisada para agrupar zonas afectadas según su nivel de riesgo de exposición. Este modelo utilizó como entrada de variables meteorológicas como temperatura, humedad, presión, dirección y velocidad del viento, entre otras, generando una representación espacial de los niveles de riesgo (bajo, medio, alto) sobre una rejilla previamente definida. Las visualizaciones obtenidas mediante heatmaps, rosas de viento y mapas interactivos facilitaron la interpretación de los resultados y fortalecieron el análisis predictivo del comportamiento del contaminante.

En términos metodológicos, este trabajo estableció un protocolo replicable que puede ser implementado en otros estudios de dispersión de contaminantes, adaptando la estructura del modelo a diferentes fuentes emisoras, topografías o condiciones meteorológicas. El uso de datos climáticos satelitales (NASA POWER DAVE), su procesamiento mediante AERMET y su visualización en plataformas como QGIS y Folium, permitió construir una herramienta integral, flexible y de alta aplicabilidad para escenarios reales. Adicionalmente, el estudio abordó una comparación conceptual entre el modelo Gaussiano simplificado utilizado en FirePlume AI y la complejidad regulatoria del modelo AERMOD de la EPA.

Mientras que el modelo de la IA sirvió como una aproximación funcional y eficiente para evaluar la dispersión bajo ciertas condiciones, AERMOD incorpora una serie de mecanismos físicos avanzados, incluyendo tratamientos diferenciados para capas atmosféricas estables e inestables, efectos de terreno complejo, influencias de estructuras físicas y parámetros atmosféricos derivados de teorías como la de Monin-Obukhov. Reconocer estas diferencias metodológicas es fundamental para valorar el alcance de cada enfoque y para continuar perfeccionando el modelo de la IA hacia mayores niveles de precisión y realismo. El impacto social y ambiental también debe de subrayarse.

La dispersión de partículas PM 2.5 representa una amenaza directa a la salud pública, especialmente en poblaciones expuestas a incendios forestales. Este trabajo contribuye a aumentar la conciencia sobre los efectos respiratorios, cardiovasculares y crónicos de estos contaminantes, además de proveer información técnica clave que puede ser utilizada por instituciones gubernamentales, ambientales y de protección civil para diseñar estrategias de prevención y respuestas ante emergencias atmosféricas. La clasificación de zonas de riesgo y la estimación de concentraciones en puntos sensibles ofrecen insumos valiosos para definir protocolos de evaluación, monitoreo o alerta temprana en situaciones futuras.

Finalmente, el modelo desarrollado, si bien no replica la sofisticación de AERMOD, representa un avance notable en el uso de Inteligencia Artificial para simular escenarios de dispersión atmosférica de manera rápida, accesible y adaptable. La posibilidad de seguir refinando este modelo, integrando nuevas variables, calibrando mejor los efectos de emisión o incorporando técnicas de aprendizaje profundo, abre una línea prometedora de investigación aplicada, especialmente en contextos donde el acceso a software regulatorio o infraestructura técnica es limitado.

En conjunto, hoy este proyecto no sólo demuestra que la fusión entre modelación física e Inteligencia Artificial es posible, sino que puede resultar altamente eficaz para enfrentar problemáticas ambientales compleja. Hoy su enfoque interdisciplinario, su metodología replicable y su potencial para apoyar decisiones ambientales basadas en evidencia posicionan este trabajo como un aporte valioso a la ciencia ambiental y a la gestión sostenible del territorio.

## Bibliografía/Referencias

- AERMOD: Description of Model Formulation (EPA-454/R-20-003). (2020). U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Recuperado 10 de julio de 2025, de <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>
- Bishop, C. M. (2006). Pattern recognition and machine learning. Springer.
- Chow, J. C. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal Of The Air & Waste Management Association*, 56(6), 707-708. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464484>
- Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., Lee, R. F., Peters, W. D., & Brode, R. W. (2005). AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. *Journal Of Applied Meteorology*, 44(5), 682-693. <https://doi.org/10.1175/jam2227.1>
- Clark, N. A., Demers, P. A., Karr, C. J., Koehoorn, M., Lencar, C., Tamburic, L., & Brauer, M. (2009). Effect of Early Life Exposure to Air Pollution on Development of Childhood Asthma. *Environmental Health Perspectives*, 118(2), 284-290. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900916>
- Diario Oficial de la Federación. (2014). "NOM-025-SSA1-2014 Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación" Cámara de Diputados LXII Legislatura.
- Lakes Software – Leader in Environmental Software Solutions. (s. f.). <https://www.weblakes.com/>
- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews Of Geophysics*, 20(4), 851-875. <https://doi.org/10.1029/rg020i004p00851>
- Naeher, L. P., Brauer, M., Lipsett, M., Zelikoff, J. T., Simpson, C. D., Koenig, J. Q., & Cohen, A. J. (2007). Woodsmoke health effects: A systematic review of the global literature. *Environmental Health Perspectives*, 115(12), 1613-1619.
- NASA POWER homepage. (s. f.). Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). <https://power.larc.nasa.gov/>

- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal Of The Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Reid, C. E., & Maestas, M. M. (2018). Wildfire smoke exposure under climate change. *Current Opinion In Pulmonary Medicine*, 25(2), 179-187. <https://doi.org/10.1097/mcp.0000000000000552>
- Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato. (2021). Programa de Gestión para mejorar la calidad del Aire ProAIRE Guanajuato 2021–2030. <https://sma.guanajuato.gob.mx/>
- U.S. EPA. (2022). AERMOD Modeling System. United States Environmental Protection Agency.