

Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 usando software para la simulación de contaminantes como AERMOD View e Inteligencia Artificial, tomando como caso de estudio en la Cañada de la Virgen.

Alexa Abigail Rosales G, Alejandro De La Peña T. División de Ingenierías, Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental. Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. AV. Juárez #77; Zona centro; Guanajuato, CP 36000.

aa.rosalesgonzalez@ugto.mx, a.delapena@ugto.mx.

Resumen

El material particulado fino (PM2.5) 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 PM2.5 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. El propósito de este estudio es comprender la dinámica de propagación de las partículas emitidas durante el evento, evaluar su impacto potencial en la calidad del aire y explorar el uso de nuevas tecnologías como apoyo en la gestión ambiental ante emergencias por incendios forestales.

Abstract.

Fine particulate matter (PM2.5) 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 PM2.5 generated by the fire that occurred in the protected area of Cañada de la Virgen, 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 purpose of this study is to understand the propagation dynamics of the particles emitted during the event, evaluate their potential impact on air quality, and explore the use of new technologies to support environmental management in the event of forest fire emergencies.

Palabras clave: PM2.5, dispersión de contaminantes, incendios forestales, AERMOD View, inteligencia artificial, calidad del aire, modelación atmosférica, cambio climático, emisiones, medio ambiente.

Introducción

La contaminación atmosférica por partículas finas, especialmente las PM 2.5 (aquellas con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros), constituye un grave problema de salud pública a nivel mundial. Su dimensión tamaña las 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 períodos 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.

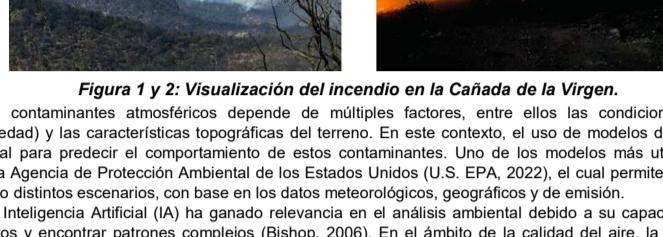


Figura 1 y 2: Visualización del incendio en la Cañada de la Virgen.

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 preventiva 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 esenciales para fortalecer los procesos de planificación, prevención y respuesta ante eventos contaminantes.

Para el presente estudio, se utilizó el módulo AERMET View para procesar los datos meteorológicos necesarios en el funcionamiento de AERMOD, el cual permitió simular con mayor precisión la dispersión de las partículas PM 2.5. Además, se emplearon plataformas de georeferenciación 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.- **Estar al alcance espacial y temporal de la dispersión:** Determinar las áreas geográficas y los períodos 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 georeferenciada 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 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.

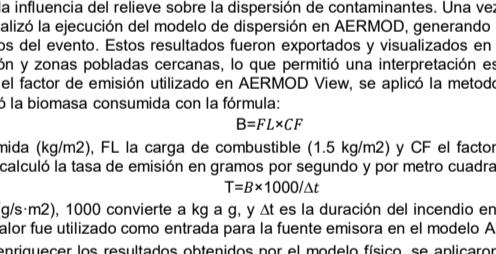


Figura 4: Área de estudio visión Google Earth.

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 período 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, 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 µg/m³ 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.

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

#	Level	Color
1	236.6982	Red
2	200	Orange
3	100	Yellow
4	60	Green
5	50	Light Green
6	20	Cyan
7	10	Blue
8	6	Magenta
9	5	Purple
10	2.366982	Black

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 µg/m³ e incluso alcanzando los 236.6982 µg/m³) 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 µg/m³ a 100 µg/m³) se expanden considerablemente desde el núcleo del impacto. Estas concentraciones se extienden notablemente hacia el noreste, 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 10 µg/m³ y 10 µg/m³ 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 µg/m³ hasta 2.36698 µg/m³) 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 Terrenos al sur, indicando una calidad del aire significativamente mejor en comparación con las zonas cercanas al foco del incendio. El valor de 2.36698 µg/m³ 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 período del estudio. Para ello, se generó una rosa de los vientos utilizando el software WRPLLOT 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).

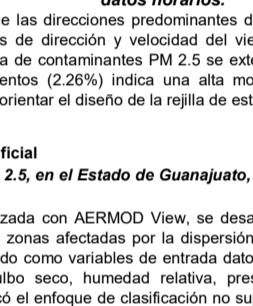


Figura 7: Rosa de los vientos generada con WRPLLOT View para el período de enero de 2023 al 1 de junio de 2025, con datos horarios.

La figura 7 muestra 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 noreste y occidente del Punto de emisión. La baja frecuencia de vientos (2.26%) indica una alta movilidad de la masa contaminante durante el período 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

Ánalisis de dispersión de las partículas PM 2.5, en el Estado de Guanajuato, del período 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. Segundo 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 (°C), humedad relativa (%), presión atmosférica (Kpa), 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 µg/m³ 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 PM2.5, 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 ubican 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 espacial temporal de los contaminantes emitidos durante el incendio.

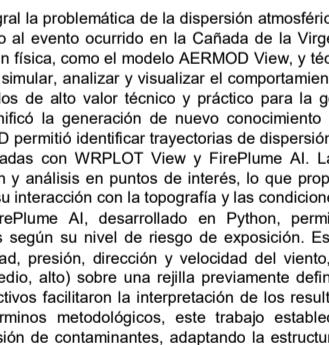


Figura 9: Rosa de los vientos generada mediante el algoritmo FirePlume AI, utilizando datos meteorológicos procesados para representar la dirección y frecuencia de los vientos durante el período de análisis.

Conclusión

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,