

## Resumen.

El material particulado (PM) es una mezcla de partículas en el aire, clasificadas en PM10 y PM2.5 según su tamaño. La OMS establece límites para asegurar una buena calidad del aire: 20 µg/m³ anuales y 50 µg/m³ en 24 horas para PM10. En México, la NOM-025-SSA1-2014 fija límites para PM10 (40 µg/m³ anuales y 75 µg/m³ en 24 horas) y PM2.5 (12 µg/m³ anuales y 45 µg/m³ en 24 horas). Las PM2.5 son especialmente peligrosas por su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio, causando enfermedades y aumentando la mortalidad prematura. También impactan el medio ambiente y contribuyen al cambio climático.

En Guanajuato, el crecimiento comercial ha incrementado las emisiones de PM2.5. Para analizar la dispersión de estas partículas, se usaron herramientas de simulación y georreferenciación, como AERMET View, QGIS, Google Earth Pro y POWER DAVE. El estudio busca identificar las fuentes principales de PM2.5 en los negocios de Guanajuato, analizar su dispersión y evaluar las condiciones meteorológicas que afectan su concentración.

## Abstract.

Particulate matter (PM) is a mixture of particles in the air, classified into PM10 and PM2.5 according to their size. The WHO establishes limits to ensure good air quality: 20 µg/m³ annually and 50 µg/m³ in 24 hours for PM10. In Mexico, NOM-025-SSA1-2014 sets limits for PM10 (40 µg/m³ annually and 75 µg/m³ in 24 hours) and PM2.5 (12 µg/m³ annually and 45 µg/m³ in 24 hours). PM2.5 is especially dangerous because of its ability to penetrate deep into the respiratory system, causing illness and increasing premature mortality. They also impact the environment and contribute to climate change.

In Guanajuato, commercial growth has increased PM2.5 emissions. To analyze the dispersion of these particles, simulation and georeferencing tools such as AERMET View, QGIS, Google Earth Pro and POWER DAVE were used. The study seeks to identify the main sources of PM2.5 in Guanajuato businesses, analyze their dispersion and evaluate the meteorological conditions that affect their concentration.

**Palabras clave:** Concentraciones, materiales particulados, emisiones, medio ambiente, cambio climático, leña, carbón PM 2.5.

## Introducción

El material particulado (PM) es una mezcla de partículas suspendidas en el aire. Pueden variar en tamaño, forma y composición química, y se clasifican en dos categorías principales: PM10 (partículas de 10 micrómetros de diámetro) y PM2.5 (partículas de 2.5 micrómetros) (WHO, 2013).

En México, los parámetros legales para estos contaminantes se encuentran en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, que regula la salud ambiental y establece límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente. Esta norma establece un límite anual de 40 µg/m³ y un límite de 75 µg/m³ para un período de 24 horas para PM10. Para PM2.5, se establece un límite anual de 12 µg/m³ y un límite de 24 horas de 45 µg/m³ (DOF, 2014).

Las partículas PM2.5 son de particular preocupación debido a su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio humano. Estas partículas son lo suficientemente pequeñas como para eludir las defensas del sistema respiratorio superior y alcanzar los bronquiolos y los alvéolos pulmonares (Pope & Dockery, 2006). Una vez inhaladas, pueden causar problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y se vinculan a un aumento en la mortalidad prematura (Brook et al., 2010).

La ciudad de Guanajuato se ubica dentro de las coordenadas 21° 00' 17" y 21° 03' 30" LN, 101° 15' 00" y 101° 18' 00" LO, a una altitud de aproximadamente 2,000 metros sobre el nivel del mar, en la región central del estado de Guanajuato, México. Los negocios, tanto grandes como pequeños, son fuentes significativas de emisiones de PM2.5 debido a la quema de combustibles fósiles y otras actividades relacionadas (Zhang et al., 2016). Las actividades económicas consideradas para este artículo fueron los negocios de comida, que emplean combustibles como el carbón y la leña. en la figura 1 se muestra los diferentes factores de emisión para uso de carbón, y en la figura 2 se muestra los distintos factores de emisión para el uso de leña (Suh Y. Lee, 2020).

Para comprender mejor la generación y dispersión del material particulado en Guanajuato, se realizaron análisis utilizando diversas herramientas de simulación y georreferenciación. Se emplearon softwares como AERMENT View para modelar la dispersión de las partículas, QGIS y Google Earth Pro para la visualización y análisis geoespacial, y POWER DAVE para obtener datos meteorológicos precisos. Estos programas permitieron una evaluación detallada de las fuentes de generación de PM2.5 y de cómo las condiciones meteorológicas influyen en su movimiento y concentración en la atmósfera.

## Objetivo.

El objetivo de este estudio es identificar las principales fuentes de PM2.5 generadas por los negocios que emplean combustibles como leña y carbón en Guanajuato, analizar la dispersión de estas partículas y evaluar las condiciones meteorológicas que afectan su concentración.

## Metodología.

Se recopiló información acerca de sitios de emisión de material particulado tales como negocios de pollo rostizado, hamburguesas al carbón, cafeterías (con máquina de café), pan a la leña, en los alrededores de la zona centro de Guanajuato, Guanajuato, haciendo uso de la herramienta de POWER DAVE y mapa satelital de Google Maps y Google Earth para la ubicación de los sitios y la obtención de sus coordenadas y se tomó el factor de emisión de la EPA de las figuras 1 y 2. Como se observa en la figura 3, a través de la herramienta de información geográfica de QGIS 3.36.6 se crearon archivos de terminación .shp sobre un mapa de la zona centro de Guanajuato señalando las ubicaciones y la extensión de tales negocios para posteriormente exportarlos al sistema de modelado de dispersión atmosférica AERMOD view del Software Lakes Enviromental.

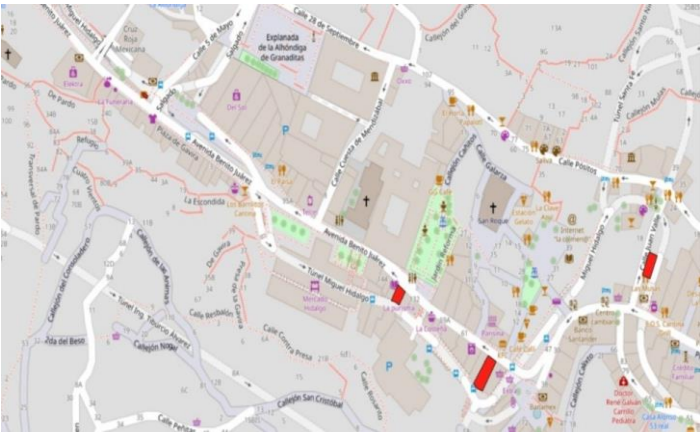


Figura 3. Integración de .SHP al mapa de la ciudad de Guanajuato por QGIS.

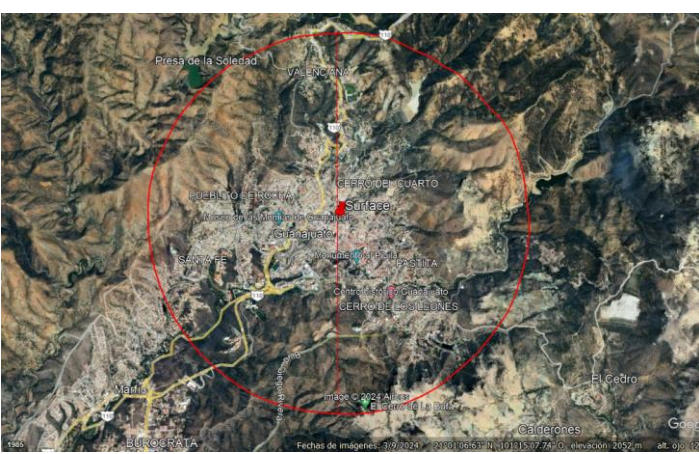


Figura 4. Área de estudio visión Google Earth.

Se creó un archivo de Excel con la información obtenida a partir del geo portal climático de la NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer Enhanced (DAVE), accediendo a los datos monitoreados en el estado de Guanajuato durante el periodo entre el 1 de enero del 2023 al 17 de junio del 2023 cada hora generando 12378 datos, se descargaron los datos de la Temperatura de bulbo seco a 2 metros (°C), Humedad relativa a 2 metros (%), dirección del viento a 2 metros (grados), presión atmosférica (KPa) y radiación (W/m²2), agregando además la altura sobre el mar promedio del perímetro. Este archivo se usó para subir la información en el archivo de AERMET.

Cuando la información proyectada con AERMET y la compilación de datos meteorológicos, se exportó el archivo de terminación. SFC a la aplicación de AERMOD view. Los archivos de terminación .shp fueron exportados a la aplicación de AERMOD view para su posterior proyección 3D, en la cual se agregaron las chimeneas emisoras de material particulado considerando medidas con estimaciones a escala, tomando en cuenta un promedio de altura para los edificios de 7 metros y para las chimeneas una altura por encima del edificio de 2 a 3 metros, y agregaron los factores del terreno considerando a 900m sobre el suelo para la correcta estimación de la dispersión de los contaminantes. Se empleó una fórmula para obtener la velocidad de dispersión de material particulado de la leña y el carbón:

$$Q=FE\ast CQ=FE\ast C$$

Donde Q representa el flujo (g/s), FE el factor de emisión (g/kg) y C el consumo promedio (Kg/s), y se agregaron los resultados a la información para cada chimenea junto con los datos de temperatura de gases (°C), diámetro de chimenea (m), velocidad del gas (m/s). Se tomaron los factores de emisión en base al uso de carbón o leña correspondiente a cada establecimiento, así como el consumo promedio de los mismos. Los parámetros manejados en las chimeneas de leña fueron el factor de emisión de 0.00296 g/s, la temperatura de salida del gas de 543,15 K y la velocidad de emisión de 1.5 m/s, mientras que para las chimeneas de carbón los datos utilizados fueron un factor de emisión de 0.00217 g/s, la temperatura de salida del gas de 673,15 K y la velocidad de emisión de 2 m/s. Una vez cargados los datos para cada chimenea fue posible correr la simulación en el programa de AERMOD, seleccionando distintas fechas a partir del 1 de enero del 2023 hasta el 17 de junio del 2024, permitiendo observar las variaciones en la dispersión de los contaminantes según las condiciones climáticas presentes en la región. Se realizó una simulación para la semana santa del 2023 y la santa del 2024 para analizarlo en ambos años, un estudio en octubre del 2023 correspondiente al festival cervantino y una semana de baja presencia turística y estudiantil, la primera semana de enero del 2024.

## Análisis de Resultados.

**Análisis anual de la dispersión de las partículas PM 2.5, en la ciudad de Guanajuato Capital, del periodo 1 de enero de 2023 al 17 de junio de 2024.**

Los resultados fueron recopilados en la figura 5 a y 5b, las cuales representan a las simulaciones de un periodo específico de tiempo del 1 de enero 2023 hasta 17 de junio del 2024, se muestra la imagen obtenida con el software AERMOD view y Google Earth Pro para una interpretación más completa. Los colores representan los niveles de concentración de PM2.5 en 1µg/m3 que corresponden a la zona señalada, estos están descritos en la tabla 3.

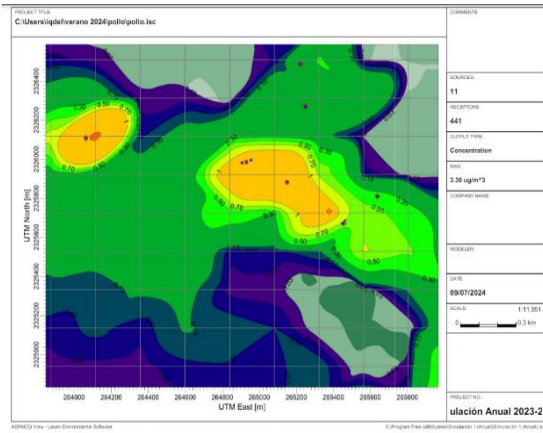


Figura 5 a)

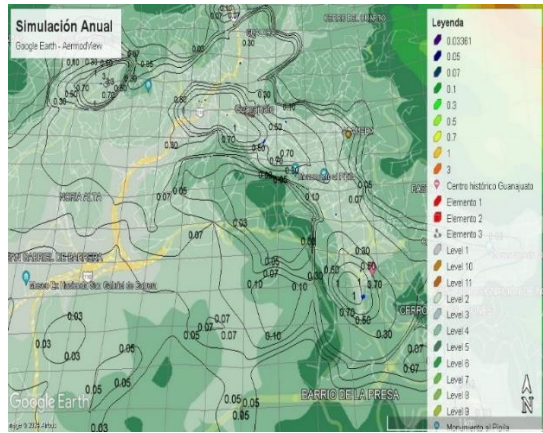


Figura 5 b)

Figura 5 a, simulación anual en Aermod View para dispersión de partículas PM 2.5 del periodo 1 Ene del 2023 al 17 de Jun del 2024, 5 b, integración del espectro de dispersión de partículas PM 2.5 en Google Earth.

Tabla 2. Interpretación colorimétrica de las distintas concentraciones de las partículas PM 2.5 en la simulación de AERMOD View.

#	Level	Color
1	3.36126	Red
2	3	Orange
3	1	Yellow
4	0.7	Light Green
5	0.5	Green
6	0.3	Dark Green
7	0.1	Blue
8	0.07	Dark Blue
9	0.05	Very Dark Blue
10	0.03361	Purple

Tabla 2.

La variación de la concentración de PM 2.5 con respecto a las variables meteorológicas se muestran en la figura 5 a, donde puede observarse que la concentración de PM 2.5 en la zona centro de la ciudad de Guanajuato tiende a incrementarse teniendo un máximo de concentración de un 1µg/m3. Sin embargo, también existe un incremento de las concentraciones en la zona de embajadoras, la zona de 2 ríos cercano a la glorieta, y en la zona de pueblito de rocha. Estos puntos naranjas indican mayor concentración de PM 2,5 y es donde se localizan los negocios de pollo a la leña y al carbón. En la figura 5 b se representa la simulación en Google Earth, en donde se muestra con mayor detalle la dispersión de las partículas PM 2.5 a través de la ciudad, de este modo se aprecia que el alcance de dispersión es muy amplio principalmente hacia la zona sur de la ciudad de Guanajuato y poca presencia hacia la zona norte conforme se aleja del punto de emisión

o control, la concentración de las partículas PM 2.5 va en decaimiento hasta alcanzar concentraciones de 0.05 µg/m3, esto es debido a que los vientos de la ciudad de Guanajuato durante este periodo analizado fueron predominantes del norte al sur de acuerdo a los datos obtenidos por el sistema meteorológico espacial de la nasa.

## Comparación de la dispersión de las partículas PM 2.5 de la semana Santa del año 2023 y 2024.

En la figura 6 a se muestra la simulación de la semana santa del año 2023, y la figura 3b se muestra la simulación de la semana santa del año 2024, podemos observar en la figura 3a que las concentraciones son mayores en la zona centro de la ciudad de Guanajuato. En los puntos de control que representan a los restaurantes o negocios en estudio cabe destacar que las concentraciones marcadas en color naranja son concentraciones cercanas a un microgramo por metro cúbico, también podemos observar que la dispersión de las partículas PM 2.5 presentan una tendencia hacia la zona sur de manera predominante y hacia la zona norte muy baja dispersión conforme avanza la distancia de dispersión esta tiende a disminuir llegando a los 0.5 µg/m³, sin embargo, las concentraciones de las partículas PM 2.5 con concentraciones de 0.8 a 1 µg/m³ tiene una distribución casi lineal entre los puntos de estudio esto se debe a la morfología de la propia ciudad ya que al ser una cañada los vientos tienden a concentrarse en la zona centro de la ciudad es por ello que observamos una conexión entre los puntos de estudio aunque se encuentren a distintas distancias u ubicaciones en la ciudad.

En la figura 6 b se muestra la simulación de la Semana Santa del 2024, en comparación a la Semana Santa del 2023 la concentración de las partículas PM 2.5. Es evidente el incremento de la dispersión de las partículas PM 2.5 en los puntos de control, alcanzando concentraciones hasta de 1 µg/m³ comparado con la Semana Santa del año del 2023. Este incremento poblacional se refleja claramente en las simulaciones realizadas ya que las concentraciones generadas por partículas PM2.5 se incrementaron principalmente en los negocios de pollos al carbón y en el centro de la ciudad ya que es la zona más concurrida en épocas de Semana Santa, sin embargo tanto en la zona de embajadoras como la zona de 2 ríos y pueblito de rocha también se presenta un leve incremento en las partículas PM 2.5, alcanzando concentraciones hasta de punto 8 µg/m³ , la dispersión de las partículas PM 2.5 sigue teniendo una tendencia hacia la zona centro y zona sur de la ciudad debido a los vientos presentes en las épocas del mes existen estudios (Zamorategui, A. (2022), que demuestran que los meses de marzo a mayo son meses con mayor presencia de vientos, provocando que exista una mayor distribución de las partículas PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato.

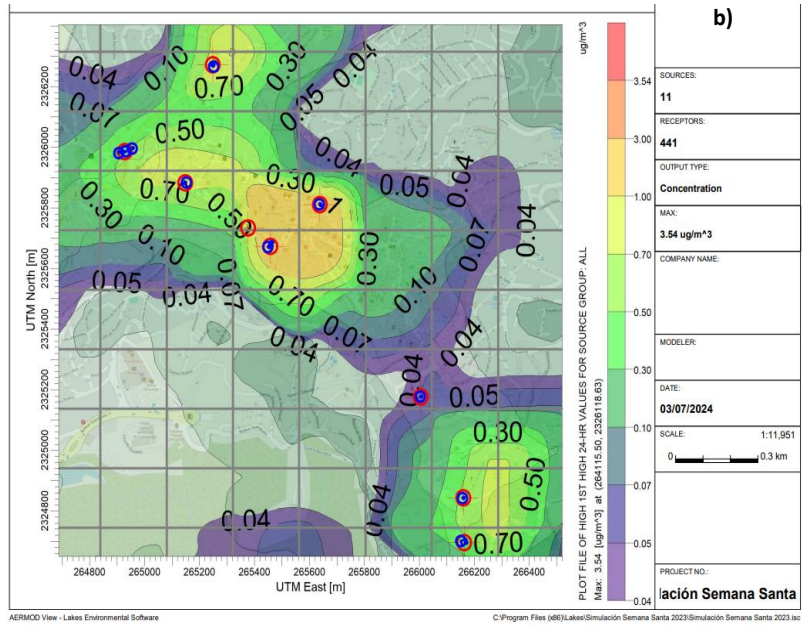
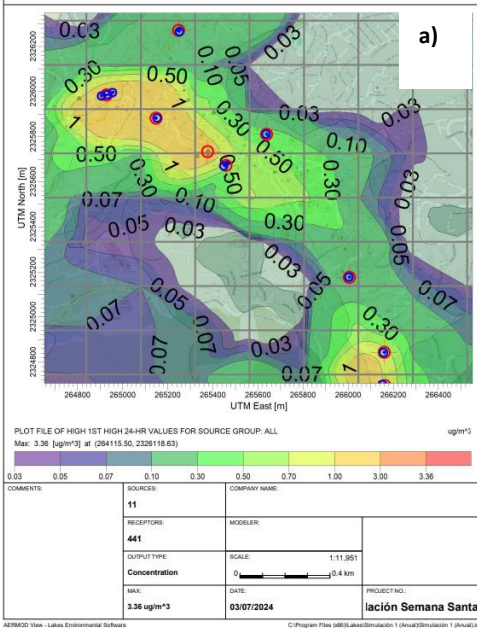


Figura 6a simulación de la dispersión de partículas PM 2.5 sobre la ciudad de Guanajuato correspondiente a la semana Santa del año 2023, figura 6b, simulación de la dispersión de partículas PM 2.5 sobre la ciudad de Guanajuato correspondiente a la semana Santa del año 2024.

## Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 en el Festival Cervantino del año 2023.

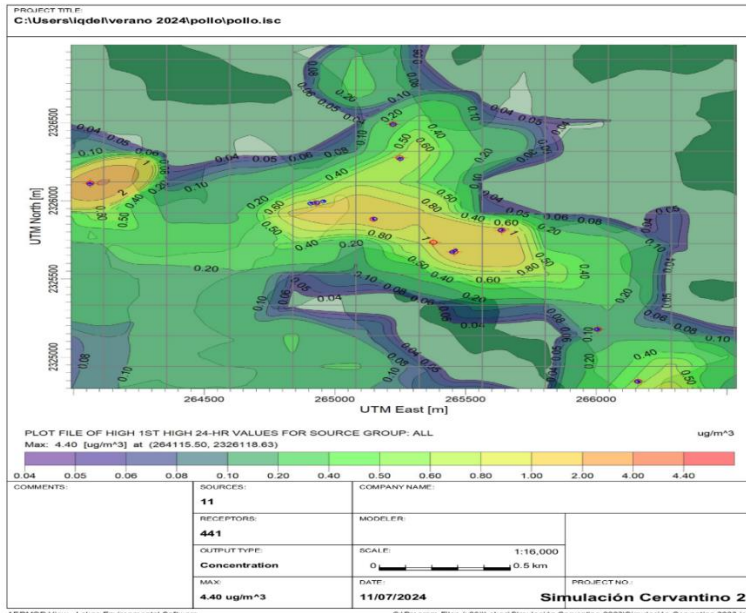


Figura 7 a. Simulación de la dispersión de las partículas PM 2.5 correspondiente al Festival Cervantino del año 2023 vista AERMOD View.

interpretación colorimétrica de las distintas concentraciones de las partículas PM 2.5 en la simulación de AERMOD View.

## Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 en una semana baja de baja poblacional flotante (turismo y estudiantes).

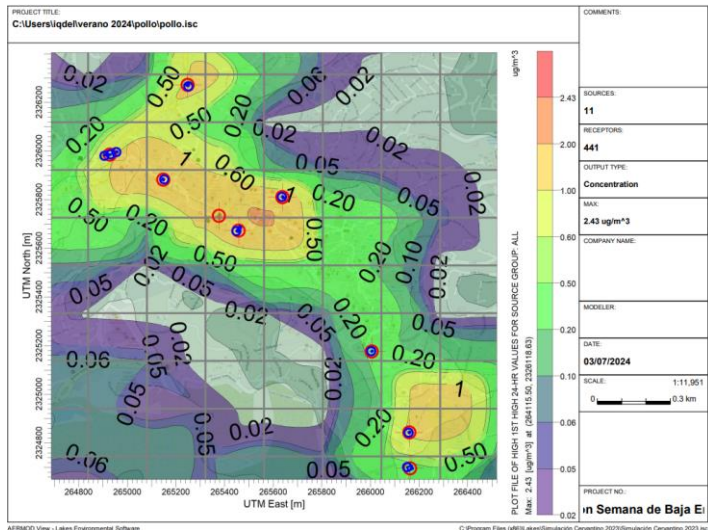


Figura 8. Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 en una semana baja de baja poblacional flotante (turismo y estudiantes).

En la figura 7 se muestra el análisis que se realizó de la dispersión de las partículas PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato en el mes de octubre del año 2023 que corresponde a los días del festival cervantino, como bien pueden observarse en este caso las concentraciones de las partículas PM 2.5 fueron principalmente superiores a 0.8 hasta 4.40 µg/m3 en los puestos de hamburguesas al carbón, lo que indica que el mayor consumo durante este festival fueron las hamburguesas y en la zona centro donde se localizan las pollerías al carbón sus concentraciones de partículas PM 2.5 fueron por debajo de 0.8 µg/m3. La dispersión de las partículas PM 2.5 alrededor de Guanajuato es mayor comparado a los estudios anteriores, porque en octubre en la ciudad de Guanajuato capital hay vientos de moderados a fuertes, lo que provoca la distribución y dispersión de las partículas PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato, en la tabla 3 se muestra la

## Conclusiones.

La concentración de PM 2.5 de promedio anual en la ciudad de Guanajuato generado por los restaurantes de pollos a la leña, pollos al carbón, así como las hamburguesas callejeras hechas con carbón presentaron una concentración cercana a 1 µg/m³, resaltando la línea de la zona centro de la ciudad, esto es debido a que la morfología de la misma ciudad al ser una cañada los vientos predominantes recorren hacia el centro de la ciudad para después ir hacia la zona sur como se pudo observar la dispersión de los contaminantes PM 2.5 se distribuyeron con dirección hacia la zona sur de la ciudad de Guanajuato y con muy baja presencia hacia la zona norte. La dispersión de las partículas de PM 2.5 en Guanajuato fue influenciada por los patrones estacionales de viento y la actividad humana. En enero y octubre, los vientos predominantes del norte y noreste concentran las partículas hacia el sur y suroeste de la ciudad, debido a la estabilidad atmosférica que mantiene las partículas cerca del suelo. Durante Semana Santa, la variabilidad de los vientos provoca una dispersión más irregular, con una mezcla atmosférica que puede reducir las concentraciones en ciertas áreas, aunque en días con vientos menos variables, las concentraciones pueden permanecer altas cerca de las fuentes de emisión. Las simulaciones muestran que las concentraciones de PM 2.5 son mayores en áreas con actividad comercial intensa, como el centro de la ciudad, Embajadoras, Dos Ríos, y Pueblito de Rocha, donde se ubican negocios que utilizan leña y carbón. En eventos como el Cervantino en donde comercios de comida suelen llegar a su mayor número de clientes, la dispersión de PM 2.5 se incrementa debido a vientos más fuertes en octubre y el movimiento de la actividad y consumo humano, alcanzando concentraciones superiores a 0.8 µg/m³ en los puestos de hamburguesas al carbón. El punto de la ciudad en los que se encuentran las concentraciones más altas (rebasando los 1µg/m³) es la calle Juan Valle en zona centro, y sus alrededores, como la intersección que tiene con calle Positos. En casi todos los periodos, esta ubicación está marcada de color naranja, pero en el festival internacional cervantino 2023 y en enero 2024 (figura 7 y 8 respectivamente), está roja, lo que indica que el nivel de concentración aumenta mucho en esa zona. En contraste, en enero, la menor actividad turística y la estabilidad atmosférica resultan en concentraciones más bajas alcanzando hasta 0.05 µg/m³, aunque las partículas pueden recorrer grandes distancias debido a la geografía de la propia ciudad, además, a esto se le agrega que esta fecha suele ser una fecha de recuperación debido a los grandes gastos económicos que presenta la población por ser el inicio de año.

## Referencias.

- Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C. M., Alvarado, J., Reid, J. S., Karl, T., Crounse, J. D., & Wennberg, P. O. (2011). Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 4039-4072.
- Andreae, M. O. (2019). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning - an updated assessment. Atmospheric Chemistry and Physics, 19, 8523-8546.
- Andreae, M. O., & Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. Global Biogeochemical Cycles, 15, 955-966.
- Bertschi, I. T., Yokelson, R. J., Ward, D. E., Christian, T. J., & Hao, W. M. (2003). Trace gas emissions from the production and use of domestic biofuels in Zambia measured by open-path Fourier transform infrared spectroscopy. Journal of Geophysical Research, 108, 8469. DOI: 10.1029/2002JD002158.
- Bhattacharya, S. C., & Abdul Salam, P. (2002). Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries. Biomass and Bioenergy, 22, 305-317.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., et al. (2010). Contaminación del aire por material particulado y enfermedades cardiovasculares: Una actualización de la declaración científica de la Asociación Americana del Corazón. Circulation, 121(21), 2331-2378.
- Campo, L., Masiol, M., & Squizzato, S. (2017). Tendencias y variabilidad interanual de material particulado (PM10 y PM2.5) en la región de Veneto (NE Italia). Contaminación Ambiental, 220, 168-178.