VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

# Evaluación de la calidad del aire y riesgos para la salud asociados a la exposición a $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$ en la zona sur de la ciudad de Guanajuato

Assessment of air quality and health risks associated with exposure to $PM_{2.5}$ and $PM_{10}$ in the southern area of the city of Guanajuato

Adrián Zamorategui Molina, Guadalupe Collazo Alfaro, Hambar Tapia Rodríguez[1], Josué Giovanni Juárez Jasso[2], Karla Guadalupe Piñón Sánchez, y Marcos Irineo Esquivel Longoria[3]

[1] Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato
[2] Div. Ciencias de la Salud: Campus León; Universidad de Guanajuato.
[3] División de Ciencias Naturales y Exactas (DCNE), Departamento de Astronomía; Área de Ciencias Atmosféricas y Observatorio Meteorológico
g.collazoalfaro@ugto.mx, kg.pinonsanchez@ugto.mx, h.tapiarodríguez@ugto.mx, jg.juarezjasso@ugto.mx, zamorategui@ugto.mx

## Resumen

La contaminación atmosférica generada por la industria ladrillera artesanal representa un problema ambiental y de salud pública en diversas regiones de México. El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del aire y estimar el riesgo sanitario asociado a la exposición a material particulado fino ($PM_{2.5}$) y grueso ($PM_{10}$) en la zona sur de la ciudad de Guanajuato, particularmente en la comunidad de Yerbabuena, donde se concentra la actividad ladrillera. Se realizaron monitoreos de $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$ en Yerbabuena y Villas de Guanajuato mediante un monitor portátil de calidad del aire, mientras que para la zona centro de la ciudad (Unidad Belén) se utilizaron registros de una estación semiautomática. Adicionalmente, se registraron variables meteorológicas y se analizaron los patrones de dispersión mediante rosas de viento. Los resultados mostraron que Yerbabuena presentó las mayores concentraciones de partículas, alcanzando promedios de $PM_{2.5}$ de hasta 30.4 µg/m³ y máximos instantáneos de 207.3 µg/m³. Estos valores superaron las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y fueron superiores a los registrados en Villas de Guanajuato y la zona centro. Asimismo, las condiciones meteorológicas locales, caracterizadas por bajas velocidades de viento y frecuentes periodos de calma, favorecieron la acumulación de contaminantes. La evaluación epidemiológica indicó incrementos potenciales de hasta 18.48 % en el riesgo relativo de mortalidad cardiovascular asociados a la exposición observada. Se concluye que la actividad ladrillera artesanal constituye una fuente significativa de material particulado en Yerbabuena y puede representar un riesgo para la salud de las poblaciones cercanas, por lo que resulta necesario fortalecer el monitoreo ambiental e implementar estrategias de control de emisiones.

**Palabras clave**: $PM_{2.5}$, Calidad del aire, Riesgo para la salud, Ladrilleras, Material particulado, Guanajuato.

## Abstract

Air pollution generated by artisanal brick-making activities represents an important environmental and public health concern in many regions of Mexico. This study aimed to assess air quality and estimate health risks associated with exposure to fine ($PM_{2.5}$) and coarse ($PM_{10}$) particulate matter in the southern area of Guanajuato City, with emphasis on the community of Yerbabuena, where brick kiln activities are concentrated. $PM_{2.5}$ and $PM_{10}$ concentrations were monitored in Yerbabuena and Villas de Guanajuato using a portable air quality monitor, while hourly $PM_{2.5}$ data for the downtown area (Unidad Belén) were obtained from a semi-automatic monitoring station. Meteorological variables were recorded, and pollutant dispersion patterns were analyzed using wind rose diagrams. The results showed that Yerbabuena exhibited the highest particulate matter concentrations, reaching average $PM_{2.5}$ levels of 30.4 µg/m³ and peak concentrations of 207.3 µg/m³. These values exceeded the World Health Organization air quality guideline and were consistently higher than those measured in Villas de Guanajuato and the city center. In addition, local meteorological conditions, characterized by low wind speeds and frequent calm periods, favored pollutant accumulation. The health risk

assessment indicated potential increases of up to 18.48% in relative cardiovascular mortality risk associated with the observed $PM_{2.5}$ exposure levels. The findings suggest that artisanal brick kilns are a significant source of particulate matter emissions in Yerbabuena and may pose a relevant health risk to nearby populations. Strengthening air quality monitoring programs and implementing emission control strategies are recommended to mitigate potential impacts on public health.

**Keywords:** $PM_{2.5}$, air quality, health risk, artisanal brick kilns, particulate matter, Guanajuato.

## Introducción

La contaminación del aire ha trascendido el ámbito ambiental para consolidarse como uno de los principales desafíos de salud pública del siglo XXI. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), la contaminación del aire es responsable de más de 7 millones de muertes prematuras cada año en todo el mundo. Esta problemática se intensifica particularmente en los países en desarrollo, especialmente en naciones del sur de Asia como India, Bangladesh y Pakistán, así como en diversas regiones de América Latina, donde el acelerado crecimiento urbano y la persistencia de actividades industriales con escasa regulación incrementan significativamente las emisiones contaminantes. En este contexto, la fabricación artesanal de ladrillos constituye una fuente importante de deterioro ambiental a escala local, impulsada por la creciente demanda de materiales de construcción y sustentada en tecnologías de cocción tradicionales de baja eficiencia energética que generan emisiones atmosféricas significativas (Reyes-García *et al.,* 2022; Singh *et al.,* 2022).

En México, esta actividad representa un sector económico de relevancia social y laboral, desarrollado predominantemente por unidades de producción familiares que operan en condiciones de informalidad y que continúan empleando procesos tecnológicos obsoletos (Quiroz Carranza *et al.,* 2021). A nivel nacional, se estima la existencia de entre 10 251 y 16 953 unidades económicas dedicadas a esta actividad para inicios de 2026. El estado de Guanajuato figura entre las entidades con mayor presencia de hornos ladrilleros en el país. En este contexto, el municipio de Guanajuato, y particularmente la comunidad de Yerbabuena, área de estudio de la presente investigación, enfrenta una problemática ambiental y sanitaria de considerable relevancia. La concentración de hornos en la periferia urbana representa una fuente potencial de exposición crónica a contaminantes atmosféricos para las poblaciones circundantes, lo que podría comprometer el derecho de la población a disfrutar de un medio ambiente sano (Quiroz Carranza *et al.,* 2021).

El núcleo del riesgo ambiental en Yerbabuena radica en la utilización predominante del denominado horno tipo campaña, una estructura de baja eficiencia térmica que carece de sistemas de control o filtración de emisiones. Para alcanzar y mantener las temperaturas requeridas durante los ciclos de cocción, que pueden extenderse durante varios días, los productores recurren frecuentemente a la combustión de diversos residuos con alto poder calorífico, entre ellos neumáticos fuera de uso (NFU), aceites automotrices residuales, maderas tratadas y plásticos industriales, incluyendo PET y PVC. La combustión incompleta de estos materiales favorece la emisión de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COV), material particulado y diversos metales potencialmente tóxicos, como plomo, cadmio y arsénico. Además, estas condiciones favorecen la formación de dioxinas y furanos, compuestos reconocidos por su potencial carcinogénico y su capacidad para alterar procesos endocrinos (López-García *et al.,* 2023; Martínez-Abarca *et al.,* 2022).

Sin embargo, las partículas suspendidas representan uno de los contaminantes de mayor relevancia sanitaria asociados a estas emisiones, particularmente las fracciones $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$. Mientras que las partículas $PM_{10}$ tienden a depositarse en el tracto respiratorio superior y se asocian con irritación de las mucosas y exacerbación de enfermedades respiratorias preexistentes, las partículas finas PM2.5 presentan una capacidad significativamente mayor de penetración en el sistema respiratorio. Debido a su reducido diámetro aerodinámico, pueden alcanzar la región alveolar profunda y, en ciertos casos, atravesar la barrera alvéolo-capilar para incorporarse al torrente sanguíneo (Thangavel *et al.,* 2022).

A nivel celular, la exposición prolongada a PM2.5 desencadena mecanismos de estrés oxidativo mediante la generación persistente de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la liberación de mediadores proinflamatorios. Este estado de inflamación sistémica crónica contribuye al desarrollo de disfunción endotelial, acelera la progresión de enfermedades ateroscleróticas, incrementa la susceptibilidad a eventos

cardiovasculares isquémicos y alteraciones del ritmo cardíaco, y favorece la aparición de daño genético y alteraciones epigenéticas asociadas con procesos de carcinogénesis (Rajagopalan *et al.,* 2021; Thangavel *et al.,* 2022).

Las consecuencias biológicas descritas anteriormente tienen una traducción directa en los indicadores epidemiológicos de salud pública. Diversos estudios han documentado que, por cada incremento de 10 µg/m³ en la concentración de PM2.5, el riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares aumenta aproximadamente un 12 %, mientras que la mortalidad por causas respiratorias se incrementa entre un 4 % y un 8 %. Asimismo, la exposición crónica a estas partículas se ha asociado con un mayor riesgo de cáncer de pulmón, enfermedades cerebrovasculares, deterioro cognitivo y trastornos neurodegenerativos, afectando de manera significativa la calidad de vida de las poblaciones expuestas (Calderón-Garcidueñas *et al.,* 2022; Quiroz Carranza *et al.,* 2021).

Desde una perspectiva contemporánea, estos efectos pueden analizarse bajo el concepto de exposoma ambiental, entendido como el conjunto de exposiciones físicas, químicas y biológicas que experimenta una persona a lo largo de su vida y que interactúan con factores genéticos y sociales para determinar su estado de salud. Bajo este enfoque, la exposición a PM2.5 derivada de la actividad ladrillera no actúa de manera aislada, sino en combinación con otros determinantes ambientales y socioeconómicos que pueden aumentar la vulnerabilidad de las poblaciones y profundizar las desigualdades en salud.

A pesar de la evidencia disponible sobre los efectos adversos de estos contaminantes, la evaluación y mitigación del riesgo asociado a la exposición a PM2.5 continúan enfrentando importantes desafíos normativos en México. Mientras que las directrices de la OMS (2021) recomiendan concentraciones máximas promedio de 24 horas de 15 µg/m³ para PM2.5 y 45 µg/m³ para $PM_{10}$, la NOM-025-SSA1-2021 establece límites máximos permisibles de 25 µg/m³ y 50 µg/m³, respectivamente, valores considerablemente menos restrictivos. Esta diferencia podría resultar insuficiente para la protección efectiva de grupos particularmente vulnerables, como niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiorrespiratorias preexistentes (DynaMedex, 2026; SEMARNAT, 2023).

En este contexto, la generación de evidencia local resulta fundamental para fortalecer los procesos de vigilancia ambiental y epidemiológica. Asimismo, la NOM-172-SEMARNAT-2023 proporciona una herramienta de comunicación del riesgo mediante la implementación del algoritmo NowCast, el cual calcula promedios móviles ponderados que permiten incorporar las variaciones recientes en las concentraciones de contaminantes y estimar de manera más precisa el Índice de Calidad del Aire y Riesgo a la Salud. Por ello, documentar y analizar la dinámica espacio-temporal de la exposición a PM2.5 en la comunidad de Yerbabuena constituye una acción pertinente y necesaria para comprender la magnitud del problema, sustentar estrategias de mitigación y contribuir a la protección de la salud de las poblaciones potencialmente expuestas.

## Metodología

Se seleccionaron tres puntos de monitoreo con base en su proximidad a hornos ladrilleros, densidad poblacional y presencia de grupos vulnerables: el primero en la comunidad de Yerbabuena, el segundo en la colonia de Vallas de Guanajuato y el tercero en la zona centro de la ciudad de Guanajuato. El monitoreo continuo de la concentración de PM10 y PM2.5 durante una hora en los puntos 1 y 2 se realizó con el equipo Air Quality Monitor SDL607. Para el punto 3, la concentración de $PM_{2.5}$ se obtuvo a partir de los registros horarios generados por la estación de monitoreo semiautomática MetOne–ECOTECH, operada por la Secretaría del Agua y Medio Ambiente (SAMA).

Las variables meteorológicas, incluyendo la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad y la dirección del viento, se registraron con una estación meteorológica portátil Acurite modelo 01015. Los datos obtenidos fueron analizados mediante gráficas elaboradas en Microsoft Excel y comparados con los valores de referencia establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la NOM-025-SSA1-2021 y la NOM-172-SEMARNAT-2023, con el fin de evaluar la calidad del aire y el riesgo potencial para la salud de la población.

Para comprender el patrón de dispersión espacial de las partículas emitidas por los hornos ladrilleros en la zona de estudio, se construyeron las rosas de viento utilizando el software WRPLOT View® (Lakes Environmental), identificando la dirección y velocidad del viento predominantes.

Finalmente, se estimó el riesgo sanitario mediante modelos epidemiológicos de dosis–respuesta. Se calculó el incremento porcentual del riesgo relativo (RR) de morbilidad y mortalidad cardiovascular y respiratoria asociado a aumentos en la concentración ambiental de $PM_{2.5}$, considerando como referencia los coeficientes reportados en la literatura científica y los valores guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud.

## Área de estudio

El área de estudio comprende la comunidad de Yerbabuena, la colonia Villas de Guanajuato y la zona centro de la ciudad de Guanajuato (Fig. 1A).

En la comunidad de Yerbabuena, se aprecian colinas con vegetación dispersa al norte y, al noroeste (NO), se ubican la zona comercial principal Plaza Alaia y los accesos viales importantes de este lado de la ciudad; al noreste (NE) predominan los cerros y las elevaciones naturales con vegetación nativa de la región. Al este colinda directamente con el entorno natural de los cerros, cañadas y suelo sin urbanizar que marcan el límite natural de la ciudad, un paisaje de lomas que hacia el sureste (SE) comienza a mostrar algunas construcciones dispersas o terrenos recreativos. Por otro lado, el relieve desciende hacia el sur dando paso a zonas habitacionales y calles más irregulares que siguen la forma del cerro, conectando hacia el suroeste (SO) con áreas residenciales densas en la colonia El Campanario (Fig. 1A).

La colonia Villas de Guanajuato al norte colinda con terrenos abiertos y de cultivo, ubicándose un poco más arriba la zona de San José de Cervera y la carretera, mientras que hacia el noroeste (NO) conecta con el área rural y dispersa de esta misma localidad y hacia el noreste (NE) se extiende hacia las zonas habitacionales de Lomas de Cervera. Al este se encuentran terrenos baldíos grandes, la Avenida Santa Fe y, cruzándola, la zona de El Campanario, un panorama que hacia el sureste (SE) muestra la glorieta de acceso, la Secretaría de Seguridad, junto con desarrollos en crecimiento. Por otro lado, el relieve limita directamente al sur con el fin de la mancha urbana, dando paso a campos abiertos y cerros, enlazando hacia el suroeste (SO) al estar totalmente rodeado por terrenos agrícolas y campo abierto, para finalmente marcar por el oeste el límite residencial de la zona, colindando con parcelas y áreas verdes rurales.

El tipo de hornos ladrilleros que se usan en la zona sur de la ciudad, principalmente en la comunidad de la Yerbabuena, son de tipo campaña, construidos a ras de suelo, con el ladrillo de arcilla que va a ser cocido en ladrillo rojo (Fig. 2).

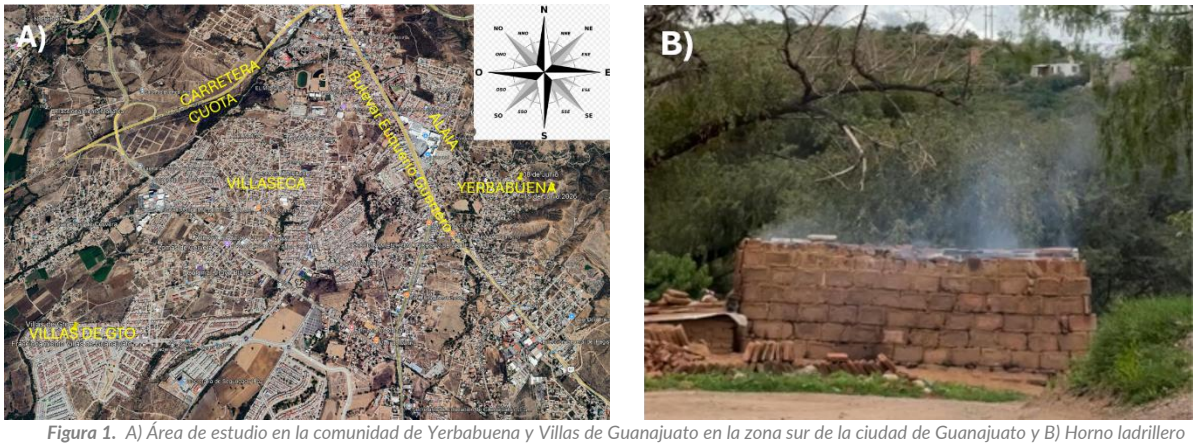



***Figura 1.*** *A) Área de estudio en la comunidad de Yerbabuena y Villas de Guanajuato en la zona sur de la ciudad de Guanajuato y B) Horno ladrillero tipo campaña.*

## Resultados

Concentraciones de material particulado ($PM_{2.5}$ y $PM_{10}$) en los tres puntos de monitoreo.

Durante el monitoreo del día 03 de junio, en la comunidad de Yerbabuena se registró el promedio más alto de partículas $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$ (24.3/31.6 µg/m³) ligeramente por debajo del límite máximo permisible para $PM_{2.5}$ (25 µg/m³) de acuerdo con la NOM-025-SSA1-2021. La concentración máxima registrada de $PM_{2.5}$ fue de 158.6 µg/m³ y de 239.8 µg/m³ para $PM_{10}$ a las 12:23 horas (Fig. 2A). Por otra parte, en la colonia de Villas de Guanajuato el promedio de la concentración de partículas fue de 18.8 µg/m³ para $PM_{2.5}$ y 23.7 µg/m³ para $PM_{10}$, con un registro máximo de 23.4 µg/m³ de $PM_{2.5}$ y 38.9 µg/m³ de $PM_{10}$ a las 14:49 horas (Fig. 2B). En contraste, se registraron concentraciones menores de partículas $PM_{2.5}$ de 9.5 µg/m³ a las 13:00 horas, 14.5 µg/m³ a las 15:00 horas en la Unidad Belén, zona centro de la ciudad, con un máximo de 25 µg/m³ registrado a las 17:00 horas (Fig. 2C). Este comportamiento en la concentración de partículas en los diferentes puntos se puede atribuir a que la comunidad de Yerbabuena es una zona con presencia de ladrilleras, y el monitoreo pudo haber coincidido con un día de quema de ladrillo, lo que podría explicar el pico abrupto y las concentraciones elevadas registradas al mediodía; en Villas de Guanajuato, siendo un fraccionamiento habitacional sin fuentes de emisión industrial cercanas, las concentraciones se mantuvieron registradas fueron menores a las obtenidas en la comunidad de Yerbabuena. Finalmente, en la Unidad Belén, ubicada en la zona centro de la ciudad, a las 13 horas se registró una concentración de 9.5 µg/m³ de $PM_{2.5,}$ considerada la concentración más baja de los tres puntos de monitoreo.

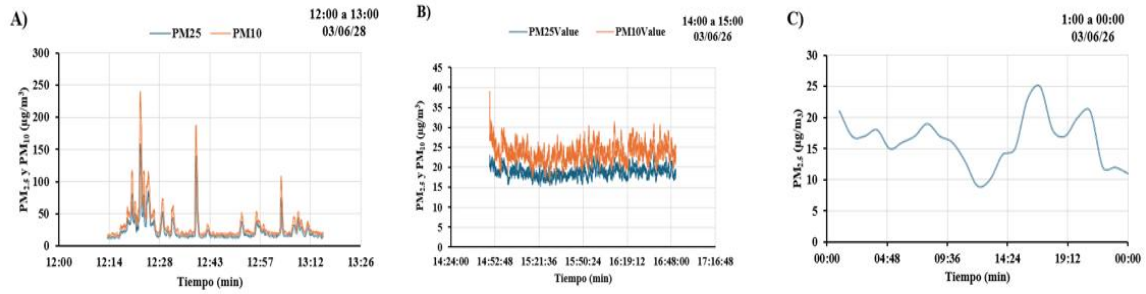



*Figura 2. Comportamiento de las concentraciones de material particulado ($PM_{2.5}$ y $PM_{10}$) el día 03 de junio de 2026 en: A) Comunidad de Yerbabuena, B) Colonia Villas de Guanajuato, C) Unidad Belén.*

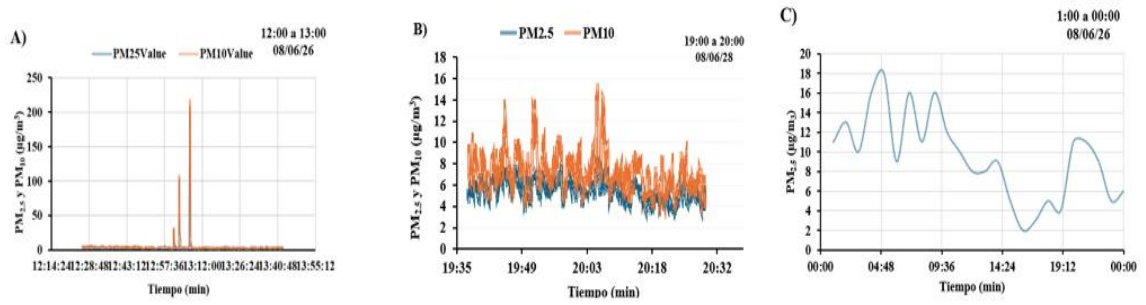



*Figura 3. Comportamiento de las concentraciones de material particulado ($PM_{2.5}$ y $PM_{10}$) el día 08 de junio del 2026 en: A) Comunidad de Yerbabuena, B) Colonia Villas de Guanajuato, C) Unidad Belén zona centro.*

El monitoreo del 08 de junio, en la comunidad de Yerbabuena se obtuvo un promedio de 3.9 µg/m³ de $PM_{2.5}$ y 4.6 de $PM_{10}$, sin embargo, se registró un máximo de 207.3 µg/m³ para $PM_{2.5}$ y 217.7 µg/m³ para $PM_{10}$ a las 13:07 (Fig. 3A). Por otra parte, en la colonia Villas de Guanajuato el promedio de la concentración de $PM_{2.5}$ fue de 5.4 µg/m³ y 7.2 µg/m³ para $PM_{10}$, con un máximo de 8.4 µg/m³ ($PM_{2.5}$) y 15.6 µg/m³ ($PM_{10}$), ambos registrados a las 20:06 (Fig. 3B). En contraste, el promedio de la concentración de partículas $PM_{2.5}$ a las 13 horas en la Unidad Belén, zona centro fue de 8 µg/m³, con un máximo de 18 µg/m³ a las 05:00 para el mismo

día (Fig. 3C). A diferencia del día 03, durante el 08 de junio no se observó actividad aparente de quema de ladrillo en los hornos de la comunidad de Yerbabuena, debido a que el día anterior se registraron precipitaciones, lo que podría explicar que el promedio general de material particulado obtenido en este punto fuera más bajo a lo obtenido en el día 03 de junio. El pico puntual registrado al mediodía podría atribuirse a una actividad puntual cercana al sensor. En Villas de Guanajuato y Unidad Belén, se registraron concentraciones mayores que en la comunidad de Yerbabuena, debido posiblemente a la dinámica propia de la ciudad y la colonia Villas de Guanajuato.Fig. 3 Comportamiento de las concentraciones de material particulado (PM 2.5 y PM10) el día 08 de junio del 2026 en: A) Comunidad de Yerbabuena, B) Colonia Villas de Guanajuato, C) Unidad Belén zona centro

Para el día 15 de junio, en la comunidad de Yerbabuena se registró un promedio de 30.4 µg/m³ de PM2.5 y 32.3 µg/m³ de PM10, valores que están por encima del límite máximo permisible promedio de 24 horas (25 µg/m³). En este mismo punto se registró un máximo de 104.3 µg/m³ para $PM_{2.5}$ y 109.6 µg/m³ para $PM_{10}$ a las 12:44 (Fig. 4A). Por otra parte, promedios menores de la concentración de partículas $PM_{2.5}$ (3.0 µg/m³) y $PM_{10}$ (4.1 µg/m³) se registraron en la colonia Villas de Guanajuato, con un máximo de 4.6 µg/m³ de $PM_{2.5}$ y 11.1 µg/m³ de $PM_{10}$, 16:55 horas (Fig. 4B). En contraste, el promedio 24 horas de la concentración de partículas $PM_{2.5}$ en la Unidad Belén para ese día fue de 11.2 µg/m³, con un máximo de 16 µg/m³ a las 06:00 horas (Fig. 4C). Los mayores promedios de las concentres de partículas se obtuvieron el día 03 de junio en la comunidad de Yerbabuena debido posiblemente a la actividad de quema de ladrillo en los hornos, y los menores promedios de concentraciones se obtuvieron el día 08 de junio debido a que en ese día se registraron lluvias que no permiten realizar quema de ladrillo en los hornos.

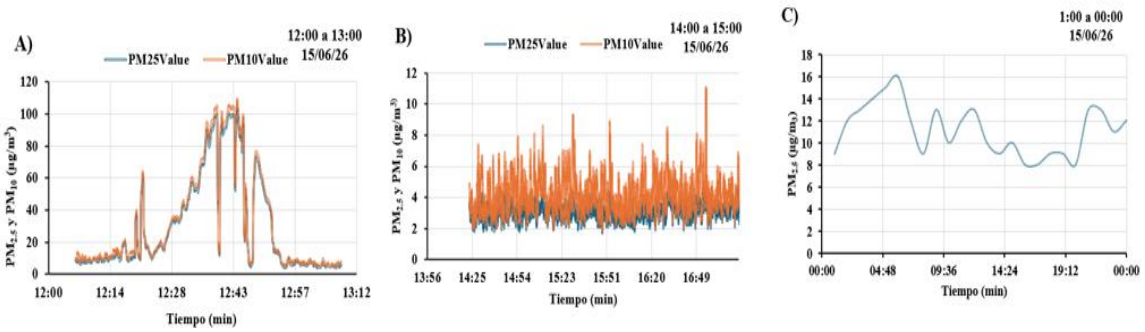



*Figura 4. Comportamiento de las concentraciones de material particulado ($PM_{2.5}$ y $PM_{10}$) el día 15 de junio de 2026 en: A) comunidad de Yerbabuena, B) Colonia Villas de Guanajuato, C) Unidad Belén zona centro.*

Al comparar los valores promedio entre las tres zonas, Yerbabuena presentó concentraciones superiores a las de Villas de Guanajuato y Unidad Belén los días 3 y 15 de junio, suponiéndose como días de actividad de cocido de ladrillo en los hornos (Tabla 1). Esto se menciona por lo observado en campo, mas no deben dejarse de lado otros eventos puntuales que puedan estar influenciando las concentraciones de material particulado. Lo anterior refuerza la posible influencia de esta actividad sobre la calidad del aire local, en específico en las inmediaciones de Yerbabuena. Cabe destacar que, en el caso de Villas de Guanajuato, su comportamiento respecto a Unidad Belén no fue uniforme: el 3 de junio superó ligeramente a Unidad Belén (18.8 frente a 14.5 µg/m³ de $PM_{2.5}$), mientras que el 15 de junio se ubicó por debajo de esta (3.0 frente a 9.5 µg/m³), lo que sugiere que las variaciones en Villas de Guanajuato responden más a condiciones puntuales del sitio que a una tendencia sistemática frente a la estación de referencia. Por otro lado, el 8 de junio se registraron las concentraciones promedio más bajas en Yerbabuena; sin embargo, durante ese mismo monitoreo se observó un pico aislado de $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$ que elevó considerablemente el valor máximo registrado (207.3 y 217.7 µg/m³). Es relevante notar que, para esa misma fecha y en el mismo horario, en la Unidad Belén se tuvo una concentración de 8 µg/m³, sin evidencia de un incremento simultáneo. Esto es consistente con que el evento de Yerbabuena pudiera deberse a una fuente puntual no identificada, más que a un fenómeno generalizado en la zona, ya que no se reflejó de forma comparable en la estación de referencia.

En conjunto, los datos sugieren que los deterioros más importantes en la calidad del aire de Yerbabuena ocurren mediante eventos de corta duración, más que por concentraciones elevadas sostenidas a lo largo del tiempo. Este patrón contrasta con el observado en Villas de Guanajuato y en Unidad Belén, donde predominó

un comportamiento relativamente estable, sin variaciones abruptas notorias, evidenciando una menor influencia de fuentes locales de emisión de partículas. La inclusión de Unidad Belén como punto de comparación adicional fortalece esta interpretación, ya que su estabilidad relativa, sugiere que el impacto de dichas posibles actividades de quema se concentra de manera preferente en las proximidades inmediatas de Yerbabuena, sin extenderse de forma homogénea al resto del área de estudio.

***Tabla 1.*** *Resumen de los datos recabados a lo largo de los monitoreos de calidad del aire.*

| Fecha | Zona | Horario | PM2.5 (µg/m³) Promedio/Máximo | PM10 (µg/m³) Promedio/Máximo |
|---|---|---|---|---|
| 03/06/2026 | Yerbabuena | 12:00-13:00 | 24.3/158.6 | 31.6/239.8 |
| | Villas de Guanajuato | 14:00-15:00 | 18.8/23.4 | 23.7/38.9 |
| | Unidad Belén | 12:00-13:00 | 9.5 | |
| | Zona centro | 14:00-15:00 | 14.5 | |
| 08/06/2026 | Yerbabuena | 12:00-13:00 | 3.9/207.3 | 4.6/217.7 |
| | Villas de Guanajuato | 19:00-20:00 | 5.4/8.4 | 7.2/15.6 |
| | Unidad Belén | 12:00-13:00 | 8 | |
| | Zona centro | 19:00-20:00 | 7.5 | |
| 15/06/2026 | Yerbabuena | 12:00-13:00 | 30.4/104.3 | 32.3/109.6 |
| | Villas de Guanajuato | 14:00-15:00 | 3.0/4.1 | 4.6/11.1 |
| | Unidad Belén | 12:00-13:00 | 11.5 | |
| | Zona centro | 14:00-15:00 | 9.5 | |

## Análisis de la dirección y velocidad del viento en la zona de estudio usando la rosa de vientos

### 08 junio de 2026

Las rosas de viento del 8 de junio de 2026 muestran la variación de la velocidad y dirección del viento en los tres puntos de monitoreo (Fig. 5). En este estudio, la dirección reportada corresponde al sentido de transporte del viento, es decir, hacia dónde se dirige el flujo de aire y potencialmente los contaminantes atmosféricos.

En la comunidad de Yerbabuena, el vector resultante fue de 278°, con una persistencia del 44 %, reflejando una mayor variabilidad en la dirección del viento con un transporte predominante hacia el oeste (W) (Fig. 5A). La distribución de frecuencias indica que el 40.6 % de los registros presentó velocidades menores a 0.5 m/s, consideradas vientos en calma; otro 40.6 % presentó velocidades entre 0.5 y 2.10 m/s, correspondientes a vientos ligeros, mientras que el 13.5 % de los registros se ubicó en el intervalo de 2.10 a 3.60 m/s, clasificados como vientos moderados (Fig. 6A). La elevada frecuencia de vientos en calma y la baja persistencia sugieren condiciones de ventilación limitadas, favoreciendo el estancamiento local y la acumulación de contaminantes en la zona.

Por otro lado, en la colonia Villas de Guanajuato, el vector resultante fue de 257°, con una persistencia del 67 %, indicando un transporte predominante de masas de aire hacia el oeste-suroeste (WSW) (Fig. 5B). La distribución de frecuencias de las clases de viento muestra que el 71.0 % de las mediciones se encuentra entre 0.50 y 2.10 m/s, consideradas como vientos ligeros. Asimismo, el 23.6 % de los registros presentó velocidades entre 2.10 y 3.60 m/s (vientos moderados), mientras que únicamente el 4.8 % registró velocidades inferiores a 0.5 m/s, consideradas vientos en calma (Fig. 6B). La baja frecuencia de calmas y la

mayor persistencia direccional sugieren una ventilación atmosférica relativamente más eficiente que la observada en Yerbabuena; sin embargo, las velocidades predominantes continúan siendo bajas, por lo que la dispersión de contaminantes puede considerarse limitada.

En la Unidad Belén, el vector resultante fue de 353°, con una persistencia del 58 %, lo que indica un transporte predominante de masas de aire hacia el norte (N) (Fig. 5C). Aunque presentó una persistencia intermedia, la rosa de viento muestra una mayor presencia de velocidades de hasta 3.6 m/s. La distribución de frecuencias de las clases de viento indica que el 87.5 % de los registros se encuentra en el intervalo de 0.50 a 2.10 m/s, correspondientes a vientos ligeros, mientras que el 12.5 % presentó velocidades entre 2.10 y 3.60 m/s, correspondientes a vientos moderados, sin registrarse vientos en calma (Fig. 6C). La ausencia de periodos de calma y la persistencia observada sugieren condiciones más favorables para la ventilación y el transporte de contaminantes en comparación con Yerbabuena.

El comportamiento del viento en cada punto de monitoreo puede atribuirse a las características topográficas y urbanas de la ciudad, incluyendo la presencia de cerros, cañadas, laderas, edificaciones y cobertura vegetal, que modifican tanto la dirección como la velocidad del flujo de aire. En términos generales, las velocidades registradas en los tres sitios fueron predominantemente ligeras (0.5–2.10 m/s) y moderadas (2.10–3.60 m/s), lo que sugiere una capacidad de dispersión atmosférica limitada, especialmente en sectores donde se registraron periodos de calma. Asimismo, se observó una diferencia espacial en las direcciones predominantes de transporte: en la comunidad de Yerbabuena y la colonia Villas de Guanajuato, ubicadas en la zona sur de la ciudad, el flujo de aire se dirigió principalmente hacia el oeste y oeste-suroeste (257–278°), mientras que, en la Unidad Belén, localizada en la zona centro, el transporte predominó hacia el norte (353°). Estas diferencias evidencian la influencia de la compleja topografía urbana de Guanajuato sobre los patrones locales de circulación atmosférica y, por consiguiente, sobre las posibles trayectorias de dispersión de contaminantes.

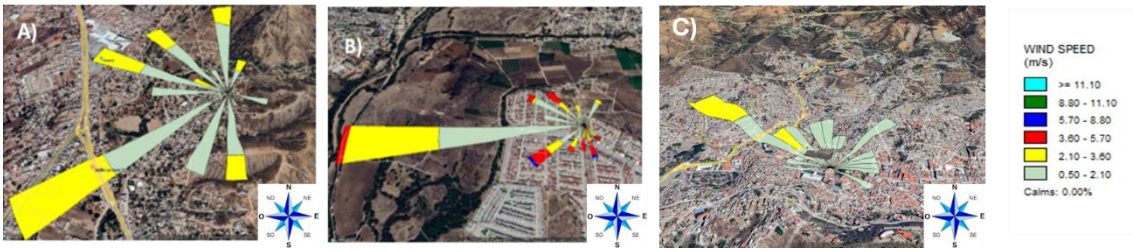



*Figura 5. Rosa de vientos del 8 de junio de 2026: A) Comunidad Yerbabuena, B) Villas de Guanajuato, C) Unidad Belén zona centro.*

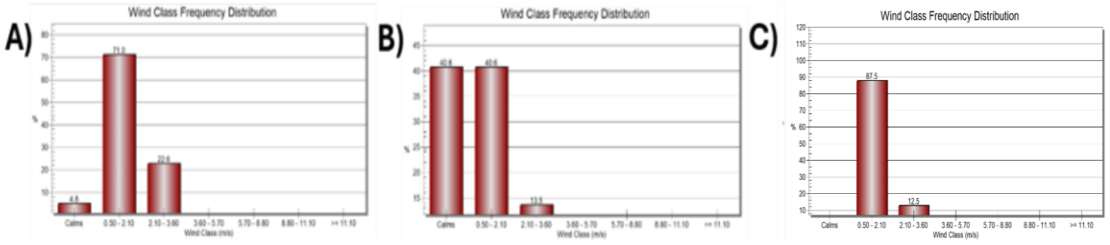



*Figura 6. Distribución de frecuencia de clases de vientos del 8 de junio de 2026: A) Comunidad Yerbabuena, B) Villas Guanajuato, C) Unidad Belén Zona Centro.*

15 junio de 2026

Las rosas de viento del 15 de junio de 2026 muestran diferencias en la dirección, persistencia e intensidad del viento entre los tres puntos de monitoreo, evidenciando la influencia de las condiciones topográficas y urbanas locales sobre los patrones de circulación atmosférica (Fig. 7). En este estudio, la dirección reportada corresponde al sentido de transporte del viento, es decir, hacia dónde se dirige el flujo de aire y potencialmente los contaminantes atmosféricos.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

En la comunidad de Yerbabuena, el vector resultante fue de 183°, con una persistencia del 54 %, lo que indica un transporte predominante de las masas de aire hacia el sur (S), aunque con cierta variabilidad direccional (Fig. 7A). La distribución de frecuencias muestra que el 40.6 % de los registros correspondió a velocidades inferiores a 0.50 m/s, consideradas como vientos en calma; otro 40.6 % presentó velocidades entre 0.50 y 2.10 m/s, clasificadas como vientos ligeros; el 13.5 % registró velocidades entre 2.10 y 3.60 m/s, correspondientes a vientos moderados, y el 5.3 % alcanzó velocidades entre 3.60 y 5.70 m/s, clasificadas como vientos frescos (Fig. 8A). La elevada frecuencia de vientos en calma y el predominio de velocidades bajas sugieren condiciones de ventilación limitadas, favoreciendo el estancamiento local y la acumulación de contaminantes en esta zona.

Por otro lado, en la colonia Villas de Guanajuato, el vector resultante fue de 257°, con una persistencia del 67 %, indicando un transporte predominante de masas de aire hacia el oeste-suroeste (WSW) (Fig. 7B). La distribución de frecuencias de las clases de viento muestra que el 46.4 % de los registros presentó velocidades entre 3.60 y 5.70 m/s, correspondientes a vientos frescos; el 40.6 % registró velocidades entre 2.10 y 3.60 m/s, consideradas vientos moderados; el 10.1 % se situó entre 0.50 y 2.10 m/s, correspondientes a vientos ligeros; y únicamente el 2.9 % presentó velocidades entre 5.70 y 8.80 m/s, clasificadas como vientos fuertes (Fig. 8B). En comparación con el monitoreo del 8 de junio, se observó un incremento significativo en la intensidad del viento, con un desplazamiento de la distribución de frecuencias hacia las clases moderadas y frescas. Estas condiciones favorecen una mayor ventilación atmosférica y una dispersión más eficiente de los contaminantes.

En la unidad Belén zona centro, el vector resultante fue de 100°, con una persistencia del 62 %, lo que indica un transporte predominante de masas de aire hacia el este (E) (Fig. 7C). La distribución de frecuencias de las clases de viento indica que el 62.5 % de los registros presentó velocidades entre 0.50 y 2.10 m/s, correspondientes a vientos ligeros; el 33.3 % registró velocidades entre 2.10 y 3.60 m/s, consideradas vientos moderados; y el 4.2 % alcanzó velocidades entre 3.60 y 5.70 m/s, clasificadas como vientos frescos, sin registrarse condiciones de calma (Fig. 8C). La ausencia de vientos en calma y la presencia de velocidades moderadas favorecen una circulación relativamente continua del aire y condiciones favorables para la ventilación atmosférica y la dispersión de contaminantes.

El comportamiento del viento presentó diferencias importantes entre los tres sitios de monitoreo, lo que refleja la influencia de las características topográficas y urbanas en la circulación local del aire. La comunidad de Yerbabuena presentó las condiciones menos favorables para la dispersión de contaminantes, debido a la elevada frecuencia de vientos en calma (40.6 %) y al predominio de velocidades ligeras, factores que favorecen la acumulación de partículas en la atmósfera. En contraste, la colonia Villas de Guanajuato registró las condiciones más favorables para la ventilación atmosférica, al presentar la mayor persistencia del viento (67 %) y una clara dominancia de velocidades moderadas y frescas, lo que incrementa la capacidad de transporte y dispersión de contaminantes. Por su parte, la Unidad Belén mostró una persistencia intermedia (62 %) y ausencia de vientos en calma, condiciones que favorecen una circulación más constante del aire y una capacidad de dispersión superior a la observada en Yerbabuena. Asimismo, se observó una diferencia en las direcciones predominantes de transporte del viento, con flujos dirigidos hacia el sur (183°) en Yerbabuena, hacia el oeste-suroeste (257°) en Villas de Guanajuato y hacia el este (100°) en la Unidad Belén, lo que evidencia la complejidad de los patrones locales de circulación atmosférica dentro de la ciudad de Guanajuato y su posible influencia sobre las trayectorias de dispersión de contaminantes.

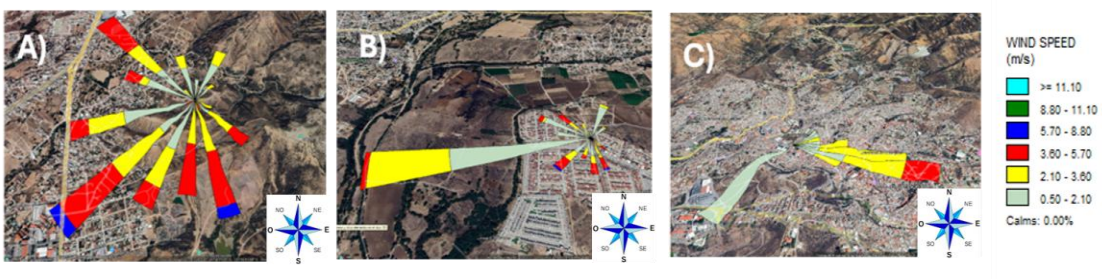



*Fig. 7. Rosa de vientos del 15 junio 2026: A) Comunidad Yerbabuena B) Villas Guanajuato, C) Unidad Belén Zona Centro.*

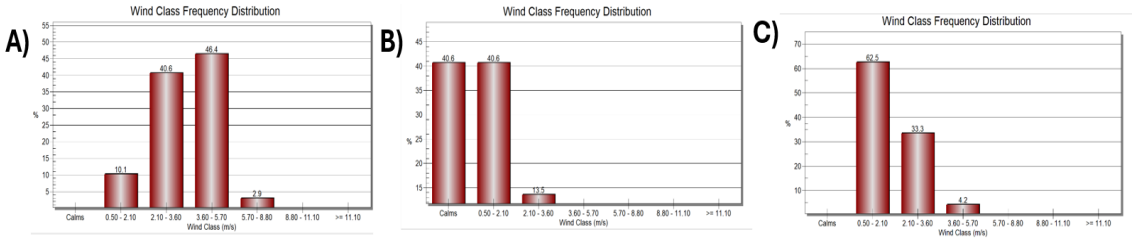



*Fig. 8. Distribución de frecuencia de clases de vientos del 15 junio 2026: A) Comunidad Yerbabuena, B) Villas Guanajuato, C) Unidad Belén Zona Centro.*

Las diferencias observadas en la dirección predominante del viento entre la Unidad Belén y los sitios localizados al sur de la ciudad pueden atribuirse a la compleja topografía de Guanajuato. Mientras que Yerbabuena y Villas de Guanajuato se encuentran en zonas relativamente más abiertas, la Unidad Belén se localiza dentro del sistema de cañadas que caracteriza a la zona centro de la ciudad. Esta configuración favorece la canalización del flujo de aire a lo largo de los corredores topográficos, modificando la dirección del viento respecto a la circulación regional (Carrera *et al.,* 2009; Sato y Kusaka, 2022). Diversos estudios han demostrado que en terrenos montañosos los vientos tienden a alinearse con el eje de los valles y cañadas debido a procesos de canalización forzada y canalización inducida por gradientes de presión, generando direcciones de flujo diferentes a las observadas en zonas más abiertas (Carrera *et al.,* 2009; Sato y Kusaka, 2022). Asimismo, las diferencias altitudinales y la presencia de laderas pronunciadas favorecen el desarrollo de circulaciones locales asociadas al calentamiento y enfriamiento diferencial del relieve, las cuales pueden modificar significativamente los patrones de transporte atmosférico y la dispersión de contaminantes (Mikkola *et al.,* 2025). Adicionalmente, la morfología urbana de la zona centro, caracterizada por calles estrechas y edificaciones continuas, puede generar procesos de canalización, desvío y turbulencia del flujo de aire, produciendo variaciones espaciales y temporales en la dirección del viento (Jiang *et al.,* 2024; Mihalakakou *et al.,* 2026). En conjunto, los cambios observados en la dirección predominante del viento en la Unidad Belén entre ambas jornadas de monitoreo sugieren una mayor influencia de los factores topográficos y urbanos locales en comparación con los sitios ubicados al sur de la ciudad, lo que podría modificar las trayectorias potenciales de transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos.

## Determinación del riesgo sanitario por exposición a $PM_{2.5}$

Para estimar el riesgo sanitario asociado a la exposición al material particulado fino en la zona de estudio, se aplicó un modelo epidemiológico de dosis-respuesta tomando como referencia el valor guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cual establece una concentración promedio de 24 horas de 15 µg/m³ para $PM_{2.5}$. Diversos estudios epidemiológicos han reportado que, por cada incremento de 10 µg/m³ en la concentración de $PM_{2.5}$, se observa un aumento relativo aproximado del 12% en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, mientras que la mortalidad asociada a enfermedades respiratorias puede incrementarse entre un 4% y un 8%.

Al analizar la dinámica espaciotemporal de las concentraciones registradas, la comunidad de Yerbabuena presenta el escenario de mayor impacto potencial sobre la salud, situación atribuible a la influencia de la actividad ladrillera local. Durante las jornadas de monitoreo del 3 y 15 de junio se registraron concentraciones promedio de 24.3 µg/m³ y 30.4 µg/m³ de $PM_{2.5}$, respectivamente. Considerando el valor guía de la OMS de 15 µg/m³, el excedente de 9.3 µg/m³ observado el 3 de junio se asocia con un incremento relativo estimado del 11.16% en el riesgo de mortalidad cardiovascular y de hasta un 7.44% en la mortalidad por enfermedades respiratorias para la población expuesta. La situación resulta más preocupante el 15 de junio, cuando el excedente alcanzó 15.4 µg/m³, lo que equivale a un incremento relativo aproximado del 18.48% en la mortalidad cardiovascular y de hasta un 12.32% en la mortalidad por causas respiratorias.

Adicionalmente, resulta relevante destacar el riesgo asociado a los episodios de alta concentración registrados durante el periodo de estudio. En Yerbabuena se documentó una concentración máxima de 207.3 µg/m³ el día 8 de junio, valor que evidencia la ocurrencia de un episodio severo de contaminación atmosférica. Exposiciones agudas a concentraciones tan elevadas de $PM_{2.5}$ pueden inducir mecanismos de estrés oxidativo mediante la generación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS), así como la liberación de mediadores proinflamatorios. Estos procesos favorecen la inflamación sistémica crónica, la disfunción

endotelial y la exacerbación de enfermedades cardiovasculares y respiratorias preexistentes, aumentando la probabilidad de eventos adversos en la población susceptible.

Por otro lado, los otros puntos de monitoreo presentaron niveles de exposición considerablemente menores. En la colonia Villas de Guanajuato únicamente el día 3 de junio se registró una concentración promedio superior al valor guía de la OMS, con 18.8 µg/m³ de $PM_{2.5}$. Este excedente de 3.8 µg/m³ se asocia con un incremento relativo aproximado del 4.56% en la mortalidad cardiovascular. Durante el resto de las jornadas de monitoreo en esta ubicación, así como en todos los registros obtenidos en la Unidad Belén, las concentraciones se mantuvieron por debajo del valor guía de 15 µg/m³. En consecuencia, el riesgo sanitario adicional asociado a la exposición a $PM_{2.5}$ en estas zonas puede considerarse sustancialmente menor que el observado en Yerbabuena, aunque no necesariamente inexistente, dado que la evidencia epidemiológica actual sugiere que no existe un umbral completamente seguro de exposición para este contaminante.

En conjunto, los resultados indican que las emisiones de $PM_{2.5}$ asociadas a los hornos ladrilleros tipo campaña generan un impacto sanitario potencialmente significativo en la comunidad de Yerbabuena y sus áreas colindantes, donde se registraron las mayores concentraciones y los mayores incrementos relativos de riesgo. En contraste, las zonas urbanas de Villas de Guanajuato y Unidad Belén en la zona centro de la ciudad presentan condiciones de exposición considerablemente más favorables durante el periodo evaluado.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que la comunidad de Yerbabuena presenta las mayores concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$ dentro de las zonas evaluadas, particularmente durante los periodos en los que se observó actividad de cocción de ladrillo en los hornos artesanales tipo campaña. En contraste, las concentraciones registradas en Villas de Guanajuato y en la Unidad Belén fueron considerablemente menores y mostraron un comportamiento más estable durante las jornadas de monitoreo.

Aunque los valores promedio registrados en Yerbabuena no superaron de manera sistemática los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-2021, en varios casos excedieron las recomendaciones más estrictas de la Organización Mundial de la Salud. Asimismo, se documentaron episodios de corta duración con concentraciones máximas extremadamente elevadas de $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$, lo que pone de manifiesto la ocurrencia de eventos puntuales de contaminación atmosférica que pueden representar un riesgo importante para la salud de la población expuesta.

El análisis meteorológico mostró que las condiciones de dispersión atmosférica en Yerbabuena son menos favorables que en los otros sitios estudiados. La presencia frecuente de vientos en calma, la baja velocidad del viento y la influencia de la topografía local favorecen el estancamiento y la acumulación de contaminantes cerca de las fuentes de emisión. Estas condiciones incrementan el potencial de exposición de los habitantes localizados en las inmediaciones de los hornos ladrilleros.

La evaluación del riesgo sanitario indicó que las concentraciones promedio registradas en Yerbabuena durante los días con mayor actividad podrían asociarse con incrementos significativos en el riesgo relativo de mortalidad cardiovascular y respiratoria. Además, la ocurrencia de episodios agudos de contaminación, como los observados durante el monitoreo, podría favorecer respuestas inflamatorias y estrés oxidativo con efectos adversos especialmente relevantes en grupos vulnerables como niños, personas adultas mayores y pacientes con enfermedades cardiorrespiratorias preexistentes.

Los resultados sugieren que la actividad ladrillera artesanal constituye una fuente relevante de emisiones de material particulado en la zona sur de la ciudad de Guanajuato y que su influencia se manifiesta principalmente mediante eventos episódicos de alta concentración más que por niveles elevados sostenidos durante largos periodos. No obstante, la exposición repetida a estos eventos puede representar un riesgo acumulativo para la salud de la población local.

Finalmente, se recomienda fortalecer los programas de monitoreo ambiental en la comunidad de Yerbabuena mediante campañas de mayor duración y cobertura temporal, así como promover estrategias de modernización tecnológica de los hornos, la sustitución de combustibles de alta toxicidad y la implementación de medidas de gestión ambiental que contribuyan a reducir las emisiones de partículas y sus posibles efectos

sobre la salud pública. Asimismo, resulta pertinente desarrollar estudios complementarios que incluyan otros contaminantes atmosféricos y evaluaciones epidemiológicas de largo plazo para caracterizar con mayor precisión el impacto de la actividad ladrillera en la población de la ciudad de Guanajuato.

## Bibliografía/Referencias

Calderón-Garcidueñas, L., Stommel, E. W., Rajagopalan, S., & Mukherjee, P. S. (2022). Particulate air pollution, systemic oxidative stress, and neuroinflammation: *A pathway to neurodegeneration. Environmental Research,* 204, 112316.

Carrera, M. L., Gyakum, J. R., & Lin, C. A. (2009). *Observational study of wind channeling within the St. Lawrence River Valley*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology,* 48(11), 2341–2361. https://doi.org/10.1175/2009JAMC2061.1

DynaMedex. (2026). Health Effects of Particulate Matter (PM2.5 and PM10). *EBSCO Information Services*.

Jiang, G., Wu, M., Li, H., & Wu, Y. (2024). *Mechanism of wind and buoyancy driving on ventilation and pollutant transport in an idealized urban street canyon*. *Buildings,* 14(10), 3168. https://doi.org/10.3390/buildings14103168

López-García, A., Montero-Montoya, R., & Galindo-Reyes, J. G. (2023). Emisiones de dioxinas y furanos en procesos de combustión informal en México: Riesgos para la salud pública. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental,* 39, 45-59.

Martínez-Abarca, C., Pérez-Vidal, H., & Gómez-Sánchez, M. (2022). Impacto ambiental y riesgos a la salud por la industria ladrillera artesanal en el Bajío mexicano. *Salud Pública de México*, 64(3), 289-297.

Mihalakakou, G., Paravantis, J. A., Nikolaou, P., Malefaki, S., Romeos, A., Fotiadi, A., Georgiou, P. N., & Giannadakis, A. (2026). Urban canyon geometry and green infrastructure: A review of strategies for enhancing thermal comfort and microclimate. *Sustainability,* 18(9), 4335. https://doi.org/10.3390/su18094335

Mikkola, J., Gohm, A., Sinclair, V. A., & Bianchi, F. (2025). *Valley floor inclination affecting valley winds and transport of passive tracers in idealised simulations*. *Atmospheric Chemistry and Physics,* 25, 511–533. https://doi.org/10.5194/acp-25-511-2025

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. *World Health Organization*.

Quiroz Carranza, J., Orozco García, E., & Silva-Gómez, S. (2021). La manufactura de ladrillo artesanal en México: Un desafío socioambiental y de salud comunitaria. *Acta Universitaria*, 31, e3012.

Rajagopalan, S., Landrigan, P. J., & Munzel, T. (2021). Ambient air pollution and cardiovascular diseases: Updates on pathophysiology and clinical impacts. *Journal of the American College of Cardiology*, 77(24), 3140-3151.

Sato, R., & Kusaka, H. (2022). *Climatological study of airflow channelling in relation to surface geostrophic wind*. *Meteorological Applications*, 29(5), e2082. https://doi.org/10.1002/met.2082

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2023, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. Diario Oficial de la Federación.

Singh, A., Sharma, R. K., & Agrawal, M. (2022). Brick kilns and air pollution: Environmental and health impacts in South Asia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 185.

Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y. C. (2022). Recent insights into particulate matter (PM2.5)-mediated toxicity in humans: An overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7511.