

Monitoreo de la concentración de partículas (PM_{2.5} y PM₁₀) y CO en la subterránea de Guanajuato y riesgos a la salud

Monitoring of Particle Concentration (PM_{2.5} and PM₁₀) and CO in the Guanajuato Underground and Associated Health Risks

Denisse Jeanette Carrillo Flores, Manuel Alejandro López Lemus, Armando Rafael Preciado González, Adrián Zamorategui Molina*, Oscar Coreño Alonso

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.
dj.carrilloflores@ugto.mx, ma.lopezlemus@ugto.mx, ar.preciadogonzalez@ugto.mx, zamorategui@ugto.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Se realizó el monitoreo las concentraciones de partículas PM_{2.5}, PM₁₀ y CO dentro de los principales túneles viales de la ciudad de Guanajuato con una longitud mayor a 200 metros. Se analizó el riesgo para la salud de las personas en función de los límites máximos recomendados por la OMS y la PIARC. Como resultado, se encontró que, en los túneles sin tramos abiertos como La Galereña, se registraron promedios máximos de concentraciones (46.58 µg/m³, 74,6 µg/m³ y 26,89 ppm) de PM_{2.5}, PM₁₀ y CO respectivamente. En contraste, los túneles que tienen tramos abiertos como la calle Miguel Hidalgo con mayor tránsito vehicular registró menores concentraciones (11.15, 18.75 y 9.9 ppm) de PM_{2.5}, PM₁₀ y CO respectivamente. Se identificó que la ventilación natural en túneles con tramos abiertos es clave para mejorar la dispersión de los contaminantes. Ningún túnel superó el límite máximo 87 ppm de CO recomendados por la OMS para un tiempo de exposición de 15 minutos. Sin embargo, los niveles de PM_{2.5} en todos los casos excedieron el umbral de 10 µg/m³, asociado a riesgos cardiovasculares en personas vulnerables, por lo que se recomienda a estos grupos vulnerables no exponerse a dichas concentraciones, además de implementar estrategias para mejorar la ventilación y control del tránsito.

Palabras clave: Túneles, PM_{2.5}, PM₁₀, CO, Guanajuato.

Introducción

Un túnel de carretera es un tipo de construcción para tráfico a gran escala que sirve como canal de conexión subterráneo para el transporte por carretera (Chang *et al.*, 2022). Este tipo de infraestructura presenta ventajas incomparables sobre otras carreteras para superar terrenos especiales y acortar distancias (Yang *et al.*, 2024). En la actualidad, los túneles de carretera han alcanzado un desarrollo significativo, siendo utilizados en todo el mundo como soluciones clave para la movilidad urbana e interurbana. Algunos países desarrollados como Noruega y China han liderado la construcción de estas infraestructuras.

En el caso de Noruega, cuenta con una red de más de 1000 túneles viales distribuidos a lo largo del país (Meyer & Naevestad, 2014), algunos de los cuales alcanzan hasta 7.9 km de longitud y profundidades de hasta 264 metros bajo el nivel del mar (Blindheim *et al.*, 2005). Esta red responde tanto a su geografía accidentada como a políticas sostenidas de movilidad. Por su parte, China alberga el mayor número de túneles de autopistas del mundo y ha experimentado el desarrollo más acelerado en esta área en las últimas dos décadas, consolidándose como referente global en ingeniería subterránea (Wan *et al.*, 2023).

Asimismo, los túneles de carretera han sido implementados en diversos países de Latinoamérica, incluido México, como respuesta a los retos que impone su compleja y variada geografía. Ciudades como Guanajuato han recurrido al aprovechamiento de túneles no solo por motivos turísticos y geográficos, sino también como una estrategia para enfrentar el crecimiento del parque vehicular y la necesidad de preservar su patrimonio histórico.

La ciudad de Guanajuato, fundada en el siglo XVI por los españoles, alcanzó un gran desarrollo durante el periodo virreinal debido a la riqueza minera de sus alrededores, convirtiéndose en el principal centro de extracción de plata a nivel mundial en el siglo XVIII (UNESCO World Heritage Centre, 2025). Su crecimiento urbano estuvo condicionado por su localización en una cañada estrecha y sinuosa, lo que limitó significativamente la expansión de sus calles (AMITOS, 2020).

Esta ubicación ocasionó frecuentes inundaciones, 19 eventos entre 1704 y 1905 (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2025), siendo la más severa la del 1 de julio de 1905, cuando el nivel del agua superó los dos metros (CENAPRED, 2019). Para mitigar estos eventos, en 1883 se inició la construcción del túnel El Cuajín, destinado a canalizar las aguas pluviales (AMITOS, 2020).

A mediados del siglo XX, el aumento del parque vehicular y la necesidad de conservar el centro histórico llevaron al aprovechamiento de los antiguos cauces entubados como vialidades subterráneas. Así surgieron calles como Padre Belaunzarán (1951) y posteriormente Miguel Hidalgo, también conocida como “La Subterránea” (AMITOS, 2020).

Durante las décadas siguientes, la ciudad desarrolló una red de túneles viales con distintas longitudes y pendientes, que actualmente permiten la circulación de vehículos diariamente, además de servir como espacios de estacionamiento (AMITOS, 2020). Según datos del INEGI, la ciudad de Guanajuato tenía en el año 2023 un parque vehicular de más 85,000 (INEGI, 2025) y una cantidad importante de éstos utilizan la red de túneles de la ciudad. Esta infraestructura, aunque funcional, presenta condiciones propicias para la acumulación de contaminantes atmosféricos, debido a su diseño cerrado, la carencia de ventilación mecánica y la alta densidad de tránsito.

Además del tráfico vehicular, los túneles de Guanajuato son utilizados diariamente por peatones, al contar con infraestructura peatonal integrada que permite su tránsito seguro. Estos espacios forman parte de las rutas cotidianas de muchos habitantes, los cuales funcionan como puntos de ascenso y descenso del transporte público, y son recorridos frecuentemente por turistas que los emplean como rutas de conexión entre distintas zonas de la ciudad o como zonas de aparcamiento. Esta multiplicidad de usos implica una exposición directa y constante de personas a contaminantes emitidos por los vehículos.

En este contexto, resulta pertinente considerar que las principales fuentes de contaminación del aire en el interior de los túneles viales urbanos son los productos de combustión emitidos por los vehículos de motor (Song *et al.*, 2024). Entre los contaminantes más relevantes se encuentran los compuestos orgánicos totales (COVT), monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx) y el material particulado (PM) ((Herrera Murillo *et al.*, 2012).

El CO es uno de los principales contaminantes vehiculares. Se ha propuesto que su concentración actúa como un indicador general de la calidad del aire en entornos con emisiones provenientes de motores (Chow & Chan, 2003). El monóxido de carbono, al ser un gas incoloro, inodoro y no irritante, representa un riesgo significativo para la salud, especialmente en espacios confinados como los túneles (Raub, 1999). Su principal vía de toxicidad se relaciona con su alta afinidad por la hemoglobina, lo que da lugar a la formación de carboxihemoglobina (COHb), reduciendo la capacidad de transporte de oxígeno y provocando hipoxia tisular. Aunque los efectos letales del CO a altas concentraciones son ampliamente conocidos, también se ha documentado que niveles bajos de exposición —por debajo de 50 ppm— pueden producir COHb en niveles clínicamente relevantes (hasta 3%) incluso en personas no fumadoras, generando cefaleas, fatiga y alteraciones neuroconductuales sutiles (Raub, 1999).

Por otro lado, el PM se considera como una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. Las partículas $PM_{2.5}$ definidas por su diámetro aerodinámico inferior a $2.5 \mu m$ y las PM_{10} con un diámetro aerodinámico menor a $10 \mu m$; presentan un riesgo a la salud. Sin embargo, las $PM_{2.5}$ se consideran más riesgosas ya que alcanzan zonas más profundas como los alvéolos pulmonares. Estas partículas provienen principalmente de los gases de escape de diésel y gasolina, pero también de fuentes no relacionadas con el escape, como el desgaste de frenos o neumáticos (Introna *et al.*, 2025). La exposición al material particulado puede afectar diversos órganos del cuerpo humano, generando múltiples consecuencias para la salud. Entre las principales afectaciones se encuentran trastornos respiratorios como asma, EPOC y cáncer de pulmón; enfermedades cardiovasculares como arritmias, hipertensión e infarto; así como alteraciones neurológicas vinculadas al Alzheimer y los accidentes cerebrovasculares. Además, el PM puede provocar daño hepático, enfermedades en la piel como dermatitis y psoriasis, y disfunción en el sistema vascular debido al estrés oxidativo e inflamación crónica (Lim & Kim, 2024).

Grupos vulnerables de personas (como adultos mayores, fumadores, diabéticos, hiperlipidemia o con estilo de vida sedentario) que se exponen de forma frecuente a concentraciones de $PM_{2.5}$ iguales o superiores a $10 \mu g/m^3$ presentan un incremento del 1 % al 2 % en el riesgo de sufrir un infarto agudo de miocardio en comparación con la población general (Henning, 2024). Además de sus efectos tóxicos, el PM genera una pérdida de visibilidad en los túneles al aumentar la opacidad del aire, lo que representa un riesgo adicional para la seguridad vial (Toribio-Hernández, 2018).

Dado el riesgo que el monóxido de carbono (CO) representan en espacios confinados y de concurrencia humana, organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Asociación Mundial de Carretera (PIARC) han establecido valores límite con el propósito de proteger la salud pública. La OMS establece límites máximos permisibles basados en tiempos de exposición (Tabla 1). Por otro lado, la PIARC propone valores orientativos específicos para condiciones operativas dentro de túneles viales, considerando tanto la exposición de los usuarios como del personal de mantenimiento (Tabla 2).

Tabla 1. Valor sobre el monóxido de carbono en interiores recomendado por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2010).

CONTAMINANTE	TIEMPO PROMEDIO	VALOR LÍMITE OMS (ppm)	COMENTARIOS
CO (Monóxido de carbono)	15 minutos	87	Las excursiones a este nivel no deben realizarse más de una vez al día.
CO (Monóxido de carbono)	1 hora	35	Las excursiones a este nivel no deben realizarse más de una vez al día.
CO (Monóxido de carbono)	8 horas	10	Concentración media aritmética Ejercicio ligero a moderado
CO (Monóxido de carbono)	24 horas	7	Concentración media aritmética Ejercicio ligero a moderado

Tabla 2. Valores de diseño y operación establecidos por la Asociación Mundial de carreteras (PIARC, 2019).

CONTAMINANTE	CONDICIÓN PIARC	DESCRIPCIÓN	VALOR PIARC (ppm)
CO (Monóxido de carbono)	Mantenimiento con tráfico	Límite para la protección de trabajadores que realicen mantenimiento dentro del túnel	20
CO (Monóxido de carbono)	Operación Normal	Límite para la operación normal del túnel: tráfico diario, congestionamiento en horas pico y embotellamientos excepcionales	< 100
CO (Monóxido de carbono)	Cierre del túnel	Umbral que amerita el inmediato cierre del túnel	200

En cuanto al material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) la OMS no definen límites diferenciados para ambientes cerrados como los túneles viales, sin embargo, la PIARC lo establece como un parámetro de grado de visibilidad en túneles.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del aire dentro de los principales túneles viales de la ciudad de Guanajuato, a través del monitoreo de las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}). Se define la calidad del aire en base a los límites establecidos por organismos internacionales como la PIARC y la OMS, con el fin de identificar riesgos potenciales para la salud de usuarios.

Metodología

Se realizó una investigación sobre los 23 túneles que conforman la subterránea de la ciudad de Guanajuato, con el objeto de seleccionar los más representativos con una longitud mayor a más de 200 metros. De esta manera se seleccionó el túnel Los Ángeles, Barretero, La Galereña, Santa Fe, Tiburcio Álvarez, Miguel Hidalgo y Ponciano Aguilar, cuyas longitudes se muestran en la tabla 3. El monitoreo se realizó recorriendo a pie cada túnel, en un horario considerado de mayor afluencia vehicular entre las 12:30 a 15:00 h. El registro de las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} se realizó con un Mini monitor láser de dispersión $PM_{2.5}$ y PM_{10} SDL607, conectado a la computadora el cual registra las concentraciones cada segundo. Para el monitoreo de la concentración de CO se utilizó un detector marca ALTAIR pro, que utiliza radiación infrarroja no dispersiva (NDIR) para la detección de CO. La velocidad del viento se registró usando un anemómetro marca STEREN modelo GER4040. Durante el monitoreo en cada túnel se realizó un registro en bitácora de personas que transitaban por el túnel y se realizó el registro de vehículos que transitaban por el mismo. Los registros de las concentraciones de los contaminantes, personas, velocidad del viento y vehículos se graficaron para su análisis y discusión.

Tabla 3. Principales túneles de Guanajuato con una longitud mayor a 200 metros.

Túnel	Longitud (m)
Calle Miguel Hidalgo	1470
Ponciano Aguilar	1104
Tiburcio Álvarez	931
Barretero	815
Galereña	721
Los Ángeles	577
Santa Fe	470

Resultados

La Figura 1 presenta los promedios máximos de la concentración de $PM_{2.5}$, PM_{10} y CO, así como el número de vehículos registrados en los siete túneles representativos de la ciudad de Guanajuato (Ponciano Aguilar, Miguel Hidalgo, Santa Fe, Los Ángeles, Galereña y Barretero) con una longitud mayor de 200 metros. Como se puede observar, el túnel la Galereña muestra el promedio máximo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ($46.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$), PM_{10} ($74.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y CO (26.89 ppm), con un flujo de 259 vehículos. Además, los túneles que mayores concentraciones de contaminantes registraron fueron aquellos que no cuentan con secciones o tramos abiertos al aire libre como son Los Ángeles, Barretero, Tiburcio Álvarez, Santa Fe y la Galereña. En contraste, se observa que los túneles con el menor promedio de concentración para dichos contaminantes fueron el Miguel Hidalgo y Ponciano Aguilar, mostrando valores para $PM_{2.5}$ (11.529 y $20.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), PM_{10} (18.75 y $27.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y CO (9.9 y 2.5 ppm) con un flujo de 297 y 224 vehículos, respectivamente. Lo anterior se debe a que estos túneles cuentan con tramos abiertos que permiten una mayor dispersión de los contaminantes, disminuyendo su concentración. Este efecto de dilución puede observarse al comparar el número de vehículos registrados en los túneles Galereña (259) y Miguel Hidalgo (297). A pesar de que el

túnel Miguel Hidalgo presenta un flujo vehicular más elevado, las concentraciones de contaminantes son menores, lo cual se atribuye a la presencia de secciones abiertas que favorecen la ventilación natural.

Los promedios de las concentraciones de CO (ppm) que se obtuvieron para cada túnel son los siguientes: Ponciano Aguilar 2.5 ppm, Miguel Hidalgo 9.9 ppm, Santa Fe 7.4 ppm, Los Ángeles 21.1 ppm, Galereña 26.9 ppm, Barretero 13.9 ppm y Tiburcio Álvarez 17.3 ppm. Estos valores se encuentran dentro del límite máximo recomendado (87 ppm) por la OMS para un tiempo de exposición de 15 minutos en interiores. El túnel que mayor concentración de CO registro fue la Galereña sin embargo el promedio de concentración calculado no rebasa el límite de la OMS. Por otro lado, los promedios de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en todos los túneles se encuentran por arriba de $10 \mu g/m^3$, lo que sugiere un riesgo para salud de las personas vulnerables de acuerdo lo reportado en estudios realizados en donde se mencionan que produciría un aumento del 1% al 2% en la posibilidad de tener un infarto agudo de miocardio en comparación con la población general (Henning, 2024).

Al contrastar dos túneles cerrados como el Barretero que presenta mayor flujo vehicular de 318 unidades y la Galereña que presenta un flujo menor de 259 vehículos, se observa que este último presenta promedios de concentraciones de contaminantes mayores que el Barretero. Este comportamiento se podría atribuir por la condición topográfica y direccional de cada túnel. En el túnel la Galereña, la pendiente se orienta en sentido ascendente respecto al flujo vehicular, lo que obliga a los automotores a operar con una mayor demanda de potencia, incrementando el régimen de combustión y, en consecuencia, la emisión de contaminantes. En contraste, el túnel Barretero presenta una pendiente descendente en favor del flujo vehicular, lo que reduce la carga sobre los motores, limitando tanto el consumo de combustible como la generación de emisiones.

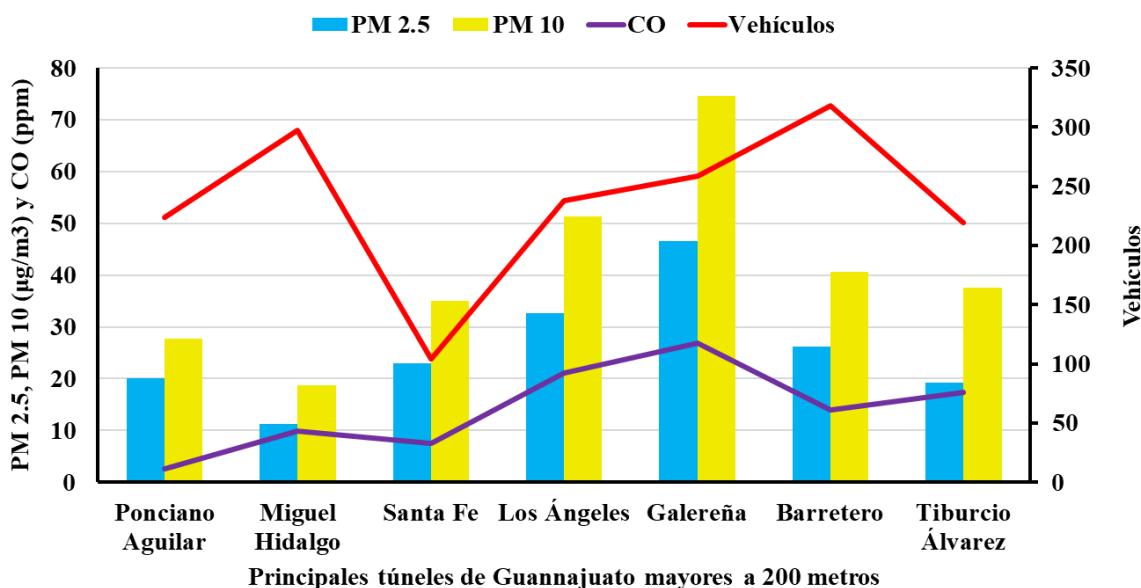


Figura 1. Promedio de concentraciones de CO, $PM_{2.5}$ y PM_{10} , registradas durante los monitoreos realizados, contra el número máximo de vehículos registrado en los principales túneles de Guanajuato, mayores a 200 metros de longitud.

La Figura 2 muestra la distribución porcentual del tipo de vehículos que circulan en los túneles de la ciudad de Guanajuato, donde el 46.63% corresponde a vehículos particulares, seguidos por camionetas con un 17.9%, taxis 12.8% motocicleta 10.6%, suburban 4.9%, camiones de carga 3.9 % y los camiones urbanos 2.9% representan el menor porcentaje. Este comportamiento en la distribución porcentual de vehículos que circulan por los túneles concuerda con los resultados reportados en un estudio realizado en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP), donde se reportó que el 64 % del total de vehículos en circulación corresponde a automóviles (Vehículos particulares), 19 % camionetas de carga, 14 % motocicletas, 1 % taxis y 0.3 % camión urbano Cerda *et al.*, (2023). Por lo anterior, la distribución porcentual de vehículos mostrada en la Figura 2 y el estudio de Cerda (2023) sugieren que las emisiones de vehículos particulares son las que mayor contribuyen a la generación de contaminantes en el aire de la ciudad, así como en los túneles o espacios semi abiertos.

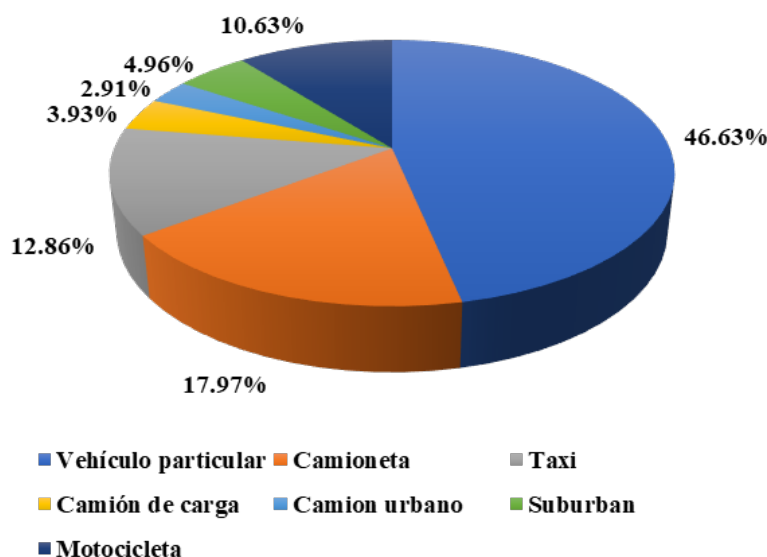


Figura 2. Distribución porcentual de vehículos que circulan en los túneles.

Túnel la Galereña

En la Figura 3 se presenta la variación temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$, PM_{10} , y CO, así como de la velocidad del viento y el número de vehículos que circularon durante el monitoreo realizado de ida y vuelta en el túnel la Galereña. Durante el trayecto de ida, se observan picos máximos en las concentraciones de $PM_{2.5}$ ($110 \mu g/m^3$) y PM_{10} ($135 \mu g/m^3$) a las 13:26 h, para un flujo promedio de 6 vehículos por minuto y baja velocidad del viento de 0.2 m/s. Con respecto al CO, la concentración en la entrada del túnel se registró en 0 ppm a las 13:20 h, conforme se fue avanzando se registraron concentraciones mínimas de 3 ppm. A las 13:26 h dicha concentración incremento de manera paulatina hasta 30 ppm.

Este comportamiento al inicio del túnel se debe a las conexiones con otros túneles que genera turbulencias en las corrientes de aire y mayor dispersión de partículas en suspensión. Posterior a las conexiones en el túnel la Galereña con un flujo de aire de la entrada a la salida la concentración del CO se incrementa de acuerdo con el flujo vehicular debido al efecto del flujo pistón y arrastre de contaminantes desde la entrada hasta la salida del túnel.

Durante el recorrido de regreso, a las 13:50 h, las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} presentan un pico máximo de $105 \mu g/m^3$ y $170 \mu g/m^3$ respectivamente. Esto es debido a que en la salida del túnel se concentran los contaminantes. Dentro del túnel, la concentración de partícula se encuentra entre los 30 y $100 \mu g/m^3$. Por otro lado, la concentración de monóxido de carbono (CO) oscila entre 20 y 40 ppm, presentando solo ligeros incrementos que coinciden con los periodos de mayor carga vehicular. Esta variación concordante con el flujo vehicular se debe a que la fuente generadora de CO son los vehículos, en comparación con las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , que pueden ser emitidas por los vehículos o resuspendidas por el viento debido a las turbulencias que genera el flujo vehicular.

El promedio de la concentración de 26.9 ppm para CO en el túnel la Galereña, comparado con los valores límite establecidos por la PIARC (tabla 2) de <100 ppm en operación normal, se mantienen por debajo del límite. Así mismo, los valores establecidos por la OMS de 87 ppm para un tiempo de 15 minutos, sigue dentro del límite.

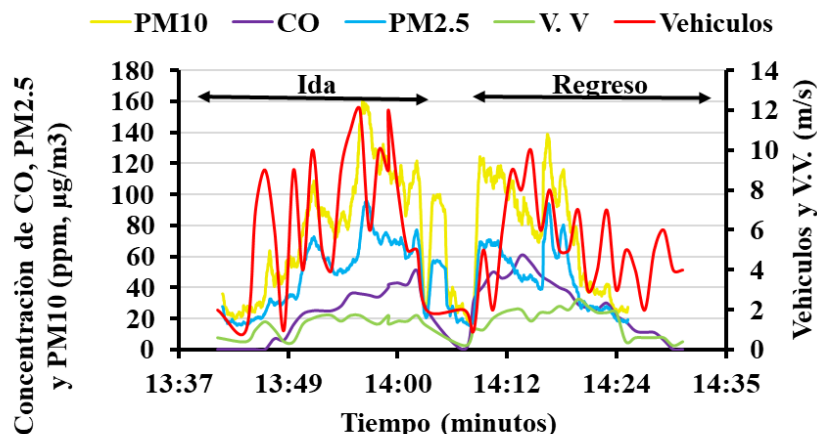


Figura 3. Variación temporal de las concentraciones $PM_{2.5}$, PM_{10} , y CO, así como de la velocidad del viento y el número de vehículos.

Túnel Santa fe

La variación de la concentración de las partículas $PM_{2.5}$, PM_{10} y de CO en relación con el número de vehículos y la velocidad del viento (V.V), registradas durante el recorrido de ida y vuelta en el túnel Santa Fe se muestra en la figura 4. El monitoreo se realizó entre las 13:16 y las 13:59 h en un periodo de 43 minutos.

Durante el monitoreo de ida la concentración de $PM_{2.5}$ alcanzó el máximo de $26.8 \mu g/m^3$ a las 13:32 h y en para PM_{10} de $53.4 \mu g/m^3$. Para el monitoreo de regreso se observan concentraciones máximas de $93.4 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y para las PM_{10} se registraron $80.3 \mu g/m^3$ a las 13:43 h. Estos máximos observados se asocian con un ligero aumento en el tránsito vehicular de 7 vehículos en ese tramo. Sin embargo, el flujo vehicular máximo de 8 vehículos por minuto se observa a las 13:49 h el cual no coincide con el pico máximo de concentración de contaminantes, lo que sugiere que el máximo de la concentración de partículas fue generado por la resuspensión de partículas generada por la turbulencia del aire dentro del túnel.

Para el CO, la concentración máxima de ida fue de 18 ppm y de regreso solamente alcanzó 12 ppm. Aunque mantiene niveles relativamente bajos durante el trayecto de ida alcanzó un pico de 18 ppm a las 13:24 h. En el trayecto registro valores de alrededor de 10 o menos durante todo el trayecto y alcanzó un valor máximo de concentración de 12 a las 13:41 h. Por su parte la velocidad del viento dentro del túnel varía entre 0 y 2 m/s durante todo el recorrido.

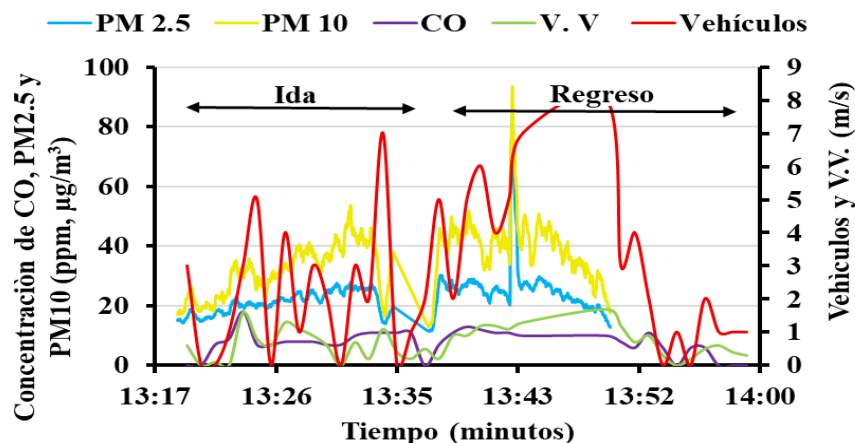


Figura 4. Variación temporal de las concentraciones $PM_{2.5}$, PM_{10} , y CO, así como de la velocidad del viento y el número de vehículos.

Túnel Tiburcio Álvarez

La variación de la concentración de las $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el túnel Tiburcio Álvarez se muestra en la figura 5. Se registró un máximo muy pronunciado de concentraciones de partículas PM_{10} ($790 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $PM_{2.5}$ ($400 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 13:24 h, durante el trayecto de ida. Este incremento se puede atribuir a las emisiones de partículas generadas por un vehículo con deficiencia en la combustión por falta de mantenimiento. Este mismo efecto se observa en la máxima concentración (50 ppm) de CO. Sin embargo, en el trayecto de regreso, al inicio del túnel a las 13:49 h, se registró el flujo máximo de 10 vehículos por minuto en el que no se observó el mismo incremento de la concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ registrándose valores menores de 46 y $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente y de 23 ppm CO. Este comportamiento en la disminución de la concentración y en el aumento de vehículos, se debe a que la entrada del túnel es una zona abierta al aire libre que favorece la dispersión de contaminantes. En tales condiciones, la dispersión natural de los contaminantes atmosféricos es mucho más eficiente debido a la mayor circulación del aire y a la acción del viento, lo que impide la acumulación de partículas en suspensión.

En el interior del túnel, las concentraciones PM_{10} y $PM_{2.5}$ se mantuvieron entre 60 y $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, con un flujo vehicular promedio de 8 a 2 vehículos por minuto y una velocidad del viento de 1.0 m/s. Este comportamiento reafirma la influencia del entorno físico (cerrado o abierto) sobre la dinámica de los contaminantes atmosféricos, siendo los espacios confinados mucho más propensos a la acumulación de contaminantes, en comparación con zonas a cielo abierto donde prevalece la ventilación natural.

Esta tendencia se alinea con lo reportado por De Vito *et al.* (2023), quienes demostraron que los túneles vehiculares actúan como sistemas cerrados donde la acumulación de contaminantes es altamente sensible al volumen y tipo de tráfico, con concentraciones significativamente más elevadas de CO respecto al ambiente exterior, a pesar de que en este último el flujo vehicular puede ser incluso mayor.

Por otro lado, el promedio de la concentración de 17.3 ppm del CO dentro del túnel Tiburcio Álvarez comparado con el límite máximo establecido por la PIARC (tabla 2), para la operación normal de un túnel (< 100 ppm), éste se encuentra dentro del límite. Así mismo, este promedio máximo comparado con el de la OMS (tabla 1) que establece 87 ppm en un tiempo de 15 minutos, sigue dentro del límite.

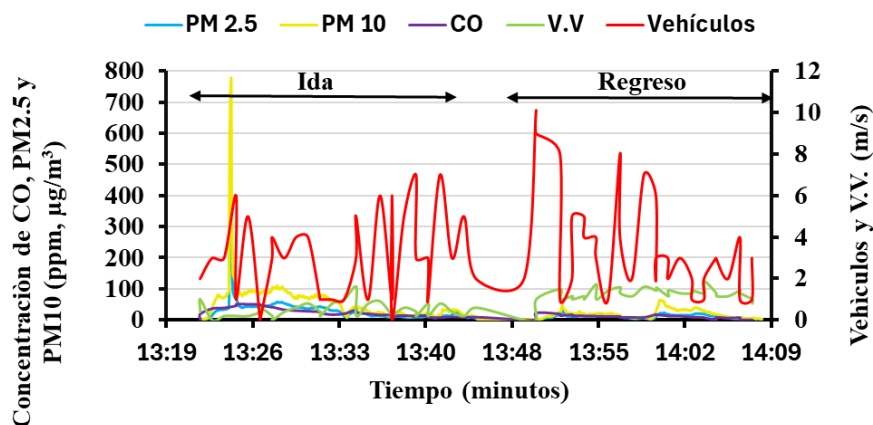


Figura 5. Variación temporal de las concentraciones $PM_{2.5}$, PM_{10} , y CO, así como de la velocidad del viento y el número de vehículos.

Túnel Barretero

Las concentraciones de los contaminantes ($PM_{2.5}$, PM_{10} y CO), así como la velocidad del viento junto con el número de vehículos durante en el monitoreo del túnel Barretero realizado entre las 13:10 y las 14:08 h figura 6. Las partículas $PM_{2.5}$ alcanzaron una concentración máxima al inicio del monitoreo, registrando un pico máximo de $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 13:17 h, las PM_{10} con $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estos picos coinciden con una reducción en la velocidad del viento, lo que sugiere que la ventilación dentro del túnel fue insuficiente para disipar los contaminantes. Durante el regreso, se presentaron aumentos notables tanto como $PM_{2.5}$ y PM_{10} que coincidió con varios aumentos en el número de vehículos transitados en el túnel.

En el caso del CO se observó un comportamiento más estable a lo largo de todo el trayecto, con concentraciones que no superan los 35 ppm. Se perciben leves aumentos en momentos específicos que coinciden con una caída de la velocidad de viento. Este es un comportamiento característico del CO como contaminante gaseoso de mayor dispersión, pero sensible a condiciones de baja ventilación en el interior del túnel.

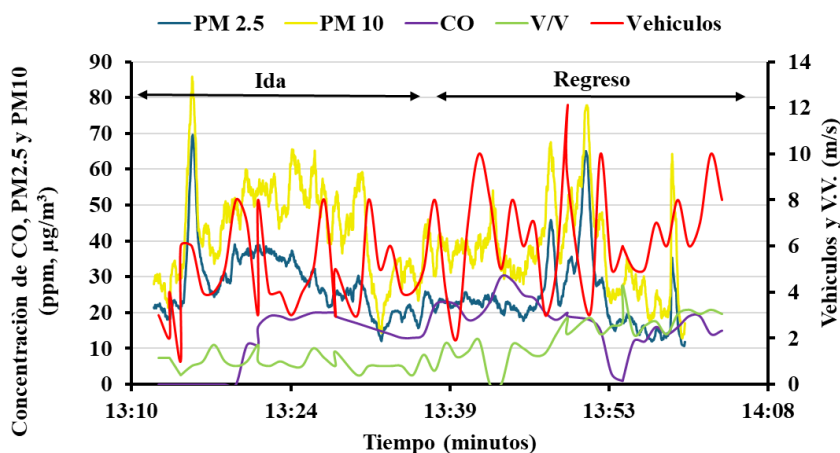


Figura 6. Variación temporal de las concentraciones $PM_{2.5}$, PM_{10} , y CO, así como de la velocidad del viento y el número de vehículos.

Túnel Miguel Hidalgo

La variación de las concentraciones de $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, el número de vehículos y la velocidad del viento durante un recorrido de ida y vuelta efectuado en el túnel Miguel Hidalgo (Calle Subterránea) entre las 12:31 y las 13:14 h se presentan en la Figura 6. Como se aprecia, el CO presenta valores máximos de 12 ppm a las 12:44 h en el trayecto de ida y de 30 ppm a las 12:58 h en el de vuelta. Se puede observar en algunos puntos que concentraciones altas de CO coincidieron con velocidades por debajo de 1 m/s. Este patrón sugiere que el estancamiento de los contaminantes como CO se favorece en zonas con ventilación limitada.

Por otro lado, las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} alcanzaron un valor máximo de $30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $62.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 12:37 h en el monitoreo de ida, comparados con las máximas concentraciones de 19.1 y de $32.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el monitoreo de vuelta a las 13:09 h. La notable variabilidad que presentan los tres contaminantes en la gráfica se puede atribuir por la estructura particular del túnel Miguel Hidalgo, compuesto por una sucesión de tramos cerrados e interconectados, intercalados con espacios abiertos o semiabiertos al ambiente exterior. Esta configuración genera una ventilación natural intermitente que facilita la dispersión de contaminantes en algunos puntos y su acumulación en otros, dependiendo de la dirección del viento y del flujo de vehículos en cada segmento.

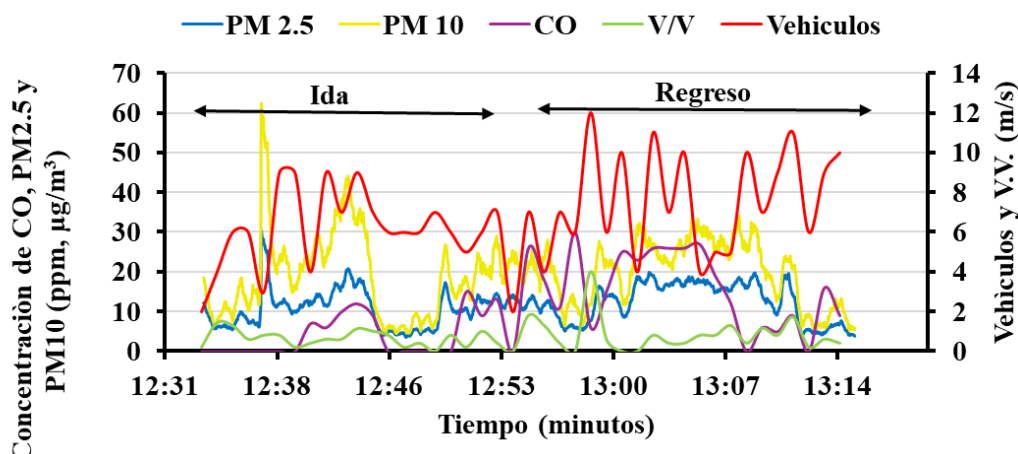


Figura 7. Variación temporal de las concentraciones $PM_{2.5}$, PM_{10} , y CO, así como de la velocidad del viento y el número de vehículos.

Túnel Los Ángeles

Los perfiles de concentración de partículas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), CO, velocidad del viento y número de vehículos, correspondiente al monitoreo de ida y vuelta en el túnel Los Ángeles, se presentan en la Figura 7. Como se observa, la concentración máxima de PM_{10} alcanza un valor de $199.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y las $PM_{2.5}$ de $171.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 13:45 h. De igual manera la concentración máxima de CO de 42 ppm se registró al mismo tiempo. Esto se puede atribuir al mal funcionamiento mecánico del motor de algunos vehículos con deficiente combustión y emisión de altas concentraciones de contaminantes.

En general las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} se encuentran por arriba de los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y por abajo de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el monitoreo de ida. En contraste, para el monitoreo de regreso las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} fueron más elevadas manteniéndose por abajo de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, esto se debe al mayor flujo vehicular registrado. El mismo comportamiento se observa con la variación de la concentración de CO registrándose una mayor concentración de 42 ppm de regreso comparada con 35 ppm de ida.

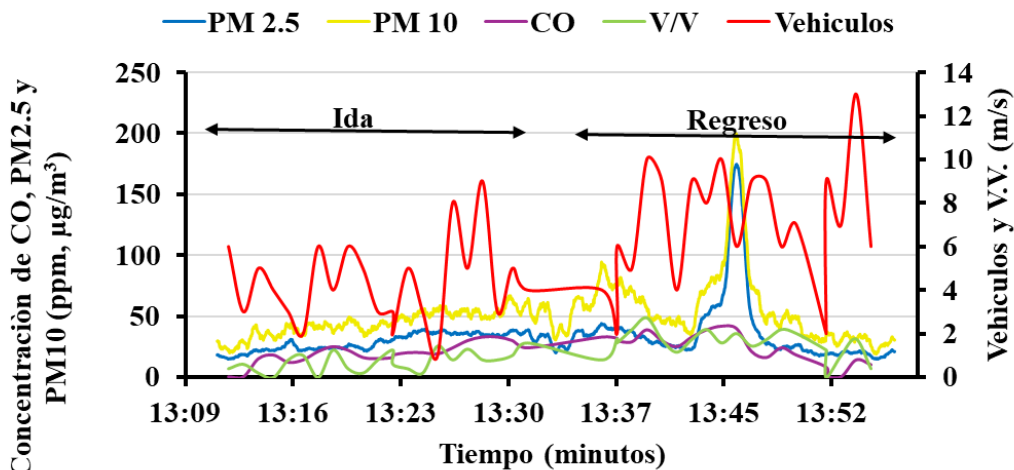


Figura 8. Variación temporal de las concentraciones $PM_{2.5}$, PM_{10} y CO, así como de la velocidad del viento y el número de vehículos; Túnel Los Ángeles.

Túnel Ponciano Aguilar

La variación de la concentración de los contaminantes ($PM_{2.5}$, PM_{10} y CO), y la velocidad del viento junto con el número de vehículos dentro del túnel Ponciano Aguilar se muestran en la figura 8. Los picos máximos de concentraciones de los contaminantes se registraron en los tramos cerrados del túnel y las mínimas concentraciones se registraron en los tramos abiertos del mismo. Por ejemplo, las concentraciones máximas ($19.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $47.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se registraron en un tramo cerrado del túnel a las 12:57 h para el material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} respectivamente. Otros máximos se observan a las 13:05, 13:10 y 13:15 h con concentraciones de 24, 33 y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Esto se puede atribuir a la baja dispersión y estancamiento de los contaminantes en tramos cerrado del túnel. El mismo efecto se observa para el CO, donde las máximas concentración se registraron a las 12:52, 13:06, 13:11 y 13:16 h con 13, 8, 13 y 15 ppm respectivamente. Un pico máximo de CO 33ppm se observa a las 13:20, que puede ser debido al paso de un vehículo con un mal funcionamiento y deficiencia del motor.

Durante el recorrido de regreso, se observó el mismo efecto de los tramos cerrados y abiertos durante el recorrido de ida. Los picos máximos (34.4 , $76.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 15ppm) para $PM_{2.5}$, PM_{10} y CO se registraron a las 13:53, con 7 vehículos por minuto y una velocidad del viento de 1.57 m/s. Otros picos máximos se observaron a las 13:45, 13:40, 13:37 y 13:33 h con concentraciones de 34.4, 40.3, 27.4, $25.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento se puede atribuir a la intercepción con el túnel santa fe, produciendo una acumulación de contaminantes. Contrastando el promedio de CO (2.5ppm) del túnel Ponciano Aguilar con los valores máximos por la OMS (tabla 1) que establece 87 ppm para un tiempo de exposición de 15 min y la PIAR (tabla 2) para condiciones de operación normal de un túnel (<100ppm), este se encuentra por debajo de los valores establecidos.

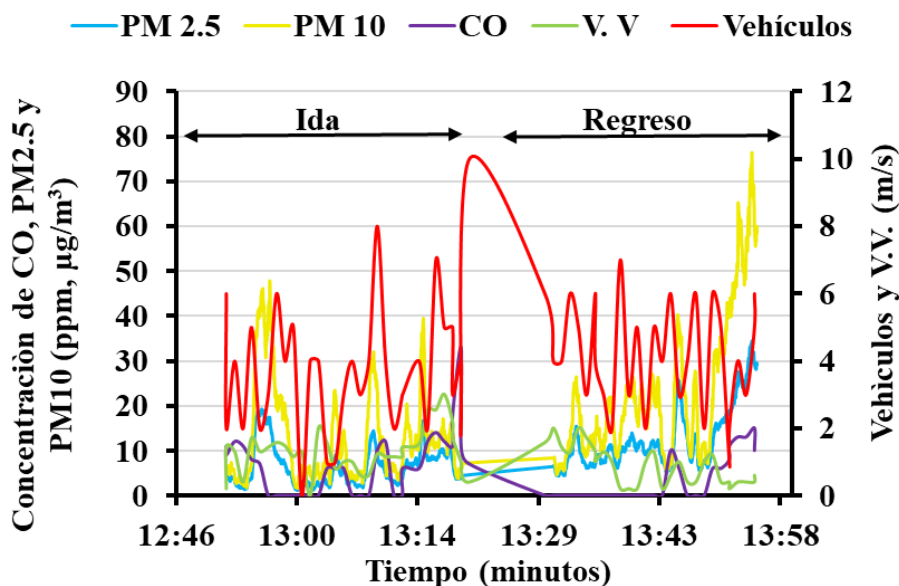


Figura 9. Variación temporal de las concentraciones $PM_{2.5}$, PM_{10} , y CO, así como de la velocidad del viento y el número de vehículos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos durante el monitoreo de los túneles muestran que aquellos con estructura completamente cerrada y sin tramos abiertos, como la Galereña, Los Ángeles, Barretero, Santa Fe y Tiburcio Álvarez, registraron las concentraciones más altas de contaminantes ($PM_{2.5}$, PM_{10} y CO). En contraste, los túneles Miguel Hidalgo y Ponciano Aguilar con mayor flujo vehicular y con tramos abiertos, presentaron menores concentraciones. Esto confirma que la ventilación natural derivada de la presencia de secciones abiertas en túneles desempeña un papel clave en la dispersión de contaminantes. Ningún túnel superó el límite máximo recomendado por la OMS de 87 ppm de CO para un tiempo de exposición de 15 minutos. En contraste, los niveles de $PM_{2.5}$ en todos los casos excedieron los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que se asocia a riesgos cardiovasculares en personas vulnerables. Por lo anterior, se recomienda restringir a grupos vulnerables el uso de los túneles como paso peatonal, además de implementar estrategias de ventilación, regular el tránsito vehicular y asegurar que los automóviles cumplan con los estándares de emisión de contaminantes.

Referencias / Bibliográficas

- Andersen, Z. J., Zhang, J., Jørgensen, J. T., Samoli, E., Liu, S., Chen, J., ... & Katsouyanni, K. (2022). Long-term exposure to air pollution and mortality from dementia, psychiatric disorders, and suicide in a large pooled European cohort: ELAPSE study. *Environment International*.
- Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C. [AMITOS]. (2013, julio-septiembre). Los túneles de Guanajuato. *Obras Subterráneas*, 1(2). <https://www.amitos.org/wp-content/uploads/2020/05/os2.pdf>
- Blindheim, O. T., Grøv, E., & Nilsen, B. (2005). Nordic sub sea tunnel projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 570–580. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779805000659>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED]. (2019, 5 de julio). Memoria histórica de desastres: Algunas inundaciones severas en Guanajuato. gob.mx. Recuperado el 16 de julio de 2025, de <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/memoriahistorica-de-desastres-algunas-inundaciones-severas-en-guanajuato>

- Chang, X., Li, H., Zhang, X., Rong, J., & Zhao, X. (2022, September 7). Transition patterns of driving style from a traditional driving environment to a connected vehicle environment: A case of an extra-long tunnel road. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369847822001814>
- Chow, W. K., & Chan, M. Y. (2003, February). Field measurement on transient carbon monoxide levels in vehicular tunnels. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132302001208>
- De Vito, S., Del Giudice, A., D'Elia, G., Esposito, E., Fattoruso, G., Ferlito, S., Formisano, F., Loffredo, G., Massera, E., Bellucci, P., Ciarallo, F., & Di Francia, G. (2023). Correlating air pollution concentrations and vehicular emissions in an Italian roadway tunnel by means of low cost sensors. *Atmosphere*.
- Gobierno del Estado de Guanajuato, Secretaría de Seguridad Pública, Coordinación Estatal de Protección Civil. (s. f.). Atlas de peligros y riesgos del Estado de Guanajuato [PDF]. Recuperado el 16 de julio de 2025, de https://servicios-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/hm/hm_guanajuato.pdf
- Henning, R. J. (2024). Particulate matter air pollution is a significant risk factor for cardiovascular disease. *Current Problems in Cardiology*, 49(2),
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014628062300511X>
- Herrera Murillo, J., Rodríguez Román, S., & Rojas Marín, J. F. (2012). Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras de Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 25(1), 54–63. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=699878356005>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2025). Vehículos de motor registrados en circulación [Consulta a la base de datos en línea]. Recuperado el 21 de julio de 2025, de https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?proy=vmrc_vehiculos
- Introna, M., Juárez-Facio, A. T., Vallabani, N. V. S., Tu, M. H., Heikkilä, P., Colombo, A., Liboni, V., Tsyupa, B., Mancini, A., Keskinen, J., Olofsson, U., Steimer, S. S., Karlsson, H. L., & Elihn, K. (2025). Toxicity of real-world PM_{2.5} road tunnel emissions using a mobile air–liquid interface system and submerged exposure. *Environmental Pollution*, 379, Article 126486.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749125008590?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=960bb1e9386aac47
- Lim, E. Y., & Kim, G.-D. (2024). Particulate matter-induced emerging health effects associated with oxidative stress and inflammation. *Antioxidants*, 13(10), 1256. <https://doi.org/10.3390/antiox13101256>
- Nævestad, T.-O., & Meyer, S. (2014). A survey of vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008–2011. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 104–112.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.12.001>
- PIARC – World Road Association, Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation. (2012). Road tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation (Report No. 2012R05EN). PIARC. ISBN 978-2-84060-269-5.
<https://www.piarc.org/en/order-library/30189-en-Road%20Tunnels:%20Vehicle%20Emissions%20and%20Air%20Demand%20for%20Ventilation%20-%20Technical%20report>
- Raub, J. (1999). Health effects of exposure to ambient carbon monoxide. *Chemosphere – Global Change Science*, 1(1), 331–351. [https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(99\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(99)00005-7)
- Song, X., Zhang, Y., Zhang, G., & Chen, X. (2024). Characteristics of thermal environment and pollutant diffusion when considering VIT and jet fans inside a 3 km long road tunnel. *Atmospheric Pollution Research*, 16(1), 102393. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102393>
- Toribio Hernández, S. (2020). Estudio de las emisiones de contaminantes debidas al tráfico en túneles carreteros: desarrollo de una herramienta para dimensionar un sistema de ventilación longitudinal (Trabajo de Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid). Repositorio de la Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/49671/1/TFG_SERGIO_TORIBIO_HERNANDEZ.pdf
- UNESCO World Heritage Centre. (s. f.). Chartres Cathedral. In World Heritage List. UNESCO. Recuperado el 16 de julio de 2025, de <https://whc.unesco.org/es/list/482>
- Wan, H., Jiang, Y., & Jiang, J. (2023). A survey of fire accidents during the process of highway tunnel operation in China from 2010 to 2021: Characteristics and countermeasures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 139, 105237. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105237>

(WHO) (2010). Air Quality Guidelines for Europe, Bonn Office. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/260127>

Yang, Y., Alonso, F., Faus, M., Du, Z., & Mei, J. (2024). Exploring the causes of frequent accidents at highway tunnel exits: Coupling analysis of the slack effect and white hole effect in extra-long tunnels. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 106, 288–305. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2024.08.018>

Zhang, Y., Lang, J., Cheng, S., Li, H., Zhou, Y., Chen, D., Zhang, H., & Wang, H. (2018). Chemical composition and sources of PM1 and PM2.5 in Beijing in autumn. *Science of the Total Environment*, 630, 72–82.