



ENERO DE 2026

Impactos es salud de la PM_{2.5} en La Paz, BCS

Evaluación de los efectos en la salud pública por la contaminación de PM_{2.5} en la zona urbana de La Paz, BCS

Informe técnico presentado para su análisis y toma de decisiones

Para: Centro de Energía Renovable Y Calidad Ambiental, CERCA

Créditos:

Dra. Tania López. Estimación de los efectos en la mortalidad por exposición crónica de PM_{2.5} de la población de la zona urbana de la Paz, y elaboración del documento.

Dr. Hugo Barrera. Colaboración técnica en la modelación de la dispersión de las emisiones provenientes de la generación de energía eléctrica.

Dra. Jaqueline Valenzuela. Coordinación técnica de los módulos de modelación de emisiones y la valoración de riesgos a la salud asociados con la generación de energía en La Paz, BCS.

Informe técnico presentado para su análisis y toma de decisiones

© 2026 CERCA. Este informe técnico es propiedad de la organización CERCA y fue concluido en enero de 2026. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento por cualquier medio sin autorización expresa de CERCA.

Contenido

Resumen Ejecutivo.....	4
Introducción	5
Objetivos.....	9
Objetivo general.....	9
Objetivos particulares	9
Justificación	9
Metodología de evaluación de los impactos en la salud (EIS)	10
Resultados.....	11
Selección de los contaminantes y de los efectos en la salud	11
Comparativa de las tasas de enfermedades asociadas con la exposición de PM _{2.5} en los municipios de Baja California Sur (2020-2024).....	12
Tasas municipales de eventos cerebrovasculares (ECV).....	12
Tasas de cáncer de tráquea, bronquios y pulmón (CP).....	13
Tasas de diabetes mellitus tipo 2 (DM2)	14
Tasas de enfermedades isquémicas del corazón (EIC).....	15
Tasas de enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC)	16
Tasas de infecciones respiratorias inferiores agudas	17
Análisis estadístico de los datos de calidad del aire de PM ₁₀ , PM _{2.5} , Ozono y SO ₂ en la Paz, BCS para los 12 meses analizados (2024-2025).....	20
Partículas suspendidas (PM ₁₀ y PM _{2.5}).....	20
Ozono (O ₃)	27
Dióxido de azufre (SO ₂)	29
Evaluación de la exposición de las PM _{2.5} en la zona urbana de La Paz, BCS.....	32
Contrafactual utilizado para las estimaciones de la mortalidad evitable	33
Riesgos relativos para cada causa de muerte	33
Tasas basales de mortalidad por causa de enfermedad	33
Casos de mortalidad de evitable por la exposición de PM _{2.5} en la región urbana de La Paz, BCS.....	34
Evaluación económica de la mortalidad evitable	37
Conclusiones	38
Recomendaciones.....	40
Limitaciones del Estudio.....	40
Bibliografía.....	41

Anexo técnico	45
Códigos CIE-10 que se incluye el subconjunto de padecimientos considerados para cada causa de enfermedad estudiadas	45
Limpieza y verificación de los datos horarios de PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ y SO ₂	46

Resumen Ejecutivo

El presente informe elaborado para el Centro de Energía Renovable y Calidad Ambiental (CERCA), presenta una evaluación de la mortalidad evitable, y su monetización económica, derivada de la exposición crónica de la población adulta a las partículas finas ($PM_{2.5}$) en la zona urbana de La Paz, Baja California Sur.

El periodo de estudio abarcó del 1 de noviembre de 2024 al 31 de octubre de 2025 (12 meses continuos). La evaluación se llevó a cabo considerando las concentraciones horarias medidas en la estación de monitoreo "Junta Estatal de Caminos" (JEC), ubicada en la zona urbana de La Paz, cuyas operaciones iniciaron a mediados de 2024. Cabe mencionar que esta estación es la primera operada por autoridades municipales. Además de las $PM_{2.5}$, se analizaron y compararon con valores normados mexicanos y de la Organización Mundial de la Salud (OMS) los datos de las partículas respirables (PM_{10}), el ozono (O_3) y el dióxido de azufre (SO_2), también medidos la estación JEC para el mismo periodo.

La metodología empleada para este estudio fue la Evaluación de Impactos en la Salud (EIS), recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y alineada al estudio de la Carga Global de Enfermedad 2021 (GBD, 2024). Se analizaron seis causas de mortalidad específicas vinculadas a la exposición crónica de las $PM_{2.5}$: eventos cerebrovasculares (ECV), Cáncer de tráquea, bronquios y pulmones (CP), diabetes mellitus tipo 2 (DT2), enfermedades isquémicas del corazón (EIC), enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) e infecciones respiratorias inferiores agudas (IARI).

Principales hallazgos:

Fuentes de Emisión: Las emisiones antrópicas de $PM_{2.5}$ del municipio de La Paz provienen principalmente de la combustión incompleta de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica (34%), de las fuentes de área (30%) y los vehículos en circulación (26%), principalmente, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de 2020, publicado por la SEMARNAT.

Tendencias de las tasas de morbilidad: En el municipio de la Paz, se evidenció un incremento sostenido en las tasas de las seis causas de enfermedades estudiadas entre 2020 y 2024. Destacan el aumento en casos de cáncer de pulmón (de 12 a 63 por cada 100,000 habitantes) y de enfermedades isquémicas del corazón (de 31 a 246 por cada 100,000 habitantes).

Estadística básica de las concentraciones horarias las $PM_{2.5}$, PM_{10} y su razón ($PM_{2.5}/PM_{10}$): Los estadísticos básicos y su histograma de densidad muestra que las concentraciones de las PM_{10} es la fracción más variable, con episodios extremos que elevan su dispersión, mientras que $PM_{2.5}$ presentan una menor variabilidad. La razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ permanece estable y generalmente baja, indicando una composición dominada por partículas gruesas. En promedio anual, las $PM_{2.5}$ registró $10 \mu g/m^3$ y las PM_{10} $40 \mu g/m^3$, reforzando esta predominancia estructural.

Calidad del aire: Si bien las concentraciones de PM_{2.5} no superaron el límite anual establecido por la NOM-025-SSA1-2021, al situarse justo en el valor normado de 10 µg/m³, estos niveles exceden de manera importante las directrices más estrictas de la OMS: el valor diario en 1.4 veces y el valor anual en 2 veces. La evidencia epidemiológica y toxicológica demuestra que no existe un umbral seguro de exposición para las PM_{2.5}, por lo que incluso concentraciones por debajo de los valores normativos pueden generar efectos adversos en la salud, especialmente en poblaciones vulnerables como personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias, infancias, adultos mayores y mujeres embarazadas. En contraste, las PM₁₀ y el ozono (O₃) sí superan los valores normados nacionales e internacionales; de haberse analizado un año calendario completo (de enero a diciembre), ambos habrían mostrado incumplimiento tanto de la normativa mexicana como de las recomendaciones internacionales.

Mortalidad evitable: Se estimaron 18 muertes prematuras anuales evitables en la población de La Paz directamente atribuibles a la exposición a PM_{2.5}.

Valoración económica: mediante la aplicación del método de transferencia de beneficios y un Valor Estadístico de la Vida (VVE) ajustado para México de aproximadamente \$41.5 millones de pesos actuales de 2024, el impacto económico de la mortalidad evitable se cuantificó en \$746.2 (y su desviación estándar de 331.6) millones de pesos anuales.

El estudio concluye que, a pesar de que el indicador de exposición crónica no rebasa el límite anual de la norma nacional para PM_{2.5}, sí se encuentra dos veces por encima del valor de las directrices de la Organización Mundial de la Salud. Esto implica un riesgo sustancial para la salud pública, especialmente para grupos vulnerables. Se recomienda urgentemente la transición hacia combustibles más limpios y el fortalecimiento de las políticas de gestión de calidad del aire para mitigar estos efectos y proteger el derecho humano a un medio ambiente sano.

Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define a la salud como "... un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades"(OMS, 2016). Esta perspectiva incluye, no solamente, la situación de salud y la gestión sanitaria, sino también los factores condicionantes de la salud: la biología humana, *el ambiente*, los estilos de vida y la organización de los sistemas de salud.

México reconoce el papel del derecho humano al medio ambiente sano, primero en 1988 con la promulgación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente ([LGEEPA](#)); y segundo con la reforma del [artículo 4° de la constitución](#) en el que se incluyó el siguiente párrafo: *"Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley"*. Garantiza este

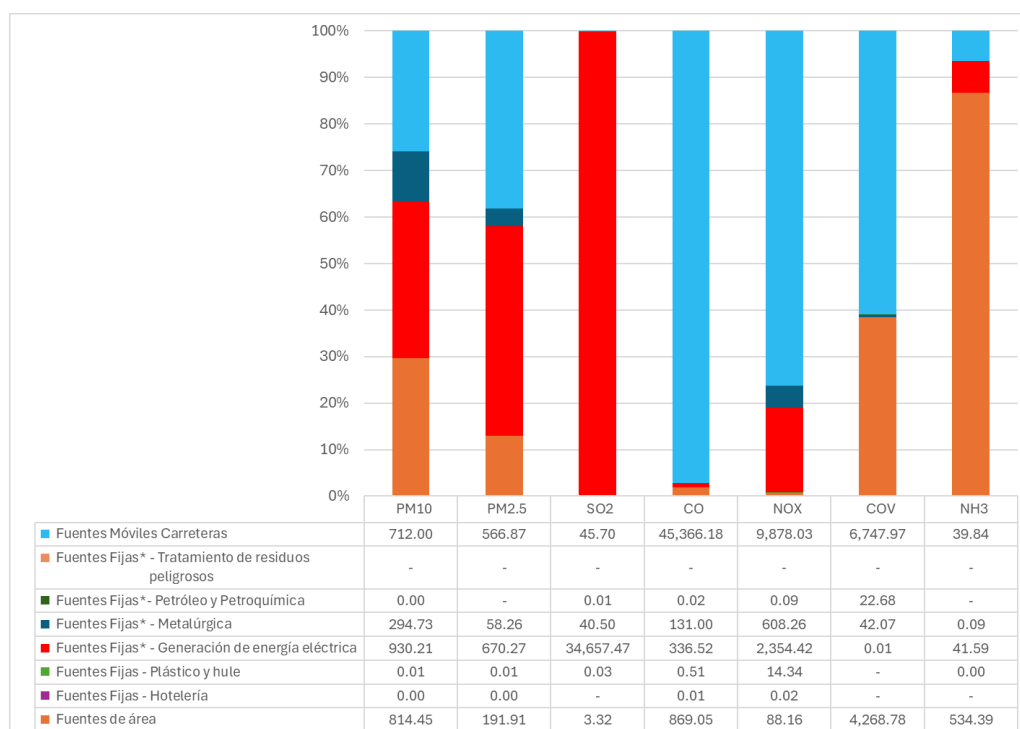
derecho en material de aire consiste en el acceso a un aire limpio y libre de contaminantes que afecten la salud.

La contaminación atmosférica constituye un problema significativo en zonas urbanas de México, y La Paz, Baja California Sur, no es la excepción. De acuerdo con algunas campañas de monitoreo de calidad del aire realizadas en La Paz, y los datos reportados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), si bien los niveles de contaminantes del aire no superaron los límites normados nacionales, la estación Costa Baja registró picos elevados de SO₂ vinculados a la termoeléctrica Punta Prieta II. En las estaciones de CFE ubicadas dentro de La Paz se detectaron altos niveles de PM₁₀, probablemente por diversas fuentes urbanas (SETUES, 2017).

Recientemente, CERCA (Centro de Energía Renovable y Calidad Ambiental Asociación Civil) en su reporte anual de calidad del aire 2022, reporta que la calidad del aire en La Paz presenta riesgos para la salud, especialmente por PM_{2.5}. Si bien las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} rara vez superan los límites de las NOM, frecuentemente exceden las recomendaciones de la OMS, que son más estrictas. Los episodios críticos están fuertemente asociados a incendios, fallas en infraestructura energética y condiciones meteorológicas (CERCA, 2023).

La atención del deterioro de la calidad del aire requiere conocer las fuentes principales de emisiones antrópicas de contaminantes de aire que son las fuentes susceptibles de control y prevención, a diferencia de las emisiones naturales. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de México de 2020 (datos públicos más recientes), las fuentes que destacan en La Paz son (ver, figura 1): las fuentes móviles carreteras (barras azul claro), la generación de energía eléctrica (barras rojas), las fuentes de área y la metalurgia (incluye la siderúrgica).

FIGURA 1. EMISIONES DE CONTAMINANTES DEL AIRE Y PORCENTAJES DE LAS PRINCIPALES FUENTES EN LA PAZ, BCS, 2020, EN TONELADAS.



Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de México 2020

Las partículas suspendidas con diámetros iguales o menores a 10 y 5 micras (PM_{10} y $PM_{2.5}$) provienen principalmente de la generación de energía (34% y 45%, respectivamente), de los vehículos en circulación (26% y 38%, respectivamente), y las fuentes de área (30% y 13%, respectivamente). El dióxido de azufre (SO_2) se origina en su mayoría de la generación de energía eléctrica a partir de combustible fósiles (99.7%). El monóxido de carbono (CO) proviene principalmente de los vehículos en circulación (97%). Los óxidos de nitrógeno (NO_x) se emite principalmente de los vehículos en circulación (76%) y de la generación de energía eléctrica (18%). Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) se emiten de los vehículos en circulación (61%) y de fuentes de área (39%), y finalmente el amoníaco (NH_3) se origina principalmente de las fuentes de área (87%) (SEMARNAT, 2020).

En resumen, en el municipio de La Paz las principales fuentes de emisiones de contaminantes del aire es la generación de energía eléctrica, los vehículos en circulación y las fuentes de área. Sin embargo, destacan por su magnitud las emisiones de la Central Termoeléctrica (CT) Punta Prieta y la Central de Combustión Interna (CCI) Baja California Sur. Como se observó en los resultados del inventario de emisiones, la presencia de plantas de generación de energía eléctrica que utilizan combustibles fósiles suele agravar la contaminación del aire.

Un estudio reciente cuantificó las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2) de tres centrales eléctricas en Baja California Sur, México. En La Paz, la central Punta Prieta mostró un incremento en sus emisiones de SO_2 y NO_2 entre 2013 y 2022, mientras que la central de combustión interna Baja California Sur aumentó sus emisiones de SO_2 y disminuyó las de NO_2 en el mismo periodo. Las mediciones concuerdan con los datos oficiales para Punta Prieta, pero existen discrepancias para las otras dos plantas (Rivera-Cárdenas et al., 2024).

Las centrales eléctricas de combustóleo y gas natural cerca de áreas urbanas costeras están asociadas con una clara degradación de la calidad del aire y efectos adversos para la salud. La mayoría de los estudios reporta que las concentraciones de contaminantes fueron más altas cerca de la fuente. Por ejemplo, en Italia, los riesgos incrementales de cáncer de por vida superaron 1/10,000 en distritos adyacentes a instalaciones de energía, y en las plantas de cogeneración del área de Boston que utilizan combustóleo y gas natural, los niveles de ozono alcanzaron $100 \mu g/m^3$, con impactos observados en una región receptora de 57 millones de personas (Galise et al., 2019; Levy et al., 1999).

En Colombia, los municipios dentro de un radio de 100 km de las termoeléctricas experimentaron aumentos del 36% en $PM_{2.5}$, 16% en PM_{10} y 25% en SO_2 . Las exposiciones elevadas fueron más notables dentro de 1-3 km de las plantas y entre grupos vulnerables (como minorías raciales, residentes de bajos ingresos y ancianos). Los hallazgos de salud van desde aumentos modestos (por ejemplo, 0.3 muertes adicionales por año en una estimación regional) hasta cifras nacionales que superan las 20,000 muertes prematuras anuales. Otros resultados incluyen bronquitis crónica, aumento de visitas a la sala de emergencias por eventos cardiovasculares e impactos monetizados en la salud de hasta \$996 millones (Adhvaryu et al., 2023).

La investigación sobre los impactos de la generación de electricidad en México reveló consecuencias ambientales y de salud significativas de las plantas de energía que utilizan combustóleo. Uno estudio mexicano pionero en evaluar los impactos en la salud pública derivados de las emisiones de $PM_{2.5}$ la central termoeléctrica "Adolfo López Mateos" en Tuxpan, Veracruz, una de las más grandes de México, estimó que las emisiones de la planta provocan aproximadamente 30 muertes prematuras anuales en la región cercana, atribuibles a las $PM_{2.5}$ primarias y secundarias, éstas últimas principalmente de sulfatos derivados del SO_2 contribuyen en más del 80% a los impactos de mortalidad detectados. (López et al., 2005).

Es oportuno comentar que las $PM_{2.5}$ en zonas urbanas provienen tanto de emisiones directas como de procesos químicos en la atmósfera. Las $PM_{2.5}$ primarias se generan de manera inmediata por la combustión incompleta de combustibles fósiles, del sector vehicular, actividades industriales, quema residencial y el desgaste de materiales como frenos y llantas. Mientras, las $PM_{2.5}$ secundarias se forman cuando gases precursores —como óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, compuestos orgánicos volátiles y amoníaco— reaccionan en el aire bajo la influencia de la radiación solar, produciendo sulfatos, nitratos y compuestos orgánicos que incrementan significativamente la carga de partículas finas en las ciudades (Seinfeld & Spyros, 2006).

Derivado de lo anterior, este estudio se enfocó en la cuantificación de impactos en mortalidad por la exposición a las partículas finas ($PM_{2.5}$) porque el peso de la evidencia epidemiológica concluyente sobre sus efectos en la salud (Balakrishnan et al., 2015; Hamra et al., 2014; Nadadur & Hollingsworth, 2015). Las partículas finas $PM_{2.5}$ debido a su tamaño pueden acumularse, estancarse en la atmósfera y permanecer en el aire por tiempo prolongado y propagarse a largas distancias. Además, tienen la capacidad de penetrar más profundamente en el organismo humano y, debido a los compuestos tóxicos que acarrean, suelen tener una mayor toxicidad, particularmente las que provienen de la combustión incompleta de combustibles fósiles (Thangavel et al., 2022).

La evidencia epidemiológica indica que la exposición a altos niveles de $PM_{2.5}$, en periodos cortos de horas a días, aumenta el riesgo de las personas a presentar impactos agudos, como irritación de ojos, nariz y garganta, o aumento en la frecuencia de eventos de asma. Adicionalmente, la exposición a $PM_{2.5}$ mayores a un año se han asociado con impactos crónicos, tales como el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias o cáncer de pulmón, entre las más estudiadas, e incluso perder la vida prematuramente (Pope et al., 2020). Estos efectos son más frecuentes entre la población más vulnerable, como los infantes, adultos mayores, mujeres embarazadas y personas con padecimientos crónicos preexistentes (USEPA, 2018).

Objetivos

Objetivo general

Estimar los efectos en la mortalidad evitable de la población de La Paz, BCS, así como su monetización, derivados de las concentraciones prevalecientes de $PM_{2.5}$ en 2024 y 2025, de acuerdo con la metodología del estudio de la Carga Global de Enfermedad de 2021.

Objetivos particulares

- Estimar las métricas de exposición crónica para las $PM_{2.5}$, de acuerdo con el manejo de datos de la norma vigente correspondiente, con la información disponible y más reciente representativa de al menos un año.
- Estimar la exposición de la población a $PM_{2.5}$, mediante herramientas de análisis geográfico.
- Evaluar los impactos en la mortalidad evitable debido a las concentraciones medidas en la zona urbana de La Paz, aplicando la metodología del estudio de la Carga Global de Enfermedad 2021 (GBD, por sus siglas en inglés).
- Monetizar los casos de mortalidad asociados a las concentraciones de $PM_{2.5}$ en La Paz, BCS.
- Elaborar de un informe de los resultados con los detalles metodológicos y las limitaciones de la EIS.

Justificación

Las partículas finas son el principal riesgo ambiental de mortalidad en México y en el mundo. El estudio de la carga de enfermedad (Global Burden of Disease, GBD) estima 59,477 muertes atribuibles a la contaminación del aire en 2021, constituyéndose como el primer factor de riesgo ambiental con el mayor valor de muertes. En el estado de Baja California Sur, para el mismo año, el GBD estima 103 muerte atribuibles a la contaminación del aire, colocando este factor de riesgo ambiental en el décimo lugar por su valor de mortalidad. El 94% de esta carga de mortalidad son atribuidas a la exposición por partículas finas ($PM_{2.5}$) (IHME, 2025).

De acuerdo con las funciones concentración respuesta que relacionan los valores de concentración de las $PM_{2.5}$ con sus efectos en la salud han mostrado que **no existe un umbral seguro para este contaminante**. La evidencia epidemiológica indica que la exposición a concentraciones relativamente bajas de estas partículas tiene efectos nocivos, particularmente en población vulnerable (adultos mayores con enfermedades crónica preexistentes, infancias, mujeres embarazadas, etc.)(Kelly & Fussell, 2015).

En la ciudad de La Paz, existe evidencia del deterioro de la calidad del aire, relacionado con la actividad vehicular, las fuentes de área y, significativamente, con las emisiones de las plantas de generación de energía que utilizan combustibles fósiles, operadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), ubicadas al noreste de la zona urbana (SEMARNAT, 2020). Las emisiones de $PM_{2.5}$ directas (primarias) – de la combustión incompleta de los combustibles fósiles, y las $PM_{2.5}$ que se forman en la atmósfera (secundarias) por las emisiones directas de SO_2 –provenientes de las emisiones de las plantas de generación de energía eléctrica, tienen una influencia en el incremento de estas partículas en la zona urbana de La Paz. Por lo tanto, el presente estudio tiene la finalidad de estimar el impacto en la mortalidad evitable por las concentraciones medidas de $PM_{2.5}$ en la estación de Junta Estatal de Caminos (JEC) que inicio operaciones a finales de 2024. Cabe destacar que es la primera estación de monitoreo operada por autoridades municipales.

Metodología de evaluación de los impactos en la salud (EIS)

La metodología de las EIS ([Evaluaciones de Impacto en la Salud](#)) se compone de una serie de etapas con las que es posible la cuantificación precisa y transparente de los beneficios en la salud en función de la reducción de las concentraciones de exposición de la población debido a una política o intervención, cuyos resultados son fundamentales para fundamentar decisiones de política pública (INE, 2012).

La EIS es una metodología derivada del enfoque de la evaluación de riesgos y se define como: “una combinación de procedimientos, métodos y herramientas por las cuales una política, programa o proyecto puede ser evaluado en función de sus potenciales efectos sobre la salud de la población y de la distribución de estos en dicha población” (OMS, 2014). Esta metodología se ha empleado extensivamente en distintos países para facilitar la toma de decisiones de las autoridades de medioambiente, de salud y de los ciudadanos (P. Medina et al., 2019; S. Medina et al., 2009).

La metodología EIS consta de cuatro etapas metodológicas, a saber:

1. La selección del contaminante que tiene efectos adversos en la salud de la población, así como la selección de los efectos en la salud que se evaluarán, basado en evidencia epidemiológica y toxicológica;
2. La selección de la función exposición-respuesta que relaciona cuantitativamente el cambio del contaminante del aire y con los cambios en los efectos en la salud seleccionados;
3. La evaluación del cambio de la exposición potencial de la población bajo un supuesto de reducción de concentraciones, que integra tanto los datos de población como las concentraciones del contaminante; y
4. La caracterización o cuantificación de los casos evitables por impacto identificado (INE, 2012). Adicionalmente, la quinta etapa evalúa monetariamente los casos evitados del

impacto identificado, aunque esta es opcional, pero importante en los análisis costo-beneficio.

Resultados

En este apartado se describen los resultados de cada etapa de la EIS.

Selección de los contaminantes y de los efectos en la salud

Las $PM_{2.5}$ también llamadas partículas finas o fracción respiratoria son aquellas partículas con un diámetro igual o menor a 2.5 micrometros (μm). Mientras más pequeñas son las partículas, pueden penetrar más profundamente en las vías respiratorias de los individuos, hasta llegar a los pulmones. Inclusive, la proporción de la superficie de contacto es mayor con respecto a su volumen, con lo que aumenta la probabilidad de que la partícula entre en contacto con el organismo, incrementando los riesgos de daño a tejidos y órganos (Rojas-Bracho & Garibay-Bravo, 2003)

Existe evidencia amplia y robusta sobre los impactos negativos en la salud a corto y largo plazo de las $PM_{2.5}$ en estudios epidemiológicos y toxicológicos en todo el mundo. Los efectos más documentados son la mortalidad y la hospitalización de pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), exacerbación de los síntomas y aumento de la necesidad de terapia en asmáticos, mortalidad y hospitalización de pacientes con enfermedades cardiovasculares, mortalidad y hospitalización de pacientes con diabetes mellitus, aumento del riesgo de infarto al miocardio, inflamación de los pulmones, inflamación sistémica, disfunción endotelial y vascular, desarrollo de aterosclerosis, aumento en la incidencia de infecciones y cáncer de pulmón (Pope III & Dockery, 2006).

Derivado del peso de la evidencia científica de los estudios epidemiológicos, el estudio de la carga global de enfermedad (GBD, por sus siglas en inglés) incluyó seis causas de mortalidad atribuida a las partículas suspendidas ($PM_{2.5}$) en población adulta (Brauer et al., 2024), que fueron las mismas causas de enfermedad estudiadas en el presente estudio, a saber:

1. Evento cerebrovascular (ECV),
2. Cáncer de tráquea, bronquios y pulmones (CP),
3. Diabetes mellitus tipo 2 (DT2)
4. Enfermedad isquémica del corazón (EIC),
5. Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), e
6. Infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (IARI).

En el Anexo técnico se presenta los códigos CIE-10 que se incluye el subconjunto de padecimientos considerados para cada causa de enfermedad de acuerdo con la metodología del Estudio de la Carga de Enfermedad de 2021 (GBD2021, 2024).

Comparativa de las tasas de enfermedades asociadas con la exposición de PM_{2.5} en los municipios de Baja California Sur (2020-2024)

En esta sección se presentan la evolución del perfil de las tasas morbilidad de los cinco municipios de Baja California Sur (Los Cabos, Comondú, Loreto, Mulege y La Paz) para las seis causas de mortalidad analizadas en este estudio: Evento cerebrovascular (ECV), Cáncer de tráquea, bronquios y pulmón (CP), Diabetes mellitus tipo 2 (DT2), Enfermedad isquémica del corazón (EIC), Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), e Infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (IARI).

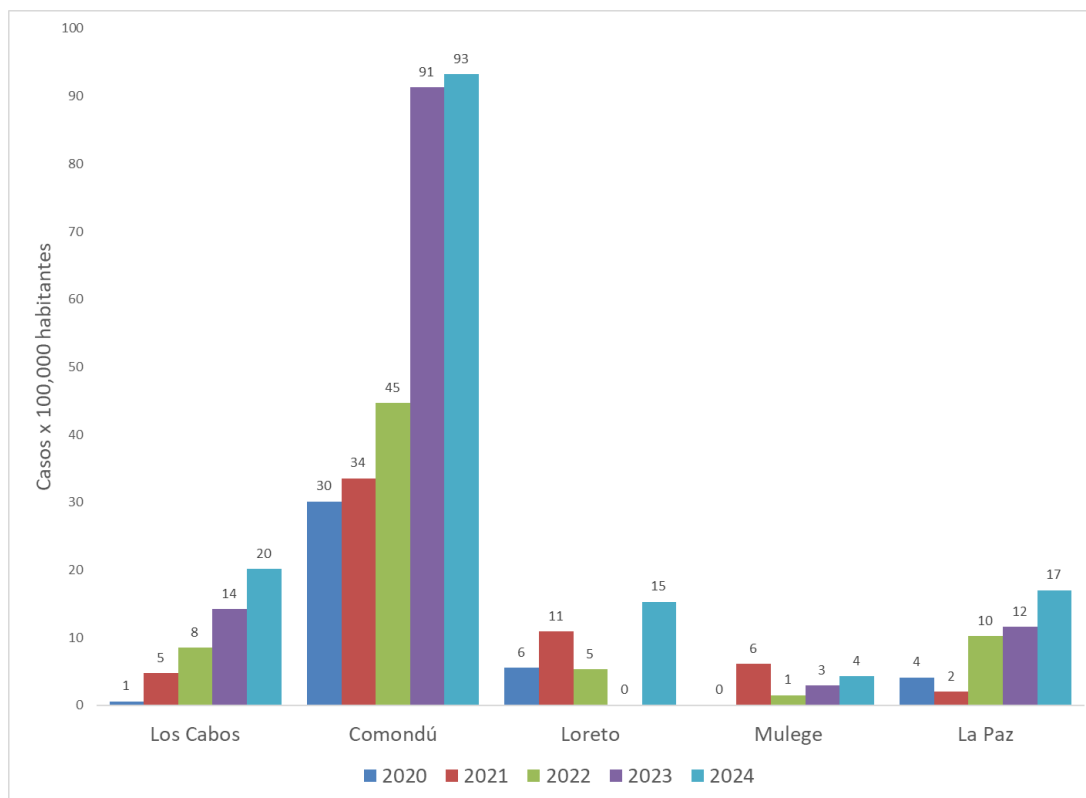
Las tasas de las causas de enfermedad mencionadas, de los cinco años considerados (2020-2024), fueron calculadas a partir de los casos anuales de enfermedad reportados para la población general de cada municipio por cada 100,000 mil habitantes. Los datos fueron proporcionados por la [Secretaría de Salud del Gobierno de Baja California](#), a través de la organización CERCA.

Cabe señalar que la población municipal utilizada para la estimación de las tasas para 2020 corresponde al valor publicado del Censo de Población y Vivienda de 2020 de INEGI, mientras que la población anual municipal a partir del 2021 fue estimada con tasas de crecimiento anual de las proyecciones para Baja California Sur publicada por la CONAPO.

Tasas municipales de eventos cerebrovasculares (ECV)

La tasa de Comondú presenta las tasas más altas y un incremento notable, pasando de 30 a 93 casos en el mismo periodo de estudio seguido por Los Cabos. En La Paz, la tasa de ECV aumentó de 4 casos por 100,000 habitantes en 2020 a 17 en 2024. El incremento sugiere un deterioro en la salud cardiovascular.

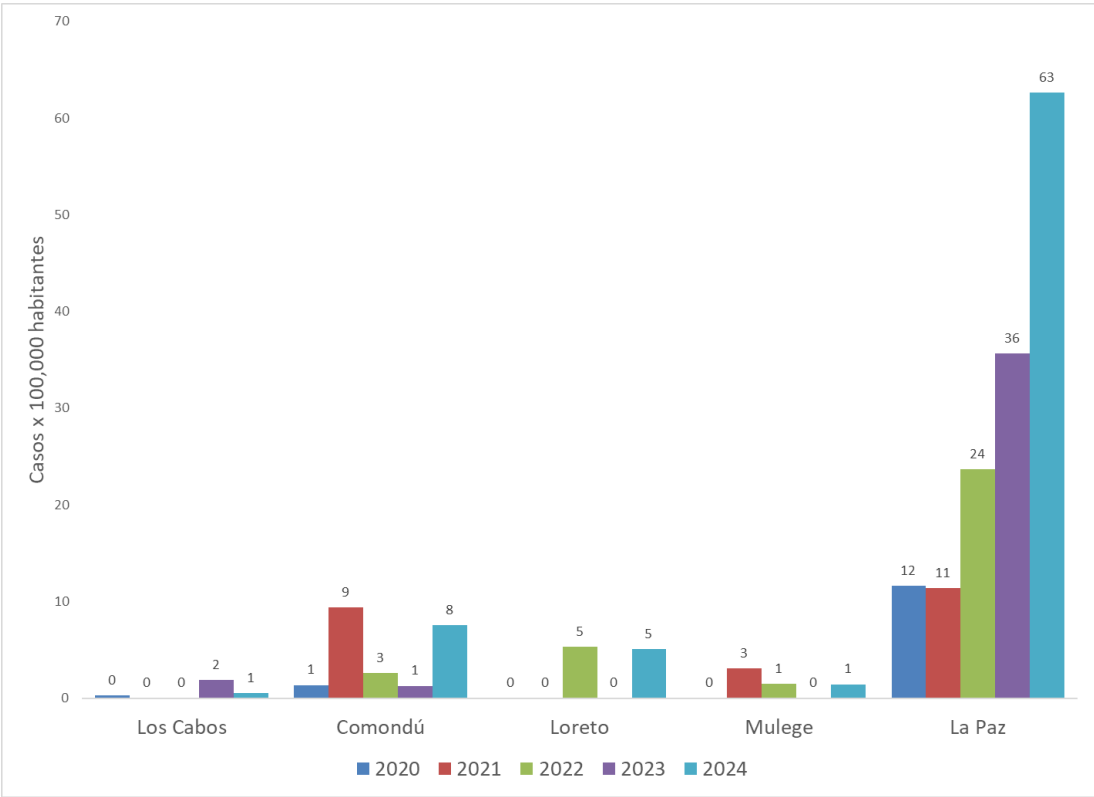
GRÁFICA 1. TASAS DE ENFERMEDAD MUNICIPAL DE EVENTOS CEREBROVASCULARES (ECV) PARA BAJA CALIFORNIA SUR (2020-2024)



Tasas de cáncer de tráquea, bronquios y pulmón (CP)

La Paz destaca como el municipio con mayor carga de cáncer de tráquea, bronquios y pulmón, lo que puede estar relacionado con la mayor exposición urbana a $PM_{2.5}$. Asimismo, muestra un aumento significativo, de 12 casos en 2020 a 63 en 2024. Los demás municipios presentan tasas mucho menores y menos crecimiento. Es importante comentar que estos resultados deben interpretarse con reserva porque en la ciudad de la Paz se ubica el Centro Estatal Oncológico "Dr. Rubén Cardoza Macías" en dónde se atienden la mayoría de los casos de cáncer del Estado, por tanto, en dato podría estar sesgado.

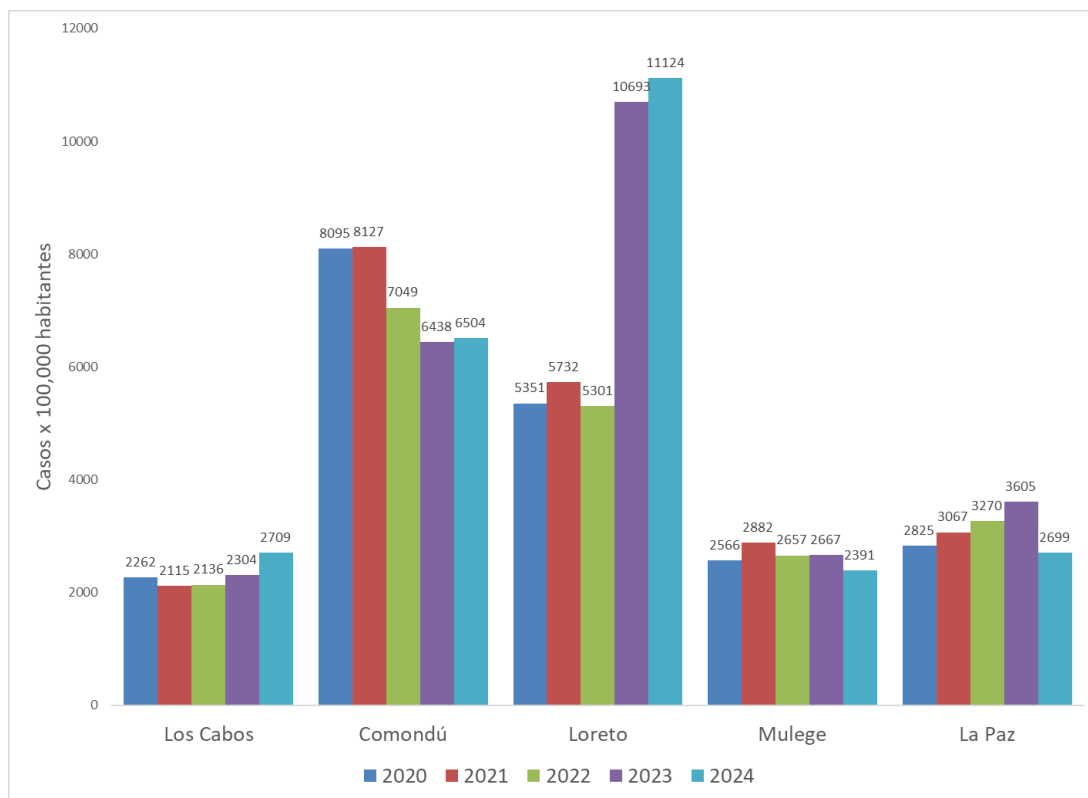
GRÁFICA 2. TASAS DE ENFERMEDAD MUNICIPAL DE CÁNCER DE TRÁQUEA, BRONQUIOS Y PULMONES PARA BAJA CALIFORNIA SUR (2020-2024)



Tasas de diabetes mellitus tipo 2 (DM2)

Las tasas son elevadas en todos los municipios, Loreto y La Paz muestran incrementos importantes en 2023 y 2024. La Paz pasó de 2,825 casos en 2020 a 2,698 en 2024, con un pico en 2023. La diabetes mellitus tipo 2 es una de las enfermedades crónicas más prevalentes y su evolución puede estar influida por factores ambientales y estilos de vida.

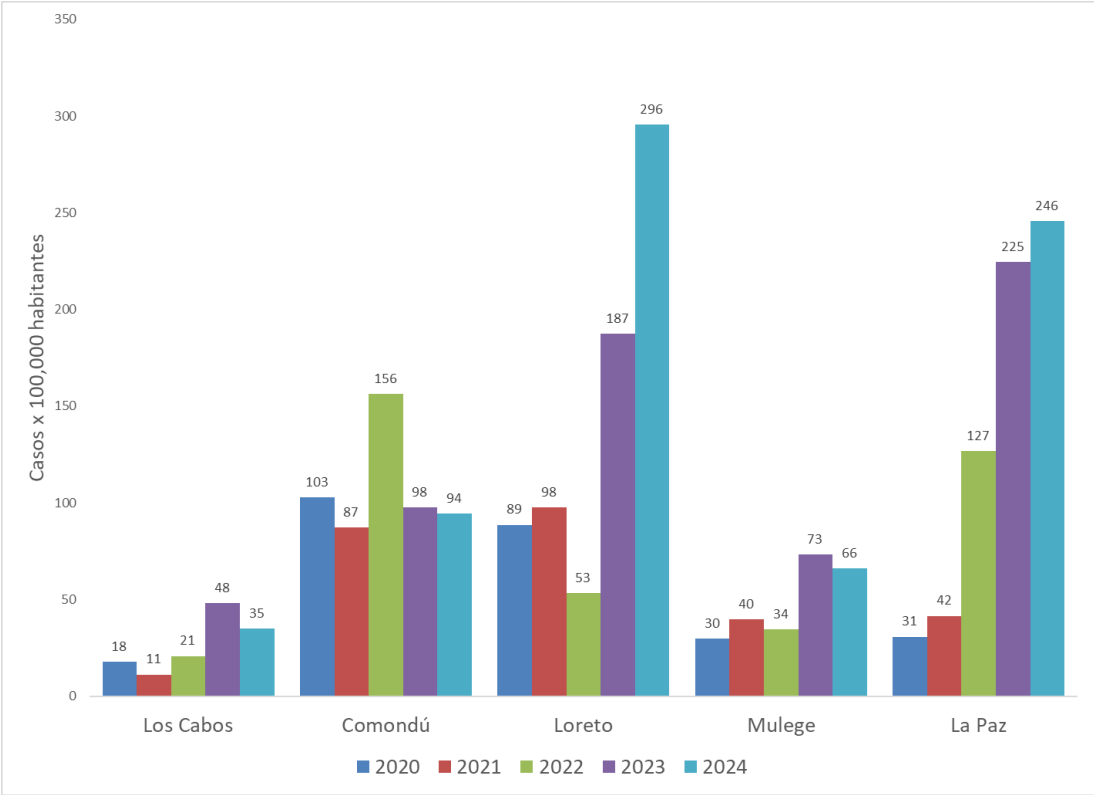
GRÁFICA 3. TASAS DE ENFERMEDAD MUNICIPAL DE DIABETES MELLITUS TIPO 2 PARA BAJA CALIFORNIA SUR (2020-2024)



Tasas de enfermedades isquémicas del corazón (EIC)

La Paz muestra un aumento de 31 casos en 2020 a 246 en 2024. Loreto también presenta un crecimiento marcado, mientras que Comondú mantiene tasas altas y estables. El incremento en La Paz es especialmente relevante y puede estar vinculado a la exposición a contaminantes atmosféricos y estilos de vida.

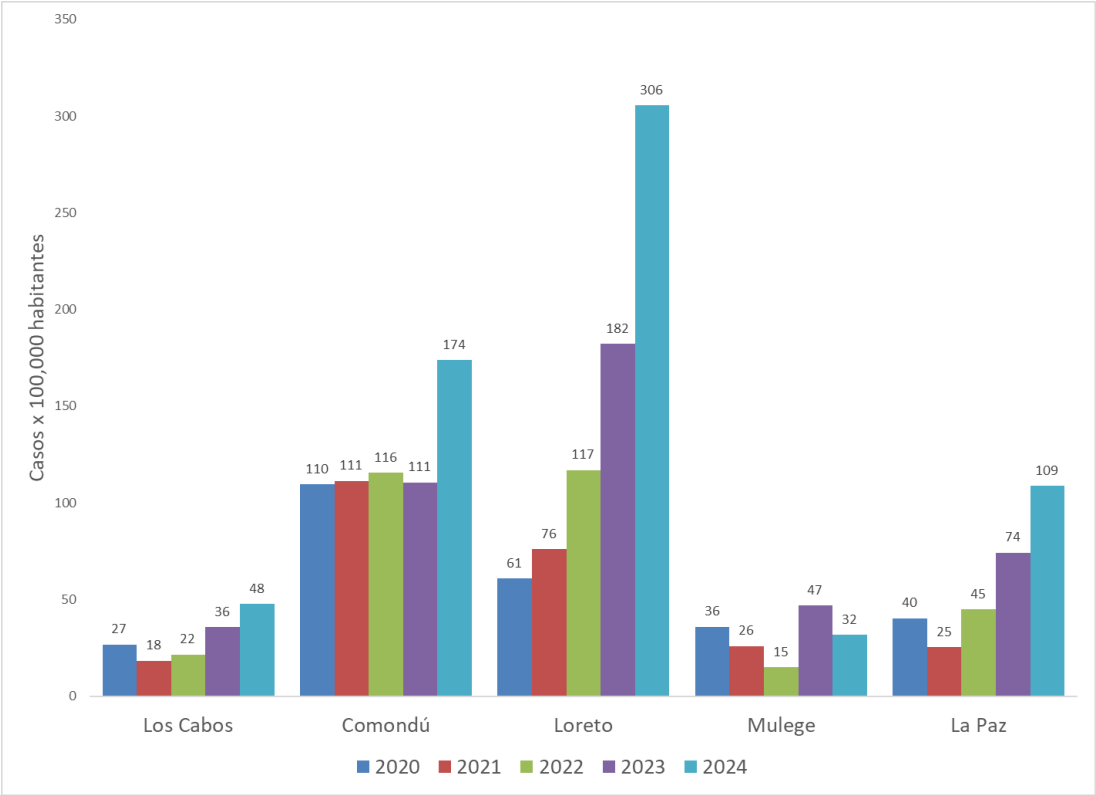
GRÁFICA 4. TASAS DE ENFERMEDAD MUNICIPAL DE ENFERMEDADES ISQUÉMICA DEL CORAZÓN PARA BAJA CALIFORNIA SUR (2020-2024)



Tasas de enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC)

Loreto muestra un crecimiento muy marcado en los últimos años pasando de 61 casos en 2020 a 306 en 2024 por cada 10,000 habitantes. La Paz, por su parte, pasó de 40 casos en 2020 a 109 en 2024. El aumento de EPOC está asociado a la exposición prolongada a partículas finas y otros contaminantes.

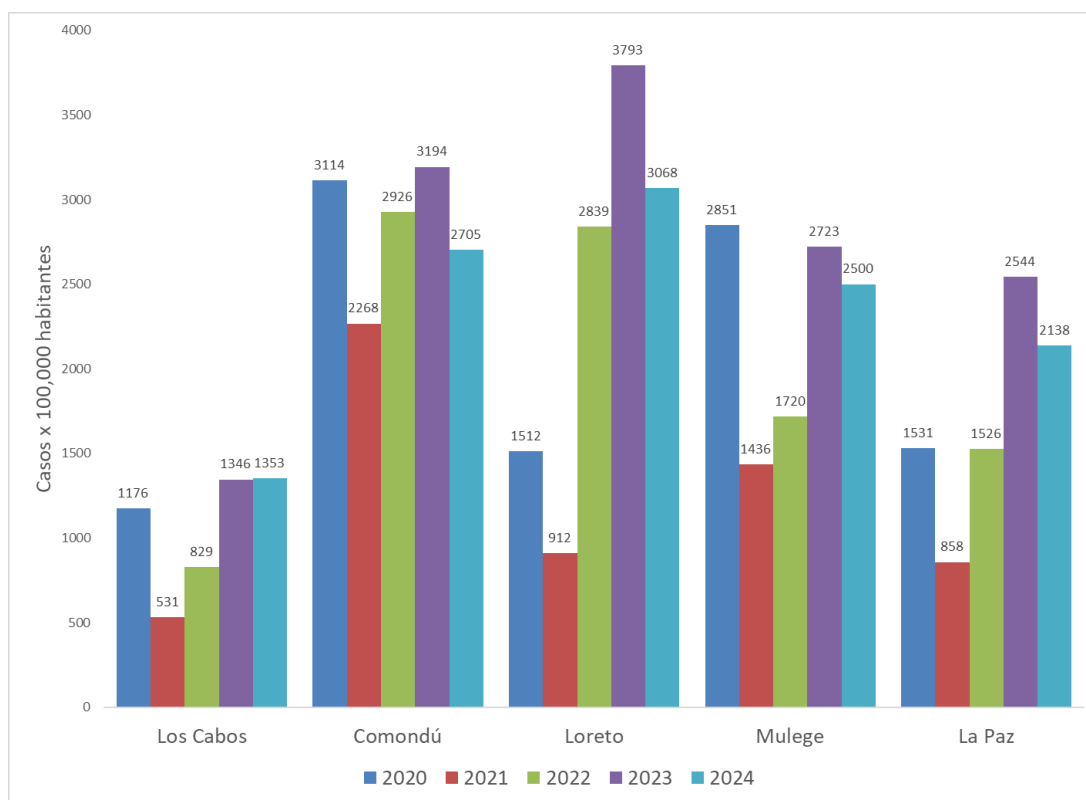
GRÁFICA 5. TASAS DE ENFERMEDAD MUNICIPAL DE ENFERMEDADES PULMONARES OBSTRUCTIVAS CRÓNICAS PARA BAJA CALIFORNIA SUR (2020-2024)



Tasas de infecciones respiratorias inferiores agudas

Los Cabos y Comondú presentan tasas más altas, pero con variaciones menos pronunciadas. En contraste con La Paz que muestra una tendencia al alza, de 1,531 casos en 2020 a 2,138 en 2024. Las infecciones respiratorias agudas son sensibles a la calidad del aire y afectan especialmente a la población vulnerable.

GRÁFICA 6. TASAS DE ENFERMEDAD MUNICIPAL DE INFECCIONES RESPIRATORIAS INFERIORES AGUDAS PARA BAJA CALIFORNIA SUR (2020-2024)



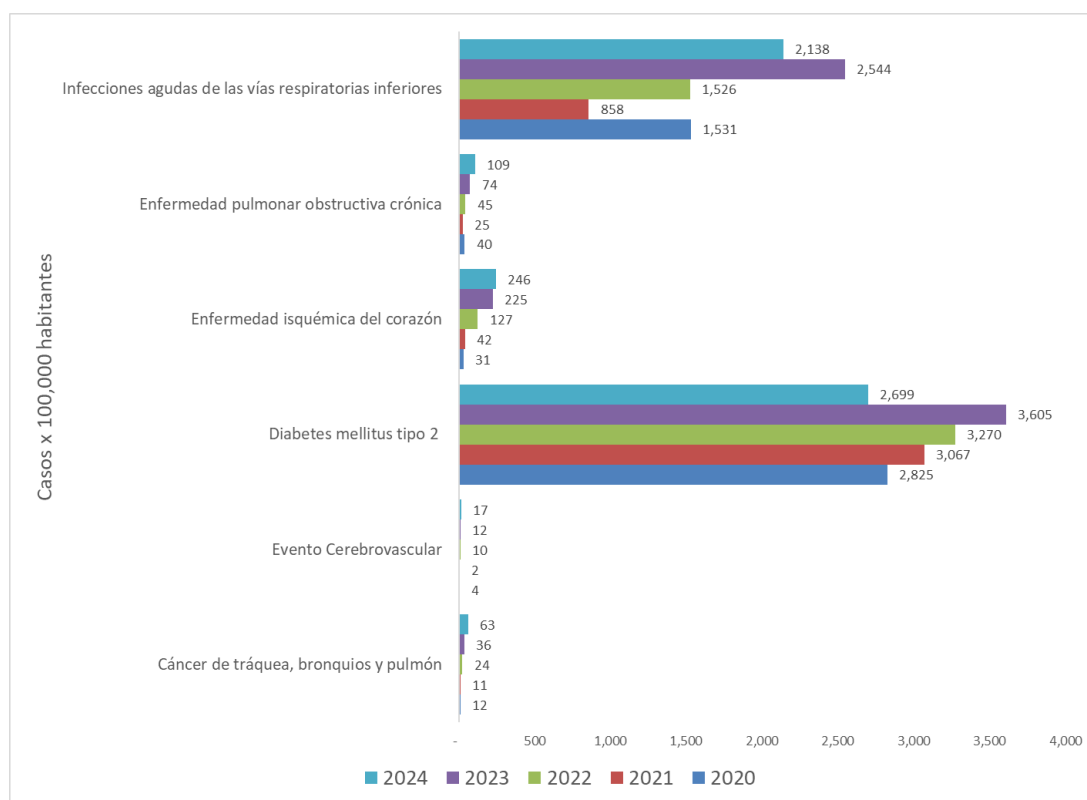
En resumen, La Paz destaca por el incremento sostenido en la mayoría de las enfermedades analizadas, especialmente cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares y EPOC. Comondú presenta tasas muy altas de evento cerebrovascular y enfermedades cardíacas, mientras que Loreto muestra aumentos importantes en diabetes y EPOC en los últimos años. La tendencia general en los municipios indica que la carga de enfermedad asociada a la exposición de $PM_{2.5}$ y otros contaminantes está aumentando, lo que refuerza la importancia de mejorar la calidad del aire para proteger la salud pública.

Finalmente se presentan a continuación la comparación de las tasas de enfermedad de los padecimientos estudiados para el municipio de La Paz. Los casos de enfermedad por diabetes mellitus tipo 2 y por las infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores son la más prevalentes.

Por otra parte, como se mencionó, La Paz destaca por la carga de morbilidad de cáncer de tráquea, bronquios y pulmón que muestra un incremento muy significativo, respecto al resto de municipios. Este aumento sugiere una mayor carga de enfermedad posiblemente relacionada con la exposición urbana a contaminantes atmosféricos. No obstante, estos resultados deben tomarse con sigilo porque en la ciudad de la Paz se ubica el Centro Estatal Oncológico "Dr. Rubén Cardoza Macías" en donde se atienden la mayoría de los casos de cáncer en el Estado, por tanto, en dato podría estar sesgado.

En cuanto a los eventos cerebrovasculares, llama la atención que la tasa aumenta de 4 casos en 2020 a 17 en 2024, lo que indica un deterioro en la salud cardiovascular de la población. Asimismo, las enfermedades isquémicas del corazón muestran un crecimiento muy marcado, de 31 casos en 2020 a 246 en 2024, lo que refuerza la preocupación por los efectos de la contaminación en la salud cardiovascular. Las tasas de enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) pasa de 40 casos en 2020 a 109 en 2024, lo que podría estar relacionado con la exposición a partículas finas y otros contaminantes. Las Infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores aumenta de 1,531 casos en 2020 a 2,138 en 2024, mostrando una tendencia al alza y afectando especialmente a la población vulnerable.

GRÁFICA 7. TASAS DE ENFERMEDAD DE LA PAZ DE LOS SEIS PADECIMIENTOS ESTUDIADOS EN EL PERIODO (2020-2024)



El análisis de morbilidad en La Paz demuestra que las causas de mortalidad estudiadas tienen una expresión previa en la carga de enfermedad registrada en este municipio. La presencia de estos casos confirma que la morbilidad es un indicador temprano de los desenlaces fatales que fueron estimados en este estudio.

La documentación de casos de morbilidad en La Paz no solo refleja la situación sanitaria local, sino que constituye evidencia de la prevalencia de enfermedades en Baja California Sur. Este análisis es indispensable para comprender la relación entre morbilidad y mortalidad, y para diseñar estrategias de prevención y control que respondan a las necesidades específicas de cada municipio.

Análisis estadístico de los datos de calidad del aire de PM₁₀, PM_{2.5}, Ozono y SO₂ en la Paz, BCS para los 12 meses analizados (2024-2025)

En este apartado se presenta el análisis de los datos horarios para las partículas suspendidas con diámetros menores o iguales a 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀, PM_{2.5}), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂). Aunque en este estudio se evaluaron los efectos en la mortalidad evitable específicamente para las PM_{2.5}, se consideró importante analizar los datos de PM₁₀, porque las PM_{2.5} forman parte de las PM₁₀, asimismo el ozono es uno de los contaminantes más prevalentes en ciudades mexicanas y también tienen efectos agudos y crónicos en la salud, aunque sus efectos en la mortalidad evitable son generalmente un orden de magnitud menor que los reportados para las PM_{2.5}. Finalmente se analizaron los datos de dióxido de azufre (SO₂), por las altas emisiones de las plantas generadoras de energía en La Paz, y por su relación con la formación de partículas secundarias.

Las mediciones fueron registradas en la estación Junta Estatal de Caminos (JEC), localizada en la zona urbana de la ciudad de La Paz y el periodo de análisis corresponde a los datos medidos en del 1 de noviembre de 2024 a 31 octubre de 2025. La estación JEC inició operaciones a finales de 2024, y es la primera estación fija de calidad del aire que es operada por personal del municipio de La Paz, que reporta datos horarios de los contaminantes criterio y que envió datos al Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, [SINAICA](#), del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Los datos de los contaminantes seleccionados fueron solicitados al INECC a través de la organización CERCA. Previo a su análisis se llevó a cabo un proceso de limpieza y verificación de datos, basado en el Protocolo de Manejo de Datos de la Calidad del aire que lleva a cabo el (INECC, 2025) para la elaboración de los indicadores de calidad de aire que forman parte de sus informes anuales. En el anexo técnico se presentan los detalles de procedimiento llevado a cabo para los datos de la estación JEC.

Partículas suspendidas (PM₁₀ y PM_{2.5})

Las partículas suspendidas tuvieron suficientes mediciones durante los días y los meses para asegurar su representatividad estadística en el año estudiado. Las PM₁₀ tuvieron un promedio de 84.1% y las PM_{2.5} un promedio de 83.6%, de los 12 meses analizados. A continuación, se muestra tanto los datos diarios (promedios horarios) que cumplieron con el criterio de tener al menos 75% de datos válidos en el día, como los porcentajes de datos en los trimestres del año analizado.

CUADRO 1. PORCENTAJE DE DATOS VÁLIDOS DE PM_{10} Y $PM_{2.5}$ DE CADA MES EN EL PERIODO DE ESTUDIO (NOV-2024 A OCT-2025)

Mes y año	Porcentaje de datos (%)	
	PM_{10}	$PM_{2.5}$
nov-24	93.3	93.3
dic-24	100.0	100.0
ene-25	80.6	80.6
feb-25	100.0	100.0
mar-25	51.6	51.6
abr-25	90.0	90.0
may-25	87.1	87.1
jun-25	53.3	53.3
jul-25	100.0	100.0
ago-25	87.1	90.3
sep-25	86.7	76.7
oct-25	80.6	80.6

CUADRO 2. PORCENTAJE DE DATOS VÁLIDOS DE PM_{10} Y $PM_{2.5}$ TRIMESTRAL EN EL PERIODO DE ESTUDIO (NOV-2024 A OCT-2025)

Trimestres del año	Porcentaje de datos (%)	
	PM_{10}	$PM_{2.5}$
oct-dic¹	91.3	91.3
ene-mar	76.7	76.7
abr-jun	76.9	76.9
jul-sep	91.3	89.1
Total	84.1	83.6

Los porcentajes de datos válidos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la estación JEC en su mayoría presentan valores mensuales y trimestrales por arriba del 75% de datos, excepto marzo y junio de 2025. Sin embargo, los promedios anuales se encuentran por arriba de este valor.

De lo anterior se puede afirmar que los valores de los promedios anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la estación JEC son estadísticamente representativos del periodo de tiempo analizado, con el que se aproximó un año con los datos disponibles.

¹ El trimestre de octubre diciembre se considera con la información de los meses de noviembre diciembre de 2024 y octubre de 2025.

Estadística básica de las concentraciones horarias de PM_{10} y $PM_{2.5}$

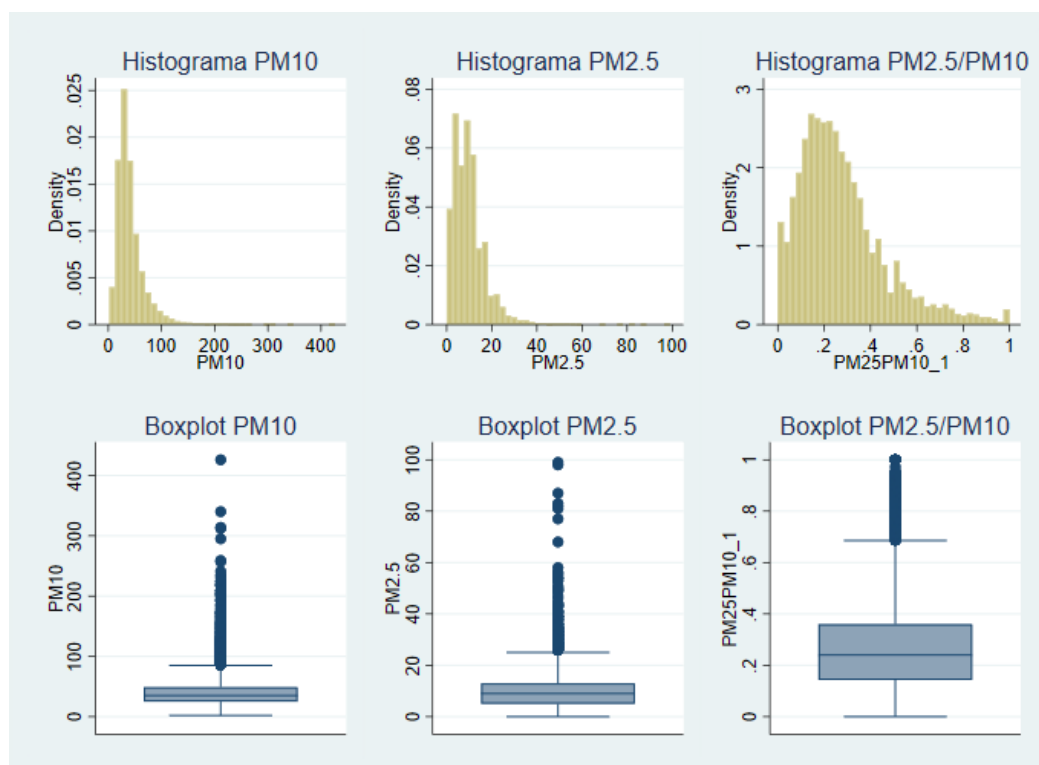
El Cuadro 3 presenta los valores de los estadísticos descriptivos básicos (media, mediana, desviación estándar máximo y mínimo) de los datos horarios de las $PM_{2.5}$ y PM_{10} , así como el valor de la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$ del periodo de estudio.

CUADRO 3. ESTADÍSTICA BÁSICA DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS DE PM_{10} , $PM_{2.5}$ Y LA FRACCIÓN DE $PM_{2.5}/PM_{10}$ REPORTADA EN LA ESTACIÓN JEC DURANTE EL PERIODO ESTUDIADO

Estadísticos	PM_{10}	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}/PM_{10}$
Media	40	10	0.28
Mediana	35	9	0.24
Desviación estándar	27	8	0.19
Mínimo	2	0	0
Máximo	426	99	1

Asimismo, la Figura 2 los histogramas de densidad de los datos horarios para estas mismas variables.

FIGURA 2. HISTOGRAMAS Y GRÁFICOS DE CAJA BÁSICA DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS DE PM_{10} , $PM_{2.5}$ Y LA FRACCIÓN DE $PM_{2.5}/PM_{10}$ REPORTADA EN LA ESTACIÓN JEC DURANTE EL PERIODO ESTUDIADO



Los estadísticos descriptivos muestran que las PM_{10} presenta los valores más altos y la mayor variabilidad entre las tres métricas analizadas. Su media ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y mediana ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) indican una distribución ligeramente sesgada hacia valores elevados, lo cual coincide con el histograma, donde se observa una clara asimetría positiva y la presencia de episodios extremos. El gráfico de caja refuerza esta interpretación al mostrar múltiples valores atípicos, algunos muy alejados del resto, lo que sugiere eventos puntuales de alta concentración.

En el caso de $PM_{2.5}$, los valores son más bajos y menos dispersos. La media ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la mediana ($9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) están muy próximas, lo que indica una distribución más concentrada y simétrica en comparación con PM_{10} . El histograma confirma esta menor variabilidad, con la mayoría de los valores agrupados en rangos bajos. El gráfico de caja muestra algunos valores extremos (outliers), pero en menor magnitud, lo que sugiere que los episodios extremos de $PM_{2.5}$ son menos frecuentes e intensos.

La razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ presenta una media de 0.28 y una mediana de 0.24, lo que indica que, en promedio, las $PM_{2.5}$ representa alrededor de una cuarta parte del PM_{10} . El gráfico de caja confirma esta tendencia, mostrando una dispersión moderada y algunos valores atípicos que alcanzan o superan la unidad, lo cual ocurre cuando $PM_{2.5}$ se aproxima o iguala a PM_{10} en episodios específicos.

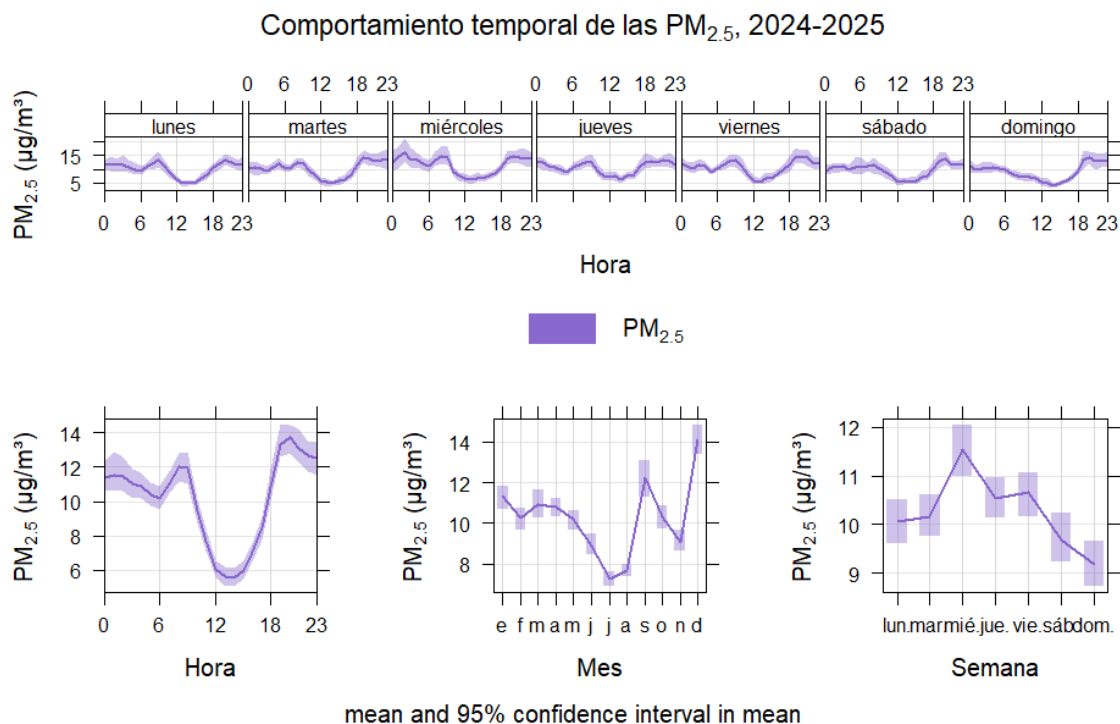
En resumen:

1. Las PM_{10} es la variable más inestable, con alta dispersión y presencia de episodios extremos.
2. Las $PM_{2.5}$ es más estable y menos variable, aunque también presenta algunos picos.
3. La razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ se mantiene baja, lo que indica que la fracción fina del material particulado suele ser menor, pero puede aumentar en condiciones particulares.

Comportamiento temporal de las PM_{10} y $PM_{2.5}$

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento temporal de las PM_{10} , $PM_{2.5}$ y la comparación entre ambas mediciones horarias en el periodo de estudio de la estación JEC.

GRÁFICA 8. COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LAS $PM_{2.5}$ EN EL PERIODO DE ESTUDIO (NOV-2024 A OCTU-2025).

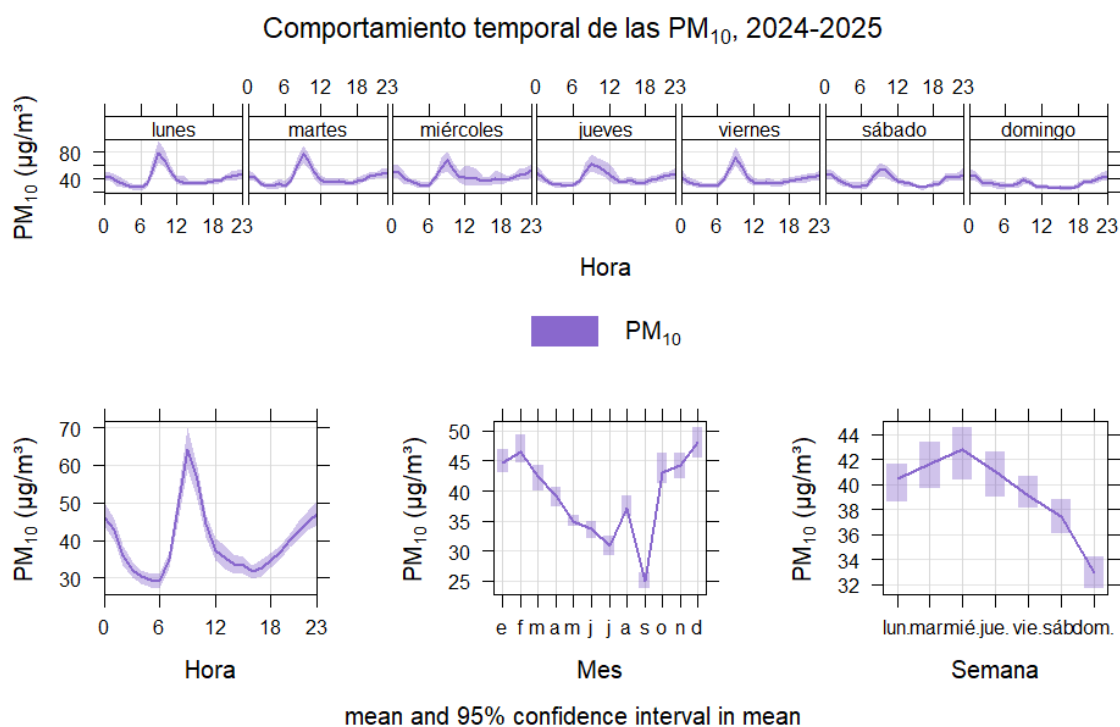


LA

Gráfica 8 muestra el comportamiento horario para los días de la semana, el comportamiento horario, mensual y semanal de las $PM_{2.5}$. En promedio durante los días de la semana se observa un comportamiento con dos picos durante el día. El primer pico se observa entre 8:00 y 9:00 de la mañana y el segundo pico a partir de las 19:00 a 20:00 h.

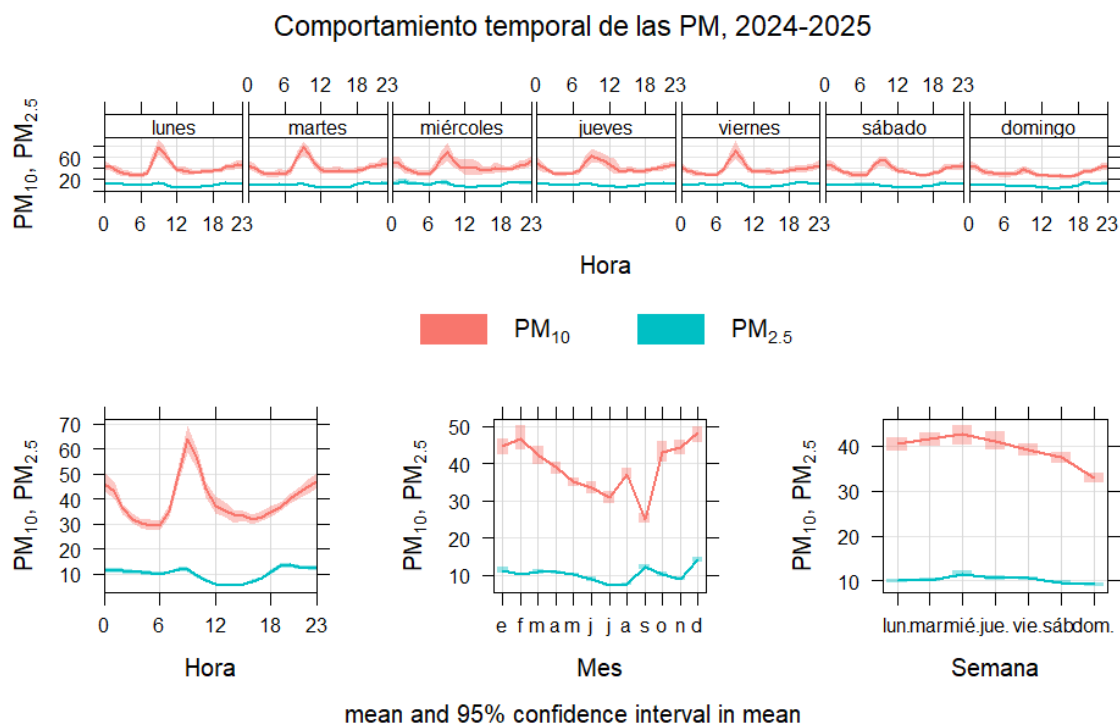
En general, el miércoles presenta los valores más altos de la semana y la mayor variabilidad en las primeras horas de la mañana, en contraste con el domingo que presentan los valores más bajos. Las concentraciones son más bajas en la época de lluvias (julio y agosto) y más altas en los meses de septiembre y diciembre.

GRÁFICA 9. COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LAS PM₁₀ EN EL PERIODO DE ESTUDIO (NOV-2024 A OCTU-2025).



La Gráfica 9 muestra el comportamiento horario para los días de la semana, el comportamiento horario, mensual y semanal de las PM₁₀. A diferencia de las PM_{2.5}, en la mayoría de los días de la semana se observa solamente un pico a las 9 h. Al igual que las PM_{2.5}, en época de lluvias decae las concentraciones y es más alta en secas, en donde se observa un pico en agosto y de octubre a enero se mantienen altas. Los valores más altos se registraron el miércoles y los más bajos en domingo, al igual que para las PM_{2.5}.

GRÁFICA 10. COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LAS PM_{10} Y $PM_{2.5}$ EN EL PERIODO DE ESTUDIO (NOV-2024 A OCTU-2025).



La Gráfica 10, por su parte, muestra las tendencias temporales como en los dos casos anteriores, pero de ambos contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$, en este caso destaca la relación de $PM_{2.5}/PM_{10}$, cuyo valor promedio fue de aproximadamente 0.27, es decir, las $PM_{2.5}$ son un tercio de las PM_{10} .

Comparación con los límites de las normas mexicanas y las directrices de la OMS

El Cuadro 4 presentan los valores de los indicadores de PM₁₀ y PM_{2.5} utilizados para comparar con los límites normados mexicanos y las directrices de la Organización Mundial de la Salud.

CUADRO 4. COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES DE LAS NORMAS MEXICANAS Y LAS DIRECTRICES DE LA OMS PARA PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Junta Estatal de Caminos	PM ₁₀			PM _{2.5}		
	Límite de 24 horas 60 µg/m³ Percentil 99	Límite anual 28 µg/m³ promedio anual	Cumple NOM-025-SSA1-2021	Límite de 24 horas 33 µg/m³ Percentil 99	Límite anual 10 µg/m³ promedio anual	Cumple NOM-025-SSA1-2021
	80	40	No	21	10	Sí
	Directrices de la OMS 45 µg/m³ Prom 24h	Directrices de la OMS 15 µg/m³ Prom anual		Directrices de la OMS 15 µg/m³ Prom 24h	Directrices de la OMS 5 µg/m³ Prom anual	
	80	40	No	21	10	No

De acuerdo con los resultados de esta comparación, las PM₁₀ rebasaron los los límites de 24 hora y anual de la norma mexicana vigente, NOM-025-SSA1-2021, así mismo los valores de los indicadores para este contaminante rebasó 1.8 veces, y 2.6 veces los valores límite de las directrices de la OMS de exposición aguda y crónica, respectivamente. En resumen, los valores de PM₁₀ registrados en el periodo de estudio están por arriba de los valores límite de las directrices de la OMS. Asimismo, se encontró que 18 días superaron el límite de la exposición aguda de (60 µg/m³).

Respecto a las PM_{2.5}, el indicador de exposición aguda (límite de 24 h) de las normas mexicanas resultó por debajo del límite, mientras que el indicador anual se encuentra junto en el límite de la exposición crónica (límite anual). No obstante, los valores superaron las recomendaciones de la OMS para los dos tipos de exposición.

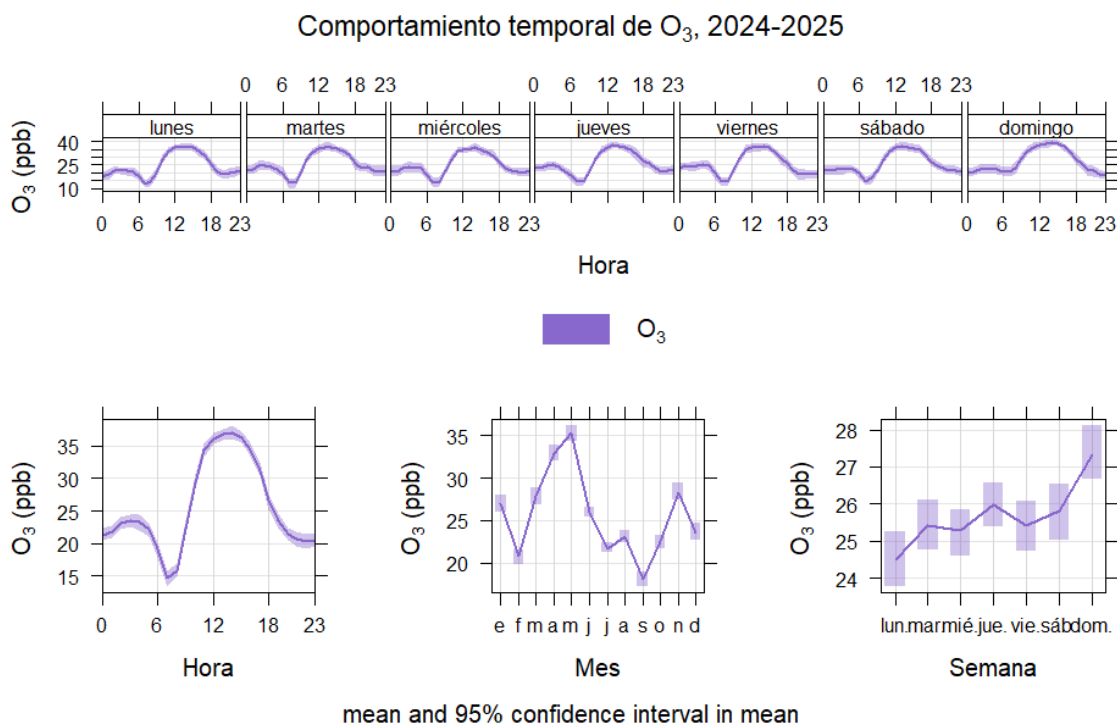
Ozono (O₃)

Al igual que en el caso de las PM, los datos horarios de ozono superaron el valor mínimo de 75% de datos, para considerarse como representativos de los 12 meses analizado, con 88.3% de datos, después de la limpieza y verificación de los datos.

Comportamiento temporal del ozono

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento temporal de ozono(O_3) de las mediciones horarias en el periodo de estudio de la estación JEC.

GRÁFICA 11. COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE DEL OZONO EN EL PERIODO DE ESTUDIO (NOV-2024 A OCTU-2025).



La Gráfica 11 muestra el comportamiento horario para los días de la semana, el comportamiento horario, mensual y semanal del ozono. En promedio durante los días de la semana se observa un comportamiento típico del ozono en zonas urbanas. El valor máximo se observa entre las 12:00 y 13:00 del día.

En general, el domingo presenta los valores más altos de la semana, en contraste con el lunes que presentan los valores promedio más bajos. Las concentraciones son más bajas en la época de lluvias (agosto, septiembre y octubre) y más altas en los meses de la época de estiaje (abril y mayo).

Comparación con los límites de las NOM para O₃

El Cuadro 5. Comparación con los límites de las normas mexicanas y las directrices de la OMS para ozono presenta los valores de los indicadores de ozono utilizados para comparar con los límites normados mexicanos y las directrices de la Organización Mundial de la Salud.

CUADRO 5. COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES DE LAS NORMAS MEXICANAS Y LAS DIRECTRICES DE LA OMS PARA OZONO

Junta Estatal de Caminos	Ozono		
	Límite de 1 hora 0.090 ppm Máximo	Límite de 8 horas 0.060 ppm Máximo	Cumple NOM-020-SSA1-2021
	0.069	0.061	No
		Directrices de la OMS 0.051 ppm límite de 8 h	
		0.061	No

Los resultados de esta comparación indican que el valor del indicador de 1 hora (exposición aguda) se encuentra por debajo del límite, mientras que el valor del indicador de 8 horas (exposición crónica) supero ligeramente el límite de la norma correspondiente (NOM-020-SSA1-2021). No obstante, de acuerdo con lo establecido de la norma, si uno de los indicadores se encuentra por arriba de los valores límite, se considera que el ozono no cumple con la Norma Oficial Mexicana (NOM). Asimismo, el indicador supera 1.2 veces el valor límite de las directrices de la OMS.

En resumen, los valores registrados durante el periodo analizado no cumplen con la normatividad mexicana ni con las directrices de la OMS. Por lo tanto, existe un problema de calidad del aire con el ozono en La Paz, y el riesgo de existan efectos en la salud en la población más susceptible es altamente probable.

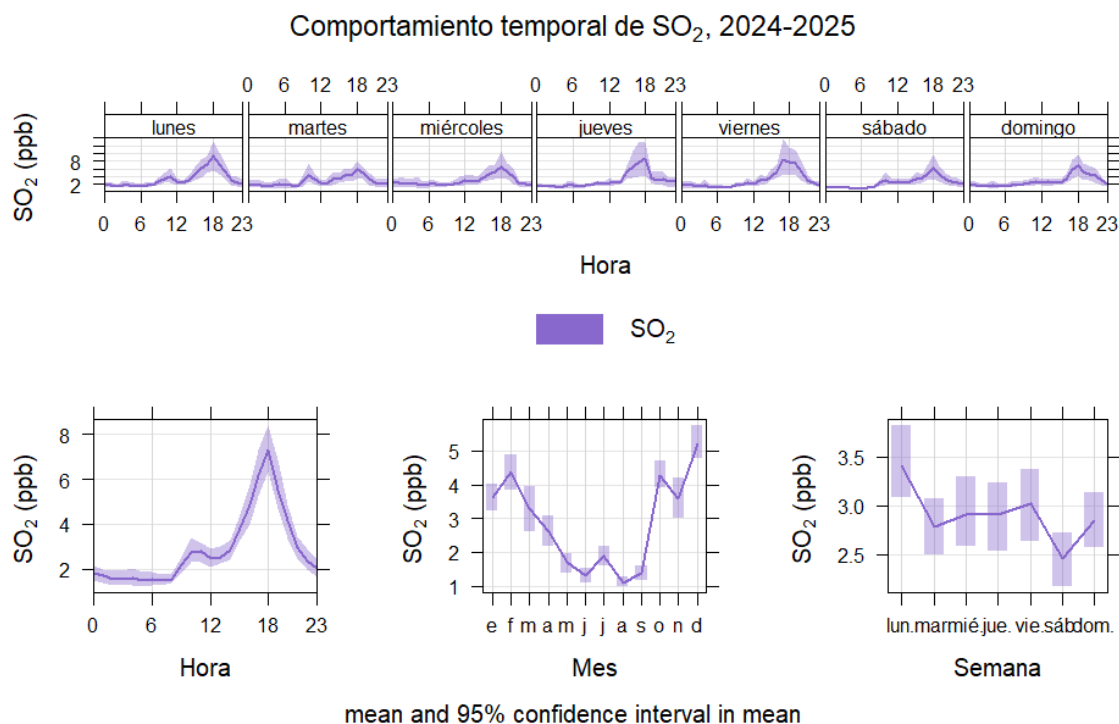
Dióxido de azufre (SO₂)

Los datos horarios de SO₂, al igual que los casos anteriores, superaron el porcentaje de datos válidos del 75%, con 84.9% de datos válidos por lo tanto se consideraron representativos de los 12 meses analizados.

Comportamiento temporal del dióxido de azufre

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento temporal del dióxido de azufre (SO₂) de las mediciones horarias en el periodo de estudio de la estación JEC.

GRÁFICA 12. COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE DEL DIÓXIDO DE AZUFRE EN EL PERIODO DE ESTUDIO (NOV-2024 A OCTU-2025).



En contraste con los otros contaminantes analizados, el SO₂ muestra un comportamiento temporal diferente. El comportamiento diario presenta un pico significativo a las 18:00, esto se observa consistentemente en los días de la semana. Los valores más altos suelen presentarse los lunes, y los más bajos en sábado. Los valores más altos del año se presentan entre los meses de octubre a febrero, en época de estiaje y temperaturas relativamente bajas.

Comparación con los límites de las NOM para SO₂

El Cuadro 6 presenta los valores de los indicadores de SO₂ utilizados para comparar con los límites normados mexicanos y las directrices de la Organización Mundial de la Salud

CUADRO 6. COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES DE LAS NORMAS MEXICANAS Y LAS DIRECTRICES DE LA OMS PARA DIÓXIDO DE AZUFRE

Junta Estatal de Caminos	SO2		
	Límite de 1 horas 0.075 ppm Percentil 99	Límite 24 horas 0.04 ppm Máximo de los promedios de 24 horas	Cumple NOM-022-SSA1-2019
	0.075	0.013	Sí
		Directrices de la OMS 0.015 ppm Prom 24h	
		0.013	Sí

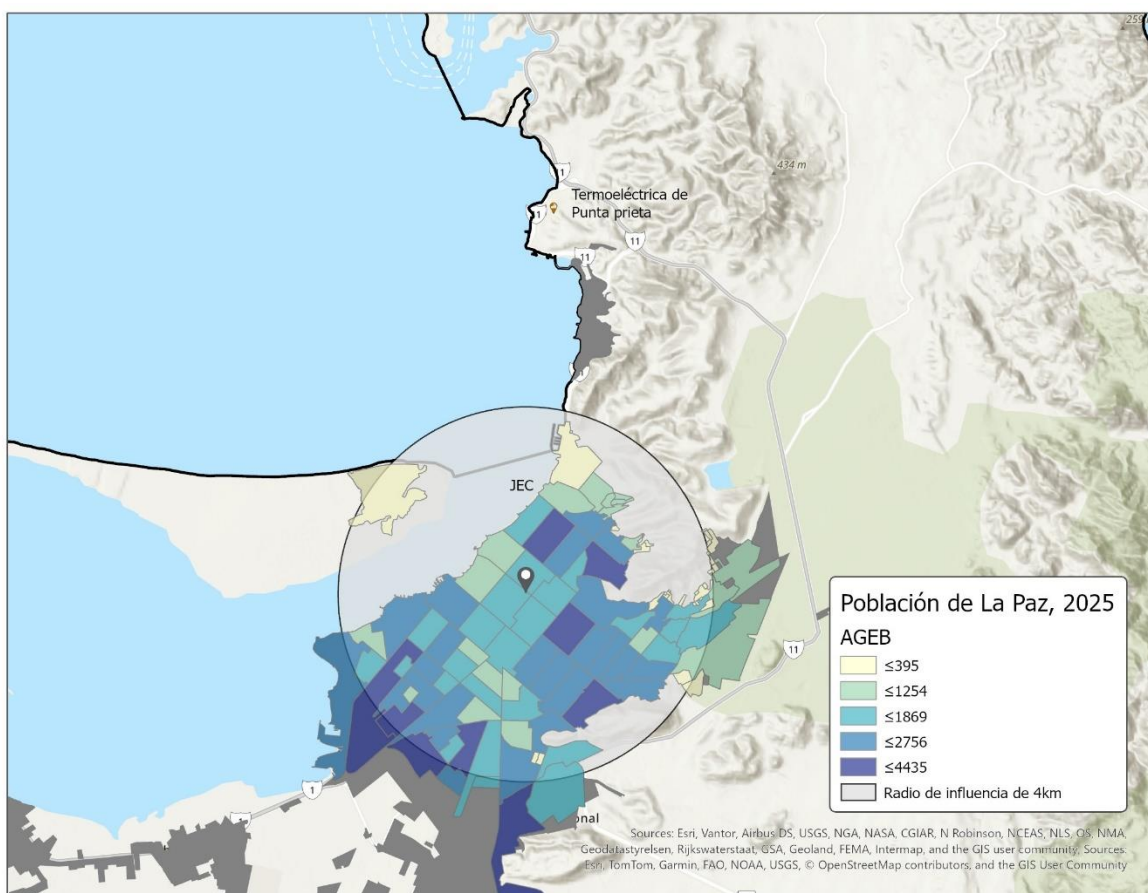
A partir de esta comparación se observa que los valores de los indicadores de SO₂ no superan ninguno de los límites considerados tanto en las normas mexicanas como las directrices de la OMS. Es decir, las concentraciones de SO₂ no representan un problema de calidad del aire en La Paz, y no se espera que existan efectos en la salud de la población por este contaminante. Sin embargo, se encontraron 3 días en el periodo analizado con valores por arriba del límite de una hora especificado en la NOM-022-SSA1-2019.

Es importante comentar que la evaluación del cumplimiento de NOM se debe de realizar con 3 años de datos, en este caso dado que, sólo se realizó con los datos de 12 meses, por lo tanto, no representa cabalmente el cumplimiento de la norma mexicana.

Evaluación de la exposición de las $PM_{2.5}$ en la zona urbana de La Paz, BCS

La evaluación de la exposición de las $PM_{2.5}$ se estimó con los valores de la concentración promedio anual, a partir de los promedios de 24 h en el periodo estudiados, de la estación JEC y la población de La Paz a nivel por AGEB (Área Geoestadística Básica). Esta concentración se asignó a un radio de 4 km de radio de influencia, de acuerdo con los objetivos del monitoreo de establecer la exposición ambiental de la población y la escala espacial vecinal, dado que el uso de suelo es relativamente uniforme (US EPA, 2013). La Figura 3 presenta ese radio de influencia en el que se asignó la exposición crónica a cada AGEB urbano y se le asoció la población total y la población mayor de 25 años para 2025. La población de 2025 se estimó con la tasa de crecimiento de CONAPO, calculada a partir de sus proyecciones de población municipal de 2020 a 2025. La tasa estimada resultó de 1.10913 (CONAPO, 2023)

FIGURA 3. POBLACIÓN CONSIDERADA EN EL RADIO DE INFLUENCIA DE LA ESTACIÓN JEC PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LAS $PM_{2.5}$



Contrafactual utilizado para las estimaciones de la mortalidad evitable

De acuerdo con el estudio GBD 2021 y las ediciones anteriores, el nivel contrafactual de exposición al riesgo corresponde al nivel de exposición que es teóricamente posible y que minimiza el riesgo en la población, permitiendo estimar la mayor carga atribuible. Para cada riesgo analizado, el estudio de la GBD 2021 utilizó la mejor evidencia epidemiológica disponible para calcular el riesgo relativo según el nivel de exposición y para identificar el nivel más bajo observado en estudios de cohorte. Con esta información se seleccionó un único nivel de exposición que minimiza el riesgo de mortalidad por todas las causas, el cual se define como el TMREL (GBD, 2024).

El TMREL para $PM_{2.5}$ es el nivel teórico mínimo de exposición que, según la evidencia epidemiológica del estudio de la GBD, minimizaría el riesgo para la salud y sirve como punto de comparación ideal para estimar cuánta enfermedad podría evitarse si toda la población estuviera expuesta a ese nivel. En el caso específico de las $PM_{2.5}$, el TMREL se define como una distribución uniforme entre 2.4 y 5.9 $\mu g/m^3$, un rango considerado el más bajo posible en condiciones reales y asociado con el menor riesgo observable para la salud humana.

Por lo tanto, los valores que se usaron para estimar el exceso de concentración de $PM_{2.5}$, a partir del valor de exposición crónica, respecto a los límites contrafactuales fueron: 7.6 y 4.1 $\mu g/m^3$, respectivamente.

Riesgos relativos para cada causa de muerte

La relación concentración-respuesta ($RR(x)$) se obtuvieron de las funciones $RR(x)$ que proporciona el riesgo relativo de muerte en cada nivel de $PM_{2.5}$ usando una meta regresión y modelos flexibles (no lineales) ajustados a la evidencia epidemiológica. Por lo tanto, para cada valor de exposición x , se estimó el valor del RR . Es decir, se obtuvo un valor para cada AGEb (GBD, 2024).

Tasas basales de mortalidad por causa de enfermedad

Las tasas basales de mortalidad indican la ocurrencia base de casos de defunciones o enfermedades por las causas estudiadas en un periodo específico del año. El Cuadro 7 presenta las tasas de mortalidad por cada 10,000 habitantes y para las seis causas de mortalidad estudiadas del municipio de La Paz, BCS, para 2024, año con información más reciente publicada por INEGI.

CUADRO 7. TASAS DE MORTALIDAD POR CADA 10,000 HABITANTES PARA LAS 6 CAUSAS DE MORTALIDAD ESTUDIADAS EN EL MUNICIPIO DE LA PAZ

Causas de muerte	Grupo etario	Tasas de mortalidad (casos/10,000 habitantes) para el municipio de La Paz, BCS
Enfermedades isquémicas del corazón	25 años y más	62
Diabetes mellitus tipo II	25 años y más	12
Evento cerebrovascular	25 años y más	8
Infecciones agudas respiratorias inferiores	Todas las edades	12
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	25 años y más	5
Cáncer de tráquea, bronquios y pulmones	25 años y más	3

Casos de mortalidad de evitable por la exposición de PM_{2.5} en la región urbana de La Paz, BCS.

Finalmente, se realizó el cálculo de los casos de mortalidad atribuible a las PM_{2.5} mediante la ecuación 1. Es este cálculo se integraron los datos de pasos anteriores. Estos casos de mortalidad atribuible son los casos potenciales de mortalidad evitable (por las seis causas seleccionadas) si la concentración anual de PM_{2.5} estuviera debajo de los valores contrafactuales. El cálculo se realizó para cada AGEB y posteriormente se sumó para dar un valor total de casos en el área de estudio.

$$\sum I_{ij} = (T_i * P_j) - ((T_i * P_j) / (\exp(\ln FER_i) * \Delta C_j)) \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

I_{ij} [número de casos]. Número de casos del impacto en la salud i [donde i es mortalidad por las causas estudiadas] asociada con el cambio en la concentración de PM_{2.5}, en el AGEB j

ΔC_j [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Cambio de la exposición del contaminante de PM_{2.5} si el nivel de este contaminante no rebasara los valores contrafactuales en el AGEB j

FER_{ij} [%/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Función exposición-respuesta (FER) expresada como el incremento relativo del riesgo para el efecto i por un cambio en una unidad en la concentración de PM_{2.5}.

P_j [número de personas]. Población expuesta a $PM_{2.5}$, en el rango de edad para la causa de enfermedad específica en el AGEB j .

T_i [número de casos/personas/año]. Tasa basal de mortalidad municipal asociada con el impacto i para la población P .

El Cuadro 8 muestra los resultados de la evaluación de los impactos en los incrementos de mortalidad por la exposición crónica a las $PM_{2.5}$ se presentan en el cuadro por causa específica.

CUADRO 8. CASOS DE MORTALIDAD ATRIBUIBLES A LA EXPOSICIÓN DE $PM_{2.5}$ EN EL PERIODO DE ESTUDIO. ESTIMACIÓN INFERIOR, SUPERIOR Y PROMEDIO.

Causas de muerte	Clave	Estimación inferior	Estimación superior	Estimación promedio
Enfermedades isquémicas del corazón	EIC	12.0	7.0	10
Diabetes mellitus tipo II	DM2	4.0	2.0	3
Evento cerebrovascular	ECV	1.0	1.0	1
Infecciones agudas respiratorias inferiores	IARI	2.0	1.0	2
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	EPOC	1.0	0.0	1
Cáncer de tráquea, bronquios y pulmones	CP	1.0	0.0	1
Total		21	11	18

El Cuadro 8 muestra la estimación de casos de mortalidad evitable (ME) por seis causas específicas asociadas a la exposición crónica a $PM_{2.5}$ en la zona urbana de La Paz, BCS, durante el periodo de estudio. Los resultados promedio (estimación promedio) indican que, anualmente, podrían evitarse aproximadamente:

- 10 muertes por enfermedades isquémicas del corazón (EIC)
- 3 muertes por diabetes mellitus tipo II (DM2)
- 1 muerte por evento cerebrovascular (ECV)
- 2 muertes por infecciones agudas respiratorias inferiores (IARI)
- 1 muerte por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)
- 1 muerte por cáncer de tráquea, bronquios y pulmones (CP)

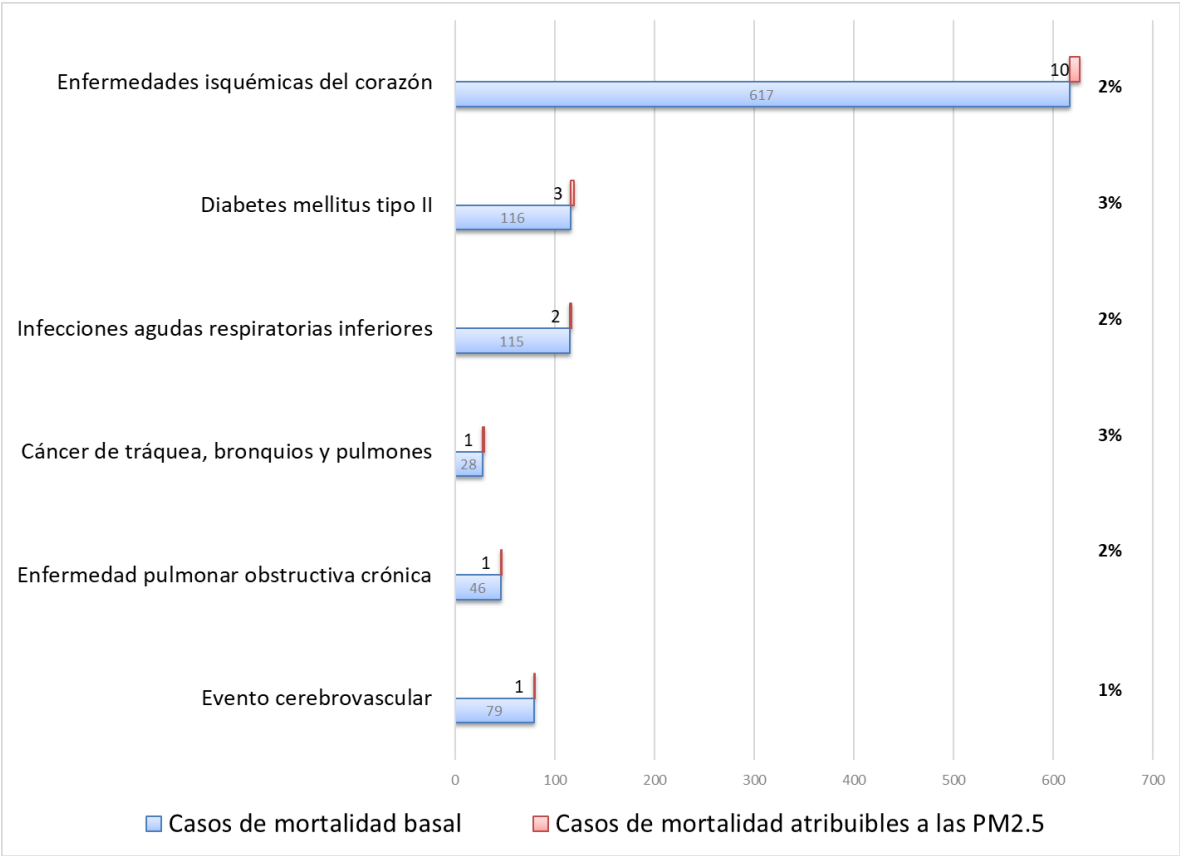
En total, se estiman 18 muertes prematuras anuales evitables en la población de La Paz directamente atribuibles a la exposición a $PM_{2.5}$. Estos resultados son consistentes con los datos publicados por el estudio de la Carga Global de Enfermedad 2021 (IHME, 2025) para el estado de Baja California Sur, que identifica a las partículas finas como el principal riesgo ambiental de mortalidad en México y en la región.

La Gráfica 13 presenta un análisis comparativo de la mortalidad basal frente a la mortalidad atribuible a la exposición crónica a las partículas finas (PM_{2.5}). En promedio los 18 casos de mortalidad atribuibles a las PM_{2.5} representan el 2% del total de casos de mortalidad registrado durante 2024 para estos seis grupos de enfermedad.

Las enfermedades isquémicas del corazón constituyen la categoría con mayor carga absoluta, registrando 617 casos de mortalidad basal y 10 casos atribuibles a PM_{2.5} (2%). En el caso de diabetes mellitus tipo II, se reportan 116 casos basales y 3 atribuibles a PM_{2.5} (3%), mientras que las infecciones agudas respiratorias inferiores presentan 115 casos basales y 2 atribuibles (2%).

El cáncer de tráquea, bronquios y pulmón muestra 28 casos basales y 1 atribuible (3%), seguido por la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) con 46 casos basales y 1 atribuible (2%). Finalmente, los eventos cerebrovasculares registran 79 casos basales y 1 atribuible (1%).

GRÁFICA 13. COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE MORTALIDAD BASAL VS. LOS CASOS ATRIBUIBLES A LA EXPOSICIÓN DE LAS PM_{2.5}, PARA CADA GRUPO DE ENFERMEDAD



En conjunto, la gráfica evidencia que, aunque el número absoluto de muertes atribuibles a las PM_{2.5} es relativamente bajo en comparación con la mortalidad basal, la exposición a este contaminante contribuye de manera consistente a la carga de enfermedad en estas seis causas

de enfermedad. Esto subraya la importancia epidemiológica de la contaminación por partículas finas y la necesidad de fortalecer las políticas de control de calidad del aire para reducir riesgos en la población.

Finalmente, la evidencia local obtenida en La Paz refuerza y es coherente con los hallazgos internacionales y nacionales sobre el impacto de la contaminación por $PM_{2.5}$ en la salud pública, subrayando la importancia de políticas de control y prevención para reducir la carga de enfermedad y mortalidad asociada a este contaminante.

Evaluación económica de la mortalidad evitable

La estimación económica de los casos de mortalidad evitables se realizó considerando un valor estadístico de la vida (VVE), obtenido a partir de un metanálisis estadounidense ajustado por ingreso a México mediante del método de transferencias de beneficios (Benefit transfer, en inglés)(ecosystemvaluation, 2020). Dicho valor se estimó a partir de los resultados de un metanálisis (Kochi et al., 2006) en el que se reporta un valor central de \$5.4 millones de dólares americanos, con una desviación estándar (DE) de \$2,400,000.00 del año 2000 para una vida estadística de la población de EE. UU. El valor central y la DE se ajustaron para México a través del ingreso nacional per cápita basado en el método de paridad del poder adquisitivo (World Bank Group, 2024) de acuerdo con los datos más recientes publicados para 2024.

Para tal estimación se usaron los valores de elasticidad de 0.5 y 2, a fin de tener un escenario alto y bajo, y posteriormente se obtuvo la media geométrica de los resultados. Finalmente, el valor se ajustó a dólares de 2024, a través del índice de precios y cotizaciones de 1.87 estimado entre enero del 2000 a diciembre del 2024.

El valor de una vida estadística que se utilizó en este estudio fue de \$ 2,147,453 dólares americanos de 2024 con una desviación estándar de \$954,423, cuyo valor en pesos fue de \$ 41,454,854 y (DE = \$18,424,380) pesos actuales de 2024. Es importante decir que dicho valor se encuentra dentro del intervalo de valores sugeridos para los miembros de la OCDE (VVE, 1.45-4.35 millones de USD) pero por debajo del valor central de 2.9 a precios del 2005 (OECD, 2012).

Por tanto, la valoración económica consideró 18 casos de mortalidad evitable en el municipio de La Paz, lo que resulta en un valor económico de \$746,187,381 pesos, con una desviación estándar de \$331,638,836, utilizando el valor promedio de paridad diaria intercambiaría de 2025 de \$ 19.3042 pesos mexicanos por dólar de EE. UU., de acuerdo con el promedio de los datos publicados por el Banco de México para ese año.

Conclusiones

- ❖ El análisis de las tasas de enfermedades asociadas con la exposición de $PM_{2.5}$ en el municipio de La Paz, da cuenta de que las causas de mortalidad por 6 causas específicas de enfermedad —evento cerebrovascular (ECV), cáncer de tráquea, bronquios y pulmones (CP), diabetes mellitus tipo 2 (DT2), enfermedad isquémica del corazón (EIC), enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), e infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (IARI), tienen una expresión previa en la carga de enfermedad registrada en este municipio. La presencia de estos casos confirma que la morbilidad es un indicador temprano de los desenlaces fatales que fueron estimados en este estudio.
- ❖ Los datos utilizados para la evaluación de la mortalidad evitable relacionada con la exposición a $PM_{2.5}$ fue representativa estadísticamente de los 12 meses considerados para obtener las métricas de exposición crónica (promedio anual) que correspondió al periodo del 1 de noviembre de 2024 al 31 de octubre de 2025.
- ❖ Los datos de $PM_{2.5}$ registrados en el periodo de análisis, si bien no corresponde a un año calendario (de 1 de enero al 31 de diciembre) como lo establece las normas mexicanas para la evaluación de su cumplimiento, sí se contó con datos representativos de 12 meses seguidos.
- ❖ Los estadísticos descriptivos y las distribuciones gráficas evidencian patrones diferenciados en el comportamiento de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y la razón $PM_{2.5}/PM_{10}$.
 - En las PM_{10} se observa la mayor variabilidad, con una distribución fuertemente asimétrica hacia la derecha y presencia de valores extremos, lo cual sugiere episodios agudos de incremento en la fracción gruesa del material particulado.
 - Las $PM_{2.5}$ presentan una dispersión menor y una distribución más concentrada en rangos bajos, aunque también muestra valores extremos (outliers) que indican incrementos puntuales en la fracción fina. Las PM_{10} dominan la variabilidad del material particulado, mientras que $PM_{2.5}$ y su proporción relativa muestran un comportamiento más consistente, con variaciones que parecen asociarse a eventos específicos más que a cambios estructurales en la composición del aerosol.
 - La razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ exhibe una distribución más estable, con valores predominantemente inferiores a 0.4 y pocos casos que superan la unidad, lo que refleja que, en condiciones típicas, la fracción fina constituye una proporción limitada del total de partículas suspendidas.
- ❖ La comparación de los indicadores de calidad del aire (de exposición aguda y crónica) indicó que las $PM_{2.5}$ registradas para el periodo de análisis está justo en límite anual del valor normado, de $10 \mu g/m^3$ y tampoco rebasa el límite diario establecido en la NOM-025-SSA1-2021. No obstante, estos indicadores se encuentran por arriba de las directrices de la OMS; lo que indica que de acuerdo con la OMS hay un problema de calidad del aire con las $PM_{2.5}$ en La Paz, BCS, y por la tanto existe una alta probabilidad de que se presenten efectos en la salud en la población más susceptible, como las infancias, las mujeres embarazadas, los adultos mayores, y personas con enfermedades crónicas preexistentes.
- ❖ En el caso de los datos horarios las PM_{10} , ozono y SO_2 , analizados para el periodo de estudio, se encontró lo siguiente: 1) Las PM_{10} representa un problema de calidad del aire en la ciudad de La Paz, porque no cumple ni con la norma oficial mexicana (NOM), ni con las directrices de la OMS; 2) El ozono es un problema de calidad del aire en La Paz, porque

rebasó el límite de exposición crónica y por tanto no cumple la NOM y tampoco con las directrices de la OMS; y 3) El SO_2 no representa un problema de calidad del aire, dado que cumplió tanto con la NOM como con las directrices de la OMS, sin embargo, se encontraron 3 días en el periodo analizado con valores por arriba del límite de una hora especificado en la NOM. Si bien los datos de NO_x y COV no se analizaron en este estudio por no ser pertinentes al alcance definido, es importante señalar que ambos contaminantes desempeñan un papel clave en la formación de ozono troposférico. En presencia de luz solar, las reacciones fotoquímicas entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles favorecen la generación de ozono, por lo que su comportamiento es fundamental para comprender la dinámica de este contaminante.

- ❖ De acuerdo con los resultados de los casos de mortalidad evitable por la exposición de la población a $\text{PM}_{2.5}$ en la región urbana de La Paz, BCS, se estima que anualmente podrían evitarse aproximadamente 18 muertes prematuras en la población local si se redujera la exposición a este contaminante. Estas muertes corresponden principalmente a enfermedades isquémicas del corazón, diabetes mellitus tipo II, eventos cerebrovasculares, infecciones respiratorias agudas, enfermedad pulmonar obstructiva crónica y cáncer de tráquea, bronquios y pulmones. Los resultados obtenidos son coherentes con los datos de la Carga Global de Enfermedad 2021, que identifican a las partículas finas como el principal riesgo ambiental de mortalidad en Baja California Sur, subrayando la necesidad de fortalecer las políticas de control y prevención de la contaminación atmosférica para proteger la salud pública.
- ❖ En relación con la evaluación económica de los casos de mortalidad evitables se estimó que el valor económico asociado a las 18 muertes prematuras anuales que podrían evitarse en la región urbana de La Paz, BCS, por la reducción de la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ asciende a aproximadamente 746.2 (y su desviación estándar de 331.6) millones de pesos mexicanos actuales de 2024. Esta valoración se realizó utilizando el método de transferencia de beneficios y un valor estadístico de la vida ajustado para México, lo que resalta el impacto económico significativo que tiene la contaminación atmosférica en la salud pública y la importancia de invertir en políticas de prevención y control para proteger tanto la salud como los recursos económicos de la comunidad.
- ❖ Tanto los resultados de este estudio como la evidencia científica subrayan que la generación eléctrica con combustibles fósiles en México contribuye de manera significativa a la contaminación atmosférica y a la carga de enfermedad en la población, especialmente por la exposición a partículas finas y gases tóxicos. La transición hacia combustibles más limpios y la aplicación de metodologías de evaluación de impacto en salud son esenciales para mitigar estos efectos y fundamentar políticas públicas orientadas a la protección de la salud.

Recomendaciones

Limitaciones del Estudio

- Se usaron los datos horarios de $PM_{2.5}$ de noviembre de 2024 a octubre de 2025 para aproximar el valor promedio de 1 año. Sin embargo, es posible que el valor sea ligeramente diferente si se hubiera usado el año calendario, es decir de enero de 2025 a diciembre de 2025.
- Se empleó un único valor de concentración para estimar la exposición a $PM_{2.5}$ dentro de un radio de influencia de 4 km alrededor de la estación, debido a que únicamente se contó con los datos provenientes de la estación JEC. Esta aproximación se sustenta en la representatividad espacial asignada a dicha estación; sin embargo, es importante reconocer que las concentraciones reales pueden variar entre distintas zonas de la ciudad, dadas las diferencias en la distribución espacial de las fuentes emisoras locales.
- Se recomienda en futuros estudios adicionar la evaluación de casos de enfermedad, por ejemplo, los casos de asma asociados a la exposición crónica de las $PM_{2.5}$. Así como indicadores de pérdida de productividad,

Bibliografía

- Adhvaryu, A., Molina, T., Nyshadham, A., Tamayo, J., & Torres, N. (2023). The health costs of dirty energy: Evidence from the capacity market in Colombia. *Journal of Development Economics*, 164, 103116. <https://doi.org/10.1016/J.JDEVECO.2023.103116>
- Balakrishnan, K., Brauer, M., Chen, G., & Chow, J. (2015). To Humans Outdoor Air Pollution. In *IARC monographs* (Vol. 109).
- ecosystemvaluation. (2020). *Benefit Transfer Method*. Methods, Section 8. Site Developed by King D.M. and Mazzotta M.J. https://www.ecosystemvaluation.org/benefit_transfer.htm
- Brauer, M., Roth, G. A., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abate, K. H., Abate, Y. H., Abbafati, C., Abbasgholizadeh, R., Abbasi, M. A., Abbasian, M., Abbasifard, M., Abbasi-Kangevari, M., Abd ElHafeez, S., Abd-El salam, S., Abdi, P., Abdollahi, M., Abdoun, M., Abdulah, D. M., Abdullahi, A., ... Gakidou, E. (2024). Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and 811 subnational locations, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, 403(10440), 2162–2203. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00933-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00933-4)
- CERCA. (2023). *Reporte anual de calidad del aire en La Paz B.C.S. 2022*. https://cerca.org.mx/wp-content/uploads/2023/06/Reporte-anual-de-calidad-del-aire-en-La-Paz-B.C.S-2022-.docx-1-1_compressed.pdf
- Collaborators, R. F., Burden, G., & Study, D. (2024). *Supplementary appendix 1. GBD 2021 Risk Factors Collaborators. Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and 811 subnational locations, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. 1990–2021*.
- CONAPO. (2023, July 11). *Bases de datos de la Conciliación Demográfica 1950 a 2019 y Proyecciones de la población de México 2020 a 2070 | Consejo Nacional de Población | Gobierno | gob.mx*. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/bases-de-datos-de-la-conciliacion-demografica-1950-a-2019-y-proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-2020-a-2070>
- Galise, I., Serinelli, M., Morabito, A., Pastore, T., Tanzarella, A., Laghezza, V., Nocioni, A., Giua, R., Bauleo, L., Bruno, V., Ancona, C., Ranzi, A., & Bisceglia, L. (2019). The integrated environmental health impact of emissions from a steel plant in taranto and from a power plant in Brindisi, (Apulia Region, Southern Italy). *Epidemiologia e Prevenzione*, 43(5–6), 329–337. <https://doi.org/10.19191/EP19.5-6.P329.102>
- GBD2021. (2024). *Global Burden of Disease Study 2021 (GBD 2021) Causes of Death and Nonfatal Causes Mapped to ICD Codes*. Global Burden of Disease Study 2021 (GBD 2021) Causes of Death and Nonfatal Causes Mapped to ICD Codes. <https://ghdx.healthdata.org/record/ihme-data/gbd-2021-cause-icd-code-mappings>
- Hamra, G. B., Guha, N., Cohen, A., Laden, F., Raaschou-Nielsen, O., Samet, J. M., Vineis, P., Forastiere, F., Saldiva, P., Yorifuji, T., & Loomis, D. (2014). Outdoor Particulate Matter

- Exposure and Lung Cancer : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Health Perspectives*, 122(9), 906–911. <https://doi.org/10.1289/ehp/1408092>
- IHME. (2025). *GBD Compare Data Visualization*. <http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare>
- INE. (2012). *Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica* (Primera). INE-SEMARNAT. http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=682
- INECC. (2025, November 2). *Protocolo de Manejo de Datos de Calidad del Aire*. Manuales de Monitoreo Atmosférico En México. <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>
- Kelly, F. J., & Fussell, J. C. (2015). Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(4), 631–649. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9720-1>
- Levy, J. I., Hammitt, J. K., Yanagisawa, Y., & Spengler, J. D. (1999). Development of a new damage function model for power plants: Methodology and applications. *Environmental Science and Technology*, 33(24), 4364–4372. <https://doi.org/10.1021/es990634+>
- López, M. T., Zuk, M., Garibay, V., Tzintzun, G., Iniestra, R., & Fernández, A. (2005). Health impacts from power plant emissions in Mexico. *Atmospheric Environment*, 39(7), 1199–1209. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10.035>
- Medina, P., Berrueta, V., Cinco, L., Ruiz-García, V., Edwards, R., Olaya, B., Schilman, A., & Masera, O. (2019). Understanding household energy transitions: From evaluating single cookstoves to “clean stacking” alternatives. *Atmosphere*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/atmos10110693>
- Medina, S., Le Tertre, A., Saklad, M., & on behalf of the Apehis Collaborative Network, on behalf of the A. C. (2009). The Apehis project: Air Pollution and Health-A European Information System. *Air Quality, Atmosphere, & Health*, 2(4), 185–198. <https://doi.org/10.1007/s11869-009-0050-2>
- Nadadur, S. S., & Hollingsworth, J. W. (2015). *Air Pollution and Health Effects* (M. and I. Toxicology, Ed.; 1st ed.). Humana Press.
- OMS. (2014). *WHO | Health Impact Assessment*. World Health Organization. WHO. <http://www.who.int/hia/en/>
- OMS. (2016). *Constitución de la OMS: principios*. World Health Organization. WHO. <http://www.who.int/about/mission/es/>
- Pope, C. A., Coleman, N., Pond, Z. A., & Burnett, R. T. (2020). Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies. *Environmental Research*, 183, 108924. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108924>
- Rivera-Cárdenas, C. I., Barrera-Huertas, H. A., Valenzuela, J., Rangel, R., López-Zamudio, E., & Carbajal-Aguilar, C. C. (2024). Emissions to the atmosphere by power plants in Baja

- California Sur, Mexico. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability*, 6(1), 28–42.
<https://doi.org/10.56845/rebs.v6i1.87>
- Rojas-Bracho, L., & Garibay-Bravo, V. (2003). Las partículas suspendidas , aeropartículas o aerosoles : ¿ hacen daño a la salud ?; ¿ podemos hacer algo ? *Gaceta Ecológica*, 69(octubre-diciembre), 29–44.
- Seinfeld, J. H., & Spyros, N. P. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd Editio). John Wiley & Sons, Inc.
- SEMARNAT. (2020). *INEM*. Documentos Del Inventario Nacional de Emisiones.
<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>
- SETUES. (2017). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Baja California Sur 2018-2027*.
https://setuesbcs.gob.mx/sustentabilidad/25_proaire_baja_california_sur.pdf
- 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). <https://doi.org/10.3390/ijerph19127511>
- US EPA. (2013). Monitoring Air Quality Monitoring Program. *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, II*, 3–348.
<https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/qa/QA-Handbook-Vol-II.pdf>
- USEPA. (2018). Integrated Science Assessment for Particulate Matter First External Review Draft. *Environmental Protection*, (October), 938. [https://doi.org/10.1016/0012-365X\(93\)90118-D](https://doi.org/10.1016/0012-365X(93)90118-D)

Anexo técnico

Códigos CIE-10 que se incluye el subconjunto de padecimientos considerados para cada causa de enfermedad estudiadas

CAUSAS DE MUERTE ESTUDIADAS, SU RESPECTIVO CÓDIGO CIE-10 Y DESCRIPCIÓN GENERAL Y EL GRUPO ETARIO CONSIDERADO

Causa de muerte	Código CIE-10	Descripción general	Grupo etario
Evento cerebrovascular	I60-I63.9 I65-I66.9 I67.0-I67.3 I67.5-I67.6 I68.1-I68.2 I69.0-I69.3 G45-G46.8	Accidentes isquémicos transitorios y síndromes relacionados, las hemorragias e infartos cerebrales (accidentes cerebrovasculares hemorrágicos e isquémicos), la obstrucción o estrechamiento de arterias cerebrales, otras enfermedades vasculares del cerebro, trastornos cerebrovasculares secundarios a enfermedades sistémicas y las secuelas o discapacidades persistentes tras un evento cerebrovascular	25 años y más
Cáncer de tráquea, bronquios y pulmones	C33-C34.9 D02.1-D02.3 D14.2-D14.3 D38.1	Neoplasias malignas de tráquea, bronquios y pulmón, y lesiones precancerosas que afectan las vías respiratorias principales y el tejido pulmonar, incluyendo tanto tumores invasivos como lesiones de comportamiento incierto o benigno en estas localizaciones	25 años y más
Diabetes Mellitus tipo 2	E11-E11.1 E11.3-E11.9	Diabetes mellitus tipo 2	25 años y más
Enfermedad isquémica del corazón	I20-I25.9	Angina de pecho, infarto agudo de miocardio, infarto agudo de miocardio subsecuente, ciertas complicaciones presentes posteriores al infarto agudo de miocardio, Otras enfermedades isquémicas agudas del corazón,	25 años y más

		enfermedad isquémica crónica del corazón	
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	J41-J44.9	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC), incluyendo bronquitis crónica, enfisema y sus formas mixtas.	25 años y más
Infecciones respiratorias inferiores agudas	A48.1 A70 B34.2 B97.2 B97.4-B97.6 J09-J15.8 J16-J16.9 J20-J21.9 J91.0 U04-U04.9	Enfermedades respiratorias agudas y enfermedades virales y bacterianas, incluyendo neumonía, gripe, bronquitis aguda, infecciones por clamidias, adenovirus y coronavirus, así como complicaciones respiratorias graves. Estas afecciones afectan principalmente las vías respiratorias inferiores	Todas las edades

Fuente: (GBD2021, 2024)

Limpieza y verificación de los datos horarios de PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ y SO₂

Los datos horarios solicitados al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) corresponde a las mediciones de noviembre de 2024 a octubre de 2025 de la estación Junta Estatal de Caminos.

Es oportuno mencionar que los datos de noviembre a diciembre de 2024 fueron validados por las autoridades ambientales del gobierno del Estado de Baja California. En el caso de los datos de enero a octubre de 2025 fueron datos pre-validados recibidos en tiempo semi real en el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) del INECC.

Los datos de ambos años contenían banderas que distinguen los valores de acuerdo con su validez. Los datos de 2024 se identificaron con la etiqueta “OK”, mientras que los de 2025 se identifican con el valor de “1”. A continuación, se describe en procedimiento de limpieza y verificación de los datos:

1. El primer paso de verificación consistió en considerar sólo aquellos datos con banderas de datos válido.
2. El segundo paso fue generar gráficas de tendencia para identificar valores negativos y concentraciones extremas, así como gráficas de perfiles horarios y mensuales para identificar comportamientos anómalos de los datos.

En cuanto a las PM_{10} y $PM_{2.5}$ se invalidaron los siguientes casos²:

- ❖ Valores de concentración negativos.
- ❖ Registros con concentraciones de $PM_{2.5}$ mayores a las PM_{10} en la misma hora.
 - Específicamente aquellas en las que conservaban el mismo comportamiento una vez obtenidos los promedios de 24 h.
 - En los registros con concentraciones en las que era evidente que el dato podría ser inválido por estar antecedido o precedido de datos inválidos o bien por saltos abruptos en la concentración en horas anteriores o posteriores.
- ❖ En aquellos casos en que la diferencia no fue significativa se conservaron registros de las $PM_{2.5}$ mayores a PM_{10} , debido a la posible incertidumbre en la medición asociada con los equipos de medición, el porcentaje de dichas mediciones fue menor del 3% del total de datos horarios.

En relación con el ozono, sólo se identificaron tres concentraciones negativas, que fueron inválidas para el análisis.

Para el dióxido de azufre se identificaron alrededor del 1% de concentraciones negativas que fueron invalidadas debido a que en la mayoría de los casos se presentaron en bloques consecutivos de hasta 18 horas.

² El protocolo de manejo de datos de calidad del aire indica como buena práctica verificar las bitácoras de las estaciones de monitoreo para asegurar que los valores son inválidos; sin embargo, en este caso no se tuvo acceso a estas bitácoras.