

# Cambio climático y calidad del aire en ambientes urbanos: recomendaciones de los Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia, 2021-2024



## Resumen ejecutivo

Una de las funciones del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) es promover la articulación de esfuerzos de investigación en torno a problemas nacionales concretos que requieren tanto de una atención urgente como de una solución integral, profunda y amplia. Para ello, el Conahcyt investiga las causas de dichos problemas con miras a proveer bases de conocimiento que produzcan soluciones a través de la colaboración de las y los integrantes de las comunidades académicas con el gobierno y la sociedad en general.

En el Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace-ECC) del Conahcyt, a través de la Convocatoria 2021-03, se apoyaron Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (Pronaii) orientados a la adaptación y mitigación del cambio climático, así como a la mejora de la calidad del aire en las ciudades mexicanas. El objetivo de estos Pronaii ha sido realizar investigación e incidencia en materia de cambio climático para

contribuir a la transformación del modelo urbano y transitar hacia ciudades más sustentables. En este sentido, se identificaron e implementaron medidas y herramientas para la adaptación de la población, de los ecosistemas y de la infraestructura, así como para mitigar las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) y para mejorar la calidad del aire en las ciudades del país.

Conforme a la convocatoria, los proyectos debían ser inter o transdisciplinarios, fomentar la participación armónica y estar orientados a la solución del problema para mejorar el bienestar de la población y proteger el medioambiente. Las demandas de investigación fueron las siguientes: 1) clima urbano, determinantes y proyecciones del cambio climático; 2) impactos del cambio climático y/o de la contaminación atmosférica, vulnerabilidad, adaptación y resiliencia; 3) mitigación de emisiones en el corto, mediano y largo plazo relacionadas con la calidad del aire y el cambio climático; 4) transformaciones sociales y político administrativas para lograr un cambio en el desarrollo de las ciudades seleccionadas tendiente a la reducción de desigualdades, el aumento de resiliencia, la adaptación al cambio climático y la neutralidad de emisiones de carbono; y 5) instrumentos de planeación y gestión, innovación tecnológica y mecanismos de interacción entre los distintos sectores de las ciudades seleccionadas y con su entorno periurbano, para alcanzar los objetivos de adaptación, mitigación y mejora de la calidad del aire.

Los objetivos generales de algunos de los proyectos apoyados fueron:

- Incidir en la mitigación y adaptación al cambio climático mediante el desarrollo de agendas de intervención ambiental con metodologías participativas y mediante la construcción de una plataforma de información con herramientas de análisis territorial actual y prospectivo.
- En las zonas metropolitanas del valle de México, valle de Toluca, Cuernavaca, Guadalajara y Monterrey, determinar las concentraciones de carbono negro y otras especies químicas en la fracción de partículas finas o materia particulada 2.5 (PM<sub>2.5</sub>, por sus siglas en inglés), analizar la política pública para la adaptación al cambio climático y generar propuestas de mediano y largo plazo para mejorar la calidad del aire con una perspectiva de salud poblacional.

- Realizar acciones de rehabilitación de tres humedales dentro de la zona urbana de la ciudad de Xalapa, Veracruz, con una gestión socioambiental, y conocer el efecto de la rehabilitación de humedales, la estructura de su vegetación y su hidrología.
- Identificar el efecto de emisiones exhaustivas y no exhaustivas de las fuentes móviles en el deterioro de la calidad del aire en Hermosillo, Sonora.
- Considerando la diversidad socioambiental y la cultura de las comunidades de la megalópolis del Valle de México, generar herramientas y proponer estrategias para la toma de decisiones dirigidas tanto a la identificación y mitigación de los efectos adversos del cambio climático como a monitorear la calidad del aire.
- Diseñar y proponer medidas institucionales, sociales, educativas y tecnológicas efectivas, que incidan en la transformación del modelo actual de desarrollo de las ciudades, incorporando conocimiento transdisciplinario para enfrentar las crisis del siglo XXI: climática, de biodiversidad y de contaminación ambiental.



# Índice

Problemática | 5

Ciudades de estudio | 7

Principales resultados y recomendaciones de cada Pronaii | 10

- a) Pronaii 316500: “Rehabilitación de humedales urbanos con participación ciudadana para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero, disminuir la temperatura ambiental y mitigar las inundaciones en Xalapa, Veracruz” | 10
- b) Pronaii 317557: “Ciudades resilientes al cambio climático: colaboración interdisciplinaria para la recuperación y restauración del ecosistema del desierto de Sonora en entornos urbanos para mejorar la calidad del aire” | 11
- c) Pronaii 316642: “Contaminación atmosférica en la megalópolis de la zona metropolitana del valle de México: fuentes, dispersión, su efecto en el cambio climático, salud de la población, percepción del riesgo y posibilidades de mitigación” | 12
- d) Pronaii 315834: “Agenda de intervención e incidencia en la mitigación y adaptación del cambio climático para mejorar la calidad del aire y la salud en tres zonas metropolitanas del estado de Hidalgo” | 13
- e) Pronaii 316370: “Impactos del cambio climático y de la contaminación del aire en la salud de la población mexicana: cobeneficios de la adaptación y mitigación en zonas metropolitanas de México” | 14
- f) Pronaii 317663: “Herramientas y estrategias para la toma de decisiones en cambio climático, calidad del aire y desarrollo sostenible en la megalópolis del valle de México” | 15

Recomendaciones generales | 17

Conclusiones | 18

Referencias | 19



## Problemática

El cambio climático que enfrenta el planeta es un problema que involucra procesos naturales globales, pero cuyas causas y consecuencias son de origen humano y socioeconómico. Por ello, tiene que ser abordado identificando y previendo sus impactos en todos los niveles, entendiendo la dinámica de sus interacciones y transformando de fondo las actividades y sociedades que lo generaron. Este fenómeno está afectando de manera creciente la salud y el bienestar de las poblaciones humanas y de los ecosistemas, los sistemas productivos, la economía, la infraestructura construida, la seguridad alimentaria y el futuro mismo de la humanidad.

Debido a que las ciudades contribuyen de manera importante a la problemática del cambio climático, los sistemas urbanos son clave para estabilizar las concentraciones atmosféricas dentro de niveles seguros para la humanidad. La concentración no planificada de población, infraestructura y servicios —sobre todo en los países en desarrollo— acentúa la desigualdad social y amplifica los impactos socioeconómicos y sanitarios de eventos ambientales locales y globales.

Aunado a la problemática climática y socioambiental general, las ciudades mexicanas —como la mayoría de las ciudades del mundo— tienen una morbilidad y mortalidad incrementadas por la mala calidad del aire. El cambio climático tiene impactos en la calidad del aire y, a su vez, ésta incide en el cambio climático. Si bien las soluciones a la contaminación atmosférica se dan en una escala de corto plazo, muchas de las medidas coinciden con las de mitigación al cambio climático en el mediano y largo plazo. Sobre todo, dichas estrategias contribuyen a reducir la vulnerabilidad de poblaciones humanas y naturales, al facilitar su adaptación y resistencia a impactos del cambio climático que no se podrán evitar.

La contaminación atmosférica es un problema de salud pública mundial, y en países como el nuestro es una de las principales causas de muerte y enfermedades crónicas en la población. México ocupa la posición número 12 en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y dichas emisiones representan el 1.5 % de las emisiones a nivel mundial (Ge *et al.*, 2021). En 2017, el Instituto de Métricas y Evaluación de la Salud (IHME, por sus siglas en inglés) estimó un total de 48,072 muertes prematuras en México a causa de la contaminación del

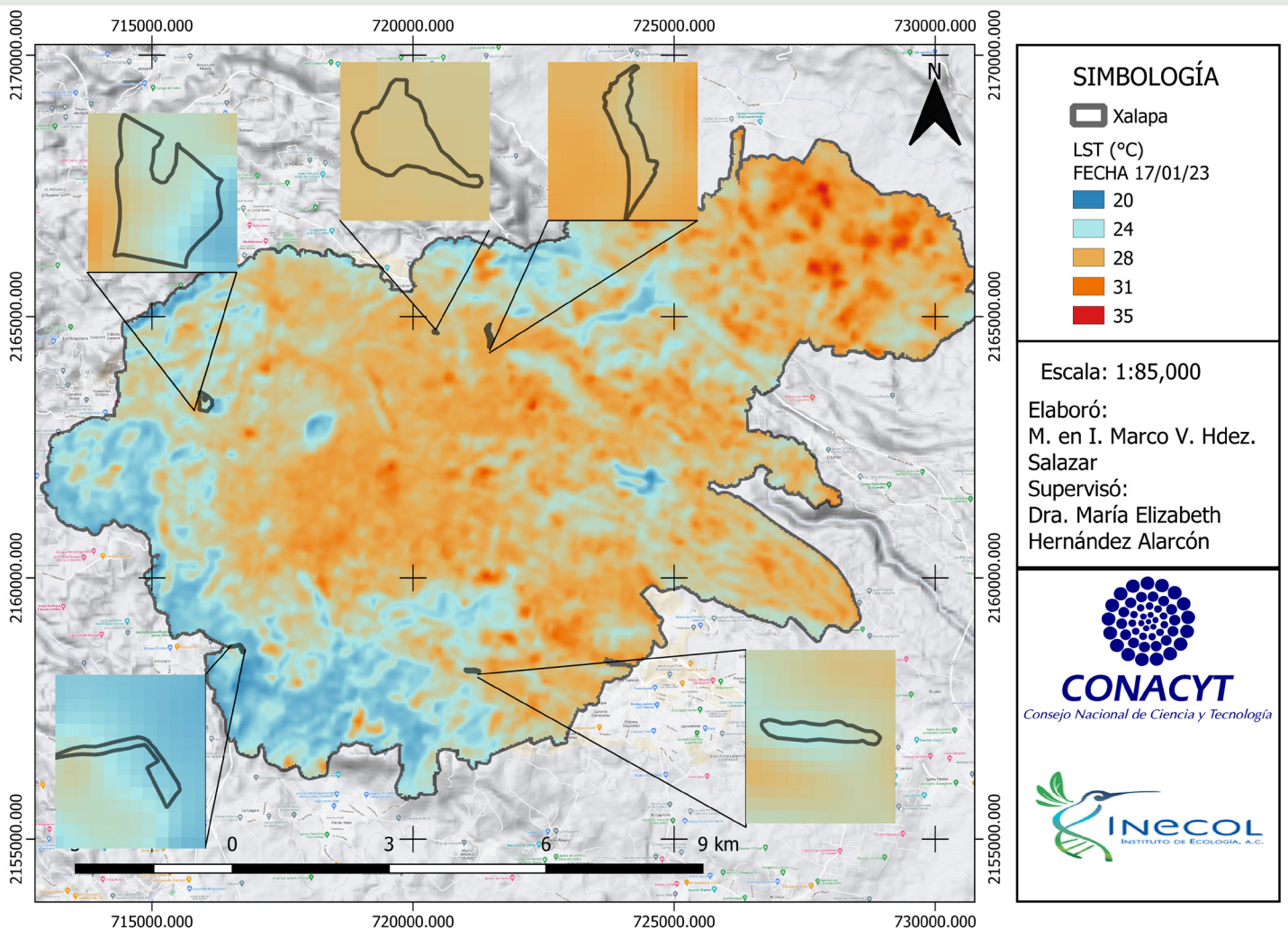
aire (IHME, 2021). Asimismo, para el mismo año se determinó que los costos por degradación ambiental atribuible a la contaminación atmosférica fueron de 619,114 millones de pesos (Inegi, 2018), que equivalen a 2.8 del producto interno bruto (PIB) (INECC, 2019).

En este sentido, las acciones que eliminan los gases y compuestos que juegan un papel climático importante —como los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC)— a la vez que actúan sobre la calidad del aire y sobre el forzamiento radiativo —la diferencia entre la luz absorbida por la Tierra y la energía irradiada al espacio— en la atmósfera, mejoran la salud de la población y los ecosistemas.

Por otro lado, las islas de calor asociadas a las condiciones prevalecientes en las ciudades no sólo han mostrado potencial para influir en las reacciones de contaminantes atmosféricos, como los precursores de ozono, sino que

constituyen un calentamiento local que se sumará al calentamiento global derivado del cambio climático, por lo que pueden agravar de forma considerable los impactos en la población, por ejemplo, frente a ondas de calor (Bell *et al.*, 2018).

Ante estas problemáticas se requieren acciones inmediatas que formen parte de estrategias de corto, mediano y largo plazo para ciudades específicas. Enfrentar esta situación requiere: 1) sensibilizar, concientizar y motivar a los distintos actores de la pentahélice —gobierno, academia, empresas, sociedad y ambiente—; 2) involucrar a las instituciones académicas para generar información con base científica; 3) crear una articulación con instituciones de gobierno a nivel federal, estatal y municipal para garantizar acciones coordinadas e incluyentes enfocadas en el bienestar de la población; y 4) proteger el medioambiente.



## Ciudades de estudio

### Xalapa, Veracruz

La ciudad de Xalapa, con 448 mil habitantes, es el segundo municipio más poblado del estado de Veracruz (Inegi, 2020). Tiene una extensión de 124.4 km<sup>2</sup>. El clima es templado húmedo, con una precipitación media anual de 1,509.1 mm, la temperatura media anual es de 18 °C, mientras que la máxima es de 30.2 °C y la mínima es de 5 °C (HAX, 2022).

En Xalapa existen reportes de mala calidad del aire, los cuales, aunque se encuentran todavía por debajo de los niveles de contaminación presentados en la Ciudad de México, están cerca de una contingencia. Como consecuencia del cambio en los patrones de precipitación pluvial por el cambio climático, la ciudad sufre inundaciones durante la época de lluvia, lo que causa pérdidas económicas y pone en riesgo la vida de sus habitantes.

En los años 90, Xalapa fue líder en extensión de áreas verdes por habitante (Capitanachi *et al.*, 2004). Sin embargo, el crecimiento acelerado y desordenado en los últimos 30 años ha ocasionado que los últimos fragmentos de bosque de niebla estén fuera del territorio de dicha ciudad con deterioro ambiental. Los humedales urbanos de Xalapa han experimentado graves impactos por las descargas de aguas residuales y porque se les ha utilizado como basureros y tiraderos de escombros.

Uno de los Pronaii del Pronace-ECC se enfocó en la restauración de los humedales urbanos que se pueden rescatar. Su trabajo articuló a científicos de instituciones locales con la población de Xalapa y el gobierno del estado. La restauración de estos ecosistemas no sólo ha podido demostrar una mejoría en la calidad del aire y del microclima, sino también que son alternativas ecológicas y económicamente viables para enfrentar las problemáticas sociales, climáticas y ambientales de Xalapa, Veracruz.



## Hermosillo, Sonora

Hermosillo es la ciudad de más rápido crecimiento del estado de Sonora, ubicada en el noroeste de México, en el núcleo de la región desértica de Arizona-Sonora. Tiene una extensión de 168.2 km<sup>2</sup>. Cuenta con alrededor de 900 mil habitantes (Inegi, 2020). La zona se caracteriza por un clima semiárido con una precipitación media anual de 356 mm, la temperatura media anual es de 25 °C, mientras que la máxima anual oscila entre los 42 y los 50 °C (Navarro *et al.*, 2020). Las condiciones áridas y polvorientas junto con la ausencia de protección natural contra la erosión eólica exponen a la ciudad a un continuo aporte anual de material particulado (MP) proveniente del desierto (Schiavo *et al.*, 2021). La contaminación atmosférica del área urbanizada está ligada al aporte geogénico —que en este caso proviene del desierto. Las contribuciones antropogénicas están asociadas a los procesos de las plantas de generación eléctrica y al tráfico vehicular —emisiones de escape y no escape.

Desde 2010, Hermosillo ha experimentado un crecimiento de expansión territorial del 29 % y poblacional del 3.6 %, lo que la ha convertido en la tercera ciudad de mayor crecimiento en México (Segob *et al.*, 2018). Casi el 85 % de la zona urbana de Hermosillo está pavimentada, lo cual provoca inundaciones en algunas partes de la ciudad. Además de la actividad del tráfico, estas zonas también actúan como fuentes potenciales de polvo (Meza-Figueroa *et al.*, 2020). Hermosillo tiene una baja proporción de espacios verdes y una alta densidad de edificación; los espacios verdes ascienden a sólo 3.5 m<sup>2</sup> por habitante (Navarro *et al.*, 2020), un valor muy inferior al mínimo de 9 m<sup>2</sup> por persona recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO, 2018). Estudios recientes sobre el cambio climático en México (Pincc e ICAYCC, 2023) han documentado una tasa mayor de calentamiento en los estados del norte del país.

Otro de los Pronaii del Pronace-ECC evaluó el impacto de las acciones ciudadanas de reforestación en la calidad del aire de Hermosillo. A la par, propuso estrategias para medir la contaminación atmosférica e identificar sus fuentes mediante sensores, biomonitores y equipo tradicional.

## Megalópolis del valle de México

La megalópolis del valle de México (MVM) tiene una extensión de 21,178 km<sup>2</sup>. Abarca seis estados —Ciudad de México, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala— y 204 municipios. El Estado de México es el que tiene mayor representatividad al contar con 84 municipios, seguido de Tlaxcala con 41, Hidalgo y Puebla con 23 cada uno, Morelos con 17 y la Ciudad de México con 16. La MVM tiene alrededor de 40 millones de habitantes, lo que representa entre el 31 y el 32 % de la población nacional. En esta región se concentra una gran parte de la actividad económica, política y cultural del país. En el gobierno federal, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (Came) se encarga de la coordinación ambiental de esta región. Aunque los estados que la conforman tienen condiciones muy heterogéneas, hay problemáticas comunes muy vinculadas entre sí. Varios de los Pronaii del Pronace-ECC confluyeron en esta región.

## Zonas metropolitanas

Ubicada en el corazón del país, la zona metropolitana del valle de México (ZMVM) se extiende por 6,070.3 km<sup>2</sup> y albergaba en 2020 a 21,436,911 habitantes (Sedatu, 2024). Además de la Ciudad de México, abarca parte de los estados de México e Hidalgo; con un clima templado subhúmedo y precipitaciones en verano, la ZMVM es centro del poder federal y económico del país (Sedatu, 2024).

La zona metropolitana de Monterrey (ZMM), motor económico del norte de México, se sitúa en el noreste del país, abarca 7,439.9 km<sup>2</sup> y albergaba en 2020 a 5,322,117 habitantes (Sedatu, 2024). Su clima es seco y cálido, con una precipitación media anual de 650 mm, la temperatura media anual es de 20 °C, mientras que la máxima es de 32 °C y la mínima de 5 °C; se encuentra ubicada en el estado de Nuevo León (Sedatu, 2024).

La zona metropolitana de Guadalajara (ZMG), vibrante centro industrial, cultural y turístico del occidente de México, se extiende por 2,486.6 km<sup>2</sup> y albergaba en 2020 a 5,110,617 habitantes (Sedatu, 2024). Su clima es



semiseco, con una precipitación media anual de 850 mm. Su temperatura media anual es de 20 °C, mientras que la máxima es de 23 °C y la mínima es de 7 °C. Se encuentra ubicada en el estado de Jalisco (Sedatu, 2024).

La zona metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), importante polo industrial y comercial ubicado en el centro del país, se extiende por 2,414.8 km<sup>2</sup> y albergaba en 2020 a 2,353,924 habitantes (Sedatu, 2024). Su clima es templado subhúmedo, con una precipitación media anual de 900 mm. Su temperatura media anual es de 15 °C, mientras que la máxima es de 25 °C y la mínima es de 3 °C. Se encuentra ubicada en el estado de México (Sedatu, 2024).

La zona metropolitana de Cuernavaca (ZMC) se extiende por 1,189.58 km<sup>2</sup> y albergaba en 2020 a 1,028,589 habitantes; la ciudad industrial del valle de Cuernavaca es el polo de desarrollo más importante del estado de Morelos (Sedatu, 2024). En general, predomina un clima cálido subhúmedo, con una precipitación media anual de 900 mm; su temperatura media anual es de 21 °C, mientras que la máxima es de 32 °C y la mínima es de 10 °C (Inegi, s.f.).

El estado de Hidalgo se localiza en el centro-oriente del país. Tiene una extensión de 20,813 km<sup>2</sup> y cuenta con alrededor de 3,082,000 habitantes (Inegi, s.f.). Se caracteriza por un clima seco, semiseco y templado subhúmedo, con una precipitación media anual de 800 mm; la temperatura media anual es de 16 °C, mientras que la máxima es de 27 °C (SE, s.f.). En los últimos 30 años se ha dado un crecimiento importante en el desarrollo urbano de dicho estado. Por este motivo, existe preocupación acerca de cómo las instancias regulatorias, financieras y de promoción de la planeación y el desarrollo están diagnosticando y analizando los impactos de las tres zonas metropolitanas de Hidalgo (ZMH) y los problemas que se deben resolver. Uno de los Pronaii del Pronace-ECC considera que se requiere una legislación robusta que regule el crecimiento urbano y metropolitano de Hidalgo, para promover la planeación y el ordenamiento territorial bajo una visión sostenible y democrática (López, 2021).



## Principales resultados y recomendaciones de cada Pronaii

a

**Pronaii 316500: “Rehabilitación de humedales urbanos con participación ciudadana para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero, disminuir la temperatura ambiental y mitigar las inundaciones en Xalapa, Veracruz”**

### Principales hallazgos

El proyecto trabajó en la recuperación de tres humedales de las zonas urbanas de Xalapa, Veracruz, los cuales presentan graves impactos por descargas residuales y porque se les ha utilizado como basureros o tiraderos de escombros durante muchos años. Los resultados mostraron que las temperaturas en las zonas donde existen bosques y humedales son hasta 10°C más frías en comparación con las zonas donde ya no existen. Como consecuencia a su vez de un crecimiento poblacional no planeado, se ha reducido la superficie de los humedales, y se observa que los de menor tamaño no proporcionan el efecto de enfriamiento de los humedales más grandes. En los suelos de cinco humedales a una profundidad de 1 metro, se encuentra almacenado un promedio de 505 toneladas de carbono orgánico por hectárea; esto significa que una hectárea del suelo de

los humedales de Xalapa captura las emisiones de un año de 826 automóviles, y contribuye de esta forma a mitigar el calentamiento global. La capacidad de filtración de los humedales urbanos ayuda a tener aire más limpio: la concentración de hidrocarburos policíclicos en el aire fue más baja cerca de los humedales que en las zonas rodeadas de pavimento. Asimismo, los humedales ayudan a depurar el agua que se filtra a los acuíferos. Como resultado del proceso de restauración de los humedales, se observó un espejo de agua, crecimiento de plantas nativas de humedal, un aumento de fauna —con predominio de aves y anfibios—, así como una mejora estética del paisaje.

### Recomendaciones

- Involucrar de forma conjunta a sociedad, academia y autoridades municipales o estatales para garantizar la conservación y rehabilitación de los humedales urbanos.
- Conservar y restaurar los humedales urbanos para tener ciudades resilientes al cambio climático.
- Implementar políticas públicas a nivel municipal para la protección y conservación de los humedales en las ciudades mexicanas.
- Poner en práctica estrategias didácticas de educación ambiental y acciones participativas con los ciudadanos para contribuir a asegurar la conservación de los humedales.
- Realizar inventarios de humedales urbanos en las ciudades mexicanas y cuantificar los servicios ambientales que prestan para la adaptación al cambio climático.
- Generar lineamientos para el desarrollo urbano con la inclusión de espacios verdes que, de ser posible, incluyan humedales.

b

## Pronaii 317557: “Ciudades resilientes al cambio climático: colaboración interdisciplinaria para la recuperación y restauración del ecosistema del desierto de Sonora en entornos urbanos para mejorar la calidad del aire”

### Principales hallazgos

A través de la identificación y clasificación de las emisiones contaminantes de fuentes móviles en entornos urbanos del estado de Sonora, se detectaron niveles de  $PM_{2.5}$  por encima de lo recomendado por la OMS, así como la presencia de doce plaguicidas en polvo urbano —incluyendo dicloro difenil tricloroetano (DDT) y metabolitos—, producto de la resuspensión de polvo emitido por suelos agrícolas y transportado por viento hacia Hermosillo. De igual modo, se identificó la presencia de nanopartículas respirables, así como niveles de metales y metaloides en filtros superiores a los reportados para la Ciudad de México. La ausencia de vegetación contribuye a un mayor tiempo de residencia o suspensión de  $PM_{2.5}$ , y genera exposición crónica. Los elevados niveles de metales encontrados se asocian con fuentes de tráfico vehicular, en especial emisiones no exhaustivas. Se identificaron compuestos asociados al desgaste de frenos —como la barita—, catalizadores de tres vías —platinoideos, circonia, cerio, tierras raras, manganeso, antimonio y cromo—, y llantas —zinc y hierro. Las altas temperaturas favorecen el aumento de ozono y compuestos de nitrógeno, los cuales también son marcadores de tráfico vehicular. Se detectaron patrones de variación horaria y estacional

asociados con el cambio de temperatura y humedad. Se ha identificado que los árboles palo fierro y palo verde capturan el mayor porcentaje de polvo. Además de la influencia del desierto y de las quemas agrícolas, Sonora es un estado con actividad minera histórica, industria tanto automotriz como manufacturera y un parque vehicular creciente. Las condiciones climáticas áridas y la falta de lluvia favorecen la presencia de contaminantes y partículas en el aire.

### Recomendaciones

- Incentivar a la población y al gobierno en torno a la recuperación de áreas verdes.
- Promover cambios en la industria de la construcción para reducir el sellado de suelos, favorecer la infiltración y cumplir con la normatividad en materia de áreas verdes.
- Generar una plataforma con recomendaciones para la población vulnerable que realiza actividades al aire libre, de acuerdo con las tendencias identificadas en el comportamiento de los contaminantes.
- Impulsar cambios sustanciales en la movilidad urbana para reducir la circulación del parque vehicular, mediante políticas que favorezcan el transporte público.
- Promover cambios en las actividades agrícolas, enfocados en reducir la erosión del medioambiente y el uso de plaguicidas.
- Crear un sistema de información geográfica dirigido al sector salud, que permita visualizar la distribución espacio-temporal de contaminantes y alérgenos para la toma de decisiones y la identificación de recomendaciones.

## C

## Pronaii 316642: “Contaminación atmosférica en la megalópolis de la zona metropolitana del valle de México: fuentes, dispersión, su efecto en el cambio climático, salud de la población, percepción del riesgo y posibilidades de mitigación”

### Principales hallazgos

Este proyecto presenta un estudio integral sobre la contaminación por  $PM_{2.5}$  en tres zonas metropolitanas de la megalópolis: 1) zona metropolitana del valle de México (ZMVM), la cual conforma una megaciudad, ha sido la zona más estudiada y es en la que se concentra la mayor parte de la población del país; 2) zona metropolitana del valle de Toluca (ZMVT), que presenta en la actualidad la mayor contaminación de  $PM_{2.5}$  en el país y ocupa el cuarto lugar en Latinoamérica; y 3) zona metropolitana de Cuernavaca (ZMC), una ciudad media que solía ser sólo turística, pero cuya población incrementó en las últimas tres décadas sin una planeación adecuada. Cabe mencionar que con este proyecto se da cumplimiento a los objetivos de investigación y caracterización de partículas incluidos en los Programas para Mejorar la Calidad del Aire (Proaire) de las tres zonas metropolitanas.

En el monitoreo que se realizó durante un año, se observa que la ZMVT presenta las mayores concentraciones de  $PM_{2.5}$ , así como de compuestos como plomo, carbono negro y algunos carcinógenos, lo cual puede explicarse por la importante actividad industrial, por el elevado número de calles no pavimentadas y por las actividades agrícolas que siguen desarrollándose en múltiples locaciones. Debido a que la ZMVM es la que tiene una mayor población —lo que implica numerosas fuentes de área para satisfacer las necesidades de los habitantes— y a que aún contiene algunas zonas industriales, se encontró que exporta masas importantes de partículas finas

hacia la ZMVT y la ZMC, por lo que habrá que comenzar a tomar medidas de tipo regional en sus respectivos Proaire. Si se lograra cumplir con la NOM-025 para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , se reduciría de manera considerable la mortalidad atribuible a carbono elemental en las tres zonas metropolitanas. El estudio de percepción del cambio climático y la contaminación del aire mostró diferencias importantes entre los habitantes de cada zona, en las cuales debe basarse la estrategia de comunicación de riesgos. Tanto el sector salud, como el estudiantil de educación media y las infancias mostraron interés y entusiasmo al involucrarse en la investigación y discusión de estos temas. Por ello, se desarrollaron y evaluaron materiales gráficos para profesionales de la salud, especialistas en medioambiente, docentes, adolescentes e infancias.

### Recomendaciones

- Formular programas y normas para prohibir las quemas clandestinas de basura de traspatio y agrícolas, sobre todo en la ZMVT y la ZMC donde persisten estas prácticas.
- Formular programas y normas para verificar y reducir las emisiones de motocicletas en todas las zonas de la megalópolis, ya que su número ha aumentado, y muchos modelos son capaces de contaminar más que los automóviles al no tener que seguir ninguna regulación.
- Diseñar normas federales o regionales para restringir los horarios y disminuir las emisiones del transporte pesado en las tres zonas estudiadas, pero principalmente en la ZMVM donde el tráfico durante el día es el más abundante.
- En la ZMVT y la ZMC, llevar a cabo un plan de pavimentado, ya que los periodos de sequía contribuyen de forma importante a la presencia de partículas respirables y finas.
- Desarrollar un programa de limpieza del suelo industrial, ya que en la ZMVT y la ZMC se encontró presencia de especies metálicas y orgánicas tóxicas.

- Promover una estrategia de comunicación con el sector salud que incluya conocer los riesgos de los contaminantes atmosféricos y el cambio climático.
- Reforzar el conocimiento de los habitantes sobre el cambio climático y la calidad del aire, en particular sobre formas de proteger su salud.
- Replicar experiencias en otros sitios de la megalópolis y elaborar un programa regional.



### Pronaii 316370: “Impactos del cambio climático y de la contaminación del aire en la salud de la población mexicana: cobeneficios de la adaptación y mitigación en zonas metropolitanas de México”

#### Principales hallazgos

De acuerdo con el monitoreo realizado entre agosto de 2022 y julio de 2023, en la zona metropolitana del valle de México (ZMVM) se registró el promedio anual más alto de carbono negro ( $1.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en comparación con la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG:  $1.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la zona metropolitana de Monterrey (ZMM:  $1.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Sin embargo, el valor máximo se registró en la ZMM (máx.  $10.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), seguido de la ZMG (máx.  $5.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la ZMVM (máx.  $5.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Este contaminante es un compuesto de las  $\text{PM}_{2.5}$ , asociado a mayores tasas de mortalidad. La concentración anual promedio de  $\text{PM}_{2.5}$  en 2021 fue de  $19.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $31.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $22.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para la ZMVM, la zona metropolitana de Toluca (ZMT) y la ZMM, respectivamente. Considerando dichas exposiciones, en 2021 las muertes atribuibles a  $\text{PM}_{2.5}$  fueron 37,638, 8,992 y 18,825 para la ZMVM, la ZMT y la ZMM, respectivamente. Asimismo, la concentración anual promedio de  $\text{PM}_{10}$  durante el mismo año fue de  $37.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $62.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $50.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $64.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para la ZMVM, la ZMT, la ZMG y la ZMM, con muertes atribuibles de 48,116,

8,992, 24,265 y 18,825, respectivamente. Tan sólo en la ZMVM, si no se hubiera rebasado el valor recomendado por la OMS de exposición crónica, se habría evitado alrededor del 11 % de la mortalidad por todas las causas —sin contar accidentes y lesiones— en 2021.

En este Pronaii, se organizaron grupos de colaboración en las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey, Toluca y Valle de México (Grupos de colaboración, 2023). Los grupos intercambiaron experiencias acerca de los impactos en la salud pública asociados a la sinergia del cambio climático y la contaminación atmosférica, con la intención de persuadir a los actores clave de cada zona a implementar acciones de adaptación. Los esfuerzos se centraron en estrategias de vigilancia epidemiológica, educación, recuperación de áreas verdes, revisión de regulaciones y promoción de la investigación local sobre el tema. Además, se consolidó un grupo de embajadoras de salud planetaria que ha impulsado y acompañado proyectos escolares con el alumnado en las cuatro zonas metropolitanas del proyecto (ESMaestras, 2022). En la Ciudad de México, las embajadoras están promoviendo la construcción de contenidos curriculares bajo el marco del nuevo plan de estudios para la educación básica, en el que se incorpora el eje articulador de vida saludable y se incluyen —de manera explícita— los componentes de salud planetaria y generación de propuestas de cambio en las comunidades del alumnado.

#### Recomendaciones

- Impulsar el desarrollo del sistema de vigilancia epidemiológica, temperatura y contaminantes del aire e integrar al monitoreo la medición de carbono negro.
- Instrumentar medios para evaluar el desempeño de los planes de gestión de la calidad del aire, considerando indicadores anuales de la reducción de la tasa de mortalidad atribuible a la contaminación atmosférica y la temperatura.
- Desarrollar sistemas de comunicación de riesgos sanitarios con un enfoque de prevención y con atención especial a las personas más vulnerables.

- Respetar, garantizar y promover el trabajo de organizaciones comunitarias y redes vecinales para facilitar el uso de espacios públicos o áreas de oportunidad como espacios de biodiversidad, así como la protección y recuperación de áreas verdes, parques, jardines, bosques, barrancas y áreas protegidas, para mejorar las condiciones locales de temperatura, calidad del aire, salud física y mental.
- Integrar contenidos de salud planetaria a los procesos de formación curricular y enseñanza, considerando su alcance integral y de vida saludable, con acciones en el aula y en extramuros desde el nivel primaria hasta posgrado.
- Revisar las normas ambientales que necesitan actualizarse para responder al reto del cambio climático.
- Establecer un vínculo interinstitucional con autoridades educativas relevantes como tomadores de decisión.
- Promover la investigación local en torno a la adaptación ante el cambio climático y la contaminación del aire, de modo que se consideren temas vinculados como contaminación de ríos, movilidad, accesibilidad a espacios públicos, transporte público no contaminante, seguridad alimentaria, ordenamiento territorial, transición energética y tanto participación como percepción ciudadana.



### Pronaii 317663: “Herramientas y estrategias para la toma de decisiones en cambio climático, calidad del aire y desarrollo sostenible en la megalópolis del valle de México”

#### Principales hallazgos

Se tomó como caso de estudio la megalópolis del valle de México (MVM), conformada por diez zonas metropolitanas

donde se concentra una fracción importante de la población nacional que contribuye significativamente a la economía del país. Se definieron seis grupos de trabajo que abarcaron los temas: 1) aspectos socioeconómicos; 2) emisiones y calidad del aire; 3) cambios de uso de suelo; 4) cambio climático local y global; 5) impactos en sistemas naturales y humanos —agua, salud y biodiversidad—; y 6) estrategias de adaptación al cambio climático.

En relación con los impactos en salud pública, sobre todo entre la población urbana, se observa un incremento del 40 % en la mortalidad por enfermedades metabólicas, cardiovasculares y neurológicas de 1998 a 2019, así como una disminución del 25 % de la mortalidad por enfermedades infecciosas. Se encontró una mayor mortalidad en las mujeres por enfermedades cardiovasculares y metabólicas, mientras que en los hombres se destacan las enfermedades infecciosas y trastornos mentales. A su vez, se ha identificado un efecto negativo en la salud debido a la presencia de la isla de calor urbana en las urbes de la región, como problemas cardiovasculares y complicaciones de salud mental. Los resultados mostraron que sí existe una relación entre la abundancia de especies, las medidas de diversidad funcional, así como el porcentaje de bosque y superficies designadas como áreas naturales protegidas con las tasas de mortalidad por enfermedades y los indicadores socioeconómicos.

En cuanto a la evaluación de la vulnerabilidad hídrica de los asentamientos humanos, destaca la reducción de lluvia en la región oriente de la MVM, mientras que en la región centro/sur/poniente se registra un aumento en los milímetros de precipitación.

En materia de cambio y uso de suelo, durante el periodo 1985-2020, se observan las siguientes disminuciones: 71 % de pastizales naturales, 20.3 % de bosques templados, 74.3 % de matorrales, 98.5 % de vegetación hidrofílica y 74.9 % de cuerpos de agua.

El fenómeno isla de calor ocurre cuando paisajes naturales —que incluyen elementos como vegetación— son reemplazados por materiales y estructuras más densas —como el concreto y el asfalto—, con mayor capacidad para absorber y emitir calor. La isla de calor produce

aumentos de temperatura en las ciudades y cambios en los patrones de precipitación y vientos; en otras palabras, genera un cambio climático a nivel local (Jauregui y Romales, 1996). Después de analizar el periodo 2003-2018, se concluyó que los valores de intensidad de la isla de calor más altos se alcanzan en la Ciudad de México —en particular en el noreste— y en municipios del Estado de México como Ecatepec y Nezahualcóyotl. El máximo se alcanza en la alcaldía Venustiano Carranza y en Nezahualcóyotl, donde en promedio la isla de calor anual excede los 3°C.

## Recomendaciones

- Impulsar el enfoque regional en las políticas públicas de la megalópolis, sobre todo las ambientales, debido a la interacción entre sus múltiples procesos biofísicos y económicos.
- Mejorar la planificación de los nuevos asentamientos urbanos para garantizar en todos los casos la protección de los recursos hídricos.
- Implementar medidas para reducir el fenómeno isla de calor, a través de un programa de techos frescos o blancos.
- Atender la problemática del cambio climático de forma transversal e integral, como parte de un plan de desarrollo del país, con programas a nivel estatal y regional.
- Considerar en las políticas públicas urbanas a las zonas suburbanas y rurales cercanas a las ciudades de la megalópolis.
- Establecer grupos intersectoriales de trabajo para la construcción de bases de datos sobre índices de vulnerabilidad socioambiental.
- Probar las estrategias de mitigación y adaptación a través de programas piloto para hacer las modificaciones necesarias antes de que se implementen a mayor escala.
- Crear un centro de resiliencia climática virtual para la megalópolis del valle de México con el propósito de dar continuidad a los esfuerzos de investigación

y aprovechar los recursos humanos, técnicos y de información generados por este y otros Pronaii.

- Como parte de un plan de atención médica para todas las poblaciones de la MVM, atender la demanda de suministros médicos —como medicamentos y equipo— en las comunidades con mayor incidencia de padecimientos derivados de la alta presencia de contaminantes en el aire y del aumento de la temperatura.
- Evaluar la actual gestión de los recursos hídricos dentro de la MVM para planificar conforme a la demanda y presencia de asentamientos de la población.
- Fortalecer los programas de agricultura y ganadería para que estas actividades puedan prevalecer con un margen rotativo de cultivos que permita mantener el suelo fértil y cuidar la biodiversidad tanto animal como vegetal de la región.



**Pronaii 315834: “Agenda de intervención e incidencia en la mitigación y adaptación del cambio climático para mejorar la calidad del aire y la salud en tres zonas metropolitanas del estado de Hidalgo”**

## Principales hallazgos

En este proyecto se realizó la construcción de los *Programas de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático* de los municipios de tres zonas metropolitanas del estado de Hidalgo, para incidir en sus condiciones ambientales actuales y mejorar la salud de sus habitantes (UAEH, 2022). Lo más importante de estos programas es que logran definir las fuentes de emisión de GEI, la cantidad de toneladas por año que generan y cuáles son las industrias —transporte, comercio, negocios, ganado y agricultura— que más contaminan. Los resultados más importantes se fundamentan en la elaboración de los inventarios de cada uno de los

quince municipios que integran las zonas metropolitanas de Hidalgo, ya que con base en ellos se puede definir el comportamiento de los aportes de emisiones a nivel estatal. A partir de estos inventarios, se construyó una agenda ambiental de intervención para orientar a los actores locales y a los gobiernos municipales en el diseño de políticas públicas.

## Recomendaciones

- Elaborar inventarios municipales para construir programas municipales de mitigación y adaptación ante el cambio climático, en los que se definan acciones de intervención focalizadas, responsables y recursos.
- Desarrollar sesiones con expertos, empresarios, transportistas, comerciantes, profesores y ciudadanos para que la construcción de los programas sea realizada por los actores del municipio.
- Asegurar que estos programas sean validados y autorizados por el ayuntamiento a través de las autoridades del cabildo.
- Incluir estos programas en los programas de desarrollo municipal para asegurar la participación de las autoridades municipales en la implementación de acciones para enfrentar el cambio climático.
- Desarrollar talleres para transferir estos conocimientos en las escuelas dentro de programas de educación ambiental que difundan los resultados de este proyecto.
- Asegurar que los resultados se integren al documento principal de reforma de la Ley Estatal de Cambio Climático de Hidalgo, y agregar, dentro de la misma ley, la creación de un Observatorio Ambiental y de Cambio Climático, así como de un Sistema de Indicadores Ambientales.





## Recomendaciones generales

Para afrontar los efectos del cambio climático y de la mala calidad del aire, se requiere implementar medidas de manera conjunta e inmediata. Las recomendaciones generales son las siguientes:

- Generar más conocimiento sobre el cambio climático y sus efectos, ampliar su difusión y facilitar los procesos de transferencia de la información.
- Impulsar acciones coordinadas e incluyentes por parte de los tres órdenes de gobierno, instituciones académicas, sector productivo y sociedad.
- Considerar la presencia y preservación de espacios naturales como un factor importante para cuidar tanto la salud humana como la de los otros seres vivos en su conjunto.
- Fortalecer las estrategias de planificación de los nuevos asentamientos urbanos y homogeneizar la distribución de los servicios básicos.
- Fomentar la recuperación y expansión de áreas verdes mediante campañas públicas, con atención a zonas suburbanas y rurales que desarrollan actividades ecoturísticas comunitarias.
- Revisar la regulación de materiales de construcción, ya que es imprescindible encontrar un equilibrio entre la disminución de la intensidad de las islas de calor urbana y la seguridad de las edificaciones y sus habitantes.
- Implementar estrategias regionales que reduzcan la emisión de contaminantes a nivel industrial y poblacional.
- Construir bases de datos de acceso público con recomendaciones para la población vulnerable que realiza actividades al aire libre, de acuerdo con las tendencias identificadas en el comportamiento de los contaminantes.
- Establecer guías con recomendaciones para entornos saludables.
- Utilizar las herramientas de modelación, regionalización, información satelital y proyecciones generadas por los proyectos mencionados en este documento para facilitar y fundamentar acciones.
- Definir un inventario o listado de Normas Oficiales Mexicanas relacionadas directa o indirectamente con la gestión del cambio climático y la contaminación del aire, susceptibles de revisión y actualización, así como sumar las iniciativas de la sociedad civil que se dirigen hacia:
  - Actualizar los niveles máximos permisibles de las normas de emisión.
  - Incorporar en el marco regulatorio medidas de mitigación para los procesos de producción de las empresas.
  - Aplicar instrumentos normativos que aseguren reforestaciones efectivas a través de la plantación, el manejo y el monitoreo de especies nativas.
- Crear Observatorios Ambientales Estatales —con los diversos actores locales y con funciones de investigación— y Sistemas Estatales de Indicadores Ambientales, para fundamentar la toma de decisiones en torno al cambio climático y la regulación del uso de recursos para enfrentar sus efectos.



## Conclusiones

El trabajo colaborativo e interdisciplinario de los Pronaii orientados a la adaptación y mitigación del cambio climático, así como a la mejora de la calidad del aire en las ciudades mexicanas, obtuvo resultados que pueden ser consultados y aplicados por diferentes sectores de la sociedad. Además, el análisis de dichos resultados permite la identificación de numerosas recomendaciones de política pública. En adelante, se busca dar continuidad al trabajo desarrollado para replicar —con las adecuaciones necesarias— las metodologías de los proyectos, generar más información e impulsar acciones eficaces que conduzcan a modelos de desarrollo que transformen los ambientes urbanos, detonando una relación sana, productiva y de bienestar que trascienda a las ciudades y abarque tanto las áreas rurales como los entornos naturales del territorio mexicano.

En el micrositio del Pronace-ECC se puede encontrar más información sobre los proyectos mencionados en el presente documento:

<https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/cambio-climatico/>

## Referencias

- Bell, M.L., O'neill, M.S., Ranjit, N., Borja-Aburto, V.H., Cifuentes, L.A., y Gouveia, N.C. (2008). Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case crossover study in Sao Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. *International journal of epidemiology* 37(4), 796-804.
- Capitanachi C., Utrera E. y Smith C.B. (2004). *El bosque urbano de Xalapa, Veracruz*. Xalapa: Instituto de Ecología A.C., Universidad Veracruzana y Sistema de Investigación del Golfo de México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- ESMaestras (2022). *ESMaestras, cambio climático y contaminación del aire*. Instituto Nacional de Salud Pública. <https://esmaestras.org/esmaestras-cambio-climatico-y-contaminacion-del-aire/>
- Ge, M., Friedrich, J., y Vigna, L. (2021). Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector. *World Resources Institute*. <https://es.wri.org/insights/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por>
- Grupos de colaboración (2023). *Plataforma de los grupos de colaboración del proyecto impactos del cambio climático y de la contaminación del aire en la salud de la población mexicana: co-beneficios de la adaptación y mitigación en zonas metropolitanas de México*. Instituto Nacional de Salud Pública. <https://www.gruposdecolaboracion.com>
- HAX (Honorable Ayuntamiento de Xalapa) (2022). *Plan Municipal de desarrollo 2022-2025. Xalapa H. Ayuntamiento 2022-2025*. Xalapa: HAX. <https://xalapa.gob.mx/direccion-de-gobierno-abierto/wp-content/uploads/sites/33/2022/05/PlanMunicipalDesarrollo22-25.pdf>
- IHME (Institute for Health Metrics and Evaluation) (2021). *Global Burden of Disease (GBD)*. <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2019). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2018, México*. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes. Climáticos. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2018.pdf>
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (s.f.). *Cuéntame Información por entidad*. Ciudad de México: Inegi. <https://cuentame.inegi.org.mx/Monografias/default.aspx?Tema=ME>
- \_\_\_\_ (2018). *Cuentas económicas y ecológicas de México 2017*. Comunicado de prensa núm. 631/18. 30 de noviembre de 2018. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/StmaCntaNaI/CtasEcmcasEcologicas2018\\_11.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/StmaCntaNaI/CtasEcmcasEcologicas2018_11.pdf)
- \_\_\_\_ (2020). Prevalencia de Obesidad, Hipertensión y Diabetes para los Municipios de México 2018. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. <https://www.inegi.org.mx/investigacion/pohd/2018/>
- Jauregui, E., y Romales, E. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmospheric Environment* 20(20), 3383-3389. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00041-6](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00041-6)
- López, S. (2021). *Metodología para la construcción de la estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático a nivel municipal: el caso del estado de Hidalgo*. Hidalgo: Congreso del Estado Libre y Soberano de Hidalgo.
- Meza-Figueroa, D., Barboza-Flores, M., Romero, F.M., Acosta-Elias, M., Hernández-Mendiola, E., Maldonado-Escalante, F., Pérez-Segura, E., González-Grijalva, B., Meza-Montenegro, M., García-Rico, L., Navarro-Espinoza, S., Santacruz-Gómez, K., Gallego-Hernández, A., y Pedroza-Montero, M. (2020). Metal bioaccessibility, particle size distribution and polydispersity of playground dust in synthetic lysosomal fluids. *Science of the Total Environment* 713, 136481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136481>
- Navarro-Estupiñan, J., Robles-Morua, A., Díaz-Caravantes, R., y Vivoni, E.R. (2020). Heat risk mapping through spatial analysis of remotely-sensed data and socioeconomic vulnerability in Hermosillo. México. *Urban Climate* 31, 100576. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100576>
- Pincc (Programa de Investigación en Cambio Climático) e ICAYCC (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático) (2023). *Estado y perspectivas del cambio climático en México: Un punto de partida*. Ciudad de México: Pincc, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://cambioclimatico.unam.mx/>

- Schiavo, B., Meza-Figueroa, D., Pedroza-Montero, M., Vidal-Solano, J., González-Grijalva, B., Navarro-Espinoza, S., Romero, F., Hernández, E., Gutiérrez-Ruiz, M., y Cenicerós-Gómez, A. (2021). In vitro assessment oral and respiratory bioaccessibility of Mn in school dust: Insight of seasonality in a semiarid environment. *Applied Geochemistry* 134, 105102. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105102>
- SE (Secretaría de Economía) (s.f.). *Información económica y estatal. Hidalgo*. Ciudad de México: SE. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/175903/hidalgo\\_2016\\_1116.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/175903/hidalgo_2016_1116.pdf)
- Sedatu (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano) (2024). *Metrópolis de México 2020*. Aguascalientes: Inegi. <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/metropolis-de-mexico-2020?state=published>
- Segob (Secretaría de Gobernación), Conapo (Consejo Nacional de Población) y Sedatu (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano) (2018). *Sistema Urbano Nacional 2018*. Ciudad de México: Segob, Conapo y Sedatu. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/400771/SUN\\_2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/400771/SUN_2018.pdf)
- UAEH (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo) (2022). *Plataforma análisis territorial diseño*. Conahcyt. <https://agendaambientalzonasmopolitanashidalgo.com.mx/AgendaAmbiental/subPaginas/subAgenda/index-agenda>
- WHO (World Health Organization) (2018). *World health statistics 2018: Monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. Geneva: WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565585>



*Este documento fue realizado dentro del Programa Nacional Estratégico en Energía y Cambio Climático (Pronace-ECC) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt). La información está basada en los resultados de cada Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia (Pronaii) en materia de cambio climático. Coordinación del Pronace-ECC: Luca Ferrari, Omar Masera y Alejandra Straffon. Coordinación del documento: Iris Santos González. Revisión: Amparo Martínez, Socrates López Pérez (Pronaii 315834), Marlene Cortez Lugo (Pronaii 316370), María Elizabeth Hernández Alarcón (Pronaii 316500), Violeta Múgica Álvarez (Pronaii 316642), Diana Meza Figueroa (Pronaii 317557), José Manuel Saniger Blesa (Pronaii 317663), así como Yutsil Sanginés. Corrección de estilo: Andrea González Márquez y Julio Alberto Montoya Lara. Fotografías: Diana Meza Figueroa (pp. 1, 3, 9, 16, 18), Fidel González (p.5) y María Elizabeth Hernández Alarcón (pp. 1, 6, 7, 20).*

#### DISEÑO EDITORIAL

Arlen Hernández • tallerhojarasca.com  
contacto@tallerhojarasca.com



*Este resumen para tomadores de decisiones se realizó con apoyo del Conahcyt en 2024. Los contenidos y el diseño editorial son responsabilidad de las y los colaboradores. El Conahcyt, con el fin de ampliar el acceso a los resultados y productos de los proyectos apoyados, difunde este documento sin que ello represente una postura institucional.*