



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CALIDAD DEL AIRE EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO

Proyecto 317557. Ciudades resilientes al cambio climático: colaboración interdisciplinaria para la recuperación y restauración del ecosistema del desierto.



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

AUTORES

Dra. Diana María Meza Figueroa*

Dr. Francisco Berrellez Reyes*

Dra. Belem González Grijalva*

Dra. Aracely Angulo Molina*

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano

Universidad de Sonora

Dr. Benedetto Schiavo*

Dra. Ofelia Morton Bermea

M.C. Elizabeth Hernández

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Carmen Isela Ortega Rosas

Universidad Estatal de Sonora

Dr. Claudio Inguaggiato

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California

M.P. Ana Iveth Mazón García

Diseño y Edición

***Laboratorio Nacional CONAHCYT de Atmósfera y Clima-LANCAC y Red
Universitaria de Observatorios Atmosféricos-RUOA**

CONTENIDO

Antecedentes

Mediciones con estación fija

Tendencias identificadas

Monitoreo de fuentes difusas o de área y la identificación de fuentes puntuales

Avances en investigación de fuentes móviles (vehículos)

Metales y metaloides en filtros

Caracterización de partículas extraídas de filtros

Recomendaciones



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



GOBIERNO DE
MÉXICO

Introducción

La contaminación atmosférica es actualmente un reto crítico para la salud humana y el cambio climático. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2024) estima que el 99% de la población mundial está expuesta a aire contaminado, con un impacto especialmente grave en los países de ingresos bajos y medios. Los efectos combinados de la contaminación del aire exterior e interior contribuyen a 7 millones de muertes prematuras al año (OMS, 2024).

El aire contaminado contiene partículas líquidas y sólidas (PM), de tamaño submicrónico a nano, y gases, como el ozono, el carbono orgánico volátil (COV), el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno (NOx) y el dióxido de azufre, que pueden afectar a la salud humana (Sonwani et al., 2021). Las PM corresponden a partículas inhalables de una variabilidad composicional, incluyendo sulfatos, nitratos, cloruros, carbono negro, polvo mineral o agua con diámetros aerodinámicos que van desde menos de 2.5 (PM_{2.5}) a 10 (PM₁₀) µm. Las nanopartículas (NPs) tienen diámetros aerodinámicos inferiores a 100 nm o 0.1 µm (PM_{0.1}), y se conocen comúnmente como partículas ultrafinas (UFP) (Abdillah & Wang, 2023; Moreno-Ríos et al., 2022; Phairuang et al., 2022). El polvo atmosférico forma parte de las UFP porque comprende partículas de entre 0.01 y 1 µm (Chauhan et al., 2024).

Dentro de los contaminantes atmosféricos se incluyen a los gases de efecto invernadero (GEI). Estos se caracterizan porque contribuyen al calentamiento global porque retienen el calor que la Tierra recibe del Sol. El aumento de los GEI ha provocado un incremento de la temperatura superficial global. Los GEI incluyen a: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), hexafluoruro de azufre (SF₆), ozono (O₃). Por otro lado, los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) son compuestos en forma de gases y partículas que tienen un tiempo de residencia corto en la atmósfera y contribuyen al calentamiento global. Entre los CCVC se incluyen el CH₄ con un potencial de calentamiento 20 veces mayor que el CO₂, el carbono negro (BC) un componente del hollín que provoca un calentamiento más intenso que el CO₂, el O₃ troposférico y los HFC.

La reducción de CCVC, particularmente el BC permite mejorar la salud pública. El BC se forma por la combustión de combustibles fósiles y biomasa que se encuentra en la fracción PM_{2.5} pero puede también ser un componente importante de las UFP. Es un conocido compuesto cancerígeno y daña el tracto respiratorio, causando morbilidades y mortalidad prematura.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



GOBIERNO DE
MÉXICO

Investigaciones recientes indican que los UFP representan el riesgo más importante para la salud humana (Phairuang et al., 2024). Los UFP pueden inducir efectos tóxicos y están asociados a la aparición y exacerbación de enfermedades cardiovasculares (Vouitsis et al., 2023), estrés oxidativo pulmonar (Yu et al., 2024), daños en el cerebro humano (Calderón-Garcidueñas et al., 2022); y sellos neuropatológicos, incluida la esclerosis lateral amiotrófica en niños (Calderón-Garcidueñas et al., 2024). Estudios recientes han evaluado los efectos tóxicos de los UFP en monocultivos celulares a partir de la extracción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en filtros (Yang et al., 2024). Entre los efectos tóxicos detectados por la exposición de células en monocultivo a UFPs se encontraban la expresión de mediadores inflamatorios, el fallo de la función mitocondrial y la alteración de las membranas celulares con daños variables en función del tiempo de exposición (Yang et al., 2024).

Las UFP se forman tras nucleación, condensación o coagulación a partir de compuestos en fases gaseosas (Moreno-Ríos et al., 2022). La nucleación se debe a la emisión de COV biogénicos (Ehn et al., 2014); la condensación se genera después de la transferencia de fases gaseosas a partículas en modo de nucleación (Seigneur, 2019), y la coagulación se relaciona con la aglomeración de partículas tras la colisión (Kwon et al., 2020). Por lo tanto, está implícito que los UFP se originan a partir de la combustión o de procesos secundarios en la atmósfera (Lenssen et al., 2024; Tao et al., 2023; De Jesus et al., 2019; de Foy & Schauer, 2015). Por ejemplo, el 99% de las UFP relacionadas con fuentes de tráfico se encuentran en el rango de 10-415 nm para Milán, Londres y Barcelona (Rodríguez et al., 2007). Por otro lado, el recuento del número de partículas (PNC) está dominado por las UFP generadas por fuentes locales, mientras que las PM_{2.5} se atribuyen al transporte regional y a las condiciones meteorológicas locales (De Jesus et al., 2019). A pesar de la escasez de investigaciones sobre las UFP en los países en desarrollo, existen pruebas de que en el sudeste asiático la quema de biomasa y el tráfico de vehículos son las principales fuentes locales (Phairuang et al., 2022).

Las fuentes de UFP se dividen en tres grupos: naturales, artificiales e incidentales (Ermolin et al., 2018). Entre las fuentes naturales se encuentran las erupciones volcánicas, el polvo del desierto, los aerosoles de sal marina y los minerales de baja temperatura en suelos erosionados. Los UFP de ingeniería son sintéticos, y su uso en la construcción, piezas de automóviles y cerámica ha aumentado (Saleh, 2020). Las NPs se utilizan actualmente en revestimientos, pigmentos, cosméticos, hormigón y pinturas. Por lo tanto, pueden ser emitidas al medio ambiente, afectando al agua, el suelo y el aire. Estudios anteriores detectaron titanio y tungsteno nanoestructurados en el polvo de las calles vinculado a las emisiones vehiculares (Tou et al., 2022) y rutilo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

(TiO₂) como UFP en la atmósfera urbana de una ciudad del norte de México (Gallego-Hernández et al., 2020).

En el caso de Hermosillo, se cuenta con datos de una estación fija de los siguientes GEI y CCVC: ozono, carbono negro. Los datos con sensores corresponden con: ozono, dióxido de nitrógeno, y dióxido de carbono. Se presenta también información de PM₁₀, PM_{2.5}, caracterización de UFP, SO₂.

Antecedentes

En Hermosillo, la infraestructura existente para evaluar parámetros que indiquen calidad de aire se concentra en (i) el Observatorio Atmosférico que forma parte de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la Universidad Nacional Autónoma de México (RUOA) y que coordina el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, y (ii) el Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire (PEMCA) del Instituto Municipal de Ecología, perteneciente al H. Ayuntamiento de Hermosillo, ahora parte de la Agencia Municipal de Energía y Cambio Climático. En 2024 se constituyó el Laboratorio Nacional CONAHCYT sobre Atmósfera y Clima (LaNCAC) con el liderazgo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático y la participación de la Universidad de Sonora, la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, y el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. La RUOA se integra al LaNCAC y la Universidad de Sonora se encarga de apoyar en el mantenimiento de los equipos, integrando un equipo para medir carbono negro en el observatorio atmosférico de Hermosillo.

El PEMCA se desarrolló hasta el 2024 como parte del programa operativo anual del Instituto Municipal de Ecología (IME), dependiente de la Coordinación General de Infraestructura, Desarrollo Urbano y Ecología (CIDUE) del H. Ayuntamiento de Hermosillo. Su antecedente se atribuye a los estudios sobre la concentración de partículas suspendidas totales (PST) durante el período de 1990-1995 dirigidos por la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) y la entonces Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (actualmente SEMARNAT) en la ciudad de Hermosillo, Sonora. En dicho período se evaluaron cuatro zonas de la ciudad, con resultados que evidenciaron un exceso del nivel máximo permisible anual en todos los años del estudio. A partir de 1998 y con los mismos equipos utilizados en el período anteriormente señalado, el Ayuntamiento de Hermosillo retomó los muestreos sumando equipos para muestrear también partículas PM₁₀, haciendo pruebas piloto del sistema de muestreo durante dos años, por lo que a partir del año 2000 se declaró formalmente el programa como parte del Programa Operativo Anual (POA) de la entonces subdirección de Ecología



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

(actualmente IME). El programa tiene como objetivo evaluar el estado de la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo, Sonora, sin embargo, su alcance aún está limitado a la operatividad de equipos manuales de alto y bajo volumen mediante los cuales se determina solo la concentración de partículas suspendidas. Mediante la colaboración formalizada a través de convenios entre el IME e instituciones académicas como la Universidad de Sonora (UNISON), la Universidad Estatal de Sonora (UES) y el Colegio de Bachilleres del Estado de Sonora (COBACH), la red cuenta con tres equipos que miden PM10 y tres equipos que miden PM2.5 distribuidos en tres puntos de muestreo dentro del casco urbano. De estos equipos, al 2024 opera solo uno en la Universidad Estatal de Sonora. El programa ha estado en operación durante veinte años, y ha significado un esfuerzo extraordinario para la administración pública municipal, sin embargo, el recurso destinado al PEMCA con las carencias presupuestales municipales históricamente no ha sido suficiente para dotar al programa de mejores equipos y tecnología, por lo que no se tiene la posibilidad de medir otros contaminantes del aire muy importantes como lo son los gases efecto de invernadero (metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, vapor de agua) y los denominados contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) que además del metano (CH₄) y el ozono (O₃), se encuentran dentro de esta categoría al carbón negro y los hidrofluorocarbonos (HFC'S).

La UNAM estableció la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), para impulsar la investigación y la docencia de las ciencias atmosféricas en el país. A través de la interdisciplina y la cooperación institucional, se busca proveer de información relevante y confiable para estudiar los problemas emergentes y dar soluciones a los retos que enfrenta el planeta en materia de contaminación atmosférica, cambio climático, recursos hídricos, seguridad alimentaria entre otros. Los datos que se generan del proyecto de la RUOA son abiertos y se encuentran disponibles a la comunidad científica y al público en general a través de este sitio web de la red (<https://www.ruoa.unam.mx/>). La publicación de la información disponible en este sitio tiene fines exclusivamente académicos y por lo tanto la UNAM y los responsables académicos que participan en este proyecto no se hacen responsables de la información ni el uso que se les pueda dar. Además, se deberá reconocer explícitamente a la "Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la Universidad Nacional Autónoma de México".

Entre los objetivos de la RUOA se encuentran:

- Fortalecer la capacidad de observación de parámetros atmosféricos de alta calidad y relevancia para fomentar la investigación en áreas afines

- Proveer datos para la docencia y apoyar la formación de especialistas en áreas afines
- Establecer lineamientos en la medición de parámetros físicos, químicos, biológicos en las áreas de la meteorología, ciencias atmosféricas y ambientales de modo que sirvan como referencia para ésta y otras redes nacionales
- Establecer vínculos con entidades de la UNAM y otras instituciones de investigación en el país
- Fomentar la creación de una red instrumental permanente con capacidad de crecer a partir de esfuerzos compartidos entre todas las instituciones participantes
- Avanzar en el conocimiento fundamental y aplicado de las distintas disciplinas que involucran las ciencias de la atmósfera
- Difundir una cultura general sobre aspectos del clima, la contaminación, el estado del tiempo y las interacciones que participan entre las esferas terrestres

La red cuenta con 16 estaciones en diferentes ciudades de México. Sonora cuenta con un sitio, denominado Observatorio Atmosférico Hermosillo (ERNO-UNAM) que inicio operaciones el 22 de agosto del 2014. Este observatorio urbano está localizado en el interior del campus de la Universidad de Sonora (UNISON). Con coordenadas 29.081385° N, 110.97061° W, altitud 154 msnm. Colinda al norte y noreste con los campos deportivos de la universidad, además de otras edificaciones circundantes de tipo residencial y comercial, la mayoría de uno a dos pisos de altura que no representan interferencia para la toma de datos.

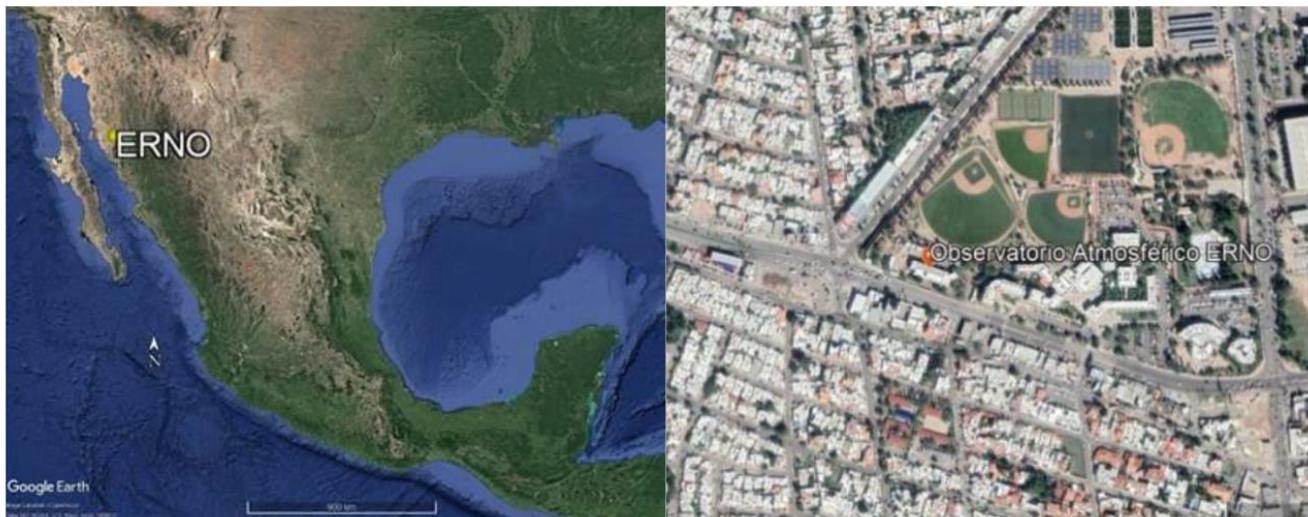


Figura 1. Localización del Observatorio Atmosférico de la RUOA-Hermosillo en el techo del edificio del Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste de la UNAM en el campus de la Universidad de Sonora.

El Observatorio Atmosférico Hermosillo de la RUOA (estación: ERNO-UNAM) cuenta con equipo de monitoreo para meteorología, Calidad del aire, Gases de Efecto Invernadero (GEI), capa límite, campo eléctrico con un total de 19 instrumentos, con sus accesorios para procesamiento de datos. Los equipos se describen en la Tabla 1 y se muestran en las figuras 2 y 3.



Figura 2. Entrada de caseta de observatorio atmosférico en Hermosillo. Caseta y torre de observatorio atmosférico Hermosillo, con instrumentos de medición. Fácil acceso a azotea de edificio de Instituto de Geología Estación Regional del Noroeste de la UNAM por escalera de servicio. A) Anemómetro, B) pararrayos, C) piranómetro, D) estación meteorológica compacta, E) termohigrómetro, F) anemómetro de prueba, G) analizador PM2.5 , H) analizador PM10, I) estación meteorológica de prueba, J) pluviómetro y K) ceilómetro.

En el caso del anemómetro de prueba y la estación meteorológica de prueba, corresponden a un sensor integrado (Mark II) que la empresa privada Arable Inc en California USA instaló en mayo 2021 para comparar su desempeño con instrumentos

de mayor calidad. Su propósito es con fines agrícolas. Si es necesario se puede pedir acceso a los datos, hasta el momento no se han utilizado en la RUOA.

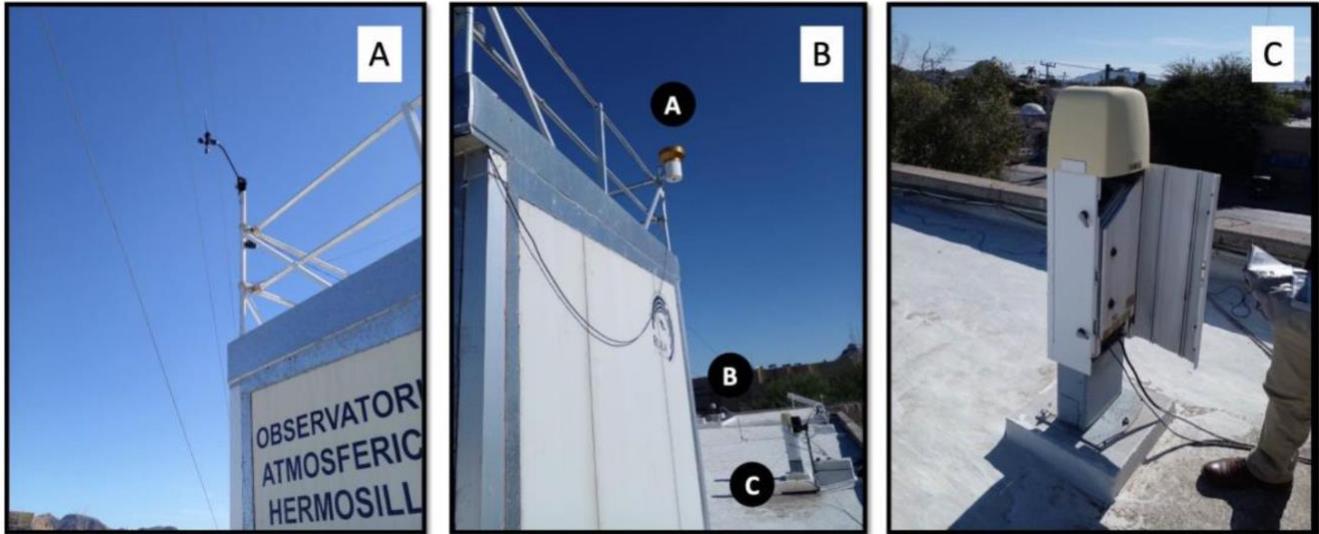


Figura 3. A) Vista de anemómetro de prueba colocado provisionalmente. B) Vista de pluviómetro al costado (A) izquierdo de caseta, instrumento de medición de campo eléctrico (B) y ceilómetro (C).

En 2021 inicia el desarrollo del proyecto 317557 “Ciudades resilientes al cambio climático: colaboración interdisciplinaria para la recuperación y restauración del ecosistema del desierto” dentro de los Programas Nacionales Estratégicos del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología-CONAHCYT, Cambio Climático y Energía. Con el financiamiento del proyecto, se atendieron diversas necesidades relacionadas con el mantenimiento de la infraestructura del observatorio RUOA. Se adquirieron consumibles y equipos menores necesarios para garantizar la operación de la estación, incluyendo un set de calibración para los monitores de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$. Además, se reemplazó una bomba de vacío dañada en el analizador de SO_2 y se adquirió una bomba adicional para el analizador de NO_x . En cuanto a equipo mayor, y siguiendo la recomendación de la Organización Mundial de la Salud, se incorporó un extinciómetro fotoacústico PAX con una longitud de onda de 870 nm, diseñado para realizar mediciones en tiempo real de Carbono Negro.

Tabla 1.

Equipo de medición instalado en el observatorio atmosférico RUOA en Hermosillo.

	Instrumento	Fabricante	Modelo	Localización en torre o caseta		Estado Actual
				Altura ^a	Orientación ^b	
Meteorología	Termohigrómetro	Vaisala	HMP 155A	4.5 m	0°	
	Barómetro	Vaisala	PTB 110	Interior gabinete	--	
	Piranómetro	Hukseflux	SR20-T1	8.2 m	180°	No hay datos
	Anemómetro	Gill	Windsonic4	8.2 m	0°	
	Pluviómetro	Texas Electronics	TE-525MM	0.9 m	--	
	Registrador de datos	Campbell Sci.	CR1000	Interior gabinete	--	
	Módulo conexión a ethernet	Campbell Sci.	NL 115	Interior gabinete	--	
	Panel solar 20 W			4.5 m	180°	
	Batería 12 V 7 Ah			Interior gabinete	--	
	Regulador de carga	Campbell Sci.	PS100	Interior gabinete	--	
	Gabinete	Stahlin	RJ1816 HPL	Interior caseta	--	
Termohigrómetro interior	Campbell Sci.	CS215	Interior caseta	--		
Calidad del aire	Analizador de NO-NO2-NOx	Thermo Scientific	42i	Interior caseta		Datos Variantes
	Analizador de O3	Thermo Scientific	49i	Interior caseta	--	Correcto
	Analizador de CO	Thermo Scientific	48i	Interior caseta	--	Datos Variantes
	Analizador de SO2	Thermo Scientific	43i	Interior caseta	--	Correcto
	Analizador de PM10	Thermo Scientific	FH62C14	Interior caseta	--	Correcto
	Analizador de PM2.5	Thermo Scientific	FH62C14	Interior caseta	--	Datos Variantes
	Muestreador de partículas PM10	ThermoScientific	EPA PM10 inlet	2.5 m	--	
	Muestreador de partículas PM2.5	ThermoScientific	EPA PM10 inlet c/VSCC (Very Sharp-Cut Cyclone)	2.5 m	--	
	Estación meteorológica compacta	Lufft	WS600-UMB	1.7 m		
	Generador de aire cero	Thermo Scientific	111	Interior caseta	--	
	Calibrador de gases	Thermo Scientific	146i	Interior caseta	--	
Registrador de datos	Recordum Messtechnik GmbH	airQlog	Interior caseta	--		
GEI	Analizador de CO2, CH4, CO, H2O*	Picarro Inc.	G2401	Interior caseta		No hay datos
	Toma de muestra GEI	--	--	1.5 m	--	Ultima lectura 2018
Aerobiología	Muestreador de esporas y pólen**	Burkard Manufacturing Co	7-day volumetric spore trap	0 m	--	Deshabilitado
Capa limite	Ceilómetro	Vaisala	CL 31	0 m	--	No hay datos
Campo eléctrico	Monitor de campos eléctricos atmosféricos	Boltek Corporation	EFM 100	0 m	--	Ultima lectura 2020
Red	Switch de red	Cisco Systems	SF200-24	Interior caseta	--	

^a Las alturas están expresadas en metros por encima del suelo de asentamiento de la torre (techo de edificio o caseta)

^b Las direcciones se expresan en grados desde el norte geográfico, en sentido dextrógiro.



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

Mediciones con estación fija

Los datos mostrados a continuación corresponden a las mediciones de la estación del Red Universitaria de Observatorios Ambientales (RUOA) localizada en la estación regional del noroeste (ERNO) de la UNAM, en Hermosillo Sonora del periodo enero-octubre 2024. En el año 2023 se aprobó la conformación del Laboratorio Nacional de Atmósfera y Clima (LANCAC) con la participación de la RUOA y la Universidad de Sonora.

PM₁₀

La Organización Mundial de la Salud considera a la PM₁₀ como contaminante atmosférico criterio ya que pueden contener hollín (BC), polvo, metales, cemento y polen y pueden causar estrés oxidativo, inflamación y daño genotóxico. Algunos de los efectos a la salud incluyen: dificultad para respirar, tos, irritación en nariz, garganta y ojos, fatiga. Estas partículas pueden ser de origen natural o antrópico. Las principales fuentes son: erosión y transporte de polvo, emisiones industriales, vehículos, construcción, combustión o incendios. Referente a los datos obtenidos correspondientes al año 2024 para material particulado menor a 10 micras (PM₁₀), se observa una disminución general en los valores respecto a los años anteriores, con un promedio anual de 13.3. La caída de mediciones se observa principalmente los meses de enero a junio. Para los meses de julio y septiembre no se obtuvieron datos validos debido a problemas de funcionamiento del equipo. Sin embargo, el promedio anual se mantuvo similar (39.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 2023).

Tabla 2. Promedios mensuales por año recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, en el periodo 2015 a 2024 partículas suspendidas PM₁₀. Valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Mes	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Promedio mensual
Enero	46.5	47.6	38.1	55.1	37.4	48.1	42.2	43.3	50.6	26.5	43.5
Febrero	33.6	52.6	40.1	38.3	32.2	40.5	49.5	40	39.9	18.4	38.5
Marzo	29.6	44.1	46.9	38.4	35.3	25.3	43.1	44.7	33.9	15.2	35.7
Abril	36.8	40.4	45.4	47.7	31.9	28.2	42	38	41.5	15.4	36.7
Mayo	32.4	39.4	39.5	46.1	29.9	33.1	42.7	42	39.8	17.5	36.2
Junio	76.8	45.4	44.5	41.3	32.8	35.7	43.6	34.2	34.3	11.5	40.0
Julio	81.5	24.5	25.6	-	26.1	24.7	20.1	21.8	27.8	-	31.5
Agosto	27.4	24.6	25.6	-	29.8	25	20.5	19.8	21.7	-	24.3
Septiembre	28.4	30.3	30.5	-	21.1	35.7	25.2	24.1	24.8	-	27.5
Octubre	35.6	44.2	48.8	-	40.6	49.9	44	33.5	28.2	38.5	40.4
Noviembre	48.9	53.9	60.3	48.8	-	56	52.3	45.8	32.7	nd	49.8
Diciembre	55.6	54.9	54.2	44.6	44.7	51.5	44.5	52.8	nd	nd	50.4
Promedio anual	44.4	41.8	41.6	45	32.9	37.8	39.1	36.7	34.9	13.3	37.9

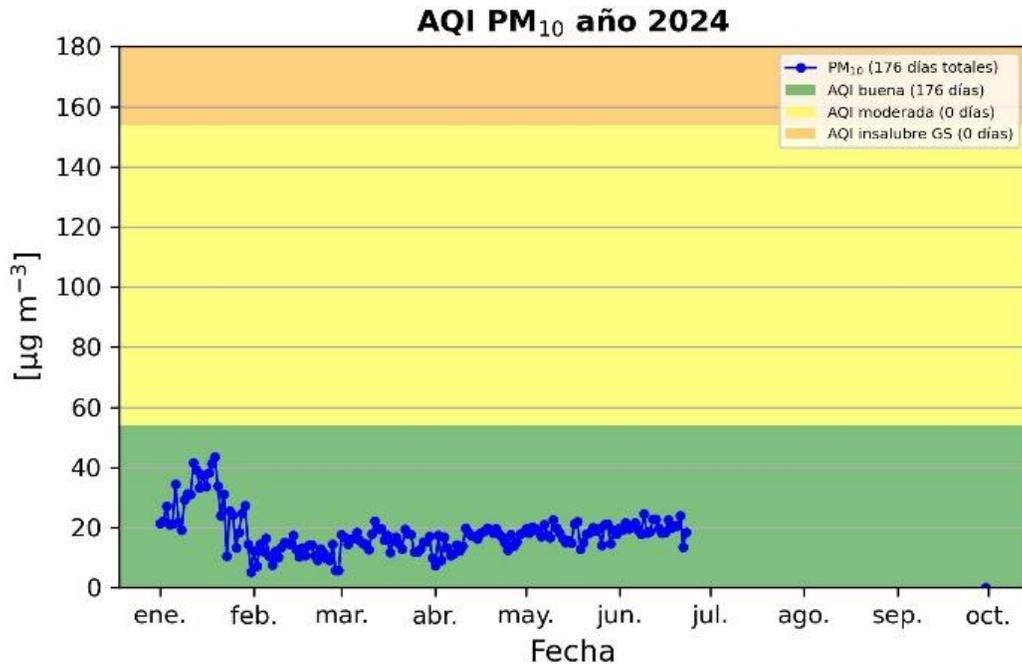


Figura 4. Serie de tiempo de datos recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, periodo enero-septiembre del 2024 para partículas suspendidas PM₁₀, promedios diarios. Valores en µg/m³. Colores expresa el índice de calidad de aire que es una herramienta de información de la EPA.



PM_{2.5}

En relación con la medición del material particulado menor a 2.5 micras (PM_{2.5}), se observa que se dispone de datos completos a lo largo de todo el año 2024. Al igual que para el PM₁₀, se percibe una tendencia de disminución de las concentraciones del particulado, aunque no tan evidente que la anterior. En términos generales (2015-2024), los valores más altos de concentración de PM_{2.5} se registran en los meses de junio y julio, mientras que los meses con las concentraciones más bajas corresponden a agosto y septiembre. El promedio mensual de las concentraciones muestra una clara tendencia a la baja, con un promedio anual de 8.7 en 2024, el valor más bajo registrado hasta la fecha, en comparación con los promedios anuales anteriores.

Tabla 3. Promedios mensuales por año recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, en el periodo 2015 a 2024 partículas suspendidas PM_{2.5}. Valores en µg/m³.

Mes	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Promedio mensual
Enero	8	12	9.6	12.8	-	-	-	12.6	-	10.2	10.9
Febrero	8.4	10.8	8.7	9.4	-	-	-	12	-	8.0	9.6
Marzo	7.5	9.3	8.8	9.9	-	-	-	9.4	-	6.8	8.6
Abril	8.5	8.7	9.4	10.2	-	-	-	11.4	-	9.6	9.6
Mayo	8.5	8.6	8.1	10	-	-	-	10.4	-	11.7	9.6
Junio	38.2	11.7	10.1	18.8	-	-	14.9	13.5	-	10.9	16.9
Julio	40.6	9.2	8.5	-	-	-	6.9	-	-	7.6	14.6
Agosto	7.9	7.6	7.1	-	-	-	6.6	-	-	4.4	6.7
Septiembre	7.7	8.4	6.7	-	-	-	8.4	-	-	7.0	7.6
Octubre	8.5	10	9.1	-	-	-	11.5	-	12	10.3	10.2
Noviembre	10.2	9.9	10.4	-	-	-	12.5	-	13.9	nd	11.4
Diciembre	16.4	13.2	13.8	-	-	-	12.1	-	nd	nd	13.9
Promedio anual	14.2	9.9	9.2	11.8	-	-	10.4	11.5	12.9	8.7	10.8

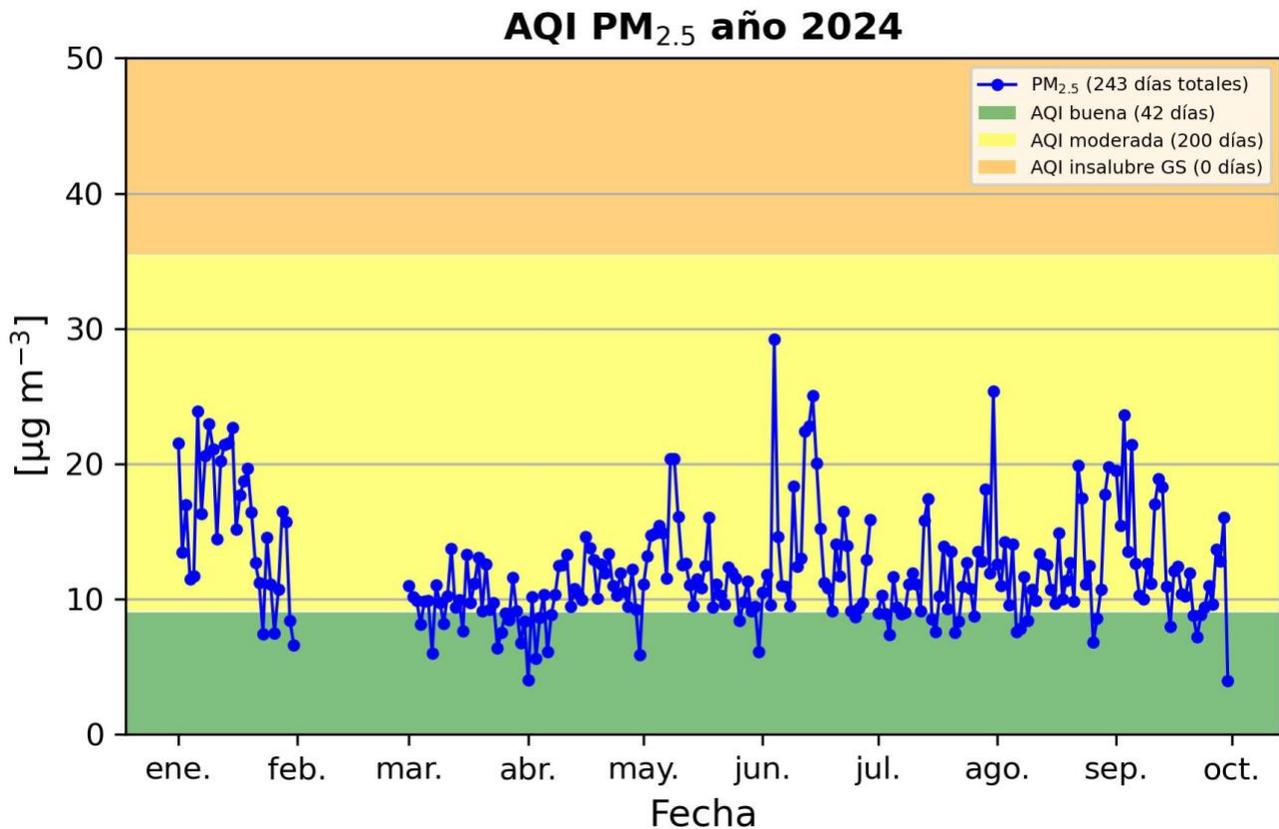


Figura 5. Serie de tiempo de datos recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, periodo enero a septiembre del 2024 para partículas suspendidas PM_{2.5}, promedios diarios. Valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Colores expresa el índice de calidad de aire que es una herramienta de información de la EPA.

Ozono (O₃)

El ozono es un gas de efecto invernadero, que puede irritar e inflamar las vías respiratorias, causa tos, y empeora los cuadros de asma o bronquitis. Este contaminante se forma en la atmósfera a partir de reacciones químicas complejas de compuestos emitidos por vehículos, plantas industriales y la temperatura elevada. El ozono es un poderoso agente oxidante y por el efecto de la temperatura alcanza sus valores máximos en días soleados, calientes y calmos (sin viento).

Es importante indicar la diferencia entre el ozono a nivel peatonal y el ozono en la estratosfera. El ozono a nivel peatonal afecta directamente la salud humana y se genera por una reacción de compuestos de nitrógenos, orgánicos volátiles y temperatura alta. Estos compuestos se asocian a emisiones vehiculares, por lo que las personas que viven en ciudades en zonas áridas y con alto tráfico son vulnerables a esta exposición. El ozono a nivel



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

peatonal también daña a las plantas, contribuye a la pérdida de biomasa afectando indirectamente los suelos al reducir la cubierta de vegetación.

El ozono estratosférico ocurre en una capa de la atmósfera lejana a la gente. Reduce la cantidad de luz ultravioleta que ingresa a la Tierra y nos protege de dicha radiación que afecta a la vida. En el caso de este informe, nos referimos al ozono a nivel superficial que afecta a la salud humana. Las mediciones presentadas de la estación fija de la RUOA ubicada a 6 metros sobre la superficie de calle y las mediciones de los recorridos con sensores a nivel peatonal (menos de dos metros) se consideran mediciones superficiales.

Según la norma mexicana NOM-020-SSA1-2021 (NOM-20, 2021), el valor límite promedio en 24 horas debe ser de 90 ppb y el límite establecido en un promedio de 8 horas es de 65 ppb. La OMS, en su informe sobre las guías de calidad del aire (WHO, 2021), recomienda no superar la concentración de 51 ppb en un promedio de 8 horas.

En términos generales, se observa una alta variabilidad en las concentraciones a lo largo del año y entre los diferentes años. El año 2024 muestra una disminución en las concentraciones de contaminantes en comparación con los promedios anuales de años anteriores, con un promedio anual de 21.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones promedio más altas se registran en los meses de abril, mayo y junio, mientras que julio de 2022 presenta el pico más alto con 36.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, los valores más bajos se observan en diciembre, enero y febrero. El ozono es producido en zonas urbanas por reacción de compuestos de nitrógeno y volátiles orgánicos con alta temperatura por lo que es de esperar que los valores disminuyan en los meses de menor temperatura como diciembre, enero y febrero.

Tabla 4. Promedios mensuales por año recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, en el periodo 2015 a 2024 para ozono (O_3). Valores en ppb.

Mes	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Promedio mensual
Enero	16.7	16.8	10.4	19.4	16.4	16	18.8	18.3	17.9	18.1	16.9
Febrero	20.2	20.5	21.9	22.2	22.9	23.5	22.3	30.3	22.4	21.3	22.8
Marzo	30.2	27.2	28	28.8	28.9	25.1	30.2	30.4	26.5	28.5	28.4
Abril	32.3	33.2	34.6	33.4	36.6	33.3	34.7	31.8	32.5	33.0	33.5
Mayo	30.8	30.3	35.2	32.7	34.8	32.8	30.8	31	31.3	32.1	32.2
Junio	34.7	20	28.9	26.7	28.4	27.6	29.4	36.9	37.9	13.2	28.4
Julio	29.2	19.3	26.2	-	26.3	23.9	30.7	37.9	34.5	21.0	27.7
Agosto	33.4	12.9	22.7	-	25.1	22.4	29	-	34.4	20.5	25.0
Septiembre	22.1	12	20.2	-	16.9	17.3	24.6	-	20.7	16.9	18.8
Octubre	21.5	13.2	23.3	-	18.6	17.8	23.5	23.9	25.9	9.8	19.7
Noviembre	15.8	13.4	16.2	17.3	18.1	19.6	20.1	22.3	22.8	np	18.4
Diciembre	15.1	7	18.8	17.9	16.116	18.7	16	13.4	nd	np	15.4
Promedio anual	25.2	18.8	23.9	24.8	24.1	23.2	25.8	27.6	27.9	21.4	24.3



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

Los datos indican que el 2023 fue el año con mayor concentración de ozono. El promedio anual menor se dio en el 2016. Históricamente, el mes con la mayor concentración de ozono es abril, seguido de mayo. El mes con la menor concentración de ozono es diciembre. La generación de ozono tiene una relación directa con las emisiones vehiculares y la temperatura. La tabla 5 muestra que en efecto, la menor temperatura ocurre en diciembre, coincidiendo con el menor valor de ozono.

Tabla 5.

Temperatura media mensual en grados centígrados (°C) por periodo.

PERIODO	MES												AÑO
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
2014	ND	33	30.5	27.6	21.9	17.8	26.2						
2015	18.1	21.5	23.8	24.8	25.9	32.2	31.8	32.5	ND	26.3	20	16.3	24.8
2016	16.8	21.9	22.7	24.7	26.9	32.9	32.9	31.8	30.1	29.3	22.8	17.4	25.9
2017	17	20	24	25.7	26.8	31.9	31	32.1	29.7	29.4	24.1	18.6	25.9
2018	19.8	19.1	22.1	26.1	28.4	32	32.8	30.8	30.8	25.4	19.9	16.9	25.3
2019	16.6	16.4	21.1	24.8	24.9	31.5	32.9	32.4	28.7	26.3	21.9	16.7	24.5
2020	16.4	18.2	19	24.1	29.1	32.5	33	33.6	32.4	28.4	22.8	16.7	25.5
2021	16.1	18	20.1	25.5	28.1	32.6	23.7	31.2	29.5	25.8	23.9	ND	21.6
2022	17.5	17.6	21	25.4	28.3	32.1	32.1	30	29.9	25.3	18.4	17	24.6
2023	15.2	16.3	20.3	24	26.8	31.6	34.2	33.7	32.6	29.1	26.9	ND	26.4
2024	19.1	18.6	20.2	23.8	28.2	32.6	33.6	33.2	25.5	27.4	19.3	18.1	25.0
2025	14.9	19.7	ND	ND	ND	ND							

*ND: Datos no disponibles

La figura 6 muestra 804 datos válidos para 2024 para ozono expresados en función del índice de calidad de aire (AQI). 793 datos caen en el campo de calidad buena con 11 datos en calidad moderada. Los valores menores ocurren hacia los meses de invierno, mientras que los picos máximos ocurren entre abril y junio.

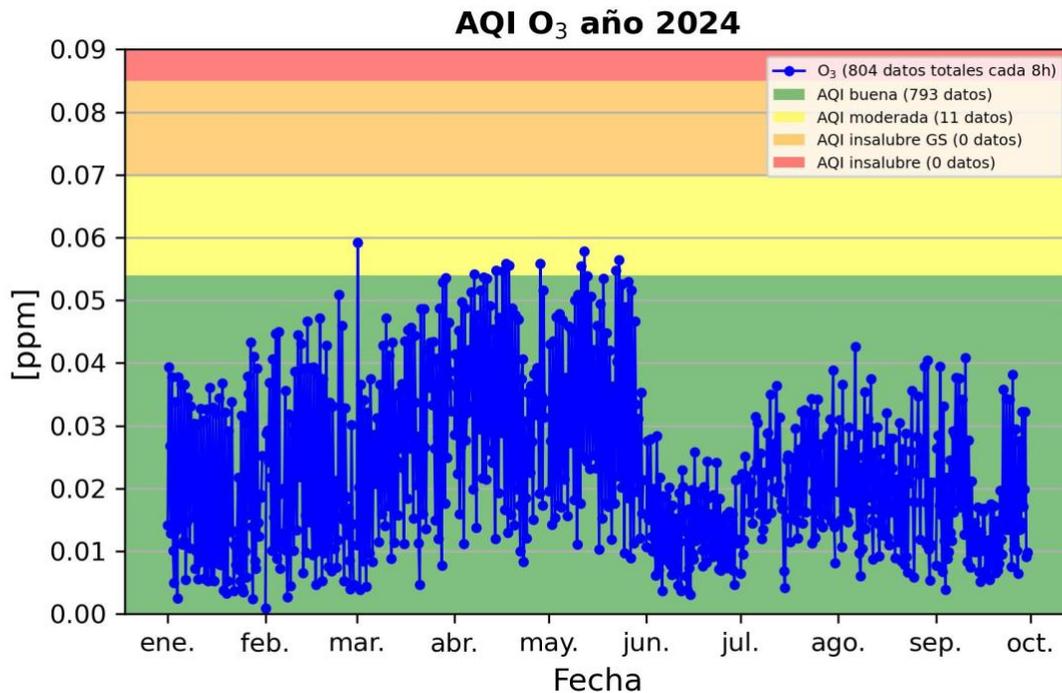


Figura 6. Serie de tiempo de datos recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, periodo enero a septiembre del 2024 para concentración de ozono en el aire, promedio 8 horas. Valores en ppm. Colores expresa el índice de calidad de aire que es una herramienta de información de la EPA.

Bióxido de azufre (SO₂)

El SO₂, ya sea de origen volcánico o antropogénico, es un gas que cuando está presente en altos niveles en el ambiente altera la calidad del aire e incide negativamente en la salud respiratoria y cardiovascular de la población, incluso a grandes distancias del foco de emisión. El SO₂ se asocia a fuentes industriales y puede producir lluvia ácida, generando daños a cultivos y fauna. La normatividad mexicana establece máximos permisibles para el SO₂ de 288 µg/m³ o 0.110 ppm en promedio en 24 horas, una vez al año. La figura 7 muestra que el SO₂ medido con estación fija en Hermosillo no excede estos valores y el AQI se considera calidad buena basado en 3447 datos medidos.

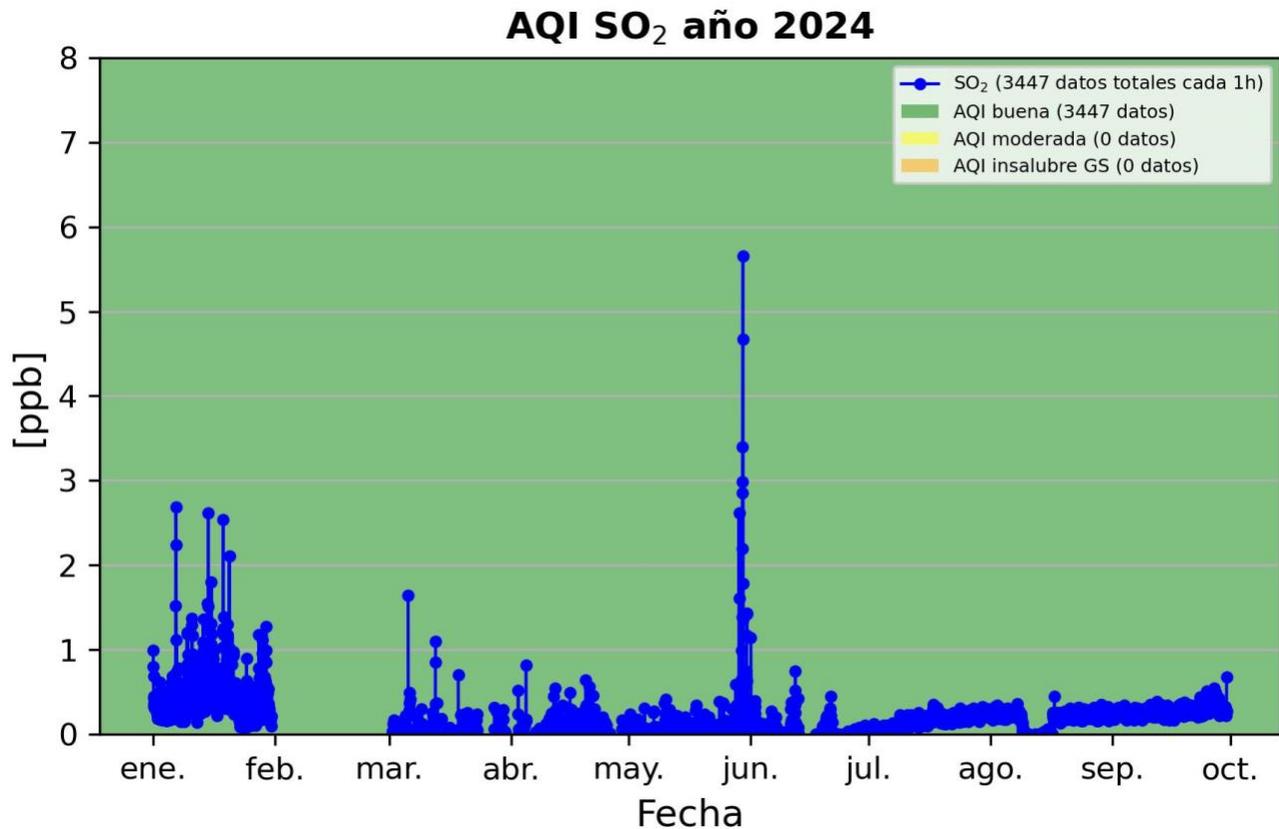


Figura 7. Serie de tiempo de datos recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, periodo enero a septiembre del 2024 para concentración de bióxido de azufre en el aire, promedio 1 hora. Valores en ppm. Colores expresa el índice de calidad de aire que es una herramienta de información de la EPA.

Monóxido de carbono (CO)

El CO es un gas producto de la combustión de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas, gasolinas). Las fuentes comunes son los tubos de escape de los automóviles, estufas, hornos, calentadores de gas, generadores. Dentro de los efectos en la salud se incluye la reducción de la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, afectando al corazón y cerebro. Causa alteraciones neurológicas y cardíacas. La figura 8 muestra los niveles de CO medidos en 2024 para Hermosillo. El AQI indica una calidad moderada para 26 mediciones realizadas en febrero marzo, lo que puede reflejar un evento anómalo de combustión. Por otro lado, 642 datos indican calidad buena.

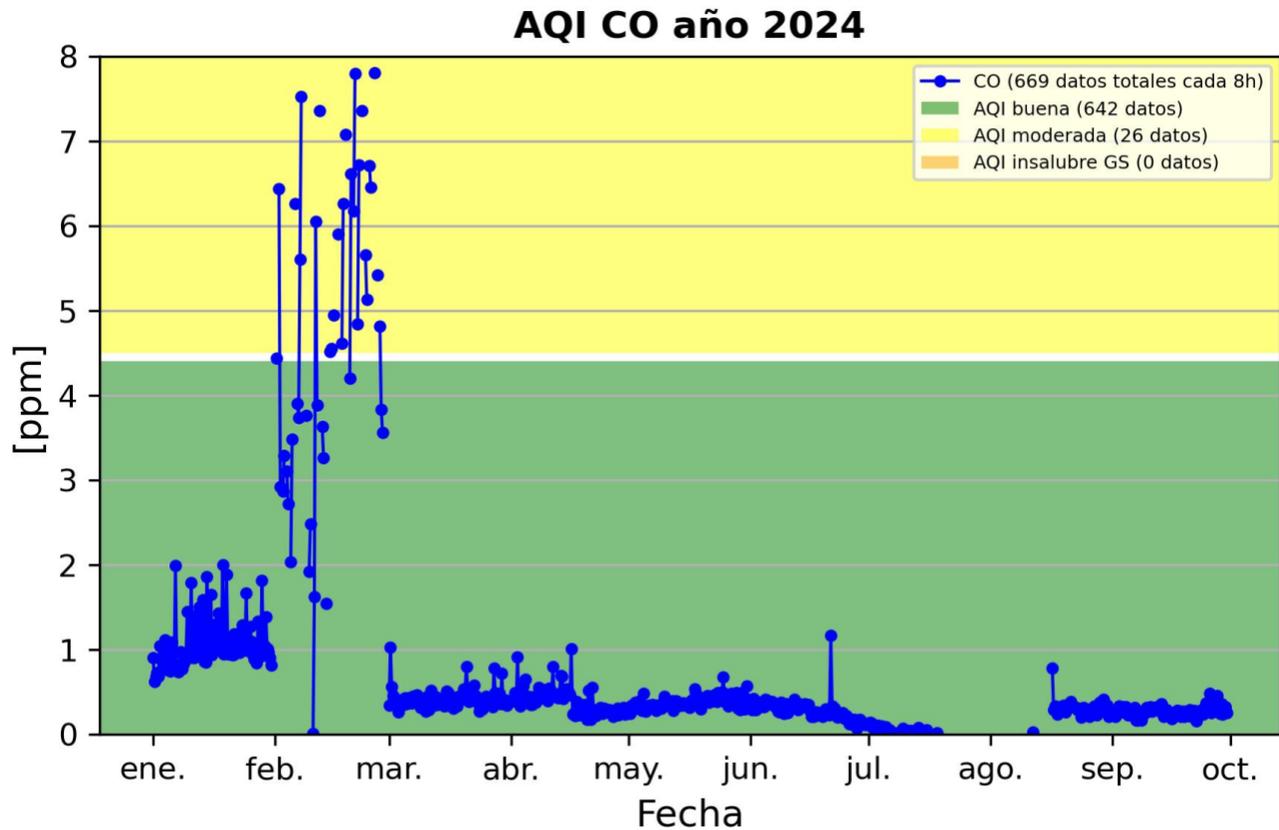


Figura 8. Serie de tiempo de datos recabados de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, periodo enero a septiembre del 2024 para concentración de monóxido de carbono en el aire, promedio 8 horas. Valores en ppm. Colores expresa el índice de calidad de aire que es una herramienta de información de la EPA.

Carbono Negro (BC)

Carbono negro (BC), es generado por la combustión incompleta de biomasa y combustibles fósiles a través de procesos naturales y actividades antropogénicas. La OMS reconoce la importancia de medir y controlar el BC como parte de las estrategias para mejorar la calidad del aire y mitigación en el cambio climático. Aunque no existe regulación directa para el BC, las guías de calidad del aire emitidas por la OMS, lo consideran como un marcador clave para la determinación de la contaminación por material particulado menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) y generador de implicaciones en salud y clima. El BC calienta la atmósfera porque absorbe la luz exacerbando el calentamiento del aire y superficies. Este contaminante afecta los



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



GOBIERNO DE
MÉXICO

patrones climáticos y los ciclos en los ecosistemas. El BC tiene un impacto de calentamiento 1500 veces más fuerte que el CO₂ por unidad de masa. La vida media del BC en la atmósfera es de 4 a 12 días y las principales fuentes emisoras son: energía doméstica, transporte, producción industrial, quema agrícola, quema de basura, combustibles fósiles. El carbón negro contribuye al calentamiento al ser muy eficaz para absorber la luz y calentar su entorno.

El BC contribuye al calentamiento al convertir la radiación solar entrante en calor, de la misma manera que las superficies de asfalto crean islas de calor en las zonas urbanas. El BC también influye en la formación de nubes y afecta el clima regional y los patrones de lluvia. A la fecha no existe un consenso para establecer límites para el BC, pero la Organización Mundial de la Salud ha emitido recomendaciones para la reducción de sus emisiones.

Como parte de la estrategia de adquisición de infraestructura para la medición de contaminantes climáticos de vida corta, se incorporó el equipo PAX (Photothermal Absorption Extinctionmeter) de la marca Drop Measurements Technologies, el cual fue instalado en la caseta RUOA Hermosillo. Este instrumento está diseñado para proporcionar mediciones en tiempo real de las propiedades ópticas de las partículas suspendidas en el aire. El equipo emplea un nefelómetro para medir el coeficiente de dispersión de la luz (Bscat) y un micrófono de alta sensibilidad para detectar las perturbaciones térmicas inducidas por el calentamiento de las partículas que absorben luz. Estas mediciones permiten cuantificar el coeficiente de absorción (Babs) mediante un láser de diodo con una frecuencia de 1500 Hz y una longitud de onda de 870 nm. Este equipo opera con un flujo de muestreo de 1.0 L/min y cuenta con un separador ciclónico para partículas PM_{2.5} en la línea de muestreo, siguiendo la configuración estándar utilizada en otras estaciones de la red.

La Figura 9 muestra la presencia del BC en la atmósfera de Hermosillo. No se puede establecer un máximo permisible pero se identifica su presencia con tendencia a aumentar de septiembre a diciembre.

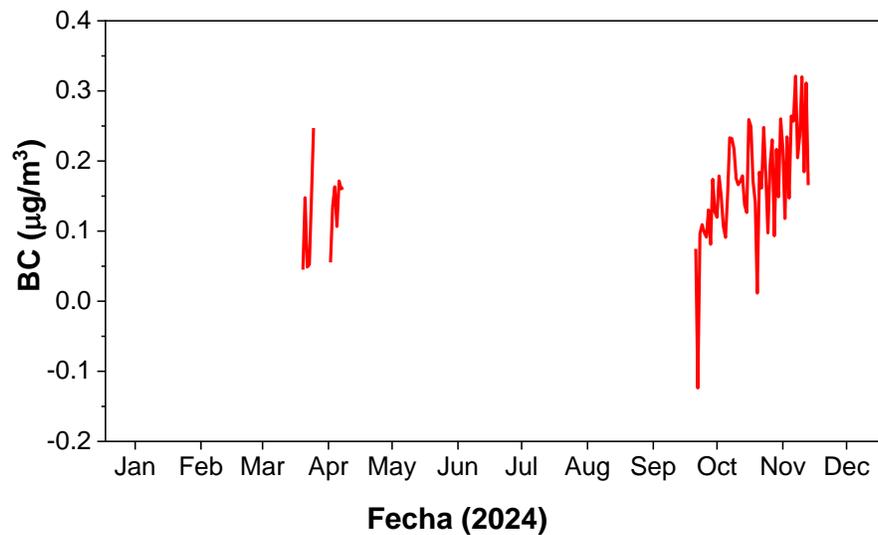


Figura 9. Serie de tiempo de datos recabados del equipo PAX (Photothermal Absorption Extinctionmeter) instalado en la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora, periodo enero a noviembre del 2024 para concentración de carbono negro en aire, promedio diario. Valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tendencias de contaminantes estudiados en base a datos de la estación fija-RUOA

El ozono troposférico o a nivel peatonal es un contaminante criterio que no se emite directamente al aire. Es creado por reacciones químicas de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC) con la luz solar. Esto pasa cuando estos contaminantes se emiten por autos, plantas eléctricas, refinerías, industrias, plantas químicas. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, el ozono puede alcanzar sus niveles más altos en zonas urbanas en los meses de verano, sin embargo también puede incrementarse durante el invierno y ser transportado por viento a otras áreas más sensibles.

El ozono puede complicar enfermedades respiratorias como el asma y también afecata a la vegetación, en especial durante su crecimiento.

El promedio anual de ozono disminuyó considerablemente en el año 2024. A partir de la pandemia (2020) el ozono seguía una tendencia al aumento. Debido a que el ozono se puede generar por reacciones de compuestos de nitrógeno y orgánicos volátiles con la temperatura, es importante revisar la causa de esta disminución para que en los años siguientes se continúen con las medidas que permitieron este descenso en la concentración.

Ozono



Figura 10. Serie de tiempo del promedio anual de la concentración de ozono obtenidos de la estación RUOA localizada en Hermosillo Sonora. Valores en ppb.

El ozono tiene una tendencia en variación horaria con un aumento durante los doce meses del año entre las 6 am y las 4 pm. La gráfica fue generada para todos los años estudiados (2015-2023). Este gráfico puede ayudar a emitir recomendaciones para realizar actividades físicas en exteriores en los meses principalmente de invierno, ya que es posible que parte de la población expuesta sufra complicaciones en enfermedades respiratorias por exposición al ozono, en especial en los meses de menor temperatura.

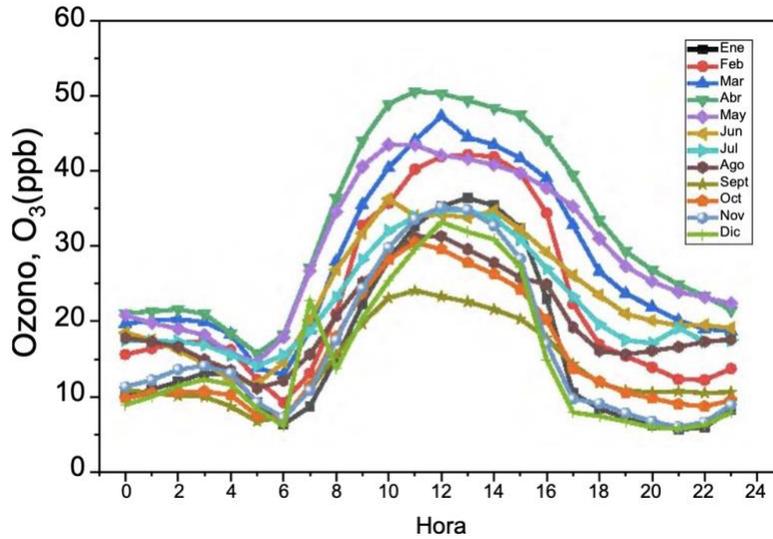


Figura 11. Tendencia horaria del ozono para los años por meses enero-diciembre 2015-2023.

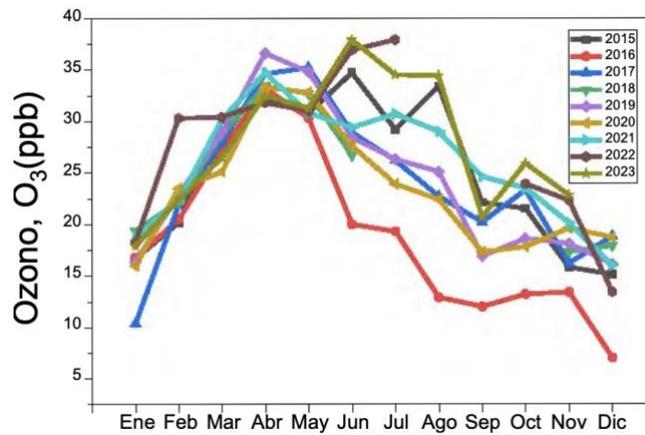


Figura 12. Tendencia mensual del ozono para los años estudiados.

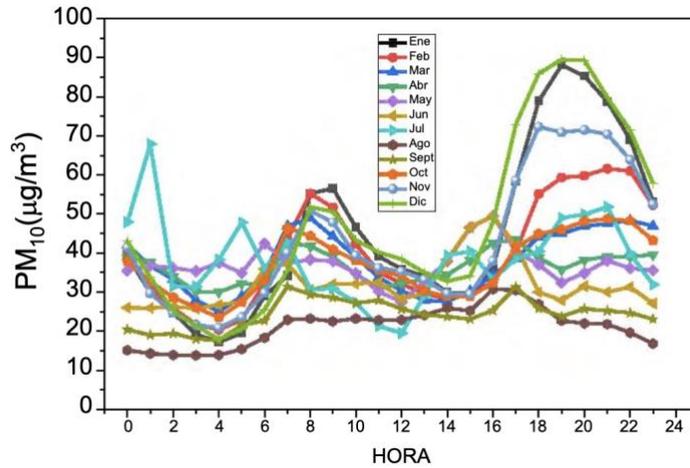


Figura 13. Grafica horaria por mes para el PM_{10} . Con tendencia de aumento en septiembre con un valor máximo en el mes de noviembre y descenso hasta marzo.

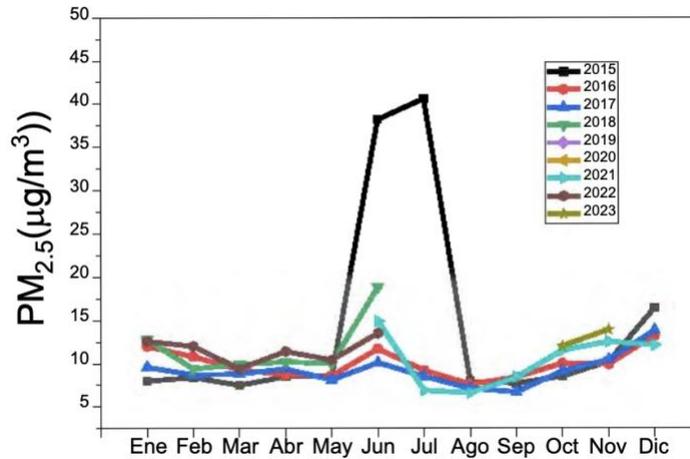


Figura 14. Grafica promedios mensuales para el PM_{10} . 2015-2023

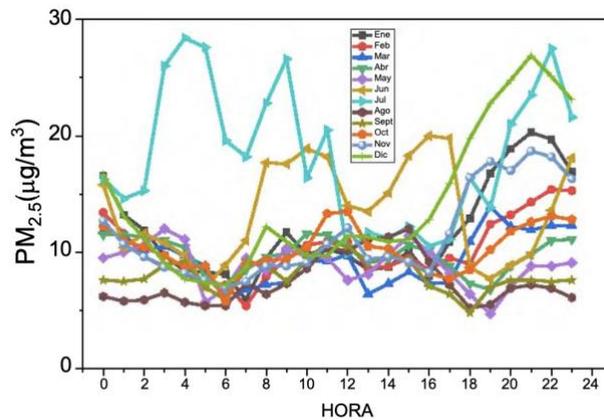


Figura 15. Gráfica promedios horaria por mes para el PM_{2.5}. 2015-2023

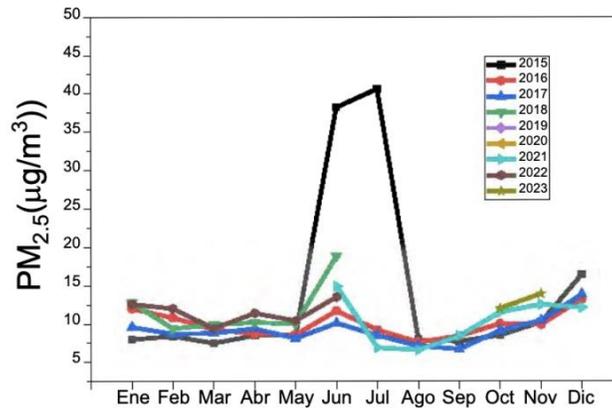


Figura 15. Gráfica promedios mensuales para el PM_{2.5}. 2015-2023

Monitoreo de fuentes difusas o de área y la identificación de fuentes puntuales

Para identificar fuentes puntuales y difusas o de área, de contaminantes criterio se utilizaron sensores en recorridos en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Para esto, se realizó una colaboración entre la Procuraduría Ambiental del Estado de Sonora (PROAES), la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES) y la Universidad de Sonora (UNISON).

El Sniffer4D es un sensor que proporciona información de la contaminación del aire y provee de mapas para identificación de fuentes. El equipo está diseñado para plataformas móviles, adaptable para su montaje en drones o vehículos terrestres, permite medir en tiempo real una amplia gama de contaminantes ambientales, incluyendo gases como CO, CO₂, SO₂, O₃ + NO₂ y VOCs, gases inflamables (CxHx) así como material particulado (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀). Además, los datos proporcionados son georreferenciados, integrándolos en mapas. El software Sniffer4D Mapper permite visualizar la distribución espacial en tiempo real y la información es particularmente útil para los tomadores de decisiones.

Tabla 6.

Especificaciones técnicas del equipo Sniffer 4D.

Contaminante	Rango de detección	Límite de detección
CO (Monóxido de carbono)	0-11 ppm	4 ppb
CO ₂ (bióxido de carbono)	0-1000 ppm	70 ppb
SO ₂ (Dióxido de azufre)	0-100 ppm	750 ppb
O ₃ (Ozono) + NO ₂ (Dióxido de nitrógeno)	0-11 ppm	5 ppb
VOCs (Compuestos orgánicos volátiles)	0-50 ppm	1 ppb
C _x H _y (gases inflamables)	0~5%VOL (0~100%LEL) metano, o 0~2%VOL propano	0.01%
PM1 (Partículas <1 µm)	0-1000 µg/m ³	1 µg/m ³
PM2.5 (Partículas <2.5 µm)	0-1000 µg/m ³	1 µg/m ³
PM10 (Partículas <10 µm)	0-1000 µg/m ³	1 µg/m ³

A partir de la firma de los convenios con la Procuraduría Ambiental y con la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Sonora fue posible realizar recorridos semanalmente para el monitoreo de temperatura, humedad, TVOC, SO₂, CO, O₃+NO₂, PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, C_xH_y/Flammable, CO₂. Se planteo un diseño de recorridos a realizarse durante seis meses para tener una idea de la distribución general de fuentes en la ciudad. Los datos fueron procesados de forma separada por personal de PROAES y UNISON, para poder cotejar posteriormente.



Figura 17. Sensor Sniffer 4D utilizando montura para vehículos terrestres.



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

El uso de esta tecnología nos permitió obtener los siguientes tipos de información:

Información sobre contaminantes atmosféricos locales: Normalmente a nivel de ciudad o distrito, sin información sobre la altitud y con baja resolución espacial. Sólo revela la distribución de los contaminantes en zonas muy extensas (por ejemplo, a escala nacional).

Información hiperlocal sobre contaminantes atmosféricos. Alta resolución espacial tanto en horizontal como en vertical. Esto revela variaciones en los contaminantes atmosféricos calle por calle o incluso edificio por edificio.

La metodología del estudio consiste en recorrer toda la ciudad utilizando dos vehículos, proporcionados y operados por personal de PROAES y CEDES, asignados respectivamente a las zonas norte y sur de la ciudad. En cada vehículo se instaló un sensor Sniffer4D utilizando una montura diseñada específicamente para vehículos terrestres. Los recorridos se realizan semanalmente siguiendo la misma ruta, alternando los sensores entre los vehículos para garantizar la homogeneidad en la recolección de datos. Este monitoreo comenzó en abril de 2024 y se extenderá hasta diciembre de 2024 como parte del primer experimento exploratorio. Se propusieron dos rutas simultáneas para las mediciones utilizando el SNIFFER 4D en dos vehículos.

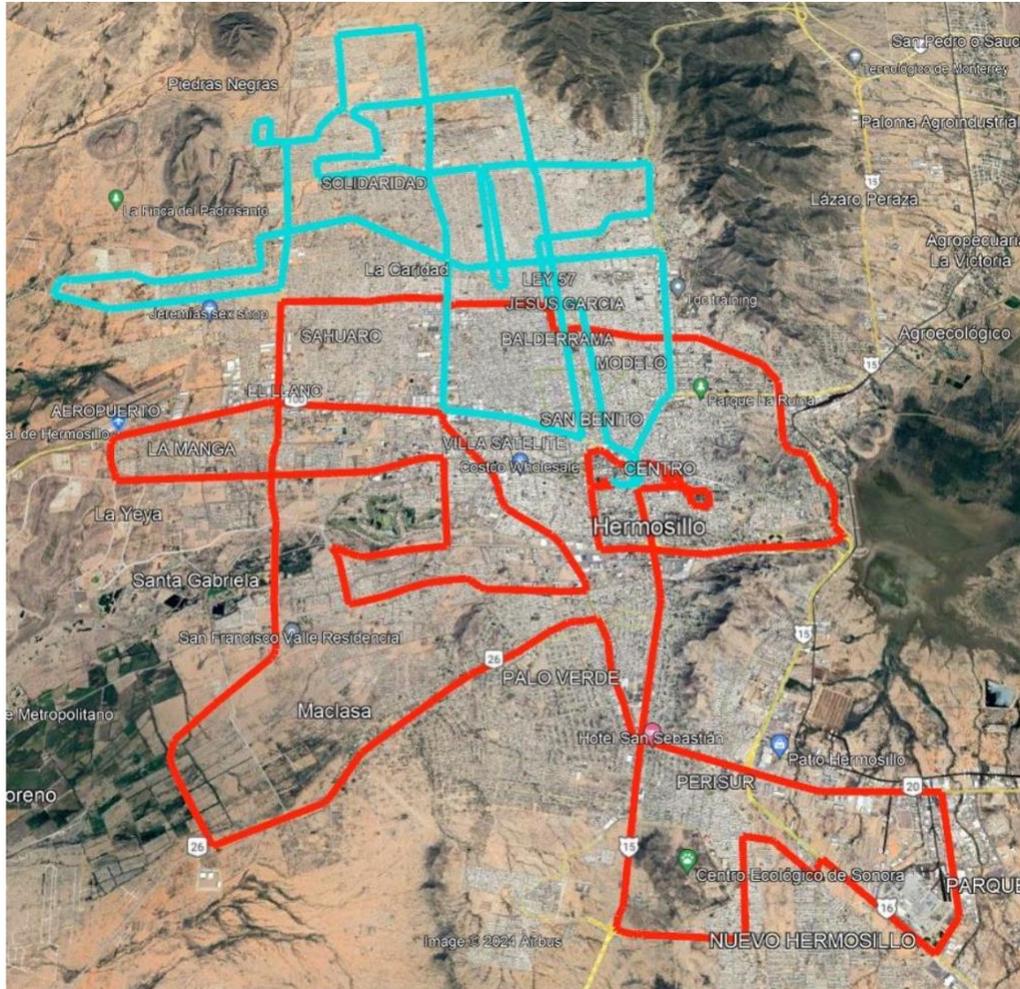


Figura 18. Diseño de recorridos con sensores para medir contaminantes atmosféricos para identificación de fuentes puntuales. Cada color representa rutas distintas que parten a la misma hora desde el punto Centro.

Las siguientes imágenes muestran el proceso de instalación del sensor en los autos y personal que realizó los recorridos. También se atendieron eventos como incendios, acudiendo al lugar para realizar mediciones y caracterizar las muestras que se tomaron. Se muestran imágenes al respecto.



Figura 19. Imágenes del equipo que realizó los recorridos para medir con el sensor Sniffer 4D.

Los valores promedio de los contaminantes medidos en los recorridos representan una exposición peatonal y tienen algunas diferencias con los promedios anuales de la estación fija, la cual está situada a aproximadamente 6 metros sobre el nivel del suelo. Sin embargo, los valores son parecidos. Por ejemplo el promedio anual para el ozono medido en la estación fija RUOA es de 0.021 ppm (o 21.4 ppb) y el valor promedio para 2024 de los datos obtenidos por el sensor Sniffer 4D es de 0.021 ppm. En el caso de $PM_{2.5}$ el promedio para 2024 obtenido por la estación fija es de $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que el promedio de los recorridos con el sensor es de $5.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Tabla 7.

Promedio mensual por contaminante a nivel peatonal durante recorridos en 2024. Cuatro recorridos por mes. Límite de detección es l.d.

Contaminante	Unidades	Abril	Mayo	Junio	Julio	Septiembre	Octubre	Promedio anual
TVOC	ppm	0.006	0.015	0.052	0.161	0.075	0.093	0.067
SO ₂	ppm	0.002	0.002	0.005	0.010	0.003	0.002	0.004
CO	ppm	1.193	1.244	1.630	1.785	1.806	2.125	1.631
O ₃ +NO ₂	ppm	0.035	0.049	0.048	0.052	0.021	0.028	0.039
PM ₁	µg/m ³	2.1	2.1	2.4	2.02	2.5	2.4	2.253
PM _{2.5}	µg/m ³	4.9	5.0	5.7	4.71	6.0	5.7	5.335
PM ₁₀	µg/m ³	9.2	9.3	10.9	8.78	10.8	10.8	10
CxHy	%	0.004	0.005	<l.d.	0.018	0.031	0.030	0.018
CO ₂	ppm	54	24	42	20.2	20.3	20	30.08

En el caso de la PM₁₀ el promedio anual obtenido en la estación fija es de 13.3 µg/m³ para el 2024, mientras que el promedio anual con el sensor a nivel peatonal es de 10 µg/m³. La diferencia mayor fue con la PM_{2.5} lo que es lo esperado ya que estas partículas tienen mayor tiempo de residencia en la atmósfera y permanecen en suspensión, por lo que el valor será mayor en la estación fija en comparación con el nivel peatonal. Sin embargo, cuando existe inversión térmica, este material suspendido puede descender y aumentar la exposición humana.

Los recorridos generaron mapas que permiten la identificación de fuentes puntuales de emisión de los contaminantes criterio. Se busca trabajar con las dependencias de gobierno para la inspección y emisión de recomendaciones que permitan (i) reducir la exposición laboral de trabajadores y vecinos y (ii) desarrollar tecnología de bajo costo para reducir dichas emisiones y poder continuar operando con condiciones seguras.

La siguiente figura es un ejemplo de mapa de O₃+NO_x generado en un recorrido en el mes de mayo de 2024. Se resalta que las avenidas de mayor tráfico son las que registran los mayores valores y en el mes de mayo las temperaturas ya son elevadas. Este tipo de mapa permite además visualizar espacialmente el impacto del tráfico vehicular en los sectores de la ciudad.

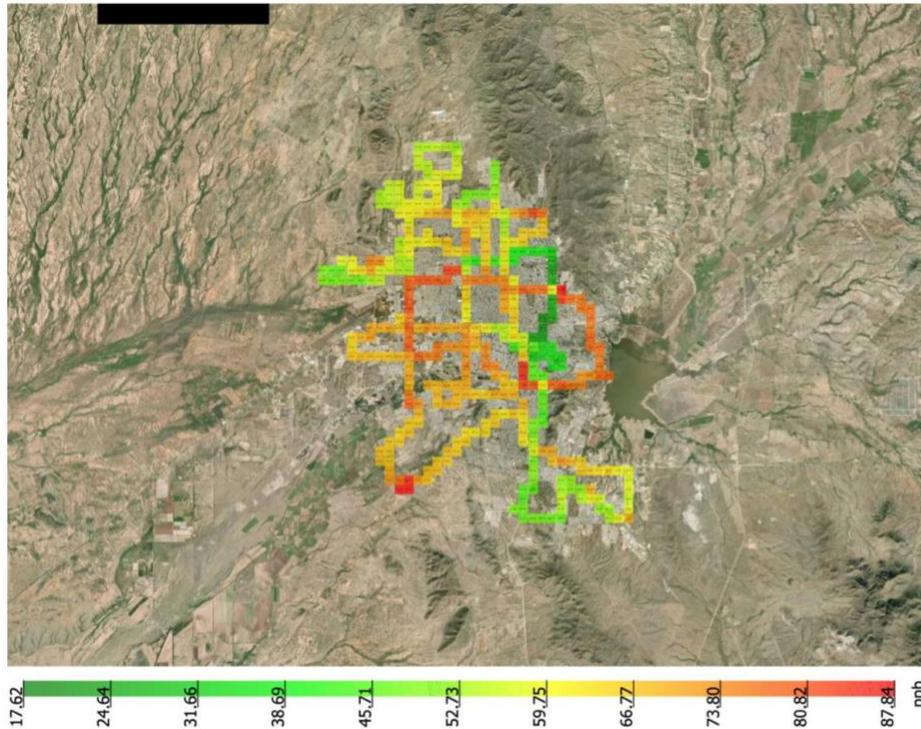


Figura 19. Imagen del recorrido realizado con el sensor Sniffer 4D, visualizando la escala de concentración de los contaminantes para la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Muestreo en talleres.

La UNISON realizó una caracterización con ayuda de estudiantes de la carrera de Ingeniería en Ciencias Ambientales del Departamento de Geología, de partículas colectadas en diferentes talleres de la ciudad. Los pequeños y medianos negocios son de diferentes rubros: carrocerías, vidrierías, talleres de suspensiones de autos, llanteras, negocios de construcción etc. Este documento presenta avances de este trabajo, tiene una continuidad más allá del cierre financiero y técnico del proyecto y los resultados se estarán reportando a las dependencias de los dos niveles de gobierno.

Se colocaron cajas de Petri para colectar polvo suspendido que deposita por gravedad en los diferentes talleres. Adicionalmente, se colectó polvo de las zonas de trabajo. Estas muestras de polvo fueron analizadas por microscopía electrónica de barrido en utilizando un equipo Thermo Scientific Phenom ProX para determinar tamaño, forma y composición de las partículas. Esta información es útil para poder emitir recomendaciones adecuadas para reducir la exposición en la zona de trabajo y a la vez hacia el medio ambiente.

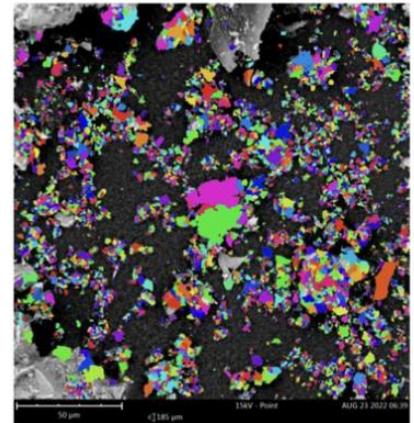
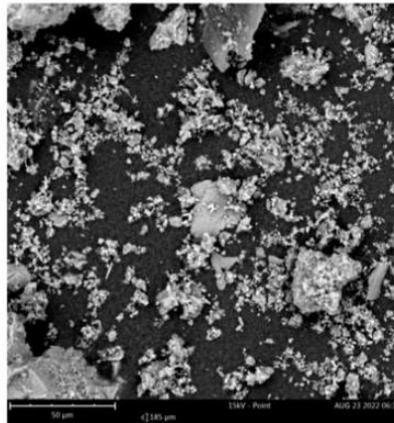


Figura 21. Microscopio electrónico de barrido y análisis de imágenes para determinar tamaño, forma y composición de partículas colectadas en polvo sedimentados en talleres.

Ejemplo 1: Talleres de vidrio o vidrieras.

De acuerdo con google maps, en Hermosillo se localizan aproximadamente 18 negocios de vidrieras:

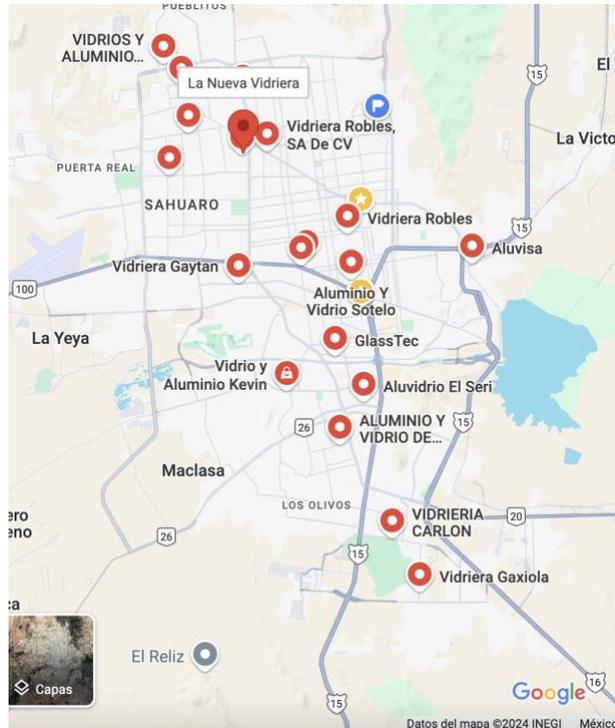


Figura 22. Localizaciones de comercios dedicados al manejo de vidrio en la ciudad de Hermosillo, Sonora

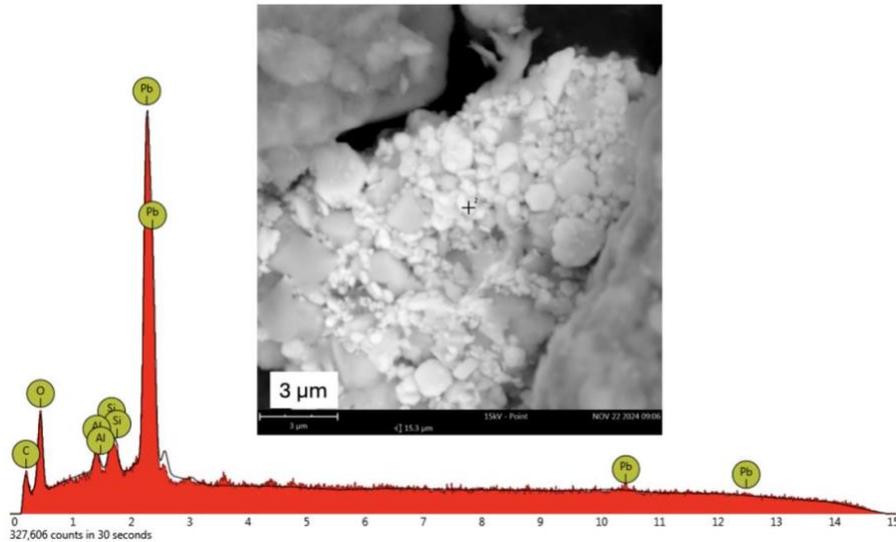


Figura 23. Partículas menores una micra con plomo (son partículas respirables) obtenidas de un taller de vidrio o vidriera en Hermosillo, Sonora.

Ejemplo 2: Talleres mecánicos

Los talleres mecánicos son de los principales emisores de partículas metálicas respirables, menores a 10 micras (PM_{10}) a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) y nanopartículas. El siguiente mapa muestra la distribución de talleres mecánicos en Hermosillo.



Figura 24. Localizaciones de talleres mecánicos en la ciudad de Hermosillo, Sonora

Las siguientes figuras muestran las principales emisiones de talleres, evidenciadas por el estudio en polvo colectado en varios de estos negocios.

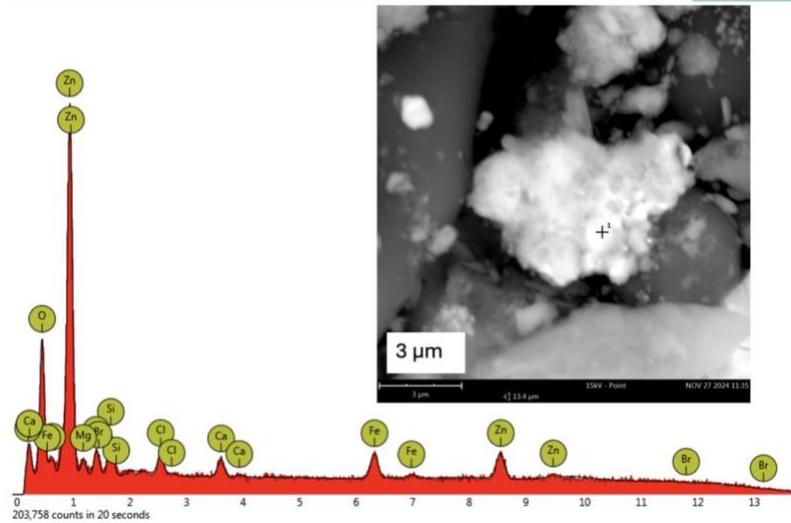


Figura 25. Partículas ultrafinas de zinc de un taller mecánico.

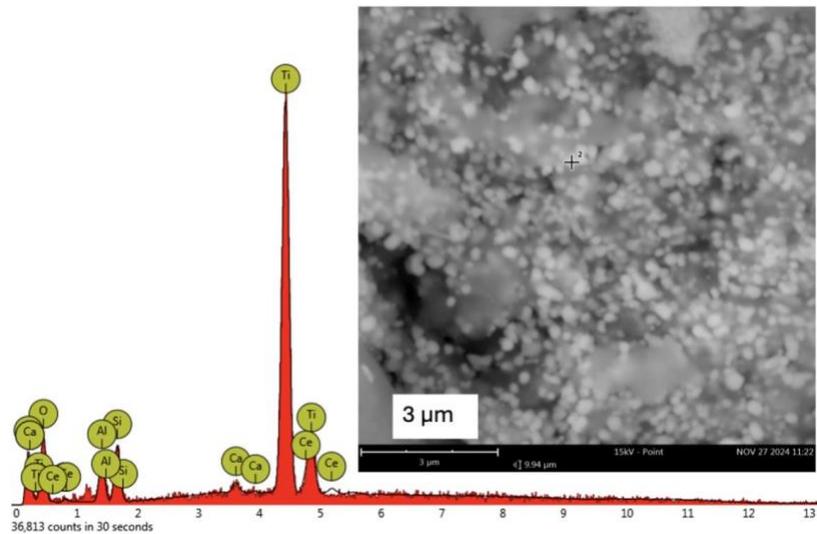


Figura 26. Partículas ultrafinas de titanio y cerio de un taller mecánico en Hermosillo, Sonora.

Se ha demostrado la asociación de elementos como el cerio y el zirconio con los convertidores catalíticos de tres vías de los autos (Meza-Figueroa et al., 2024; Navarro-Espinoza et al., 2021; Meza-Figueroa et al., 2021).

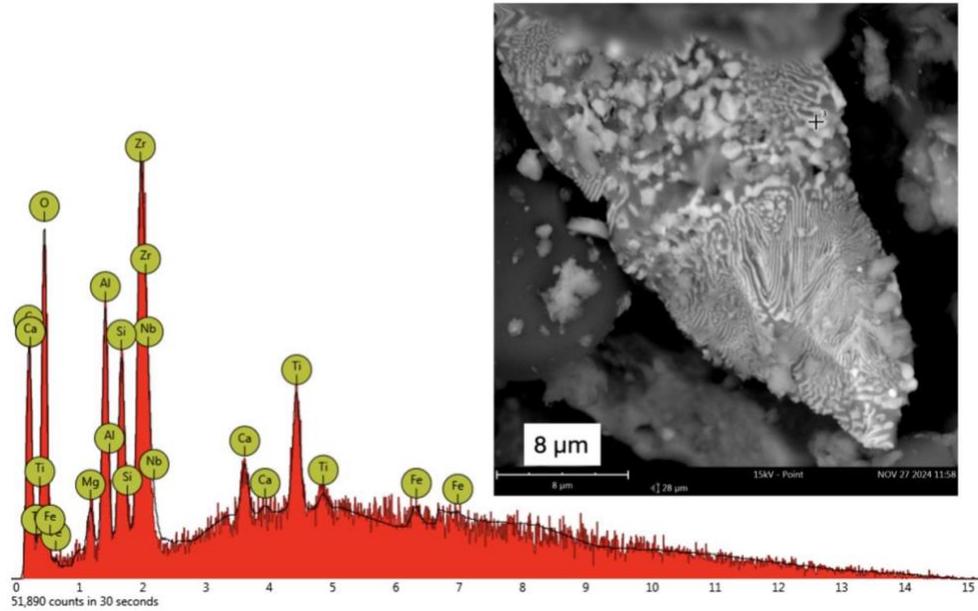


Figura 27. Partícula con circonio, niobio y titanio de taller de carrocería.

Avances en investigación de fuentes móviles (vehículos)

De acuerdo con datos obtenidos por la Organización Hermosillo ¿cómo vamos? Hermosillo cuenta al 2023 con 613,706 vehículos en circulación. Este grupo de investigación realizó un aforo vehicular en la zona alrededor de la Universidad de Sonora con los siguientes resultados:

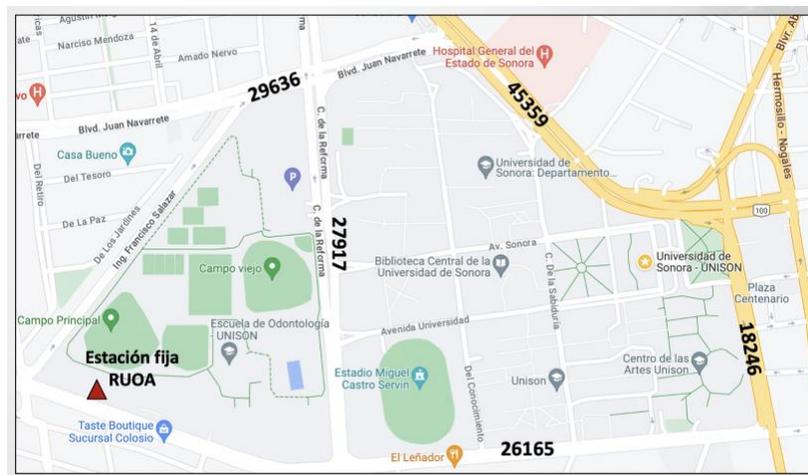


Figura 28. Mapa de contabilización de vehículos en el programa de aforo vehicular realizado en las calles del perímetro de la Universidad de Sonora.

Se contaron en las avenidas alrededor de la Universidad de Sonora entre 18,246 y 45,359 vehículos circulando en un lapso de 11 horas.

A la fecha se han publicado diversos estudios enfocados en la caracterización de las partículas del polvo urbano y del particulado atmosférico de Hermosillo. En particular, hay varias publicaciones centradas en el estudio de partículas emitidas como consecuencia del desgaste de catalizadores. En los entornos urbanos, los catalizadores de tres vías representan una fuente potencial de partículas ultrafinas refractarias. Desde su introducción en 1974, los catalizadores de los automóviles han sido un factor determinante para eliminar metales de la gasolina y reducir la contaminación atmosférica en zonas urbanas. La figura 29 muestra la localización de un catalizador en un automóvil y las emisiones exhaustivas y no exhaustivas.

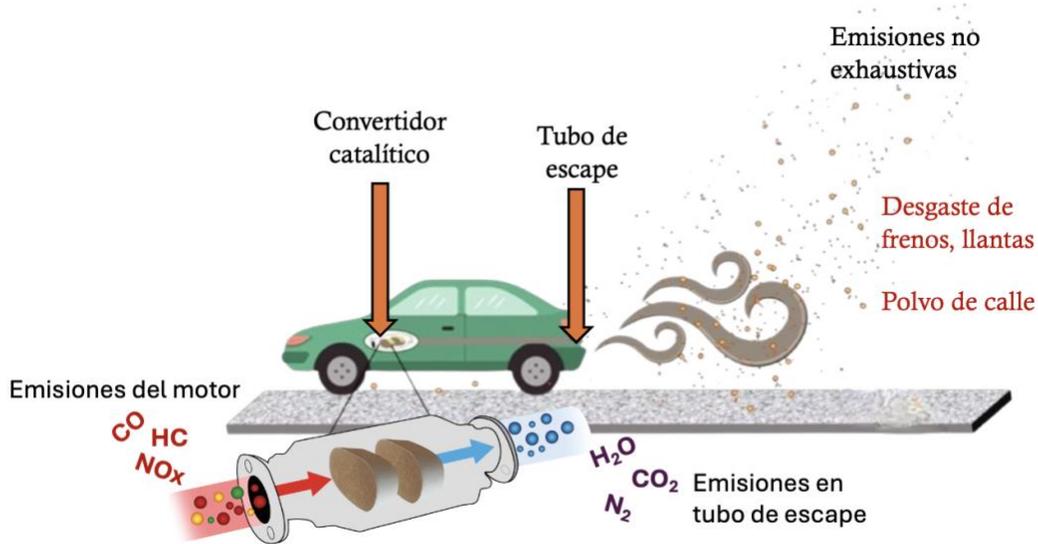


Figura 29. Imagen que muestra la localización de un catalizador en autos.

En lugares donde existe un programa de verificación vehicular, el catalizador debe reemplazarse una vez que se pierde la capa de compuestos activos, esto para que el catalizador pueda seguir cumpliendo con la conversión de gases tóxicos del motor a gases más amigables con el medio ambiente. La figura 30 muestra un catalizador y los componentes que lo forman.

Catalizador de tres vías (3 reacciones)

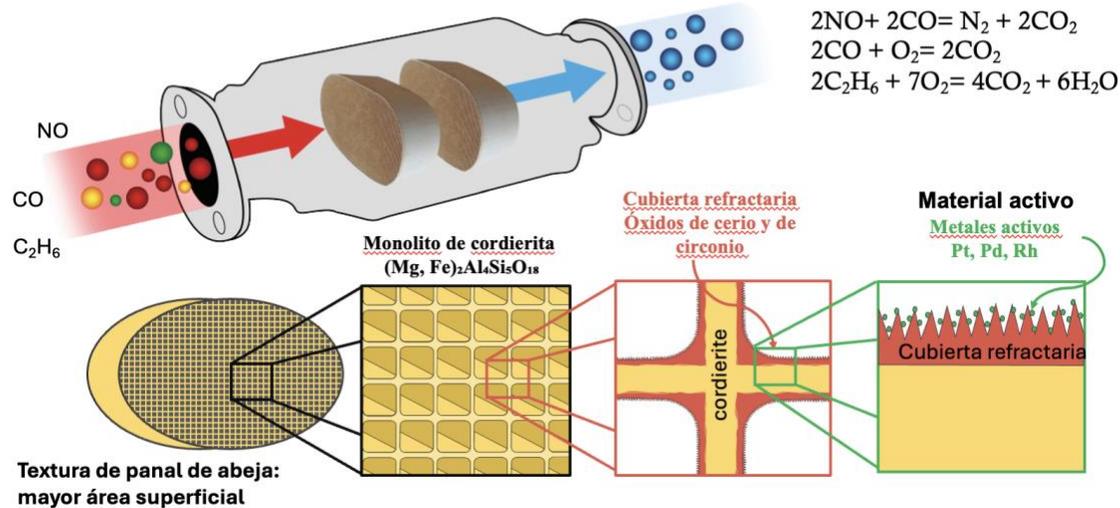


Figura 30. Catalizador de tres vías.

Un TWCC para motores de gasolina se compone de un sustrato o monolito cerámico con una estructura de tipo panal de abeja, que está hecho de cordierita ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$). La figura 30 muestra la superficie monolítica que está recubierta con una capa de óxido de cerio (CeO_2) y óxido de circonio (ZrO_2 o circonia) para aumentar la capacidad de almacenamiento de oxígeno en los convertidores catalíticos (Palacios et al. 2000). Además de la cubierta refractaria de $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$, hay una fina capa de sustancias activas formada por nanopartículas metálicas de platino, paladio y/o rodio (Arughete et al., 2020; Wang y Li 2012). Esta última capa es la que permite las reacciones químicas para transformar los gases del motor en gases amigables con el medio ambiente.

A pesar de las ventajas de los convertidores catalíticos, está ampliamente documentado que su abrasión y desgaste provocan la emisión al medio ambiente de elementos del grupo del platino (Abdou et al., 2016; Aruguete et al., 2019; Aruguete et al., 2019; Clement et al., 2015) y de tierras raras (Wiseman et al., 2016).

En lugares que cuentan con un programa de verificación vehicular, el catalizador debe ser cambiado una vez que se pierde esta capa de sustancias activas. Esto es porque al no tener la cubierta con platinoides, no ocurre la conversión de gases provocando que el auto no pase la prueba, es decir no cumpla con los estándares para continuar circulando.

Es una creencia común pensar que las emisiones de los catalizadores son un problema exclusivo de las megaciudades. Sin embargo, en Hermosillo, Sonora, al no existir un programa de verificación vehicular, los automóviles pueden continuar

circulando con el catalizador sin funcionar, hasta que la capa refractaria se desgaste y parte de la misma sea emitida por el tubo de escape. La figura 31 muestra el desgaste del monolito de cordierita de un catalizador de Hermosillo en comparación con uno de la Ciudad de México y uno nuevo. El monolito del catalizador de la Ciudad de México está más conservado porque una vez que pierde la capa de metales activos, el vehículo no pasa la verificación por lo que debe ser reemplazado. El monolito de Hermosillo está muy deteriorado porque los automóviles continúan circulando aún sin la cubierta de metales activos. Esto último genera emisiones nocivas ya que el catalizador no funciona y además se emiten partículas respirables que son de alta dureza o refractarias, como la circonia.



Figura 31. Imagen que muestra el estado de un catalizador nuevo, uno de un vehículo de Ciudad de México y uno de Hermosillo, Sonora, México.

Este tipo de partículas se detectaron en el polvo colectado en los talleres mecánicos. En este sentido, se generó evidencia que prueba la existencia de estas partículas en el medio ambiente de Hermosillo (Meza-Figueroa et al., 2021). La figura 31 muestra evidencia del desgaste de la cubierta refractaria de óxidos de Ce y Zr, con el monolito del catalizador de Hermosillo sin rastros de dicha cubierta refractaria. Esta fue emitida como partículas a través del tubo de escape del carro. En la figura 32 se muestra la separación en partículas menores a una micra de óxidos de cerio y de circonio en la superficie del monolito del catalizador. Estas partículas aparecen sueltas y pueden ser emitidas por el tubo de escape.

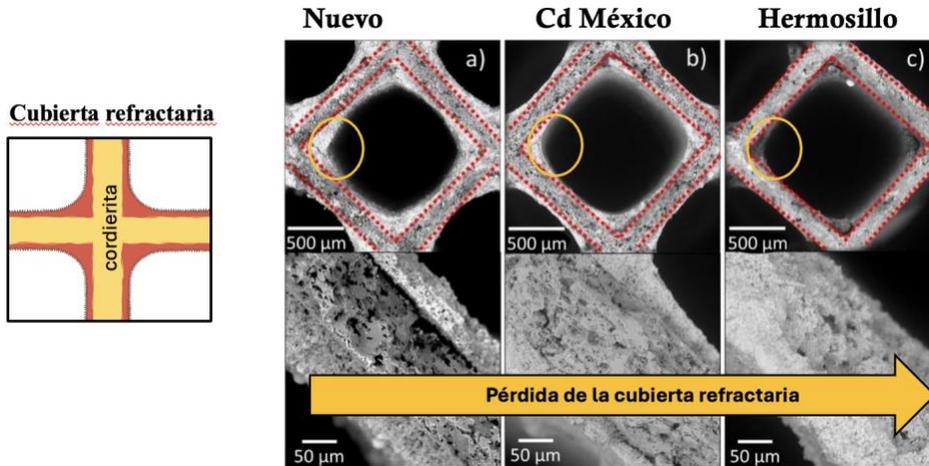


Figura 32. Imagen que muestra la pérdida de la cubierta refractaria en los catalizadores estudiados. Para corroborar la emisión del material de esta cubierta refractaria, se tomaron muestras del tubo de escape de autos circulando en Hermosillo, así como muestras de filtros, polvo depositados en calles y polvo resuspendido. La figura 33 muestra un aglomerado de partículas ultrafinas de circonia (tamaños menores a una micra de diámetro aerodinámico).

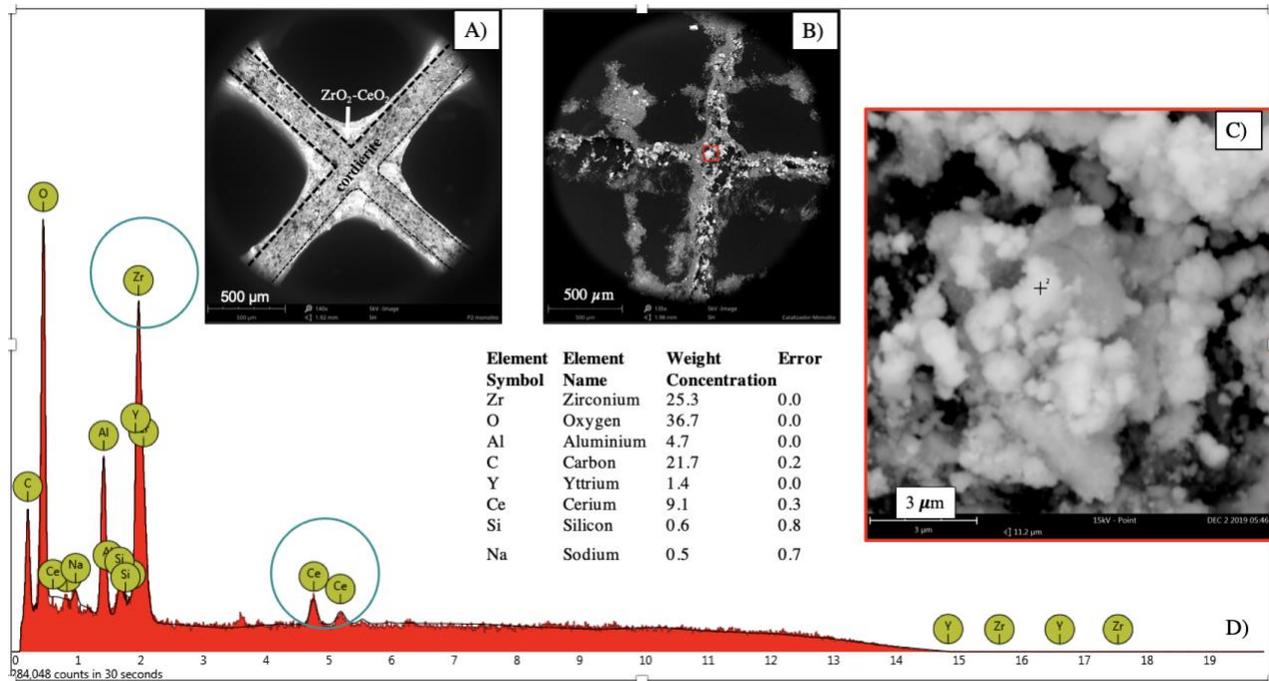


Figura 33. Aglomerados de circonia y cerio tomados del tubo de escape de autos de Hermosillo, Sonora.

La figura 34 muestra la concentración de los elementos cerio (Ce) y circonio (Zr) en polvo urbano de Hermosillo, así como los valores correspondientes al fondo

geoquímico local. Se aprecia que la concentración de estos elementos es mucho mayor que el fondo lo que indica un origen no natural o antrópico. Al no existir fuentes industriales que generen estos elementos y considerando la alta correlación entre los mismos, se puede concluir que tienen una fuente común. Se muestra también en la misma figura, un comparativo con el polvo urbano de la Ciudad de México. En este caso, los valores de Hermosillo son superiores ya que en Ciudad de México existe un programa de verificación del funcionamiento de catalizadores en vehículos lo que previene el desprendimiento de la cubierta refractaria. En el caso de Hermosillo, Sonora, la fuente principal de cerio y circonio en polvo y material particulado atmosférico son los catalizadores de los autos.

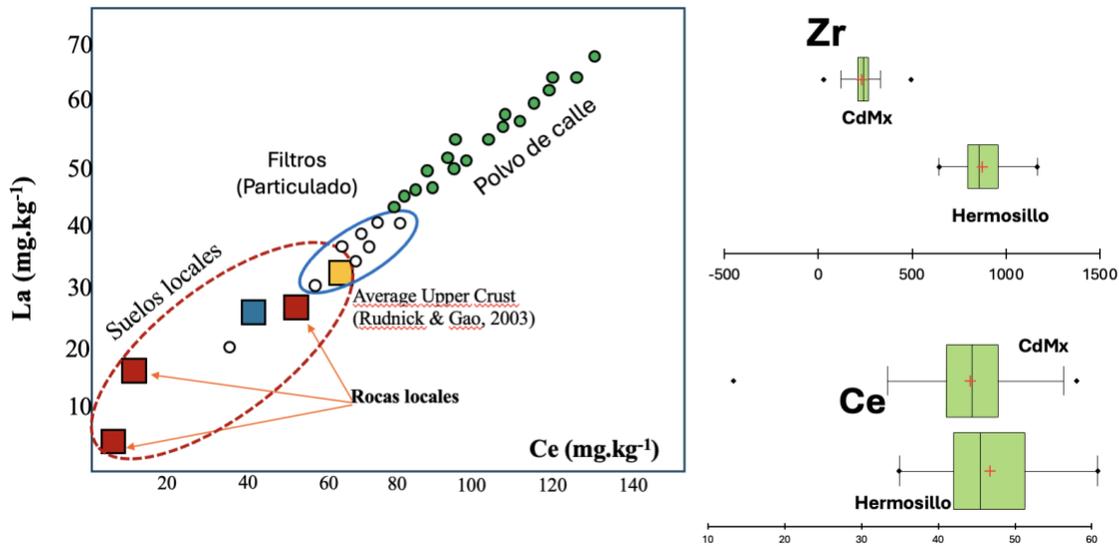


Figura 34. Concentración de cerio y lantano en muestras de suelos locales, rocas, filtros de aire y polvo de calle colectados en Hermosillo, Sonora. La figura muestra que el polvo y filtros tienen valores de cerio muy superiores a los valores naturales o geogénicos, por lo que la fuente es antrópica.

Metales y metaloides en filtros

Se colectaron 156 muestras de filtros. Se analizaron en el laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Los filtros se colocaron en viales de teflón. Posteriormente se adicionó 8 ml de agua regia y 2 ml de ácido fluorhídrico grado ultrapuro. Se procesaron en un digestor ETHOS UP con horno de microondas, rotor de 15 viales de teflón de la marca Milestone con digestión en dos etapas de 25 minutos cada una a 230 °C y 1800 W. Posteriormente las



"El saber de mis hijos hará mi grandeza"



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

muestras se evaporaron para eliminación del ácido fluorhídrico, se adicionó HCl para posterior aforo a 10 mL con solución HNO₃ al 2%. Se filtraron con membrana de nitrocelulosa a 0.45 micras y se almacenaron a 4 °C previo al análisis. Como control de calidad, cada 15 muestras se analizó el material de referencia certificado 1648a (Urban particulate matter, National Institute of Standards and Technology-NIST). Adicionalmente se procesó un blanco reactivo para monitoreo de potencial contaminación.

Adicionalmente, filtros colectados en los mismos meses se utilizaron para extraer nanopartículas para su caracterización por microscopía de trasmisión electrónica y por microscopía de barrido electrónico.

Tabla 8.

Concentración promedio de metales en material particulado (PM_{2.5}) de Hermosillo (ng m⁻³) por año analizado.

V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Tl	Pb	año
7.32	56.60	68.45	1908.14	1.56	75.64	43.10	167.17	2.87	0.98	14.34	0.05	21.03	2019
4.29	59.72	26.09	960.38	0.64	14.23	34.95	187.36	1.56	0.59	5.58	0.19	10.09	2020
4.45	19.51	31.61	895.33	1.05	23.88	54.39	278.92	2.08	2.49	16.75	0.18	32.46	2021
2.65	41.66	21.52	745.22	0.61	19.38	28.63	118.31	0.90	0.62	6.39	0.03	22.47	2022

Caracterización de partículas Ultrafinas

La extracción y caracterización de partículas ultrafinas atmosféricas (PUF) es fundamental para comprender el impacto ambiental y la dinámica del clima.

Dentro de las recomendaciones de la OMS, se incluye: “ampliar la estrategia común de control de la calidad del aire integrando el control de las UFP (menores a 0.1 µm o nanopartículas) en el control de la calidad del aire existente. Incluir mediciones de PNC segregadas por tamaño en tiempo real en estaciones de vigilancia del aire seleccionadas, además de otros contaminantes atmosféricos y características de la PM”.

Aunque se consideró la adquisición de un equipo de medición en tiempo real para partículas finas (10 nm-1000 nm), su elevado costo, cercano a los 4 millones de pesos, lo hizo inviable. En respuesta, el equipo de investigación exploró métodos alternativos mediante el uso de ciencia emergente para la caracterización de las UFP los cuales se describen a continuación.



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



GOBIERNO DE
MÉXICO

Algunos de los artículos recientes del grupo, Meza-Figueroa et al. (2024), Berrellez-Reyes et al. (2024) y Gallego-Hernández et al. (2020), proponen el uso combinado de técnicas de caracterización y metodologías innovadoras para el análisis de la calidad del aire. Estas incluyen el empleo de biomarcadores, análisis de filtros de muestreo y caracterizaciones físicas avanzadas, como la microscopía de fuerza atómica (AFM), microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), dispersión dinámica de la luz (DLS) y espectroscopía Raman.

El trabajo “Tracking fine particles in urban and rural environments using honey bees as biosamplers in Mexico”, Meza-Figueroa et al. (2024), explora la eficiencia de las abejas melíferas (*Apis mellifera*) como biomuestreadores de contaminación por metales. Para ello, se recolectaron muestras de polvo urbano y abejas capturadas en vuelo en áreas con diferentes niveles de urbanización. El análisis incluyó espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), microscopía de fuerza atómica (AFM) y microscopía electrónica de barrido (SEM) para examinar la forma, distribución de tamaños de partículas y la composición química semicuantitativa de las partículas adheridas a las alas de las abejas. Los resultados demostraron que las abejas son efectivas para caracterizar fracciones de polvo fino, reflejando la contaminación urbana de los sitios analizados.

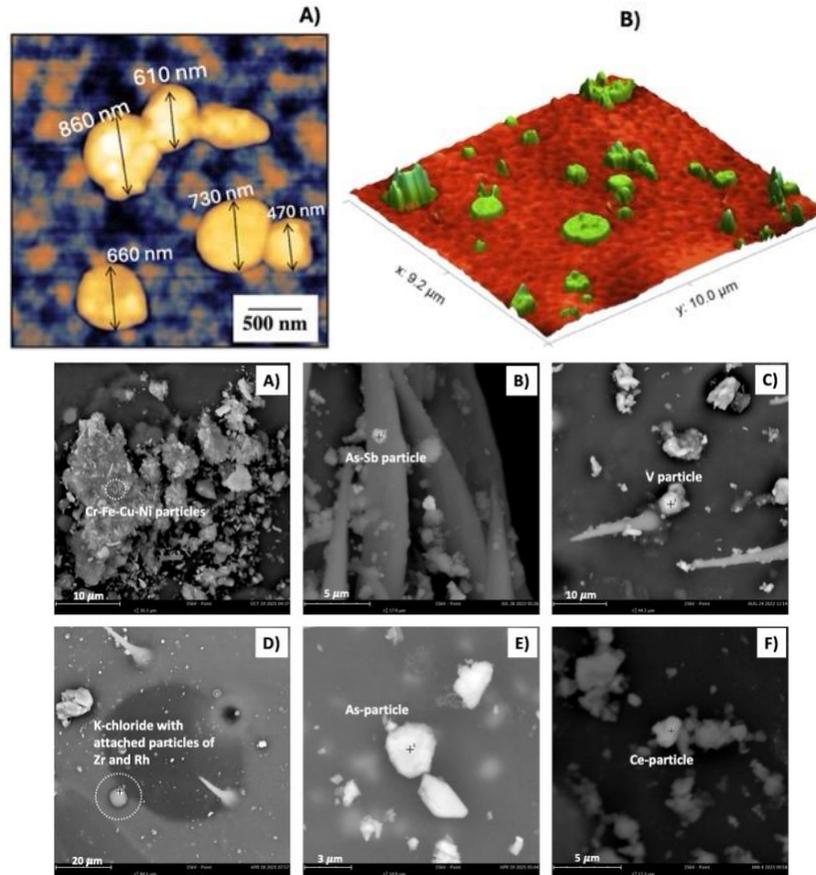


Figura 35. Evidencia de partículas ultrafinas adheridas a alas de abejas capturadas en vuelo. Las partículas son nanométricas y están dentro de la categoría de partículas ultrafinas.

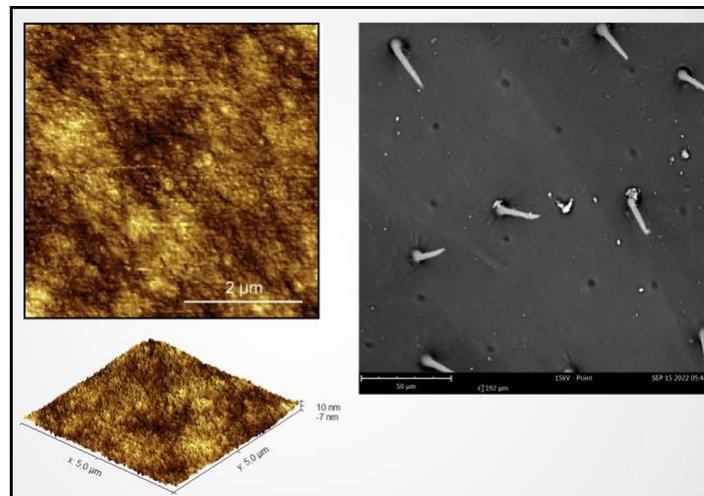


Figura 36. Imagen de alas de abejas sin partículas adheridas. Abejas capturadas en zonas con mayor vegetación en Hermosillo, Sonora.

En el estudio “Characterization of soot and crystalline atmospheric ultrafine particles”, Berrellez-Reyes et al. (2024), se extrajeron y caracterizaron partículas ultrafinas de filtros recolectores para monitoreo ambiental en Hermosillo, Sonora. Se utilizó la combinación de técnicas poco comunes en el análisis de la calidad del aire, como la microscopía de fuerza atómica (AFM), y algunos más convencionales como la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la dispersión dinámica de luz (DLS). Los resultados obtenidos mediante DLS indican un rango de diámetros hidrodinámicos de 117 a 1069 nm, y evidencias de procesos de aglomeración de las UFP. Con AFM se identificaron partículas de entre 10 y 25 nm. El análisis TEM se identificó UFP cristalinas, así como partículas de hollín y NPs enriquecidas en Si, Ca-F-Cl-Na-Si, carbonatos, cloruros y nanosílice enriquecida en Zn-Ti. Hallazgos valiosos para el conocimiento de las propiedades fisicoquímicas del polvo atmosférico en la ciudad, contribuyendo a un mejor entendimiento de implicaciones para la salud humana y el medio ambiente.

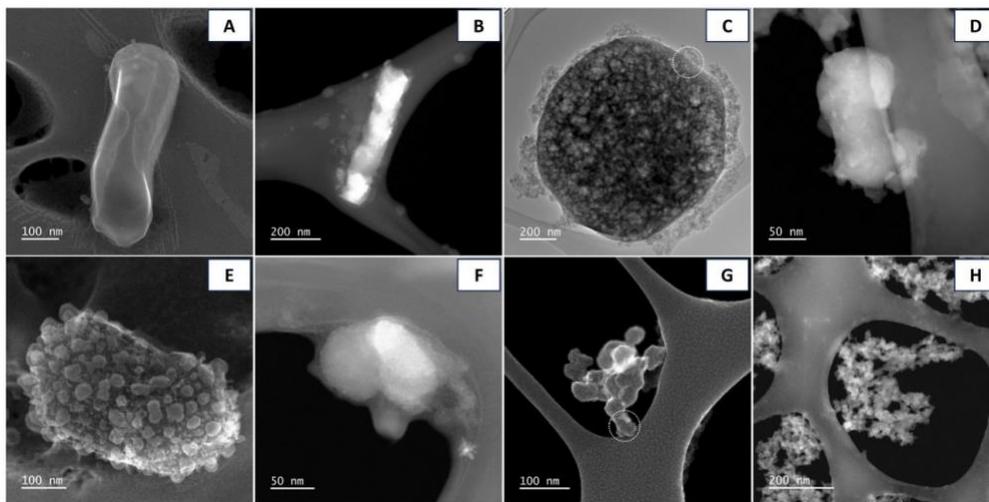


Figura 37. Imagen de nanopartículas identificadas mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) en filtros muestreadores, mostrando una diversidad de tamaños, formas y estructuras.

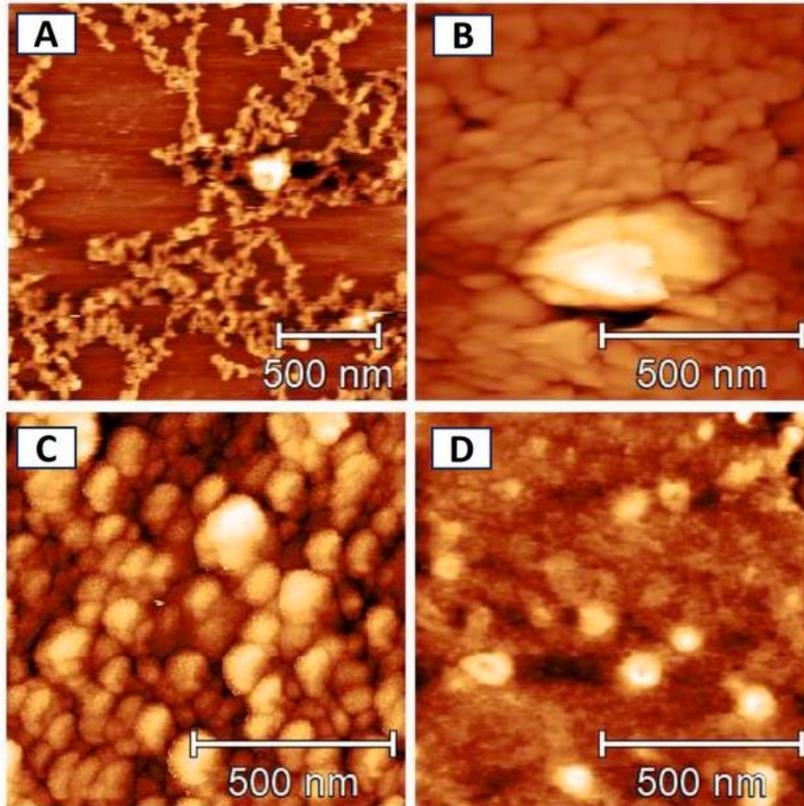


Figura 38. Imagen de nanopartículas identificadas mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) en filtros muestreadores.

En otro artículo publicado, Gallego-Hernández et al., 2020, se desarrolló una metodología para la identificación de NPs en el polvo atmosférico. Identificando nanopartículas de rutilo y compuestos de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). Estos hallazgos concuerdan con lo encontrado recientemente en los talleres mecánicos y las fuentes son el tráfico vehicular, actividad de talleres y erosión urbana.



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



GOBIERNO DE
MÉXICO

Recomendaciones

- Diseñar estrategias para apoyar a las pequeñas y medianas empresas en la reducción de emisiones y manejo de residuos, sin perjuicio para sus ingresos y atendiendo una transición energética justa.
- Establecer un programa de monitoreo ciudadano, con el apoyo de servicio social y prácticas profesionales de estudiantes universitarios en carreras afines.
- Generar un plan urbano de adaptación al cambio climático para generar comunidades resilientes.
- Atendiendo el principio precautorio, generar estrategias para resolver el problema de emisiones de partículas de los catalizadores.
- Transitar hacia la electromovilidad y mejora del transporte público.
- Incremento de áreas verdes, aplicación de infraestructura azul y verde.
- Monitoreo continuo y generación de indicadores a partir de sinergías generadas por universidades y dependencias de gobierno de todos los niveles.
- Se presenta una traducción del cuadro de recomendaciones actual de la Organización Mundial de la Salud en el tema de salud y calidad de aire.

Referencias

Abdillah, S.F., Wang, Y., 2023. Ambient ultrafine particle (PM_{0.1}): sources, characteristics, measurements and exposure implications on human health. *Environ. Res.* 218, 115061. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115061>

Calderon-Garciduenas, L., Ayala, A., 2022. Air pollution, ultrafine particles, and your brain: are combustion nanoparticle emissions and engineered nanoparticles causing preventable fatal neurodegenerative diseases and common neuropsychiatric outcomes? *Environmental Science & Technology* 56 (11), 6847–6856. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04706>

Calderón-Garcidueñas, L., Stommel, E.W., Torres-Jardon, R., Hernandez-Luna, J., Aiello- Mora, M., González-Macié, A., Reynoso-Robles, R., Perez-Guille, B., Silva- Pereyra, H., Tehuacanero-Cuapa, S., Rodriguez-Gomez, A., Lachmann, I., Galaz- Montoya, C., Doty, R.L., Roy, A., Mukherjee, P.S., 2024. Alzheimer and Parkinson diseases, frontotemporal lobar degeneration and amyotrophic lateral sclerosis overlapping neuropathology start in the first two decades of life in pollution exposed urbanites and brain ultrafine matter and industrial nanoparticles, including Fe, Ti, Al, V, Ni, Hg, Co, Cu, Zn, Ag, Pt, Ce, La, Pr, and W are key players. *Metropolitan Mexico City health crisis is in progress. Front. Hum. Neurosci.* 12 (17), 1297467. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1297467>

Chauhan, B.V.S., Corada, K., Young, C., Smallbone, K.L., Wyche, K.P., 2024. Review on sampling methods and health impacts of fine (PM_{2.5}, $\leq 2.5 \mu\text{m}$) and ultrafine (UFP, PM_{0.1}, $\leq 0.1 \mu\text{m}$) particles. *Atmosphere* 15 (5), 572. <https://doi.org/10.3390/atmos15050572>, 2024

de Foy, B., Schauer, J.J., 2015. Origin of high particle number concentrations reaching the St. Louis, Midwest Supersite. *J. Environ. Sci.* 34, 219–231. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.12.026>

De Jesus, A.L., Rahman, M.M., Mazaheri, M., Thompson, H., Knibbs, L.D., Jeong, C., Evans, G., Nei, W., Ding, A., Qiao, L., Li, L., Portin, H., Niemi, J.V., Timonen, H., Luoma, K., Petäjä, T., Kulmala, M., Kowalski, M., Peters, A., Cyrys, J.,



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



GOBIERNO DE
MÉXICO

- Ferrero, L., Manigrasso, M., Avino, P., Buonano, G., Reche, C., Querol, X., Beddows, D., Harrison, R.M., Sowlat, M.H., Sioutas, C., Morawska, L., 2019. Ultrafine particles and PM_{2.5} in the air of cities around the world: Are they representative of each other? *Environ. Int.* 129, 118–135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.021>
- Ehn, M., Thornton, J.A., Kleist, E., Sipilä, M., Junninen, H., Pullinen, I., Springer, M., Rubach, F., Tillmann, R., Lee, B., Lopez-Hilfiker, F., Andres, S., Acir, I.H., Rissanen, M., Jokinen, T., Schobesberger, S., Kangasluoma, J., Kontkanen, J., Nieminen, T., Kurtén, T., Nielsen, L.B., Jørgensen, S., Kjaergaard, H.G., Canagaratna, M., Maso, M.D., Berndt, T., Petäjä, T., Wahner, A., Kerminen, V.M., Kulmala, M., Worsnop, D.R., Wildt, J., Mentel, T.F., 2014. A large source of low-volatility secondary organic aerosol. *Nature* 506, 476–479. <https://ezproxy.cuc.edu.co:2067/10.1038/nature13032>
- Ermolin, M.S., Fedotov, P.S., Ivaneev, A.I., Karandashev, V.K., Fedyunina, N.N., Burmistrov, A.A., 2018. A contribution of nanoscale particles or road-deposited sediments to the pollution of urban runoff by heavy metals. *Chemosphere* 210, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.150>
- Gallego-Hernández, A.L., Meza-Figueroa, D., Tanori, J., Acosta-Elías, M., González-Grijalva, B., Maldonado-Escalante, J.F., Rochin-Wong, S., Soto-Puebla, D., Navarro-Espinoza, S., Ochoa-Contreras, R., Pedroza-Montero, M., 2020. Identification of inhalable rutile and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) nanoparticles in the atmospheric dust. *Environ. Pollut.* 260, 114006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114006>
- Kwon, H., Ryu, M.H., Carlsten, C., 2020. Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Exp. Mol. Med.* 52 (3), 318–328. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0405-1>
- Lenssen, E.S., Janssen, N.A.H., Oldenwening, M., Meliefste, K., de Jonge, D., Kamstra, R. J.M., van Dinther, D., van der Zee, S., Keuken, R.H., Hoek, G., 2024. Beyond the Runway: respiratory health effects of ultrafine particles from aviation in children. *Environ. Int.* 188, 108759. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108759>
- Moreno-Ríos, A.L., Tejeda-Benitez, L.P., Bustillo-Lecompte, C.F., 2022. Sources, characteristics, toxicity, and control of ultrafine particles: an overview. *Geosci. Front.* 13 (1), 101147. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101147>
- OMS-Organización Mundial de la Salud (2024). https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1 consultado en diciembre de 2024.
- Phairuang, W., Chetiyakornkul, T., Suriyawong, P., Ho, S., Paluang, P., Furuuchi, M., Amin, M., Hata, M., 2024. Daytime-nighttime variations in the concentration of PM_{0.1} carbonaceous particles during a biomass fire episode in Chiang Mai, Thailand. *Particuology* 87, 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.09.013>
- Phairuang, W., Amin, M., Hata, M., Furuuchi, M., 2022. Airborne nanoparticles (PM_{0.1}) in Southeast Asian cities: a review. *Sustainability* 14 (16), 10074. <https://doi.org/10.3390/su141610074>
- Rodríguez, S., Van Dingenen, R.V., Putaud, J.P., Dell'Aquila, A., Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., Chenery, S., Ho, K.F., Harrison, R., Tardivo, R., Scarnato, B., Gemelli, V., 2007. A study on the relationship between mass concentrations, chemistry and number size distribution of urban fine aerosols in Milan, Barcelona and London. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 2217–2232.
- Saleh, T.A., 2020. Trends in the sample preparation and analysis of nanomaterials as environmental contaminants. *Trends in Environmental Analytical Chemistry* 28, e00101. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2020.e00101>
- Seigneur, C., 2019. Atmospheric Dispersion. Air Pollution: Concepts, Theory, and Applications. Cambridge University Press, pp. 95–124. <https://doi.org/10.1017/9781108674614.006>
- Sonwani, S., Madaan, S., Arora, J., Suryanarayan, S., Rangra, D., Mongia, N., Vats, T., Saxena, P., 2021. Inhalation exposure to atmospheric nanoparticles and its associated impacts on human health: a review. *Frontiers in Sustainable Cities* 3. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.690444>
- Tao, L., Zhou, Z., Tao, J., Zhang, L., Wu, C., Li, J., Yue, D., Wu, Z., Zhang, Z., Yuan, Z., Huang, J., Wang, B., 2023. *Sci. Total Environ.* 889, 164202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164202>



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**GOBIERNO DE
MÉXICO**

Tou, F., Nabi, M., Wang, J., Erfani, M., Goharian, E., Chen, J., Yang, Y., Baalousha, M., 2022. Multi method approach for analysis of road dust particles: elemental ratios, SP-ICP-TOF-MS, and TEM. *Environ. Sci.: Nano* 10. <https://doi.org/10.1039/D2EN00409G>

Vouitsis, I., Portugal, J., Kontses, A., Karlsson, H.L., Faria, M., Elihn, K., Juárez-Facio, A. T., Amato, F., Piña, B., Samaras, Z., 2023. Transport-related airborne nanoparticles: sources, different aerosol modes, and their toxicity. *Atmos. Environ.* 301, 119698. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119698>

Yang, M., Wu, Q.-Z., Zhang, Y.-T., Leskinen, A., Wang, X.-F., Komppula, M., Hakkarainen, H., Roponen, M., Jin, N.-X., Tan, W.-H., Xu, S.-L., Lin, L.-Z., Liu, R.-Q., Zeng, X.-W., Dong, G.-H., Jalava, P., 2024. Toxicological evaluation and concentration of airborne PM_{0.1} in high air pollution period in Guangzhou, China. *Sci. Total Environ.* 921, 171224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171224>

Yu, Y., Zhu, T., 2024. Concentration-dependent effects of reductive pulmonary inhalants on ultrafine particle-induced oxidative stress: insights for health risk assessment. *Environmental Science and Ecotechnology* 19, 100339. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100339>

Recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud

Recomendaciones

- BC/EC**
1. Realizar mediciones sistemáticas de carbono negro y/o carbono elemental. Dichas mediciones no deben sustituir ni reducir el control existente de los contaminantes para los que existen actualmente directrices.
 2. Llevar a cabo la elaboración de inventario de emisiones, evaluaciones de la exposición y el reparto de las fuentes para BC/EC.
 3. Adoptar medidas para reducir las emisiones de BC/EC dentro de la jurisdicción correspondiente y, en su caso, elaborar normas (u objetivos) para las concentraciones de BC/EC en el ambiente.
- UFP**
1. Cuantificar la UFP ambiental en términos de PNC (conteo o número de partículas) para un rango de tamaño con un límite inferior de 10 nm y sin restricción en el límite superior.
 2. Ampliar la estrategia común de control de la calidad del aire integrando el control de las UFP en el control de la calidad del aire existente. Incluir mediciones de PNC segregadas por tamaño en tiempo real en estaciones de vigilancia del aire seleccionadas, además de otros contaminantes atmosféricos y características de la PM.
 3. Distinguir entre PNC baja y alta para orientar las decisiones sobre las prioridades del control de las emisiones de las fuentes UFP. Se puede considerar que una PNC baja es <1000 partículas/cm³ (media de 24 horas). La PNC alta puede considerarse > 10 000 partículas/cm³ (media de 24 horas) o 20 000 partículas/cm³ (media de 1 hora).
 4. Utilizar la ciencia y la tecnología emergentes para avanzar en los enfoques de la evaluación de la exposición a los UFP para su aplicación en los estudios epidemiológicos y la gestión de los UFP.
- SDS**
1. Mantener programas adecuados de gestión de la calidad del aire y de previsión de polvo. Estos deben incluir sistemas de alerta temprana y planes de acción contra la contaminación atmosférica a corto plazo para alertar a la población de que permanezca en el interior y adopte medidas personales para minimizar la exposición y los consiguientes efectos a corto plazo sobre la salud durante los incidentes de SDS con altos niveles de PM.
 2. Mantener programas adecuados de monitoreo de la calidad del aire y procedimientos de reporte, incluyendo actividades de prorrateo de fuentes para cuantificar y caracterizar la composición de PM y el porcentaje de contribución de SDS a la concentración ambiental general de PM. Esto permitirá a las autoridades locales centrarse en las emisiones locales de PM de fuentes antropogénicas y naturales para su reducción.
 3. Realizar estudios epidemiológicos, incluidos los que abordan los efectos a largo plazo del SDS, y actividades de investigación destinadas a comprender mejor la toxicidad de los diferentes tipos de PM. Dichos estudios se recomiendan especialmente para las zonas en las que se carece de conocimientos e información suficientes sobre el riesgo para la salud debido a la exposición frecuente a las SDS.
 4. Implementar el control de la erosión eólica a través de la expansión cuidadosamente planificada de los espacios verdes que considere y se ajuste a las condiciones contextuales del ecosistema.
 5. Limpiar las calles en aquellas zonas urbanas caracterizadas por una densidad de población relativamente alta y una baja pluviosidad para evitar la resuspensión por el tráfico rodado como medida a corto plazo tras episodios intensos de SDS con altas tasas de deposición de polvo.

PNC: Concentración por número de partículas