

# LO QUE EL AIRE NOS DIJO

Historias detrás de **cuatro décadas de monitoreo** de la calidad del aire, gestión y cambio climático en México



Ruth Wouters  
Carlos Sánchez Rivas

# LO QUE EL AIRE NOS DIJO

Historias detrás de **cuatro  
décadas de monitoreo** de la  
calidad del aire, gestión  
y cambio climático en México

Ruth Wouters  
Carlos Sánchez Rivas

# LO QUE EL AIRE NOS DIJO

Historias detrás de cuatro décadas  
de monitoreo de la calidad del aire,  
gestión y cambio climático en México

© Copyright 2026 Ruth Wouters y Carlos Sánchez Rivas.

Bajo las sanciones establecidas por las leyes quedan rigurosamente prohibidas, sin autorización por escrito de los titulares del copyright, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio, procedimiento mecánico o electrónico, actual o futuro (incluyendo fotocopias y la difusión a través de internet), y la distribución de ejemplares de esta edición mediante alquiler o préstamo, salvo las excepciones que determine la ley.

La selección de la información en las líneas de tiempo presentadas en el libro integra las fechas más significativas del periodo estudiado. Para la curaduría de datos, algunos recursos gráficos emplean herramientas de inteligencia artificial a partir de la consulta de fuentes oficiales.

Fotografía de portada © Getty Images. Usada bajo licencia Unsplash+. Fotografía original "An aerial view of a city with lots of traffic" (2023), tomada en Eje Central Lázaro Cárdenas, Centro Histórico, Ciudad de México, México.

Corrección de textos: Diana Arizmendi

Cuidado de la edición: Isabel Orozco

Diseño y formación: Marian López

Milian und Kunst Editores SA de CV

Revisor Técnico de texto: Dr. Pablo Cicero Fernández

ISBN: 978-607-29-8155-3

Impreso y encuadernado en México

Este libro fue impreso en papel Bond Natural Paper Capuccino, elaborado con fibras 100 % recicladas y tecnología Colorlok®. Cumple con la normativa federal sobre adquisiciones sustentables, está libre de cloro elemental (ECF) y presenta valores cromáticos conforme al sistema CIE L\*a\*b\*, de acuerdo con la norma ISO 11475. Su producción contribuye al ahorro de recursos naturales y a la reducción de la huella ambiental.

## ÍNDICE

Prólogo - Calidad del aire, clima y compromiso	5
Introducción	8
<b>Cooperación, innovación y perseverancia: Experiencias en la gestión de la calidad del aire y las medidas políticas</b>	13
Rodolfo Lacy Tamayo	
<b>Una vida en el campo: El rol de un técnico en la historia de la calidad del aire en México</b>	19
Felipe Angeles Garcia	
<b>Más que cifras: Testimonios del monitoreo de la calidad del aire</b>	25
Carlos Sánchez Rivas	
<b>Diagnosticando el aliento de una ciudad: El papel del monitoreo de la calidad del aire en la política ambiental y de salud pública de la Ciudad de México</b>	31
Pablo Cicero Fernández	
<b>Del uso de plantas de tabaco a la gestión ambiental: La biología como puente hacia la construcción de políticas públicas de calidad del aire</b>	37
Mónica V. Alegre González	
<b>Una profesión poco conocida con impacto ambiental</b>	43
Pablo Escamilla Báez	
<b>De las refinerías a los productos de limpieza: Las fuentes cambiantes de la contaminación del aire</b>	49
Víctor Hugo Páramo Figueroa	
<b>Evolución de la química atmosférica: Entendiendo la contaminación del aire y sus consecuencias</b>	55
Rodolfo Sosa Echeverría	
<b>La arquitectura del acuerdo</b>	61
Sergio Reyes Luján	
Epílogo - Considerar al pasado, avanzar hacia el futuro	66
Bibliografía sugerida	70

## Calidad del aire, clima y compromiso

En el momento que me invitaron a escribir este prólogo, me sentí tanto honrado como esperanzado. Honrado porque he tenido el privilegio de participar en distintas etapas y funciones —como investigador, funcionario público y miembro de la sociedad civil—, en el largo y complejo camino que ha recorrido México para comprender y mejorar su calidad del aire. Esperanzado porque esta obra da voz y visibilidad a muchas de las personas que han hecho posible ese camino. Su trabajo es un referente que seguirá inspirando a las nuevas generaciones de científicos, líderes en la toma de decisiones y defensores del medio ambiente.

Este libro reúne décadas de esfuerzos. No solo representa avances científicos, sino también las historias humanas detrás de ellos. A través de entrevistas con pioneros, visionarios y profesionales que sentaron las bases de los sistemas de monitoreo atmosférico en México, la obra rescata el trabajo de quienes, con constancia y bajo condiciones muchas veces adversas, recopilaron datos, mantuvieron instrumentos y promovieron mejores estándares de emisión y calidad del aire.

## Calidad del aire y cambio climático: Un reto compartido

5

Una de las contribuciones más valiosas de esta publicación es recordarnos que la contaminación atmosférica y el cambio climático están profundamente interrelacionados. Durante mucho tiempo fueron tratados como problemas separados, pero hoy sabemos que comparten causas comunes: el transporte, la industria y la generación de energía. El uso de combustibles más limpios, normas más estrictas y una transición energética hacia fuentes renovables, benefician tanto a la salud urbana como a la estabilidad climática del planeta. En este contexto, el monitoreo de la calidad del aire desempeña una doble función: protege vidas a corto plazo y aporta información esencial clave para la mitigación climática a corto y largo plazo.

Entre las lecciones y aprendizajes reiterados en las páginas de esta obra, destaca la importancia fundamental del monitoreo. Sin datos confiables, continuos y públicos, la contaminación del aire permanecería invisible para la ciudadanía y los responsables de políticas públicas. Las mediciones transforman la sospecha en evidencia, y la evidencia en acción. En la Ciudad de México, fue únicamente a partir del monitoreo sistemático — iniciado a finales de los años ochenta — que comprendimos la verdadera magnitud del problema. Ese conocimiento permitió implementar medidas eficaces para controlar contaminantes como el plomo, el dióxido de azufre y el monóxido de carbono, además de facilitar la colaboración internacional.

## Del dato a la decisión: El poder del monitoreo

El monitoreo es fundamental para construir la confianza pública y exigir responsabilidad institucional. Informa a la ciudadanía, empodera a los periodistas y respalda a los profesionales de la salud, revelando tendencias de largo plazo tanto en las emisiones como en la voluntad política para enfrentarlas. Gracias al monitoreo, México pudo tomar decisiones cruciales en los años noventa, como eliminar el plomo en la gasolina, reducir el contenido de azufre en combustibles e introducir el uso de convertidores catalíticos en los vehículos. Estos avances no fueron casuales, son el fruto de un trabajo científico sostenido, de persuasión política y de decisiones valientes del más alto nivel.

No obstante, el progreso no ha sido lineal. Como señalan varios de los entrevistados en este libro, México se ha tardado en adoptar los estándares internacionales de calidad del aire y emisiones vehiculares. Los retrasos no son científicos, sino industriales y administrativos. A pesar de ello, también existen ejemplos de innovación, entre los que se encuentra la adaptación de metodologías de evaluación de exposición para identificar poblaciones vulnerables; el uso de bioindicadores en regiones con infraestructura limitada, y el desarrollo de alianzas regionales y estructuras de gestión novedosa para mejorar la coordinación ambiental entre jurisdicciones.

## Resistencia, innovación y futuro común

La conexión entre la calidad del aire y el cambio climático ha cobrado mayor relevancia en las últimas décadas. El concepto de co-beneficios ha alcanzado madurez, pues hoy sabemos que reducir el metano ayuda tanto a frenar el calentamiento global como a disminuir el ozono troposférico. Este doble impacto fortalece la necesidad de políticas integradas. Pero, para diseñarlas, necesitamos datos sólidos que proporcionan los sistemas de monitoreo.

## Participación y memoria institucional

Otro tema clave que aborda esta obra es el papel de la participación pública. En la historia ambiental de México, con frecuencia ha

sido la presión de la ciudadanía, la comunidad académica y las organizaciones sociales las que han impulsado a los gobiernos a actuar. Los estándares de calidad del aire siguen evolucionando, no sólo por los avances científicos, sino también por las crecientes demandas sociales. A medida que la ciencia progresa y los límites aceptables se vuelven más estrictos, los niveles antes considerados “seguros”, ahora requieren de intervención inmediata. Esta transformación puede generar confusión, pero refleja un avance hacia una comprensión más precisa y justa de lo que significa respirar aire limpio.

Finalmente, este libro cumple una función esencial: preservar la memoria institucional. En un país donde las políticas y los gobiernos cambian con frecuencia, es fácil olvidar los procesos que tomaron décadas en construirse o repetir errores del pasado. Las entrevistas y reflexiones aquí reunidas constituyen un archivo vivo, una fuente invaluable para estudiantes, investigadores y responsables de políticas públicas, pero también un homenaje a quienes continuaron trabajando cuando el respaldo político era escaso y la atención pública se desvanecía.

## Un legado que continúa

A quienes se inician en este campo: su trabajo es importante. Ya sea diseñando instrumentos, analizando datos, asesorando a gobiernos o sensibilizando a la comunidad, ustedes dan continuidad a un legado intergeneracional. No heredan un problema, sino que se integran como parte activa de su solución.

Las voces reunidas en esta publicación representan apenas una muestra del universo de profesionales, responsables de políticas públicas y defensores que han contribuido a mejorar la calidad del aire en México. Espero que este trabajo motive nuevas investigaciones y publicaciones que den visibilidad a muchas más historias que merecen ser contadas y reconocidas ampliamente.

Que este libro sirva como base para un compromiso más profundo, una colaboración más amplia y una acción más decidida.

Dr. Adrián **Fernández** Bremauntz

# INTRODUCCIÓN

Este libro reúne una serie de entrevistas con personas que han contribuido de manera significativa a la conformación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire en México. Científicos, ingenieros y funcionarios públicos comparten cómo este tema se convirtió en una prioridad política, cómo se estructuraron los sistemas y cómo la ciencia, la salud y las políticas públicas han influido mutuamente a lo largo del tiempo. Sus relatos destacan, por ejemplo, el uso de plantas como bioindicadores, la construcción de redes nacionales de monitoreo y los esfuerzos por hacer que los datos sean más accesibles. Estas entrevistas ofrecen una mirada personal y poco común sobre cuatro décadas de construcción de conocimiento ambiental.

---

## Una convicción compartida

El proyecto nació a partir de un propósito colectivo: la historia de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire en México no puede contarse únicamente a través de informes formales. Detrás de los datos compilados hay personas que desafiaron el statu quo, diseñaron nuevos métodos, negociaron con funcionarios de distintas dependencias gubernamentales, formaron a estudiantes y lucharon por mantener los temas ambientales en la agenda pública. A través de sus voces, este libro reconstruye una historia compleja de innovación, resiliencia, conflicto y aprendizaje. Lamentablemente, algunas figuras clave no pudieron ser incluidas, debido a que ya no están con nosotros o no fue posible localizarlas.

Este libro está dirigido a un público amplio y diverso. Estudiantes e investigadores en ciencias ambientales, salud pública o derecho ambiental encontrarán en estas páginas valiosas reflexiones sobre cómo se produce y se comparte el conocimiento. Para profesionales del gobierno, integrantes de la sociedad civil, periodistas y educadores, las entrevistas ofrecen lecciones sobre lo que implica construir instituciones duraderas, problematizando lo frágil que puede ser el progreso en materia ambiental.

Por encima de todo, este libro es para quienes se preocupan por el aire limpio y la gestión ambiental, y desean comprender cómo los datos y el conocimiento científico se transforman en políticas públicas, o por qué a veces no lo hacen.

## Aprender del pasado

Esperamos que este libro cumpla varios propósitos. En primer lugar, documentar una historia nacional que aún está poco representada, tanto en la literatura nacional como internacional. Los esfuerzos ambientales de México han atraído la atención global, particularmente por sus iniciativas tempranas de monitoreo de la calidad del aire. Sin embargo, las dinámicas personales e institucionales detrás de esos esfuerzos rara vez se han documentado a profundidad. Este libro contribuye a llenar ese vacío.

En segundo lugar, ofrecer una reflexión crítica sobre la compleja relación entre la calidad del aire y las políticas públicas. Muchas entrevistas revelan momentos de convergencia —cuando la evidencia científica condujo directamente a la acción—, pero también momentos de desconexión, demora o interferencia política. La implementación de estándares internacionales, la adopción de nuevas tecnologías de monitoreo y el desarrollo de estrategias regionales rara vez fueron procesos sencillos. Aún así, muchos entrevistados expresan un optimismo prudente respecto a las nuevas generaciones de científicos, la creciente visibilidad de la salud ambiental y la mayor integración entre las agendas de cambio climático y calidad del aire.

La intersección entre la contaminación atmosférica y el cambio climático teje un hilo conductor a lo largo de las conversaciones. Varios entrevistados subrayan cómo los esfuerzos iniciales de monitoreo urbano sentaron las bases para estrategias climáticas más ambiciosas. Otros destacan la necesidad de actualizar normas, asegurar la transparencia de los datos y mejorar la coordinación entre el sector ambiental y energético. El mensaje compartido es claro: la calidad del aire es un asunto central de salud pública y también un pilar de la resiliencia climática.

## Un mosaico de perspectivas

A lo largo del libro surgen temas recurrentes: el papel crucial del acceso a los datos sobre calidad del aire; los dilemas éticos en la toma de decisiones ambientales; la distribución desigual de la contaminación, sus impactos en la salud y la fragilidad de las instituciones ante los cambios políticos. Algunas entrevistas se centran en los avances científicos, otras en hitos regulatorios o

en la presión social. En conjunto, ofrecen un mosaico de perspectivas —en ocasiones complementarias, en otras en tensión— que reflejan la complejidad de la gestión ambiental en México.

Agradecemos profundamente a todas las personas entrevistadas para este libro por su generosa colaboración y disposición para compartir sus experiencias. Sus testimonios hicieron posible documentar una historia que pocas veces se cuenta de esta manera.

Extendemos también nuestro agradecimiento a Adrián Fernández Bremauntz y al equipo de Iniciativa Climática de México, cuyo respaldo y colaboración hicieron posible la existencia de este trabajo.

Esperamos que este libro informe, provoque e inspire. Que se convierta en un pilar para futuras investigaciones, una herramienta de enseñanza, un insumo para la política pública y un recordatorio de que un aire más limpio no es solo un reto científico, sino también social y político.

Ruth **Wouters**  
Carlos **Sánchez Rivas**

### Detrás de la historia

- » En la década de 1990, México comenzó a desarrollar políticas sistemáticas de control para la contaminación del aire, basadas en datos de salud, inventarios integrales de emisiones y lineamientos internacionales.
- » Las redes automatizadas de monitoreo y programas de largo plazo como ProAire fueron posibles gracias a la mejora en la infraestructura de datos.
- » La colaboración entre expertos e instituciones de investigación mexicanas e internacionales se incrementó, lo que permitió fundamentar los estándares de calidad del aire en análisis complejos de riesgo.
- » La cooperación regional en América Latina apoyó el intercambio de conocimientos y estrategias para la gestión de la calidad del aire.
- » Organismos internacionales como la OCDE y el Banco Mundial comenzaron a integrar las experiencias de México en marcos ambientales más amplios.

### Cooperación, innovación y perseverancia: Experiencias en la gestión de la calidad del aire y las medidas políticas

En días despejados, se hacen visibles los contornos de los volcanes que rodean la Ciudad de México. El ingeniero ambiental Rodolfo Lacy, se refiere a esta excepcional claridad con una frase de Alfonso Reyes: “la región más transparente del aire”, una descripción que posteriormente utilizó Carlos Fuentes con ironía. Con no más de tres días al año, con esta vista la ironía parece hoy justificada. Para Lacy, este cambio en la visibilidad refleja transformaciones más amplias en el desarrollo urbano, el clima y las políticas de salud pública.

### La ingeniería como respuesta a un desafío de salud pública

Lacy comenzó a estudiar ingeniería ambiental en la década de 1970, cuando la contaminación atmosférica en la Ciudad de México apenas se reconocía como un problema político o de salud. Sin embargo, ya era un fenómeno visible y dañino. Las tormentas de polvo transportaban contaminantes provenientes de los lechos de lagos secos, fábricas de ladrillos informales e industria pesada. Lacy recuerda que el polvo contenía plomo, materia orgánica y otras sustancias nocivas, aunque no siempre se reconocían como tales por parte del público.

Impulsado por la urgencia de estos problemas, Lacy decidió especializarse en calidad del aire, una decisión inusual en aquel entonces, debido a la falta de infraestructura institucional. En 1989, se incorporó al gobierno de la Ciudad de México, y desarrolló su primer programa formal de gestión de la calidad del aire. Posteriormente lideraría iniciativas emblemáticas, como el Programa Integral de Control de la Contaminación Atmosférica (PICCA), el plan de contingencia para días de alta contaminación, y más adelante, la estrategia ProAire. A pesar de la falta de presupuesto, lineamientos o incluso una descripción de funciones definida, logró junto con un pequeño equipo establecer los sistemas y programas necesarios para abordar la contaminación atmosférica.

Ver **Figura 7**. Seis décadas de colaboración entre instituciones y organismos para el desarrollo de las políticas actuales para monitorear la calidad del aire en México.

Su trabajo dio lugar a las primeras estrategias integrales que combinaron el monitoreo de emisiones, la restricción vehicular, la planificación urbana y las campañas de salud pública. Estas estrategias se convirtieron en un referente para otras ciudades latinoamericanas, contribuyendo a la creación de marcos regulatorios nacionales más amplios.

## Primeros pasos de política y medidas estratégicas

Las medidas iniciales incluyeron un programa de restricción vehicular en toda la ciudad y el cierre de instalaciones altamente contaminantes. En algunos casos, la aplicación de la normativa requirió coordinación con la policía o con las autoridades federales. Se utilizaron datos epidemiológicos para vincular la contaminación con las enfermedades respiratorias y la mortalidad.

*Se eliminó el plomo de la gasolina después de que los hijos del embajador estadounidense sufrieran intoxicación por plomo.*

Algunos cambios ocurrieron por casualidad. Se eliminó el plomo de la gasolina después de que los hijos del embajador estadounidense su-

frieran intoxicación por plomo, lo que derivó en medidas ejecutivas a nivel presidencial. De igual forma, las fundiciones clandestinas y las últimas ladrilleras ilegales dentro de la ciudad, cerca del densamente poblado barrio de Tlatelolco, fueron clausuradas mediante operativos coordinados.

Se introdujeron convertidores catalíticos y se negociaron nuevas normas para los combustibles. El equipo de Lacy también creó sistemas de alerta pública y reformuló los índices de calidad del aire, lo que contribuyó a crear conciencia e influir en el comportamiento civil. Cabe destacar que se desarrolló el índice IMECA (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire) para monitorear los niveles de contaminación y comunicar los riesgos al público.

Paralelamente, se establecieron programas para promover una industria más limpia. Lacy logró acuerdos con empresas estatales y del sector privado para adoptar tecnologías menos contaminantes o cerrar instalaciones obsoletas. Esto incluyó el cierre de una refinería, junto con la limpieza del sitio, que se convirtió en un parque ecológico, y cambios en las operaciones de las centrales eléctricas.

## Cooperación institucional e internacional

Lacy trabajó a través de instituciones y fronteras para fortalecer la gestión de la calidad del aire. Colaboraciones internacionales con expertos de Estados Unidos, Alemania, Japón, Canadá y Francia apoyaron el monitoreo del aire, la reforestación y la elaboración de estándares para las emisiones industriales.

Un pilar en este proceso fue su colaboración con el Premio Nobel Mario Molina, quien en 1991 presidió un grupo asesor que brindó respaldo científico a las decisiones de largo plazo. Estas alianzas ayudaron a México a generar credibilidad y acceder a financiamiento por medio de organizaciones como el Banco Mundial y las Naciones Unidas.

Lacy considera que dicha cooperación fue vital en un momento en que la capacidad nacional aún estaba en desarrollo. El intercambio de experiencias y de ejemplos internacionales reforzó la formulación de políticas locales. La ciudad también participó en iniciativas de investigación más amplias, como el Proyecto Milagro, que exploró cómo los contaminantes de la Ciudad de México afectan las condiciones atmosféricas globales.

## Gestión de la complejidad y la resistencia

Lacy enfatiza que la política ambiental requiere de un equilibrio entre la ciencia, la política y la sociedad. Programas como Hoy No Circula (programa de restricción vehicular basado en el número de matrícula) necesitaban tanto comunicación pública como justificación técnica. De hecho, recuerda que el lanzamiento de dicho programa se percibió internamente como un referéndum sobre la credibilidad del gobierno.

Incluso asignar nombres a los programas era un acto estratégico, ya que un título engañoso podía erosionar la confianza. Su equipo hizo hincapié en la transparencia, la publicación de datos en tiempo real y la interacción con el público. La resistencia surgió desde múltiples sectores, pero el diálogo abierto ayudó a generar credibilidad. Recuerda una larga tarde en la escuela de sus hijos explicando la política sobre contaminación atmosférica. Un padre le dijo: “No sé si estoy convencido, pero admiro su paciencia”, comenta Lacy.

Para impulsar el desarrollo institucional, Lacy también contribuyó a la creación de laboratorios de análisis de combustibles, emisiones vehiculares y monitoreo de la calidad del aire. Estas instalaciones desempeñaron un papel fundamental para garantizar la transparencia y la generación de datos.

## Reveses recientes y preocupaciones persistentes

En los últimos años, Lacy ha advertido un retroceso tanto en el monitoreo como en la política ambiental. Se han cerrado laboratorios, las estaciones de monitoreo han perdido financiamiento y la capacidad técnica se ha debilitado. Estos cambios, argumenta,

*“Construimos infraestructura no solo con equipos, sino también con confianza y colaboración”*

reducen la capacidad de la Ciudad de México para evaluar contaminantes clave o la calidad del combustible.

En su apogeo, la red de la ciudad contaba con 25 estaciones que medían una amplia gama de contaminantes. Hoy en día, pocas operan en pleno funcionamiento. Según Lacy, esto refleja un cambio en las prioridades políticas, donde las inversiones a largo plazo suelen sacrificarse por ganancias a corto plazo.

“Construimos infraestructura no solo con equipos, sino también con confianza y colaboración”, afirma. “Sin mantenimiento, todo empieza a deteriorarse”. También advierte sobre el riesgo de interferencia política y la pérdida de independencia técnica, factores cruciales para mantener los datos ambientales fiables.

## Principios clave para futuros profesionales

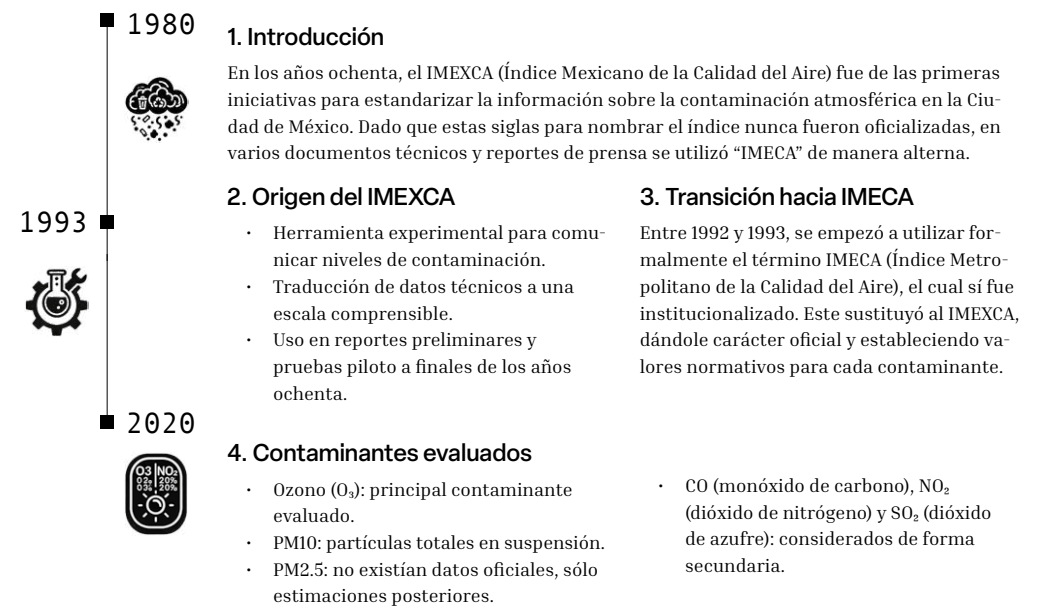
Dirigiéndose a los futuros profesionales, Lacy destaca algunos aspectos esenciales: constancia, paciencia y adaptabilidad. La formulación de políticas rara vez sigue un camino continuo y estable. Requiere visión, pero también la capacidad de responder a contextos políticos y sociales en constante cambio.

Su trabajo le ha enseñado que el aprendizaje continuo y mantener un diálogo con el trabajo de la comunidad científica es de suma importancia. Argumenta que la experiencia técnica debe ir de la mano con la capacidad de formar coaliciones y comunicarse con claridad.

Finalmente, resalta el poder de escuchar. “A veces, la diferencia no reside en convencer a los demás, sino en tomar realmente en serio sus preocupaciones”.

La trayectoria de Lacy demuestra que es posible lograr mejoras significativas en la calidad del aire, pero solo mediante una atención constante a la ciencia, la sociedad y la compleja dinámica entre ambas. Para él, el trabajo ambiental nunca es estático: “Se empieza con un destornillador —afirma—, pero con el tiempo, se necesitará un taladro y, finalmente, un martillo. Cada etapa exige nuevas herramientas y un mayor compromiso”.

## Evolución del IMEXCA en la Ciudad de México



### 5. Tabla comparativa

Contaminante	IMEXCA (80-90s)	IMECA (1995-2019)	Índice Aire y Salud (2020-)
Ozono (O <sub>3</sub> )	≈ 330 días/año con excedencias	≈ 220 días/año	≈ 230 días/año
PM10	≈ 340 días/año	≈ 150 días/año	≈ 180 días/año
PM2.5	≈ 200 días/año (no oficial)	≈ 180 días/año	≈ 90 días/año
Comentario	PM2.5 no medido oficialmente		

Figura 1. Evolución de los primeros reportes de calidad del aire de la Ciudad de México

Ver Figura 1. Principales cambios metodológicos y normativos para el monitoreo de niveles de contaminación. El equipo de Lacy tuvo un papel clave en la mayoría de ellos.

## Detrás de la historia

- » El monitoreo de la calidad del aire en los años setenta dependía de redes manuales. La mayoría de las mediciones en México se realizaban mediante muestreo con filtros; las estaciones automatizadas eran escasas y, con frecuencia, poco confiables.
- » Los técnicos de campo fueron la columna vertebral de los primeros esfuerzos de monitoreo. Ángeles y sus colegas instalaban, daban mantenimiento y recolectaban muestras de aire en ciudades y zonas rurales.
- » Los perfiles detallados de contaminación dependían del muestreo manual. La identificación de tipos de partículas y metales pesados solo era posible mediante la recolección física de muestras, no con sistemas automatizados.
- » La expansión de la cobertura de monitoreo comenzó con iniciativas impulsadas por técnicos. El despliegue nacional de nuevas estaciones a inicios de los años ochenta fue posible gracias al uso creativo de los recursos disponibles.
- » Las investigaciones sobre salud a menudo dependían de datos recolectados manualmente. Casos críticos de contaminación por plomo cerca de instalaciones industriales fueron confirmados gracias al muestreo directo en lugares como Chihuahua y Torreón.

## Una vida en el campo: El rol de un técnico en la historia de la calidad del aire en México

Cuando Felipe Ángeles García comenzó a trabajar para el gobierno federal en 1975, no imaginaba que se convertiría en uno de los pioneros del monitoreo de la calidad del aire en México. En 1976 se incorporó al departamento técnico y, para 1977, ya trabajaba en la red manual de monitoreo atmosférico en la Ciudad de México. “Todo era nuevo para mí”, recuerda Ángeles. “No conocía el tema, pero me sumergí en él por completo.”

A medida que se familiarizaba con el campo, Ángeles percibió las limitaciones de las técnicas utilizadas en ese momento. Aunque en esos años comenzaba a establecerse una red automatizada moderna, principalmente con equipo holandés, Ángeles notó que la tecnología era vulnerable: “La comunicación dependía de la red telefónica y las estaciones fallaban con frecuencia. Además, hacía falta personal técnico bien capacitado.”

Ángeles se especializó en la recolección manual de muestras de aire. Utilizando un equipo sencillo, similar a una aspiradora, recogía partículas en filtros que luego se analizaban en laboratorios. Descubrió que el muestreo manual proporcionaba información única: “Podías ver el tipo de partículas —biológicas, orgánicas, volcánicas—, y determinar la presencia de metales pesados. Eso no lo daban las estaciones automáticas, que solo arrojaban un número.”

## Conciencia y colaboración

En los primeros años, la conciencia pública sobre la contaminación del aire era aún muy limitada. “La gente ni siquiera sabía que existía la contaminación, mucho menos que podía afectar su salud.” Ángeles colaboró con el sector de Salud para instalar estaciones de monitoreo del aire en sus centros, ayudando así a sentar las bases de futuras políticas ambientales.

Su dedicación lo llevó a realizar aportaciones significativas. Fue él quien seleccionó la ubicación de la estación de monitoreo del Pedregal en la Ciudad de México, un sitio que sigue en operación

hasta el día de hoy. Mientras trabajaba en el Pedregal de San Ángel, una de las zonas más acomodadas de la ciudad, encontró una escuela primaria pública, algo poco común en el área. “Lo que me sorprendió fue encontrar una escuela primaria pública justo en medio de un barrio tan adinerado.”

Gracias a la cooperación con el director de la escuela y con sus supervisores, se logró establecer la estación. Ángeles subraya que, aunque él seleccionó el sitio, no participó en la instalación técnica de la red automatizada. “En ese momento, yo seguía trabajando únicamente con la red manual, pero fui quien encontró el sitio”, explica.

## Expansión de la red nacional

La curiosidad e iniciativa de Ángeles pronto le permitió desempeñar un papel clave en la expansión de las redes manuales de monitoreo en México. Al notar decenas de muestreadores de alto volumen sin uso almacenados en una bodega, propuso aprovecharlos. Su idea llevó a la instalación de nuevas estaciones de monitoreo en ciudades como Querétaro, Puebla y Saltillo.

Aunque Ángeles se describía a sí mismo como “un soldado raso”, poco a poco ascendió en responsabilidades hasta encabezar un equipo encargado de recolectar muestras manuales de aire en todo el país. Mantener altos estándares de funcionamiento se convirtió en una de sus señas identitarias. Supervisaba rigurosamente la calidad y desarrollaba protocolos internos basados en lineamientos internacionales. “Me di cuenta de que una preparación cuidadosa y una entrega rápida al laboratorio eran fundamentales.”

## La actitud importa

Para Ángeles, la actitud es tan importante como las habilidades técnicas. “Lo primero que siempre dejaba claro a los jóvenes técnicos era que necesitaban tener la actitud correcta”, afirma. Recuerda cómo algunos se negaban a adaptarse a las condiciones de trabajo en campo, mientras que otros mostraban gran dedicación, dispuestos a trabajar largas horas para cumplir adecuadamente con sus tareas.

Durante este periodo, Ángeles viajó extensamente por el país, ayudando a establecer redes de monitoreo en condiciones muchas veces difíciles. “El trabajo era duro. Conducíamos durante días por caminos en mal estado y, a veces, teníamos que improvisar para instalar los equipos de forma segura”, recuerda. Sin embargo, considera esos años una experiencia valiosa. “Me di cuenta de la importancia de lo que hacíamos, realmente estábamos haciendo una contribución.”

También sentía orgullo al revisar y criticar el trabajo técnico de distintas redes. “Me daba satisfacción identificar y señalar errores. No fallas técnicas, sino cosas como mantener limpios los inyectores de muestreo, algo esencial y a menudo descuidado.”

## Red Manual vs. Red Automática

Ángeles siempre se mantuvo como un firme defensor del monitoreo manual. “Las estaciones automáticas daban datos rápidos, pero carecían de detalles sobre la composición del aire”, explica. Su trabajo demostró lo importante que es seguir investigando las partículas finas, los metales pesados y las partículas biológicas mediante métodos manuales, especialmente en contextos donde hay riesgos para la salud. En ciudades como Chihuahua y Torreón, Ángeles contribuyó con datos para investigaciones importantes sobre la contaminación por plomo cerca de instalaciones industriales. En Chihuahua, instaló un muestreador de alto volumen cerca de la fábrica de acero de Ávalos, a pesar del calor extremo. “Instalamos ahí porque en un centro de salud cercano estaban naciendo bebés con plomo en la sangre”, relata.

Los médicos vincularon la contaminación con la fábrica cercana, lo que impulsó la instalación de una red manual y, posteriormente, de equipos automatizados. Pronto se hizo evidente que el equipo automático no detectaba niveles de plomo; el muestreo manual era el único medio de obtener esa información crítica. En Torreón, el monitoreo gubernamental se volvió necesario porque el muestreo privado de la empresa Peñoles carecía de independencia. “Los médicos de la Secretaría de Salud llegaron a la zona de conflicto vestidos con trajes blancos, como astronautas”, recuerda Ángeles. “La población se asustó. Analizándolo ahora, no fue la mejor estrategia.” Durante estas operaciones, Ángeles y

su equipo recolectaron muestras en azoteas, dentro de viviendas, en cuartos técnicos e incluso dentro de las propias instalaciones industriales. Sus hallazgos confirmaron prácticas ambientales deficientes y una negligencia grave.

### Apoyando la formación de la siguiente generación

Más adelante en su carrera, Ángeles se dedicó a formar nuevos técnicos. A través de proyectos como el Programa Ambiental México y el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental de México (CENICA), impartió capacitación práctica en técnicas de monitoreo de calidad del aire. Bajo su mentoría, jóvenes técnicos se convirtieron en especialistas, gestionando redes en estados como Morelos, Puebla y Guanajuato. “Muchos egresados llegaban con mucho conocimiento teórico, pero sin habilidades prácticas, como recolectar y manipular correctamente las muestras.”

*“Muchos técnicos sólo querían escalar puestos sin dominar lo básico. Es fundamental construir experiencia real y desarrollar un amor genuino por el trabajo.”*

Si pudiera empezar de nuevo, Ángeles pondría aún más énfasis en la selección de personal comprometido: “Muchos técnicos sólo querían escalar puestos sin dominar lo básico. Es fundamental construir experiencia real y desarrollar un amor genuino por el trabajo.”

### Una larga carrera al servicio de la calidad del aire

Después de más de cuatro décadas dedicadas al monitoreo de la calidad del aire, Ángeles advierte que el progreso requiere más que sólo tecnología avanzada. Aunque la Ciudad de México cuenta con redes automáticas de excelente nivel, observa que gran parte de los datos no se aprovechan lo suficiente, ya que la participación del público es escasa. Espera que la nueva generación siga valorando el monitoreo preciso e independiente para gestionar la contaminación, pero sobre todo, para proteger la vida de las personas.

## Contaminación atmosférica, 1978 Índice de calidad del aire, Valle de México

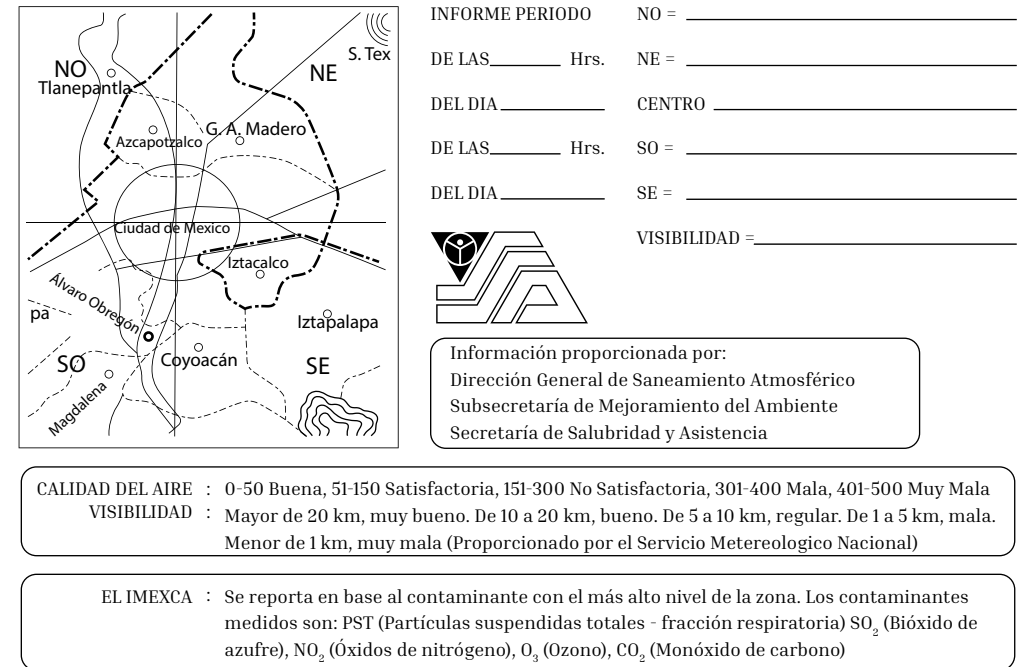


Figura 2. Mapa técnico Contaminación Atmosférica, Índice de calidad del aire en el Valle de México.  
 Fuente: El Índice Mexicano de la Calidad del Aire (IMEXCA). Memorandum Técnico SMA/DGS AT/02-78

## Detrás de la historia

- » A finales de la década de 1980, la Ciudad de México era una de las urbes más contaminadas del mundo, con niveles de ozono y plomo muy por encima de los umbrales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- » Estudios internacionales mostraron vínculos entre la contaminación del aire y problemas de salud como enfermedades respiratorias y cardíacas, lo que generó llamados a la acción en México.
- » Jóvenes profesionales ambientales, como Carlos Sánchez Rivas, iniciaron los esfuerzos de mapeo de la contaminación y aplicaron técnicas de análisis de uso del suelo a nivel local para la instalación de estaciones de monitoreo.
- » Las primeras normas formales de calidad del aire en México se emitieron en 1982, aunque su aplicación sistemática comenzó mucho más tarde.
- » El monitoreo temprano dependía en gran medida de lecturas manuales y redes incompletas; las estaciones automatizadas solo empezaron a expandirse de manera significativa en la década de 1990.

## Más que cifras: Testimonios del monitoreo de la calidad del aire

Entre 1982 y 1996, Carlos Sánchez Rivas trabajó en México contribuyendo a la construcción de una infraestructura confiable para la medición y el análisis de la contaminación atmosférica. Como geógrafo, integró la dimensión espacial y temporal en el estudio de la calidad del aire, combinando trabajo de campo, innovación tecnológica y colaboración con instituciones nacionales e internacionales. Su labor no solo aportó datos esenciales para la investigación científica, sino que también ofreció información fiable a los responsables políticos y fomentó la concientización pública. Siempre ha defendido el derecho a respirar aire limpio, convencido de que el conocimiento impulsa el cambio.

Sánchez comenzó su carrera a principios de la década de 1980 como analista de datos de contaminación atmosférica en la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente. En 1986 inició una maestría en Toluca, donde participó en algunos de los primeros esfuerzos para monitorear y cartografiar la calidad del aire.

## Las primeras medidas: Trabajo manual y la urgencia de contar con datos

Sus primeros trabajos combinaron herramientas de muestreo manual con datos de redes automáticas existentes, aunque la calidad de estos últimos era, a menudo, inconsistente. En algunos casos, se habilitaron mediciones a través de estaciones móviles instaladas en zonas específicas. Sin embargo, los resultados pronto revelaron un panorama preocupante, reflejando altas concentraciones de material particulado, óxidos de azufre y nitrógeno, además de plomo, atribuidos principalmente al tráfico vehicular. Los datos recopilados por él y su equipo se utilizaron posteriormente en debates sobre políticas públicas para la eliminación gradual de la gasolina con plomo y la introducción de vehículos con convertidores catalíticos.

Ver **Figura 11**. Representación ilustrativa inspirada en el trabajo de Sánchez con globos meteorológicos para crear perfiles verticales atmosféricos en Toluca.

Con esa experiencia, Sánchez se involucró en proyectos regionales de medición en el norte del país, donde estudió las diferencias en la calidad del aire a ambos lados de la frontera entre Estados Unidos y México. La colaboración con instituciones estadounidenses —como la Agencia de Protección Ambiental (EPA)— y con universidades de ambos países le permitió comparar métodos de medición e interpretar los datos en un contexto más amplio. Enfatizó la importancia de los protocolos estandarizados, pero también la necesidad de flexibilidad y adaptabilidad en las condiciones locales.

## Nuevas perspectivas

En 1990, Sánchez recibió una beca para cursar un posgrado en Gestión Ambiental en Italia. En sus estudios aprendió a trabajar con Sistemas de Información Geográfica (SIG), modelado y análisis de datos orientados a políticas públicas. Esta especialización le brindó nuevas perspectivas sobre cómo los datos ambientales pueden ser útiles en la formulación de políticas. En Italia, observó cómo los mapas y las visualizaciones podían desempeñar un papel fundamental en la comunicación con los responsables políticos y con la ciudadanía.

Estos conocimientos lo acompañaron en su regreso a México, donde comenzó a mejorar el procesamiento y la presentación de datos en sus proyectos. Durante una breve estancia en una región desértica del norte de África, adquirió experiencia con la contaminación atmosférica natural, como el polvo proveniente de zonas desérticas. Le fascinó cómo la población del lugar respondía de forma natural a los cambios en la calidad del aire. Esta dimensión cultural de la percepción atmosférica reforzó su convicción de que los problemas ambientales siempre están arraigados en los contextos sociales.

## De los datos a la colaboración intersectorial y multidisciplinaria

Tras su regreso al Instituto Nacional de Ecología, Sánchez asumió la coordinación de un equipo de análisis de la calidad del aire en la Ciudad de México. Formó grupos multidisciplinarios, impulsó redes de monitoreo y experimentó con métodos innovadores. Entre

ellos, el uso de plantas de tabaco y alfalfa como bioindicadores, un enfoque con el que más tarde trabajaría Mónica Alegre González. Las hojas de estas plantas mostraron daños visibles a medida que aumentaban las concentraciones de ozono y óxidos de nitrógeno. Este método fue posteriormente desarrollado por otros investigadores.

*“Nosotros proporcionamos las cifras, ellos sacaron las conclusiones”*

Durante este período, también se fortaleció la colaboración con instituciones de salud. La dependencia en la que trabajaba Sánchez compartió datos de medición con el Instituto Nacional de Salud Pública y otras entidades. Estos datos se emplearon en estudios sobre la relación entre la contaminación atmosférica y los problemas respiratorios infantiles. Sánchez consideraba esta colaboración como una responsabilidad compartida: su trabajo consistía en proporcionar datos confiables que otros pudieran traducir en perspectivas médicas. “Nosotros proporcionamos las cifras, ellos sacaron las conclusiones”, declaró posteriormente.

## La red en Toluca como modelo

En 1993 regresó a Toluca, esta vez para liderar un equipo responsable de una red de monitoreo automatizado. Esta tarea asignada a Sánchez, fue una decisión sencilla, ya que había participado previamente en el diseño, planificación e instalación de esta red. Gracias a su conocimiento de la ciudad y a su experiencia en proyectos de medición anteriores, sabía dónde ubicar los puntos de monitoreo más efectivos, con la visión de expandir la red a nivel regional.

Además de los equipos de medición estándar, utilizó globos meteorológicos, proporcionados por medio de la colaboración con una central nuclear, para crear perfiles verticales de aire. La red instalada en Toluca se convirtió en un modelo para otras zonas urbanas de México.

## Entre la tecnología y la gestión: Un papel de conexión

Sánchez no se consideraba un investigador tradicional, sino un facilitador clave en la gestión del conocimiento geográfico

y ambiental. Su trabajo integró datos espaciales y temporales para apoyar tanto a investigadores como a responsables en la toma de decisiones, garantizando información confiable para la gestión intersectorial de la calidad del aire. Su trabajo fue clave para institucionalizar el monitoreo atmosférico en México y establecer acciones orientadas a la prevención y mitigación de riesgos.

*Su trabajo integró datos espaciales y temporales para apoyar a investigadores y responsables de la toma de decisiones*

En sus reflexiones posteriores, Sánchez resaltó la importancia de la colaboración intersectorial. Señaló la necesidad de desarrollar sensores asequibles para la ciudadanía, promover un intercambio transparente de datos y el fortalecer la comunicación entre los sectores de la salud y medio ambiente. Su experiencia le enseñó que las soluciones técnicas solo funcionan cuando se vinculan con la participación ciudadana y la educación.

### Mirando hacia el futuro: Desafíos y recomendaciones

Sánchez lamenta el lento ritmo del progreso. Si bien hoy se dispone de más conocimiento que nunca, observa que la voluntad política y la colaboración institucional suelen quedar rezagadas. Advierte sobre los riesgos de un pensamiento tecnocrático desconectado de las realidades sociales y aboga por un enfoque en el que la ciudadanía participe activamente. Su trabajo en las décadas de 1980 y 1990 continúa siendo un referente en los informes regionales sobre la calidad del aire.

*El aire limpio no es un privilegio.  
Es un derecho de todos.*

Su mensaje central es poderoso en su simplicidad: el aire limpio no es un privilegio, es un derecho de todos. Sánchez está convencido de que si las personas comprenden lo que respiran, estarán más dispuestas a exigir cambios. Esta convicción fue un hilo conductor en su trayectoria y sigue vigente hoy en día ante los desafíos ambientales globales.

La contribución de Carlos Sánchez Rivas al desarrollo de políticas de calidad del aire en México ejemplifica cómo la experiencia técnica, la práctica y la participación social pueden conjugarse para generar un cambio sostenible. Su historia subraya la importancia de la colaboración interdisciplinaria y muestra cómo el

trabajo de campo geográfico puede contribuir a la salud, las políticas públicas y, sobre todo, a la concientización sobre el impacto de la calidad del aire en la calidad de vida.

### Línea de tiempo de mediciones de la calidad del aire en el valle de Toluca

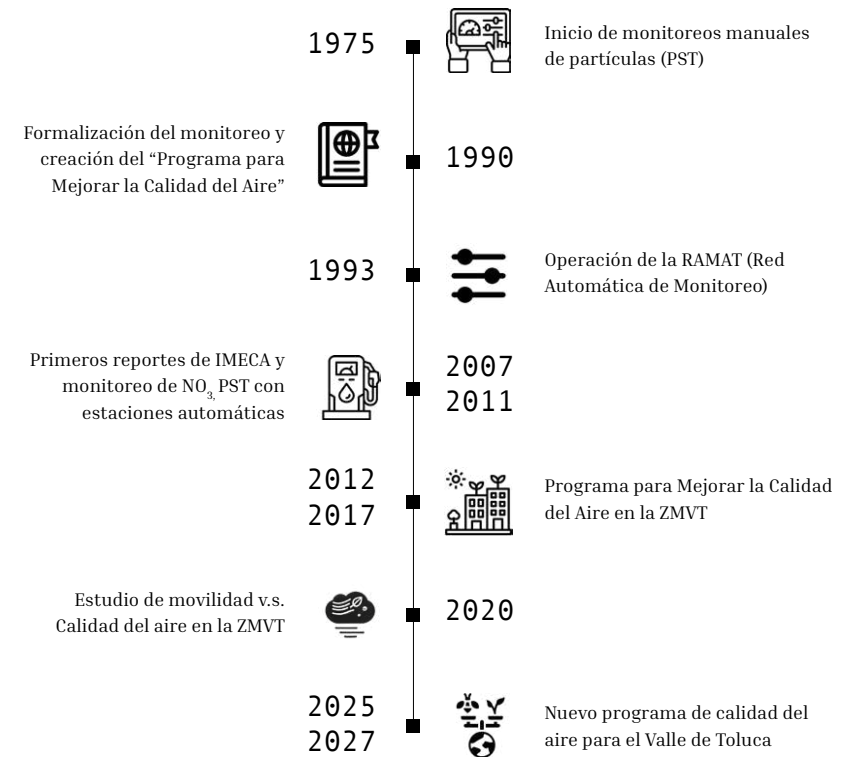


Figura 3. Línea del tiempo ilustrativa del trabajo de medición de calidad del aire en el Valle de Toluca.

## Detrás de la historia

- » En la década de 1970, los vínculos científicos entre la contaminación del aire y los efectos en la salud –como las enfermedades respiratorias y la mortalidad infantil– ya estaban bien establecidos a nivel internacional. Las autoridades sanitarias mexicanas comenzaron a explorar en qué medida estos problemas podían atribuirse a la mala calidad del aire en el país.
- » La colaboración internacional –especialmente con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Organización Panamericana de la Salud, rama de la OMS, entre otras– fue esencial para desarrollar los primeros estándares de calidad del aire basados en la salud en México.
- » La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE, hoy SEMARNAT) emprendió uno de sus primeros esfuerzos para construir redes automáticas de monitoreo del aire a principios de los años ochenta.
- » Las primeras mediciones se centraron en contaminantes como el ozono, el dióxido de azufre, el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y las partículas suspendidas, aunque vincularlos con los efectos en la salud requería nuevas metodologías.
- » Una vez que las métricas de calidad del aire fueron confiables y accesibles, estudios posteriores ofrecieron sólidas pruebas epidemiológicas y evidencia causal de que la contaminación urbana crónica tiene profundos impactos en la salud respiratoria de los niños.

## Diagnosticando el aliento de una ciudad: El papel del monitoreo de la calidad del aire en la política ambiental y de salud pública de la Ciudad de México

En la década de 1980, la Ciudad de México era una de las urbes más contaminadas del mundo. Diariamente, millones de personas estaban expuestas a un aire que representaba graves riesgos para su salud. Durante este período, Pablo Cicero Fernández dirigió el equipo que instaló el sistema automático de monitoreo de la calidad del aire de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología de México. Esta red de estaciones distribuidas por toda la ciudad fue fundamental para impulsar políticas ambientales sustentadas en datos e investigaciones de salud pública.

Cicero nació en una familia de médicos. Su madre era antropóloga médica y su padre, cirujano torácico y neumólogo. Inspirado por su temprana exposición a los problemas de salud respiratoria y al impacto ambiental, estudió la carrera de Ingeniería Ambiental en la Universidad Autónoma Metropolitana de Azcapotzalco (UAM), en 1976.

*A pesar de las limitaciones técnicas, la red comenzó a proporcionar datos críticos sobre la calidad del aire.*

En 1980, Cicero se incorporó al servicio público de gobierno. Inicialmente se enfocó en la contaminación del agua y, posteriormente, en la gestión de la calidad del aire, al ser invitado a colaborar en la instalación y puesta en marcha de una red de monitoreo en la Ciudad de México.

Con su trabajo, contribuyó a la instalación de 25 estaciones de monitoreo en toda la capital. Estos primeros esfuerzos se basaron en tecnología analógica y líneas telefónicas. A pesar de las limitaciones técnicas, la red comenzó a proporcionar datos cruciales sobre la calidad del aire.

## Formación avanzada y colaboración científica

Para interpretar mejor estos datos, Cicero se mudó a Estados Unidos en 1988, donde se dedicó al estudio de la salud ambiental en la Universidad de California, Los Ángeles (UCLA). En la institución,

obtuvo los grados de maestría y doctorado en Ciencias e Ingeniería Ambiental. Su formación abarcó bioestadística, toxicología, evaluación de la exposición y epidemiología, campos esenciales para vincular la calidad del aire con los resultados de salud pública.

Incluso durante su residencia en California, Cicero mantuvo una participación activa en los problemas ambientales de México. Colaboró con investigadores como Carlos Sánchez, Víctor Hugo Páramo y Rodolfo Lacy en estudios que demostraron los beneficios mensurables para la salud derivados de las mejoras en la calidad del aire. Este trabajo contribuyó a que la contaminación se reconociera no solo como un problema ambiental, sino también como una crisis de salud pública.

## Implicaciones para la salud y comunicación pública

Entre 1984 y 1988, la política de calidad del aire en México carecía de un enfoque sanitario. A pesar de que los datos epidemiológicos ya mostraban un aumento de la mortalidad durante los episodios de alta contaminación, al igual que en otras partes del mundo, estos hallazgos rara vez se compartían con el público. Los grupos vulnerables —niños, adultos mayores, mujeres embarazadas y trabajadores al aire libre— se veían afectados de manera desproporcionada.

Los niveles de contaminación variaban en toda la ciudad: las partículas en suspensión eran más frecuentes en los barrios pobres del norte, mientras que las concentraciones de ozono eran más altas en los barrios adinerados del sur. La preocupación pública surgió principalmente cuando los problemas de calidad del aire afectaron a las zonas de la ciudad con altos recursos económicos.

## Visualización y conciencia

Cicero y sus colaboradores fueron pioneros en la visualización de datos sobre contaminación atmosférica mediante mapas, mosaicos e índices con códigos de colores. Estas herramientas facilitaron la comprensión de datos complejos a personas no especializadas y contribuyeron a fortalecer la concienciación pública.

Además, se integraron datos meteorológicos para mostrar cómo se dispersaban los contaminantes por la ciudad.

La geografía de la Ciudad de México —una cuenca de gran altitud propensa a inversiones térmicas— la hacía particularmente vulnerable a la acumulación de contaminantes. Las principales fuentes incluían el tráfico vehicular, la actividad industrial, una cementera y una central eléctrica. El sistema de monitoreo permitió comprender estas dinámicas con mayor precisión.

*Cicero y sus colaboradores fueron pioneros en la visualización de datos sobre contaminación atmosférica mediante mapas, mosaicos e índices con códigos de colores.*

## Infraestructura científica y desarrollo de políticas

Durante este período, la infraestructura científica de México se expandió. Universidades como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) establecieron estaciones de monitoreo adicionales e iniciaron sus propios programas de investigación. Un catalizador clave para la colaboración intersectorial fue el químico ganador del Premio Nobel, Mario Molina, quien promovió la cooperación entre la academia, los responsables políticos y las autoridades del sector salud.

Los esfuerzos lograron transformaciones importantes. Se cerraron plantas de cemento, las centrales eléctricas adoptaron combustibles más limpios y las normas de emisiones para la industria y los vehículos se volvieron más estrictas. Cicero enfatizó que los datos desempeñaron un papel crucial: sin ellos, establecer las bases para la acción habría sido imposible.

## Contaminación del aire y riesgos para la salud

Los hallazgos científicos destacaron los efectos de contaminantes como el ozono y las partículas PM<sub>2.5</sub> (partículas de menos de 2.5 micras de diámetro), vinculados con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como con muertes prematuras. Cicero comparó la exposición crónica a la contaminación atmosférica con el tabaquismo, una amenaza gradual pero grave para la salud.

También participó en un estudio del Banco Mundial que permite cuantificar el potencial de vidas que podrían salvarse si México

*Ver Figura 7. La evolución de las medidas interinstitucionales reflejada en el período de 1986 hasta 1997, en las que Cicero y sus colaboradores participaron.*

alcanzará los estándares internacionales de calidad del aire. Los hallazgos proporcionaron evidencia sólida para continuar invirtiendo en mejoras de la calidad del aire.

## Carrera en Estados Unidos

En 1993, Cicero se estableció definitivamente en EE. UU. Trabajó para la Dirección de Recursos del Aire de California (CARB), centrándose en la investigación de emisiones móviles y en el desarrollo de inventarios de emisiones. Desempeñó un papel central en la investigación que destapó el escándalo de emisiones de Volkswagen (Dieselgate). Paralelamente, fue profesor adjunto en la UCLA, impartiendo cursos sobre la calidad del aire y salud pública.

## Perspectivas e impacto

Cicero considera que su tiempo en México fue fundamental tanto para su carrera como para la gestión ambiental del país. Defiende la importancia de mantener el monitoreo continuo de la calidad del aire, fortalecerlo y promover la educación pública. Su

*Cicero considera que su tiempo en México fue fundamental tanto para su carrera como para la gestión ambiental del país*

uso de herramientas como las rosas de contaminantes, empleadas para rastrear las fuentes de contaminación, subraya el valor de los datos en la formulación de políticas específicas.

Su trayectoria ilustra cómo los primeros esfuerzos de recopilación de datos ambientales se transformaron en la base de políticas sanitarias y ambientales sustentadas en evidencia. Actualmente, su mensaje sigue siendo claro: el aire limpio no es un lujo, sino una necesidad básica de la humanidad.

## Línea de tiempo de normas y control de la calidad del aire en México (1950–2020)

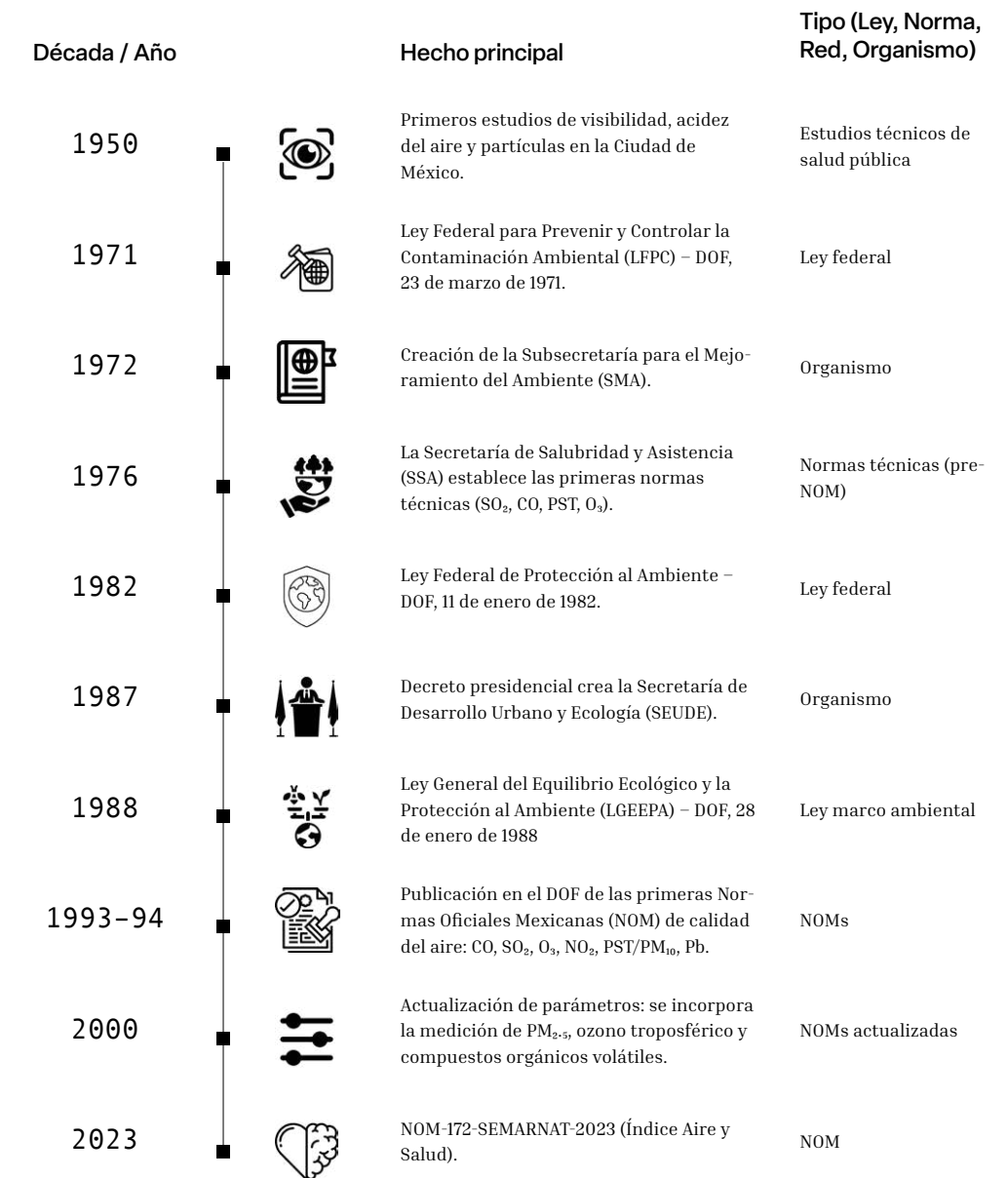


Figura 4. Línea de tiempo de normas y control de la calidad del aire en México.

## Detrás de la historia

- » Los efectos biológicos de la contaminación del aire todavía se comprendían poco en México durante las décadas de 1980 y principios de 1990; la mayor parte de la atención se centraba en la salud humana y el smog urbano.
- » Las plantas comenzaron a estudiarse como “testigos silenciosos” de la exposición a la contaminación, mostrando daños visibles –como clorosis, deformación de hojas– que podrían indicar problemas locales de calidad del aire.
- » Especies nativas y cultivadas, como el tabaco y la alfalfa, fueron de las primeras utilizadas en estudios experimentales para detectar estrés por contaminantes en ambientes urbanos. El interés en los indicadores biológicos creció a medida que el monitoreo tecnológico seguía siendo costoso y escaso, convirtiendo los métodos basados en plantas en una alternativa de bajo costo en la Ciudad de México.
- » Trabajos posteriores se enfocaron a la estimación de emisiones biogénicas –especialmente isopreno y monoterpenos– provenientes de la vegetación alrededor de la Ciudad de México, ya que estos compuestos contribuyen a la formación de ozono. Se adaptó un modelo de la USEPA para estimar estas emisiones bajo condiciones locales, mejorando la comprensión de su papel en la química atmosférica urbana.
- » La investigación biológica mexicana en este campo era, a menudo, aislada, con pocos vínculos interdisciplinarios entre ecología, geografía y ciencias atmosféricas.

## Del uso de plantas de tabaco a la gestión ambiental:

La biología como puente hacia la construcción de políticas públicas de calidad del aire

En la década de 1990, la Ciudad de México enfrentó una creciente preocupación por la contaminación atmosférica, mientras la infraestructura técnica para el monitoreo de la calidad del aire seguía siendo limitada en muchas zonas. En busca de métodos complementarios, investigadores y autoridades exploraron el uso de indicadores biológicos: especies vegetales que responden visiblemente a contaminantes específicos. Esta iniciativa condujo al desarrollo de un programa de biomonitoreo que utilizó plantas de tabaco y alfalfa para rastrear los niveles de ozono y dióxido de azufre en distintas zonas de la ciudad.

La bióloga Mónica Alegre González desempeñó un papel clave en el establecimiento de este programa, adaptando métodos internacionales a las condiciones locales y garantizando que los resultados se vincularan con los datos oficiales de calidad del aire. Con el tiempo, su trabajo se amplió hacia la modelación de emisiones biogénicas y la participación en el desarrollo de políticas públicas, fortalecimiento de capacidades y cooperación internacional.

## La calidad del aire como campo de trabajo

Alegre estudió Biología en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y combinó su formación con una carrera en el sector público. A los veinte años, tuvo la oportunidad de elegir entre distintas áreas en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Recuerda que, al momento de decidir, miró por la ventana y notó la capa de contaminación suspendida sobre la ciudad. Esa presencia visible fue decisiva para que eligiera centrarse en la calidad del aire.

*Esa presencia visible fue clave para que eligiera centrarse en la calidad del aire.*

En sus primeros años se enfocó en los aspectos técnicos del monitoreo, analizando los datos de las estaciones y estudiando el comportamiento de la contaminación ambiental en la Ciudad de México. Con el tiempo, su interés se orientó hacia el monitoreo biológico, una forma alternativa de evaluar la calidad del aire mediante el uso de plantas como sensores vivos.

## Biomonitoreo con plantas de tabaco

En colaboración con otros investigadores y colegas, Alegre trabajó en un método de biomonitoreo basado en experiencias internacionales con plantas de tabaco. Ciertas variedades de estas plantas presentan daños visibles en las hojas —en forma de manchas blancas— cuando se exponen a concentraciones elevadas de ozono. En el caso del programa mexicano, las plantas se cultivaron en invernaderos del Colegio de Postgraduados de Chapingo, una institución agrícola y de investigación cercana a Texcoco. Posteriormente, se colocaron en distintos puntos de la Ciudad de México, junto a estaciones automáticas de monitoreo. Cada ciclo de exposición duraba quince días, tras los cuales las plantas se recolectaban, analizaban y reemplazaban por nuevas.

El daño foliar se comparó con las concentraciones de ozono medidas, y los resultados demostraron una clara correlación entre la exposición al ozono y el deterioro de las hojas. Este método se consolidó como una herramienta valiosa, especialmente en zonas con escasa infraestructura técnica.

## Más allá del tabaco: Nuevos indicadores y otros intereses biológicos

Gracias al trabajo con las plantas de tabaco, el programa se amplió para incluir la alfalfa, una especie sensible a otros contaminantes, en particular al dióxido de azufre. En este caso, además del daño foliar, se observó la acumulación de contaminantes en las raíces, estableciendo una correlación con los datos de medición de la red automática oficial.

Posteriormente, Alegre participó en la adaptación de un modelo de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) a las condiciones de la Ciudad de México. Este modelo, el Siste-

ma de Inventario de Emisiones Biogénicas (PC-BEIS), estima las emisiones naturales de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación, como el isopreno y los monoterpenos, que pueden contribuir a la formación de ozono al reaccionar con los óxidos de nitrógeno en la atmósfera.

Para implementar el modelo, utilizó el mapa oficial de vegetación de la Ciudad de México, dividido en cuadrantes de 10 x 10 kilómetros. Calculó manualmente los tipos de vegetación en cada cuadrante y utilizó la información para crear una base de datos como insumo para el modelo. Con mayor accesibilidad a los sistemas de información geográfica, los datos de vegetación se enriquecieron con imágenes satelitales analizadas con el apoyo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Los resultados del modelo se incorporaron más tarde a documentos de política pública y se emplearon en ejercicio de pronóstico de la calidad del aire.

*Los resultados del modelo se incorporaron posteriormente a documentos de política pública y se utilizaron en ejercicios de pronóstico de la calidad del aire.*

## Colaboración y difusión

Los resultados del proyecto de biomonitoreo y las estimaciones de emisiones biogénicas se presentaron en congresos nacionales e internacionales. A principios de los años 2000, en el marco del proyecto de calidad del aire dirigido por el Premio Nobel, Mario Molina, Alegre tuvo la oportunidad de colaborar con investigadores del Instituto Fraunhofer de Alemania, profundizando en el cálculo de emisiones biogénicas. Asimismo, impulsó la formación de nuevo personal que continuó desarrollando el inventario de emisiones biogénicas.

## De los datos a las políticas públicas

Aunque la investigación tenía una sólida base científica, la implementación de los datos en las políticas públicas a menudo dependía tanto de la evidencia técnica como del tiempo. El uso de plantas como bioindicadores era un método rentable y sencillo, pero requería el reconocimiento previo de los tomadores de decisiones. Finalmente, el programa de biomonitoreo —y más tarde el inventario de emisiones biogénicas— se incorporaron a la política de calidad del aire de la Ciudad de México. Este trabajo se complementó con otros programas, como el monitoreo de la lluvia ácida.

## Una carrera interdisciplinaria

Su participación en temas de calidad del aire influyó significativamente en su desarrollo profesional. Su enfoque interdisciplinario, que incluyó la colaboración con expertos en química, meteorología, ingeniería ambiental, geografía y, posteriormente, en la aplicación de la legislación ambiental, la inspiró a abordar los problemas ambientales desde múltiples perspectivas. En algún momento consideró cambiarse al área de ingeniería ambiental, pero decidió mantenerse fiel a la biología. Fue gracias a esta perspectiva que abordó los desafíos ambientales desde diversos ángulos. Posteriormente, trabajó en la aplicación de la legislación ambiental, contribuyendo al reconocimiento del derecho humano a un medio ambiente sano.

Actualmente, es la titular de la Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial, institución de vanguardia en la defensa de los derechos de las personas en la Ciudad de México a un ambiente sano y a un territorio ordenado. Las bases para esta función más amplia iniciaron en el programa de calidad del aire.

## Vigencia actual

Aunque el programa de plantas de tabaco fue suspendido, Alegre considera que el biomonitoreo sigue teniendo gran potencial, especialmente en zonas rurales o aisladas donde no hay equipos automáticos de medición disponibles. También señala los recientes picos de ozono en la Ciudad de México como un recordatorio de la urgencia del problema y de la necesidad de mantener a la ciudadanía informada y comprometida con el estado actual del monitoreo de la calidad del aire.

La naturaleza invisible de la contaminación atmosférica es una de las razones por las que el problema se pierde fácilmente de vista. “Mientras las personas no lo perciban directamente, desaparece de la agenda. Por eso es importante seguir buscando maneras de visibilizar y comprender el impacto de los efectos de la contaminación atmosférica”.

## Reflexión final y consejo a las nuevas generaciones

La importancia de la colaboración, la comunicación efectiva y la perseverancia en los procesos de investigación y en la formulación de políticas públicas son puntos centrales que deben mantenerse en trabajo continuo. Gran parte del trabajo solo fue posible gracias al apoyo de colegas, instituciones y supervisores que brindaron un espacio para la experimentación.

Recomienda a los jóvenes investigadores invertir en la comunicación y traducir los datos científicos en mensajes comprensibles para los líderes en la toma de decisiones y para el público en general. También destaca la relevancia de la biología para comprender los problemas ambientales. Los biólogos aportan un pensamiento sistémico y una perspectiva a largo plazo. En los debates sobre la calidad del aire, pueden establecer vínculos entre los procesos químicos atmosféricos y sus efectos en los ecosistemas y la salud humana.

Mónica Alegre González fue pionera en el uso de plantas como bioindicadores de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México, así como en el desarrollo de los primeros inventarios de emisiones biogénicas. Su trabajo no solo sentó las bases prácticas para las políticas públicas ambientales, sino que también demostró cómo la biología puede contribuir a abordar problemas ambientales específicos. “Me enseñó que, mediante la aplicación de la ciencia, puedo hacer una contribución concreta, incluso con algo aparentemente simple como la información que se puede obtener de una planta de tabaco”.

*“Me enseñó que, mediante la aplicación de la ciencia, puedo hacer una contribución concreta, incluso con algo aparentemente simple como la información que se puede obtener de una planta de tabaco”*

## Detrás de la historia

- » En la década de 1980, la Agencia Federal de Medio Ambiente creó un equipo de meteorólogos y, por primera vez, se desarrollaron pronósticos de contaminación del aire basados en parámetros meteorológicos.
- » Los primeros pronósticos dependían de radiosondas y análisis manuales, con meteorólogos trabajando en condiciones básicas y con recursos limitados.
- » Los esfuerzos de pronóstico ayudaron a dar forma a medidas de emergencia como Hoy No Circula, destinadas a reducir la contaminación durante episodios críticos.
- » En Toluca, los estudios locales de emisiones revelaron la influencia de los patrones estacionales y de prácticas culturales como los fuegos artificiales y la quema a cielo abierto.
- » La vinculación de la contaminación del aire con los impactos del cambio climático se volvió cada vez más importante, destacando la necesidad de sistemas integrados de alerta temprana como parte de las políticas de gestión ambiental.

## Una profesión poco conocida con impacto ambiental

A principios de la década de 1980, la carrera de Meteorología aún era poco conocida en México. Pablo Escamilla Báez decidió estudiarla en Xalapa, Veracruz, atraído por su carácter científico y por la participación de instituciones académicas como la UNAM. Tras el terremoto de 1985 en la Ciudad de México, la Meteorología comenzó a desempeñar un papel importante en la gestión ambiental y en la protección de la salud pública. Escamilla se unió a una nueva iniciativa centrada en el pronóstico de la calidad del aire.

Trabajando en una pequeña oficina en Río Elba, formó parte del primer equipo que utilizó datos meteorológicos para predecir los niveles de contaminación. Se empleaban radiosondas, globos que transportan instrumentos meteorológicos para medir las condiciones de estabilidad atmosférica, las cuales son la base para los pronósticos sobre la posible propagación de la contaminación. Estos análisis eran fundamentales para la toma de decisiones ante episodios críticos, como la aplicación de restricciones vehiculares durante los días de alta contaminación.

## Desarrollo de pronósticos de la calidad del aire en condiciones básicas

En ausencia de directrices oficiales o herramientas digitales, el equipo desarrolló sus propios métodos. Cada mañana, se recopilaban y analizaban manualmente los datos de las radiosondas para elaborar pronósticos diarios.

*Los meteorólogos se basan en una combinación de datos y experiencia para evaluar cómo los patrones climáticos influirán en la calidad del aire.*

Los niveles de contaminación solían ser altos, por lo que los meteorólogos se combinaban datos y experiencia para evaluar cómo los patrones climáticos influirían en la calidad del aire.

Ver **Figura 5.**  
Integración de los datos de Inventarios de emisiones de gases efecto invernadero en el Estado de México, donde participó Escamilla activamente.

Con el tiempo, se incorporaron modelos informáticos y sistemas expertos al proceso, aunque el criterio y la experiencia seguían siendo esenciales. Los pronósticos del equipo contribuyeron en la toma de decisiones clave, como en la aplicación del programa Hoy No Circula, una política de restricción vehicular utilizada para reducir la contaminación durante episodios críticos. Estos primeros esfuerzos no solo influyeron en las políticas públicas, sino que también marcaron el inicio de la Meteorología como una herramienta ambiental fundamental en el país.

Escamilla y su equipo demostraron que el conocimiento técnico puede traducirse en decisiones prácticas. Pese a los recursos limitados, su capacidad para interpretar datos y explicar sus implicaciones para la vida urbana contribuyeron a legitimar la Meteorología en la planificación ambiental.

## Enfoque en emisiones regionales en Toluca

En 1994, Escamilla se trasladó al Estado de México para concentrar sus estudios en la región de Toluca, donde las fuentes de contaminación diferían: había menos tráfico, pero más polvo y quemadas a cielo abierto. Los cambios estacionales mostraron una influencia particular en los datos, ya que durante las temporadas más frías la concentración de partículas finas aumentaba notablemente.

Escamilla estudió las emisiones locales, incluyendo las derivadas de prácticas culturales como la pirotecnia y la quema de residuos agrícolas. También colaboró en el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano y el CO<sub>2</sub>, procedentes

de fuentes energéticas, agrícolas, ganaderas, vertederos y plantas de tratamiento de aguas residuales, concluyendo que las políticas deben basarse en datos fiables.

*“A la fecha, todavía no hay un meteorólogo trabajando para dicha Secretaría”*

Como parte del Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Estado de México, Escamilla participó en la elaboración de inventarios de emisiones, que incluían tanto contaminantes atmosféricos como gases relacionados con el clima, entre ellos el dióxido de carbono, el metano y óxido nitroso. Su trabajo permitió a las autoridades locales identificar zonas de alto riesgo, evaluar las fuentes de contaminación y establecer prioridades en las estrategias de adaptación y mitigación.

Durante muchos años, ha sido el único meteorólogo empleado por la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México. “A la fecha, todavía no hay un meteorólogo trabajando para dicha Secretaría”, señala. Desde Toluca, también colabora con las autoridades de la Ciudad de México, ya que ambas zonas forman parte de la misma región metropolitana (Megalópolis). Esta cooperación garantiza que las medidas implementadas en un lado de la frontera regional se basen en las condiciones atmosféricas de todo el valle.

## Vinculación de la calidad del aire con los impactos climáticos

Escamilla destaca la conexión entre la contaminación atmosférica y el cambio climático. Participó en estudios sobre el impacto de las olas de calor, las sequías y las inundaciones, e identifica comunidades vulnerables utilizando datos de salud pública. Enfatiza la necesidad de alertas públicas oportunas y sistemas de alerta temprana más eficaces, especialmente en el Valle de México.

Promueve enfoques intersectoriales que integren la gestión de la calidad del aire con la planificación urbana y las iniciativas de salud pública. Al comparar datos ambientales con tendencias epidemiológicas, su trabajo ha permitido comprender mejor por qué ciertas poblaciones enfrentan un mayor impacto en la salud debido a la exposición a contaminantes.

## Resultados a lo largo del tiempo

En la década de 1990, las concentraciones de ozono registradas en la estación de monitoreo de Plateros alcanzaron los 398 puntos IMECA, un nivel extremadamente alto en el índice de calidad del aire de la Ciudad de México. En la actualidad, se emiten alertas con tan solo 0.154 partes por millón de ozono. En Toluca, donde las PM2.5 (partículas finas que penetran profundamente en los pulmones) son la principal preocupación, también se observan mejoras. No obstante, factores culturales como los fuegos artificiales y las fogatas continúan generando picos de contaminación.

Escamilla considera necesario seguir concientizando a la población. “La gente suele dar por sentado que el problema está resuelto, pero no es así”. Los eventos locales y las actividades estacionales

aún pueden causar picos peligrosos. Destaca la importancia de la comunicación para la prevención, sobre todo en comunidades que desconocen la interacción entre el clima y la calidad del aire.

## Lecciones para la política y la práctica

Escamilla enfatiza la necesidad de un apoyo económico continuo para el monitoreo de la calidad del aire, el análisis de datos y la educación. Considera que se están desaprovechando la gran cantidad de datos disponibles para implementar sistemas estructurados de alerta temprana de carácter intersectorial, que integren los pronósticos meteorológicos en la información que se difunde al público.

*“Finalizar un inventario de emisiones basado en datos reales me hizo sentir satisfecho con el trabajo”* Valora especialmente el trabajo científico que genera resultados concretos. “Finalizar un inventario de emisiones basado en datos reales me hizo sentir satisfecho con el trabajo”, comenta. Añade que su formación académica le permitió centrarse en la investigación a lo largo de su carrera.

La trayectoria de Escamilla demuestra cómo el conocimiento experto, la continuidad institucional y la colaboración local pueden generar un impacto duradero. Invita a las instituciones a invertir en experiencia y en el desarrollo de capacidades a largo plazo, de modo que los datos se traduzcan en acciones efectivas en múltiples sectores.

## Recomendaciones para jóvenes profesionales

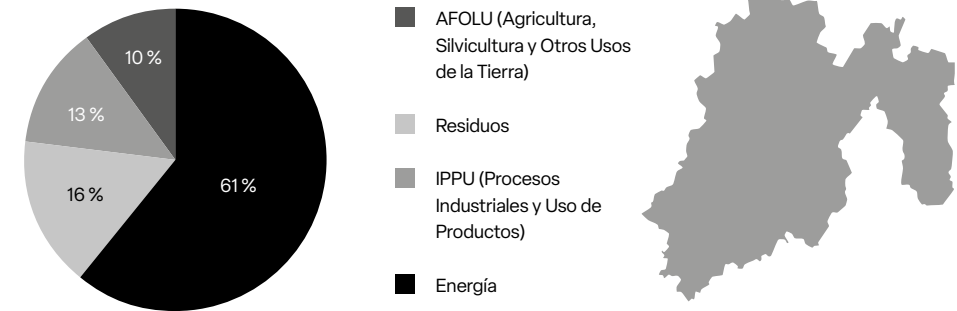
A los jóvenes meteorólogos, Escamilla les envía un mensaje claro: sigan aprendiendo, combinen el trabajo técnico con la investigación y valoren la experiencia. Cita al experto estadounidense en huracanes, William Gray, como un ejemplo de conocimiento profundo que generó importantes debates.

Finalmente, subraya que la contaminación y el cambio climático deben abordarse de manera conjunta. Los cambios en la geografía local, como el desarrollo urbano de los valles, pueden influir en el aumento de temperatura, los patrones de viento y la calidad del aire. “Todo está conectado”, afirma. Más que un problema técnico,

Escamilla considera la calidad del aire una responsabilidad pública que requiere compromiso tanto científico como cívico.

## Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero Estado de México

### 1. Emisiones por sector



### 2. Retos para la mitigación

- La transición a energías limpias mejora la eficiencia del transporte público.
- Gestión de residuos del tráfico y consumo energético.
- Uso apropiado del suelo

### 3. Zonas de alta emisión

- Valle de Toluca: Alta densidad industrial y vehicular.
- Zona Metropolitana del Valle de México: Alta densidad en municipios como Naucalpan, Tlalnepantla, Ecatepec y Nezahualcóyotl.
- Cuenca de Lerma: Alta densidad y producción de metano en zonas agrícolas y ganaderas.

**Figura 5.** Inventario estatal de emisiones y gases compuestos de efecto invernadero en el Estado de México en 2022.

Fuente: Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático (IEECC) (2022)

## Detrás de la historia

- » Las primeras mediciones de calidad del aire en México eran manuales y de alcance limitado; la automatización solo mejoró el monitoreo a finales de la década de 1980 y comienzos de la década de 1990.
- » A mediados de la década de 1990, los datos de salud se vincularon sistemáticamente con los niveles de contaminación a través de estudios epidemiológicos.
- » Los planes regionales de gestión de la calidad del aire, como ProAire, se hicieron posibles una vez que hubo suficientes datos de monitoreo y modelos disponibles. Los primeros programas de ProAire comenzaron a principios de la década de 1990.
- » Las emisiones domésticas provenientes de productos de limpieza, gas LP y quema de leña constituyen una fuente subestimada de contaminación del aire en las ciudades mexicanas.
- » El progreso en la calidad del aire en México se ha beneficiado de la continuidad política y del compromiso a largo plazo de profesionales que iniciaron su carrera en los primeros programas de monitoreo.

## De las refinerías a los productos de limpieza: Las fuentes cambiantes de la contaminación del aire

En las últimas cuatro décadas, el enfoque de las políticas de calidad del aire en México ha cambiado significativamente. Si bien antes la contaminación provenía principalmente de instalaciones industriales, ahora está cada vez más vinculada al comportamiento del consumidor y a los productos para el hogar. Esta evolución en las fuentes de contaminación ha requerido un ajuste constante en las políticas, la tecnología y la gestión.

La calidad del aire ha pasado de ser una preocupación marginal a convertirse en un asunto estratégico, integrado en la formulación de políticas nacionales y urbanas. A medida que cambian las fuentes, el clima y la tecnología, la gestión de la calidad del aire debe adaptarse continuamente.

## Túneles coloniales como referencia de calidad del aire

Víctor Hugo Páramo Figueroa, figura clave en las iniciativas de calidad del aire en México, se formó como ingeniero químico en la ciudad de Guanajuato. Durante sus estudios, él y sus compañeros comenzaron a medir los niveles de contaminación en los túneles de esa ciudad colonial, una experiencia temprana que despertó su interés por las ciencias ambientales.

*La importancia del intercambio de datos y la cooperación internacional seguiría siendo un principio fundamental de su trabajo.*

En 1976 se trasladó a Francia para estudiar la contaminación atmosférica y la acidificación transfronteriza, donde obtuvo una maestría y un doctorado en la Universidad de Pau. En sus estudios, se interesó por la respuesta coordinada de Europa ante problemas de contaminación transfronteriza, como la lluvia ácida. La importancia del intercambio de datos y la cooperación internacional seguiría siendo un principio fundamental en su trabajo.

Al regresar a México, a principios de la década de 1980, Páramo se unió a la Comisión de Ecología de la Ciudad de México, uno de los

pocos organismos dedicados a la calidad del aire por aquel entonces. Ayudó a establecer laboratorios químicos y sentó las bases para el monitoreo ambiental rutinario.

## La calidad del aire como territorio inexplorado

En ese momento, la Ciudad de México apenas comenzaba un monitoreo ambiental detallado y un marco de políticas claro. Los esfuerzos iniciales se centraron en identificar los contaminantes y comprender su comportamiento a lo largo de las estaciones y los años.

La recopilación de datos era crucial, pero las políticas no podían basarse únicamente en la información compilada. Medidas como la reducción de combustibles con alto contenido de azufre podían adoptarse sin necesidad de modelos complejos, pero estrategias más integrales y duraderas requerían de datos sólidos y a largo plazo.

## Política en movimiento

Desde la década de 1990, Páramo participó en casi todas las iniciativas importantes sobre calidad del aire, trabajando en inventarios de emisiones, modelado y diseño regulatorio. Considera el proceso como un intercambio constante entre el conocimiento científico y la formulación de políticas: medir, analizar, proponer, evaluar, revisar.

Los datos de ozono de esa época muestran que los límites establecidos se superaban casi a diario. Con el paso de los años, se ha observado un aumento en el número de días que cumplen los estándares de salud, lo que refleja el efecto acumulativo de diversas intervenciones. Estas incluyeron la reubicación de la industria pesada, la eliminación gradual de la gasolina con plomo y la implementación de requisitos para convertidores catalíticos, además de nuevas normas sobre combustible.

Programas como Hoy No Circula, que restringe la circulación vehicular en determinados días, y los controles obligatorios de smog también desempeñaron un papel importante. Sin embargo, a medida que aumentaron las exenciones y las evasiones, su impacto disminuyó. Actualmente, el gobierno revisa estos programas para enfocarse en la reducción real de emisiones.

## Nuevas fuentes, nuevas preocupaciones

Las fuentes de contaminación atmosférica se han vuelto más dispersas. Los compuestos orgánicos volátiles presentes en productos domésticos de uso diario —aromatizantes, ambientadores, productos de limpieza, entre otros— contribuyen significativamente a la contaminación. Estas fuentes son más difíciles de regular debido a su ubicuidad y a los comportamientos individuales que implican. Abordarlas requiere políticas detalladas y orientadas al comportamiento, con frecuencia coordinadas con estrategias de comunicación en salud pública. Se están desarrollando nuevas regulaciones sobre el contenido de disolventes en productos de consumo, una tarea que indiscutiblemente requiere de la colaboración intersectorial.

*Los compuestos orgánicos volátiles presentes en productos domésticos de uso diario (aromatizantes, ambientadores, productos de limpieza, etc.) contribuyen ahora significativamente a la contaminación*

## Clima y continuidad

El aumento de las temperaturas y los cambios en los patrones climáticos complican la dinámica de la contaminación atmosférica. Los modelos predictivos deben incorporar más variables, lo que requiere enfoques cada vez más refinados.

A pesar de los frecuentes cambios políticos, la política de calidad del aire en México se ha beneficiado de un apoyo constante. Las sucesivas administraciones han continuado con los programas existentes, manteniendo el impulso en la gestión ambiental a largo plazo.

## La cooperación regional en acción

Páramo coordina actualmente la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME), una coalición de siete estados y cuatro secretarías federales. Creada originalmente para armonizar la normativa vehicular, la CAME ahora promueve una agenda más amplia de coordinación ambiental.

La Ciudad de México funciona eficazmente como una zona de bajas emisiones, y las políticas de la CAME influyen en las normas vehiculares en los estados participantes. La normativa común permite una aplicación más amplia y un impacto regional.

Ver **Figura 12**. El mosaico correspondiente al periodo de 1990–2025 refleja los aumentos y avances para disminuir los índices de ozono en los que trabajó Páramo.

La CAME también incorpora las aportaciones de científicos, organizaciones no gubernamentales y grupos industriales. Si bien esto enriquece el desarrollo de políticas, añade complejidad, ya que las regiones participantes difieren en geografía, enfoque económico y prioridades ambientales.

## El seguimiento como brújula

El monitoreo es esencial tanto para el diagnóstico como para la respuesta. Datos confiables y consistentes permiten a los gobiernos rastrear las fuentes de contaminación, medir los efectos de las políticas y evaluar el impacto en la salud.

En ciudades como Monterrey, el monitoreo limitado ha obstaculizado el progreso. La carencia de responsabilidad para controlar las fuentes de contaminación y las intervenciones ineficaces se deben, en parte, a sistemas de medición deficientes. Páramo cita esto como un ejemplo aleccionador de lo que puede ocurrir sin datos confiables.

## El papel de la adaptación y la continuidad política

Los desafíos ambientales evolucionan. Las políticas que antes eran eficaces pueden quedar obsoletas. La flexibilidad es esencial: los programas deben reevaluarse y rediseñarse en respuesta a nuevos datos, comportamientos y condiciones ambientales.

*“Un legado duradero no reside solo en los programas o las regulaciones, sino en los profesionales que los sustentan”*

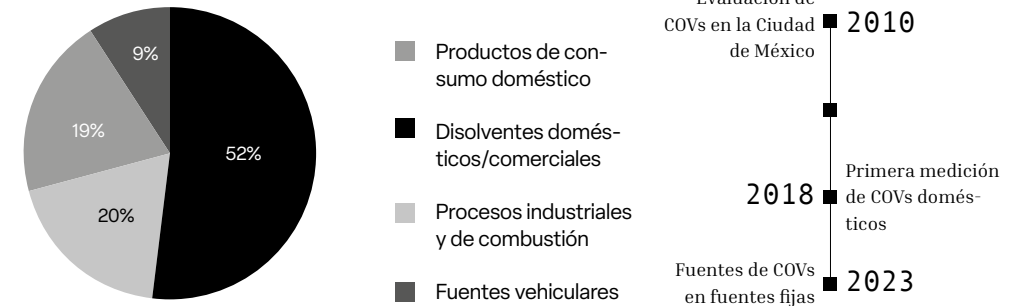
Páramo enfatiza la importancia de la continuidad, pero también de la disposición al cambio.

Una política exitosa requiere tanto apoyo político como capacidad de adaptación. Señala que la fortaleza de la política de calidad del aire de México reside en su compromiso continuo con ambos aspectos.

Un legado duradero, sugiere, no reside solo en los programas o las regulaciones, sino en los profesionales que los sustentan. Muchos de los líderes actuales en materia de calidad del aire en México comenzaron sus carreras en sus equipos, lo que evidencia que el conocimiento y el compromiso institucionales pueden persistir y evolucionar a lo largo de las generaciones.

## Productos de limpieza que contaminan más que las emisiones vehiculares

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) de productos de limpieza contribuyen más que el transporte.



Fuentes oficiales: (UNAM DGCS 736 / 2021, INECC 2018, SEDEMA-CDMX 2020).

Figura 6. Gráfico informativo que refleja el impacto contaminante de los productos de limpieza que suele superar las emisiones vehiculares, a partir de información compartida por la UNAM y el INECC.

## Detrás de la historia

- » La contaminación del aire en la Ciudad de México comenzó en la época colonial, cuando los conquistadores españoles alteraron la hidrología de la cuenca, creando zonas de sequía que aumentaron la dispersión de partículas a lo largo del valle.
- » La composición química de la contaminación del aire en México incluye no solo ozono y partículas, sino también solventes, metales pesados y ácidos.
- » La deposición atmosférica ha distribuido sustancias tóxicas sobre superficies urbanas, suelos y ecosistemas durante décadas.
- » México carece de un enfoque sistemático para monitorear la contaminación química a largo plazo a través de la lluvia y el polvo.
- » La contaminación del aire se presenta con frecuencia como un desafío técnico, pero esta perspectiva oculta las dimensiones éticas y de salud pública que merecen igual atención. Si bien el monitoreo es un primer paso crucial, debe ir acompañado de acciones sostenidas y equitativas; de lo contrario, el derecho fundamental a un aire limpio sigue sin concretarse para muchos.

## Evolución de la química atmosférica: Entendiendo la contaminación del aire y sus consecuencias

Como explicó Rodolfo Sosa Echeverría, jefe de la Sección de Contaminación en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAyCC) de la UNAM, el problema de la contaminación del aire en la Ciudad de México es el resultado de siglos de decisiones urbanas, industriales y políticas.

La ubicación misma de la ciudad ha contribuido a los persistentes problemas de calidad del aire. Construida en el centro de una antigua cuenca lacustre y rodeada de montañas, se encuentra a más de 2.240 metros de altitud. Esta topografía atrapa los contaminantes, limita la circulación del aire y favorece la radiación ultravioleta, lo que intensifica la formación de ozono.

La transformación del paisaje comenzó durante la época colonial, cuando los conquistadores españoles expandieron la ciudad sobre los cimientos aztecas, desecaron lagos y canalizaron los ríos. La contaminación actual del aire no puede comprenderse plenamente sin reconocer estos antecedentes históricos. Según Sosa, la planeación ambiental debe considerar no solo los datos de emisiones, sino también la vulnerabilidad geográfica y la desigualdad social.

### Datos atmosféricos a través de la deposición atmosférica húmeda

El equipo de Sosa ha monitoreado durante años los contaminantes atmosféricos mediante un método conocido como deposición atmosférica húmeda, que consiste en analizar las sustancias químicas presentes en la lluvia. Estas mediciones permiten identificar compuestos que se acumulan en la atmósfera y descienden sobre el entorno urbano.

Los datos muestran que, pese a las mejoras en las concentraciones de dióxido de azufre en el aire, los compuestos de azufre siguen siendo predominantes en las muestras de agua de lluvia. Esta aparente contradicción se debe a la contaminación transportada

Ver **Figura 8.** Investigación sobre la evolución de la contaminación atmosférica realizada por Sosa, en 2025.

desde zonas industriales externas, como el corredor Tula-Vito-Apasco, en los estados de México e Hidalgo, donde aún se utiliza combustóleo con alto contenido de azufre para la generación de energía y procesos industriales. Estas emisiones son arrastradas por el viento hacia la cuenca de la Ciudad de México, donde contribuyen a la lluvia ácida. “La calidad del aire regional no puede gestionarse solo con políticas locales —señala Sosa—. Se necesita cooperación entre jurisdicciones.”

*“La calidad del aire regional no puede gestionarse solo con políticas locales”*

Actualmente, el gobierno de la Ciudad de México opera una red sólida de estaciones de monitoreo de deposición atmosférica húmeda en colaboración con la UNAM. Las muestras de lluvia se recolectan semanalmente y se analizan en los laboratorios universitarios. Sin embargo, los estados vecinos aún carecen de sistemas plenamente desarrollados, lo que genera disparidades en la recolección de datos y en la gestión ambiental.

## El impacto ignorado de los compuestos tóxicos

Aunque gran parte de las políticas regulatorias se concentran en los llamados contaminantes criterio —ozono, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, partículas y plomo—, Sosa enfatiza los riesgos para la salud y el medio ambiente de sustancias tóxicas como el benceno, tolueno y otros compuestos orgánicos volátiles (COV), así como metales pesados.

A diferencia de los contaminantes criterio, que tienen umbrales establecidos en las normas de calidad del aire, estos compuestos son dañinos incluso en bajas concentraciones. Además, muchos COV, junto con los óxidos de nitrógeno, actúan como precursores del ozono y contribuyen a su formación.

“Varios compuestos orgánicos volátiles son químicamente reactivos y tóxicos —explica Sosa—. Representan una doble amenaza: dañan directamente la salud humana y también generan contaminación secundaria.” A pesar de su relevancia, estas sustancias frecuentemente quedan fuera de las políticas actuales de calidad del aire. Sosa sostiene que se necesita un marco regulatorio más inclusivo, que reconozca tanto la complejidad química como los efectos acumulativos de diversos contaminantes.

## La contaminación como un problema social y económico

La contaminación del aire en la Ciudad de México no es solo un tema científico, sino también socioeconómico. Muchas prácticas cotidianas exponen a trabajadores y residentes a aire tóxico. Estas incluyen la pintura automotriz en la vía pública sin equipo de protección, la cocción de alimentos con tanques de gas LP con fugas en mercados al aire libre, y el abastecimiento de gasolina en estaciones sin sistemas de recuperación de vapores.

*“Estos no son incidentes aislados, forman parte de una realidad económica”*

“Estos no son incidentes aislados, forman parte de una realidad económica”, —dice Sosa—. La gente depende de estos trabajos, aunque impliquen riesgos para la salud.” Por ejemplo, los despachadores de gasolina pueden laborar largas jornadas expuestos a vapores de benceno y otros compuestos tóxicos, dependiendo más de las propinas de los clientes que de su salario. Regular estas prácticas sin considerar sus implicaciones económicas sería poco realista. Por ello, Sosa propone estrategias integrales que combinen la protección ambiental con apoyo social y alternativas laborales para esta economía informal pero real.

## Lecciones del confinamiento por COVID-19

La pandemia de COVID-19 ofreció un caso de estudio inesperado para la gestión de la contaminación. Durante el confinamiento, el tráfico vehicular se redujo drásticamente, lo que llevó a una disminución significativa de contaminantes primarios como los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, los contaminantes secundarios, especialmente el ozono, no disminuyeron de la misma forma e incluso aumentaron en algunos casos.

“Esto nos mostró que reducir el tráfico no es una solución mágica —explica Sosa—. El ozono se forma mediante interacciones complejas entre COV, óxidos de nitrógeno, la radiación solar y la meteorología. Las estrategias eficaces deben abordar todos estos factores al mismo tiempo.”

## El papel de la ética en la ciencia ambiental

Uno de los temas más importantes en el trabajo de Sosa es la responsabilidad ética. Para él, el monitoreo no es solo una tarea técnica, sino una obligación moral. Los profesionales ambientales, especialmente quienes trabajan en consultoría o en el servicio público, deben reportar con veracidad y basar sus recomendaciones en evidencia.

Sosa recuerda cómo su antiguo supervisor, Humberto Bravo, financió personalmente un informe sobre calidad del aire para asegurar resultados honestos. “Uno no hace informes para hacer sentir bien al cliente —dice Sosa—. Se hace un diagnóstico, como un médico. Solo presentando la verdad se puede actuar con eficacia.”

Este principio también guía la formación de nuevos científicos en la UNAM, donde los estudiantes no solo aprenden habilidades técnicas, sino también las consecuencias éticas de su trabajo. Los informes ambientales influyen en la política de salud pública, en la acción regulatoria y en la confianza ciudadana; por ello, la precisión y la transparencia son esenciales.

## Fortaleciendo los sistemas nacionales y regionales

La red de monitoreo en la Ciudad de México se considera una de las más avanzadas de América Latina. Incluye estaciones automáticas, muestreo manual, sensores meteorológicos y un sistema en expansión para medir la deposición atmosférica. Esta infraestructura, construida durante décadas, requiere mantenimiento constante, calibración e inversión.

Estados vecinos como el Estado de México, Hidalgo, Querétaro, Puebla y Morelos se encuentran en fases iniciales de desarrollo de sistemas similares, con el apoyo de expertos nacionales como Víctor Hugo Páramo. Sin embargo, los desafíos persisten. Ampliar la infraestructura confiable de monitoreo fuera de la capital es clave para desarrollar políticas regionales coordinadas.

## Prioridades para futuras acciones

Para reducir la contaminación de manera significativa, Sosa identifica tres prioridades:

1. México necesita mejorar el control de las emisiones evaporativas, especialmente en gasolineras, talleres de pintura automotriz y estaciones de gas LP, así como reducir o controlar las fugas en ámbitos domésticos e industriales.
2. Incluir los contaminantes tóxicos en los inventarios nacionales de emisiones y establecer obligaciones legales de reporte.
3. Pasar de restricciones temporales a reformas estructurales, sustituyendo programas como Hoy No Circula por políticas centradas en la calidad del combustible, el mantenimiento vehicular, los procesos industriales y la planeación urbana, que realmente aborden las fuentes subyacentes de las emisiones.

## Recomendaciones para la próxima generación

Para estudiantes y jóvenes profesionales, Sosa destaca tres principios rectores: conocimiento científico, responsabilidad y ética. La ciencia ambiental no solo consiste en medir contaminantes, sino también en entender los sistemas humanos y políticos que los generan. Tener el valor de enfrentar datos incómodos es esencial para construir políticas eficaces. *“Medir no es solo un asunto técnico.”*

“Medir no es solo un asunto técnico —concluye Sosa—. Es una responsabilidad con la ciencia, con los tomadores de decisiones y, sobre todo, con las personas que respiran este aire cada día.”

## Detrás de la historia

- » El despliegue de redes automáticas de monitoreo comenzó a finales de la década de 1980, con el fin de contar con datos que permitieran abordar el problema de la contaminación atmosférica ante la creciente preocupación internacional.
- » Políticas como el Hoy No Circula fueron inicialmente medidas de emergencia, pero más tarde se integraron en la planificación a largo plazo.
- » El cierre de industrias contaminantes, dentro del modelo de comando y control, fue muy efectivo para que las empresas comprendieran la seriedad del problema. En ocasiones, estas acciones ocurrieron tras demandas de la sociedad civil.
- » Los científicos desempeñaron un papel clave en el desarrollo de políticas, aunque generalmente operaban fuera de las estructuras formales de toma de decisiones.
- » La creación del Instituto Nacional de Ecología marcó un cambio hacia una gestión ambiental más efectiva, centrándose en la parte normativa y basada en datos.

## La arquitectura del acuerdo

Sergio Reyes Luján estudió Física en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a principios de la década de 1960, durante un período de rápido crecimiento urbano y creciente contaminación atmosférica en la Ciudad de México. Posteriormente se convirtió en profesor e investigador, y participó en la fundación de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Con el paso de los años, su enfoque se trasladó del trabajo académico a la intersección entre la ciencia y la política. Actualmente trabaja con diversas instituciones y disciplinas, entre la teoría y la aplicación práctica. En sus propias palabras: “No se puede eliminar el caos. Pero sí se puede ayudar a la gente a encontrar claridad en él”.

En las décadas de 1980 y 1990, Reyes desempeñó un papel clave en las primeras respuestas de México ante la contaminación atmosférica urbana. No abordó el problema como activista ni como investigador, sino como creador de instituciones. Se desempeñó como subsecretario de Ecología y posteriormente como presidente fundador del Instituto Nacional de Ecología (INE), donde contribuyó al desarrollo de la normativa ambiental del país.

*“No era científico ni investigador. Era alguien capaz de llegar a acuerdos”.*

Desde estos cargos, facilitó algunas de las decisiones más trascendentes sobre la calidad del aire de la época. Estas incluyeron programas de restricción vehicular y el cierre de importantes fuentes industriales de contaminación. Describe su contribución con modestia: “No era científico ni investigador. Era alguien capaz de llegar a acuerdos”.

## Instituciones antes de la acción

Cuando Reyes asumió cargos directivos, el panorama de la política ambiental en México aún era fragmentado. Aunque la preocupación pública por la contaminación crecía, existían pocas estructuras coordinadas. La prioridad de Reyes fue fortalecer esas estructuras. Durante su gestión en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), contribuyó a desarrollar planes a largo

plazo para la calidad del aire, ampliar los sistemas de monitoreo y a definir los marcos legales de las instituciones ambientales.

También impulsó la visibilidad de decisiones políticas, como el cierre de una planta de cemento y una refinería en el Valle de México. Ambas instalaciones se consideraban fuentes importantes de contaminación por partículas. Estas medidas marcaron un punto de inflexión: la contaminación atmosférica dejó de ser un problema secundario para convertirse en un asunto central de política pública.

Reyes no se atribuye el mérito de estas acciones. “Digamos que participé”, dice. Su objetivo no es el reconocimiento, sino crear las condiciones para una acción coordinada.

Paralelamente a estos esfuerzos nacionales, Reyes se involucró en los temas ambientales internacionales emergentes. Gracias a sus contactos en la UNAM, conoció al Dr. Mario Molina, quien más tarde recibiría el Premio Nobel de Química. Antes de este reconocimiento, Molina asesoró a legisladores mexicanos —entre ellos, a Reyes— sobre la necesidad de reducir el uso de cloro-fluorocarbonos (CFC) en aerosoles y sistemas de refrigeración. Estas asesorías llevaron a México a convertirse en el primer país del mundo en ratificar tanto el Convenio de Viena como el Protocolo de Montreal.

## Negociación como método

Reyes trabaja constantemente en la intersección entre el conocimiento y la toma de decisiones. En lugar de impulsar una ideología específica, promueve la negociación como herramienta para el progreso. Para él, alcanzar un acuerdo implica identificar lo que los diferentes actores pueden aceptar, no solo lo que exigen. Este enfoque busca construir un terreno común y garantizar que todos los participantes tengan voz en el resultado.

*“Si las personas no se sienten incluidas, no apoyarán los resultados”*

Fomenta la coordinación intersectorial, promueve el uso de datos científicos en la formulación de políticas y facilita la comunicación entre instituciones. Considera que los procesos inclusivos son tan importantes como los resultados. “Si las personas no se sienten incluidas —afirma—, no apoyarán los resultados.”

Este enfoque de negociación fue crucial en un momento en que la política ambiental en México aún se encontraba en desarrollo y el respaldo institucional era limitado. Al promover el consenso, Reyes contribuyó a la permanencia de medidas clave a lo largo de los ciclos políticos.

## Hoy No Circula y el espacio público

Una de las políticas más visibles de este período fue Hoy No Circula, un programa de restricción vehicular basado en el número de matrícula. La medida generó reacciones encontradas al momento de su implementación. Mientras que algunos apoyaron sus objetivos, otros cuestionaron su imparcialidad o eficacia. Reyes considera el programa no solo como una intervención técnica, sino también como una herramienta para la participación ciudadana. “Cuando las personas pierden el acceso a algo, empiezan a preguntarse por qué —explica—, eso abre espacio para un debate más amplio”.

Destaca la dimensión social de la política. Incorpora la contaminación al debate público y responsabiliza no solo a la industria, sino también a las personas. De este modo, contribuye a normalizar la regulación ambiental como parte de la vida cotidiana.

Años después, Reyes sigue viendo Hoy No Circula como una muestra de que las instituciones públicas pueden actuar y la ciudadanía es capaz de adaptarse.

## Política a través del conocimiento

Reyes sostiene que una política eficaz requiere más que datos. También depende de que el público comprenda su significado. A menudo enfatiza la importancia del periodismo y la educación. “Me fijo en la fuente”, dice al referirse a cómo lee las noticias. “Eso es lo que la gente necesita aprender: cómo acudir a la fuente”.

En su opinión, el cambio ambiental se basa en la orientación, en ayudar a las personas a interpretar la información y evaluar su credibilidad. “Ahora hay videos sobre casi todo —señala—. Ese no es el problema. El problema es que la mayoría no sabe distinguir lo que importa”.

## Considerar al pasado, avanzar hacia el futuro

### Lecciones y acciones para un aire limpio en México

La historia del monitoreo de la calidad del aire en México es una historia de persistencia, innovación y cambio gradual. Este epílogo repasa las lecciones de las últimas décadas, pero también mira hacia adelante, hacia las acciones necesarias para asegurar un aire más limpio para las futuras generaciones.

En los años ochenta y principios de los noventa, la Ciudad de México enfrentó una de las peores crisis de contaminación del aire urbano a nivel mundial. Episodios de concentraciones elevadas de ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y partículas (PM<sub>10</sub>) superaban con frecuencia los umbrales internacionales de seguridad. Factores como el crecimiento poblacional, la expansión industrial y la congestión vehicular fueron factores centrales en el problema. Las primeras normas oficiales de calidad del aire se emitieron formalmente en 1982, pero su aplicación sistemática llegó mucho después.

El monitoreo inicial se basaba en lecturas manuales y redes fragmentadas. Las estaciones automáticas comenzaron a expandirse significativamente apenas en la década de 1990, impulsadas por la creciente presión pública y la atención internacional. Los técnicos de campo desempeñaron un papel fundamental en la instalación y mantenimiento de esta primera generación de estaciones, recolectando datos cruciales que evidenciaron puntos críticos industriales y exposición al plomo cerca de refinerías y fundiciones.

### Creando las bases para la acción

Estos esfuerzos iniciales se moldearon a partir de una combinación de iniciativa científica y activismo ciudadano. Los técnicos de campo fueron la columna vertebral de las primeras campañas

Expresa su preocupación por una generación que crece sin el hábito de la verificación. Considera que la capacidad de comprobar afirmaciones, rastrear fuentes y comprender las políticas es esencial para el apoyo público a las medidas ambientales. Sin esta capacidad, incluso las políticas mejor diseñadas pueden fracasar.

### La experiencia internacional como herramienta

Reyes también anima a los jóvenes profesionales a estudiar en el extranjero y regresar con habilidades y redes de contactos más amplias. En su experiencia, eso fortalece su posición en los debates sobre política nacional, les otorga credibilidad, los ayuda a articular ideas complejas y favorece la creación de relaciones profesionales duraderas.

Considera la conexión internacional no como un lujo, sino como una necesidad. En campos en rápida evolución como la gestión de la calidad del aire, la capacidad de aprovechar el conocimiento y los sistemas globales constituye un componente clave del progreso nacional.

### La estructura de un legado

Sergio Reyes Luján ha trabajado en el sector privado durante los últimos doce años. Hoy, muchos de los programas e instituciones que ayudó a fundar siguen funcionando. Su persistencia, sugiere, es más importante que el crédito individual.

*El conocimiento, una vez establecido, tiene la capacidad de moverse, adaptarse y encontrar nuevos administradores* También es consciente de la facilidad con que puede perderse el progreso. Los programas de monitoreo pueden desmantelarse, las agencias pueden reestructurarse o absorberse.

Aún así, mantiene la convicción de que el conocimiento, una vez establecido, tiene la capacidad de moverse, adaptarse y encontrar nuevos administradores. “Siempre hay más por hacer —afirma—, pero hay mucho más que podemos perder”.

Ver **Figura 7.** Evolución de la coordinación institucional en materia de calidad del aire que desde las gestiones fundacionales de Reyes Luján, ha sostenido la continuidad de las acciones públicas hasta la actualidad.

de monitoreo, desplazándose entre distintas ubicaciones para instalar dispositivos rudimentarios, recolectar filtros y analizar muestras. Su labor permitió identificar zonas con alta contaminación por plomo cerca de instalaciones industriales y reveló la magnitud de la contaminación por partículas en el área metropolitana.

Programas como el PICCA y ProAire marcaron las primeras respuestas coordinadas frente al smog urbano severo. Políticas como el programa Hoy No Circula comenzaron como medidas de emergencia, pero más adelante se integraron a la planificación de largo plazo. El cierre de industrias contaminantes, en muchos casos, ocurrió tras una presión sostenida por parte de la ciencia y la sociedad civil. La creación del Instituto Nacional de Ecología representó un cambio hacia una gestión ambiental más independiente y basada en datos. Con el tiempo, la calidad del aire dejó de ser solo un asunto exclusivamente capitalino para convertirse en un tema nacional, extendiendo las redes de monitoreo a otras regiones del país.

Durante los años ochenta y principios de los noventa, los efectos biológicos de la contaminación atmosférica aún eran poco comprendidos en México. Las plantas servían como testigos silenciosos de la polución, mostrando daños visibles como clorosis y deformaciones foliares. Especies como el tabaco y la alfalfa estuvieron entre las primeras especies empleadas en estudios experimentales para detectar estrés por contaminantes en entornos urbanos. Estos métodos de bajo costo complementaban la recolección manual de datos llevada a cabo por los técnicos de campo. El uso de bioindicadores también fomentó colaboraciones interdisciplinarias, enlazando la biología, la geografía y las ciencias atmosféricas de maneras novedosas.

## Desafíos por venir

Las entrevistas recogidas en este libro dejan claro que el monitoreo sigue siendo esencial para comprender la calidad del aire y orientar la toma de decisiones, pero también evidencian que los avances aún son frágiles e incompletos. Los sistemas de monitoreo se han expandido y perfeccionado, pero por sí solos no pueden alcanzar los niveles de aire limpio que la ciudadanía merece. Lograr este estándar exige avanzar más allá: requiere acción concreta basada en el conocimiento que estos sistemas producen.

Los esfuerzos de México en materia de calidad del aire nunca fueron producto de un único plan o institución. Evolucionaron mediante ensayo y error, presión social, colaboración y construcción de evidencia, guiados tanto por la urgencia como por la innovación. Desde las campañas manuales de campo de los años setenta hasta los modelos de emisiones sofisticados de la década de 2020, la trayectoria ha implicado cambios generacionales en la forma de comprender, gestionar y convivir con la contaminación. El camino a seguir debe honrar ese legado.

No con nostalgia, sino reconociendo que los sistemas de gestión ambiental son frágiles, reversibles y siempre cambiantes.

## Pasos clave para el futuro

- Profundizar la integración entre políticas de salud y clima.

La contaminación del aire, el cambio climático y la salud pública están estrechamente interrelacionados. Las políticas deben alinear las normas de calidad del aire con datos de salud y estrategias de adaptación climática. Los sistemas de alerta temprana deben integrar indicadores meteorológicos y biológicos. Contaminantes emergentes como las partículas ultrafinas y los compuestos orgánicos volátiles (COV) en interiores requieren mayor atención normativa.

- Pasar de la recolección de datos a la aplicación de políticas.

México ha construido una infraestructura de monitoreo robusta, pero su aplicación no siempre ha estado a la altura de sus capacidades técnicas. Los datos en tiempo real deben traducirse en acción, respaldados por marcos legales y autonomía institucional para entidades como el INECC y la SEMARNAT. Los datos deben estar al servicio de la población, no solo del cumplimiento normativo.

- Reconocer y regular las fuentes domésticas e informales.

Las emisiones provenientes de productos de limpieza, gas LP y la quema de leña en los hogares representan una fuente subestimada de contaminación en las ciudades mexicanas. La calidad del aire en interiores debe abordarse como una cuestión de salud pública, mediante tecnologías más limpias y campañas de educación. Las emisiones informales deben tratarse con la misma seriedad que las industriales.

- Formar una nueva generación de líderes ambientales.

El progreso siempre ha dependido de técnicos, científicos y responsables comprometidos. Hoy en día, la falta de financiamiento, la fuga de talentos y los vínculos débiles entre investigación y toma de decisiones amenazan ese legado. La inversión en formación, mentoría y educación interdisciplinaria es vital para el futuro.

- Incorporar la ética y la equidad en las políticas públicas.

Los riesgos ambientales suelen presentarse como problemas técnicos, mientras que las dimensiones éticas y de salud permanecen poco representadas en el debate público. Las comunidades con menos recursos siguen siendo las más afectadas. La política de calidad del aire debe priorizar la justicia, la rendición de cuentas y la inclusión.

- Liderar la colaboración regional y global.

Con décadas de aprendizaje, capacidad científica e innovación, México puede liderar con el ejemplo en América Latina, compartiendo buenas prácticas, fortaleciendo la cooperación con otras megaciudades y contribuyendo a acuerdos ambientales regionales.

## Una responsabilidad compartida

Las personas entrevistadas en este libro representan décadas de dedicación y convicción. Sus historias demuestran que el progreso ocurre paso a paso, muchas veces impulsado por individuos fuera de las estructuras formales que insistieron en actuar con base en la evidencia. Los avances científicos, las innovaciones en políticas públicas y los cambios institucionales logrados en los últimos cuarenta años muestran que incluso las crisis de contaminación más graves pueden abordarse con persistencia y colaboración.

Algunos pioneros importantes no aparecen en este libro porque han fallecido o fue imposible localizarlos. Nos gustaría mencionar aquí algunos de sus nombres para honrar sus contribuciones: Dr. Mario Molina Pasquel y Henríquez, Dr. Humberto Bravo Alvarez, Dr. Ernesto Jaúregui Ostos, Dra. Matilde Espinosa Rubio, Mtra. Yolanda Falcón Briseno, Met. Ernesto Sandoval Jimenez, Ing. Enrique Tolivia Meléndez, Dra. Margarita Castillejos Salazar, Dra. María de Lourdes de la I. de Bauer, Ing. Rogelio González García, Arq. René Altamirano Pérez. Su trabajo de investigación, labor técnica y esfuerzos en el ámbito de las políticas sentaron bases fundamentales, y su legado sigue siendo parte de los cimientos de los esfuerzos por la calidad del aire en México.

México tiene hoy la oportunidad de consolidar ese legado. Con el conocimiento acumulado, la memoria institucional y la infraestructura técnica disponible, el país puede ejercer un liderazgo ejemplar en la región. El próximo capítulo dependerá de las decisiones que se tomen hoy en inversión, aplicación, educación y cooperación. Proteger la independencia de las instituciones científicas, mantener programas de largo plazo como ProAire y fomentar alianzas internacionales será clave para lograr mejoras duraderas.

Este epílogo no es una conclusión. Es un reconocimiento de que el aire que respiramos es el resultado de innumerables decisiones tecnológicas, políticas, económicas y personales. La historia de la calidad del aire en México está lejos de terminar, pero constituye una prueba de que el cambio es posible cuando la evidencia se convierte en acción y cuando las personas siguen estando en el centro de la política pública.

## Medidas interinstitucionales acordadas para la calidad del aire en México (1950-2020)



Figura 7. Línea del tiempo de las principales medidas y acuerdos interinstitucionales para el control de la contaminación atmosférica en México (1960-2025).

Campaña MILAGRO 2002. Iniciativa de una Megaciudad: Observaciones científicas locales y globales (Megacity Initiative: Local and Global Research Observations) (MILAGRO). (2002).

Comisión Ambiental de la Megalópolis. (2018, 21 de septiembre). Imeca: Índice Metropolitano de la calidad del aire.

Organización Panamericana de la Salud y Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. (1967, junio). Programa para estudiar la contaminación atmosférica. Carta-convenio. Salud Pública de México, Época V, 9(5).

Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas. (1992–presente).

Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA). (1990–1995).

ProAire Valle de México, 2002–2010. (2002).

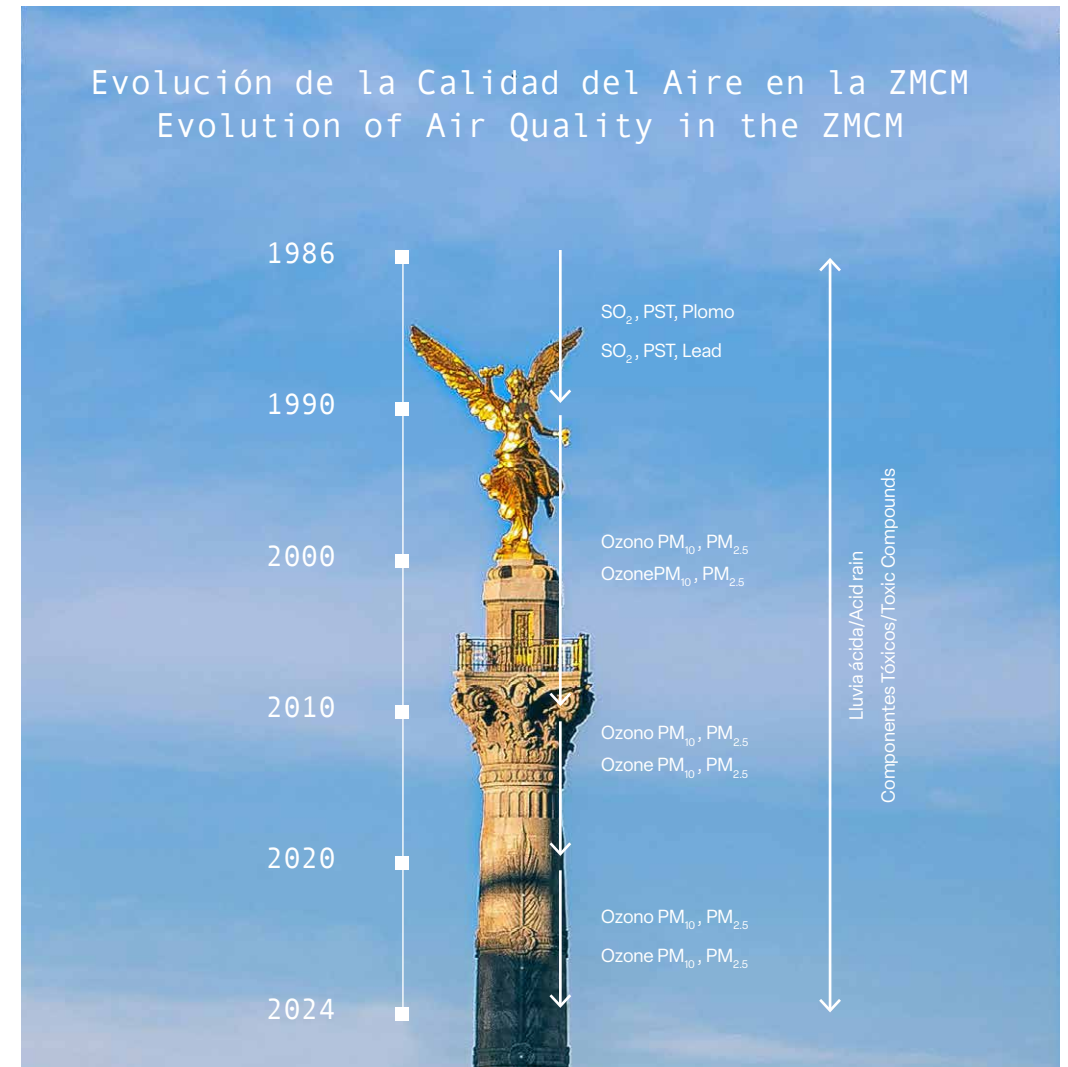
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, desempeño ambiental y crecimiento verde.

Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente. (1978). El Índice Mexicano de la Calidad del Aire (IMEXCA). Memorandum Técnico SMA/DGS at/02/78.

Soto Colobaltes, N. V. (2015). El aire de cada día: Política y medición de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México (1960–2015).

Vizcaíno Murray, F., et al. (1973, enero-febrero). La contaminación ambiental y la salud del niño. Revista de Salud Pública, Época V, 15(1).

Voria-Aburto, V. H., Castillejos, M., et al. (1998, diciembre). Mortality and ambient fine particles in Southwest Mexico City, 1993–1995. Environmental Health Perspectives, 106(12).



**Figura 8.** Línea del tiempo de la evolución de la contaminación atmosférica en la ZMCM.

Fuente: SEMINARIO INSTITUCIONAL DEL ICAYCC UNAM. Estado actual y futuro de la investigación sobre contaminación atmosférica. Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

**Figure 8.** Timeline of the evolution of air pollution in the Mexico City Metropolitan Area.

Retrieved from Institutional Seminar of ICAYCC UNAM. Current Status and Future of Research on Air Pollution. Dr. Rodolfo Sosa Echeverría



**Figura 11.** Representación ilustrativa inspirada en las mediciones pioneras de meteorología en en Valle de Toluca

**Figure 11.** Illustrative representation inspired by the first meteorological measurements in the Valley of Toluca.

**Figura 9.** Hoja de tabaco con 80% de daño por ozono.

**Figure 9.** Tobacco leaf with 80% ozone damage.



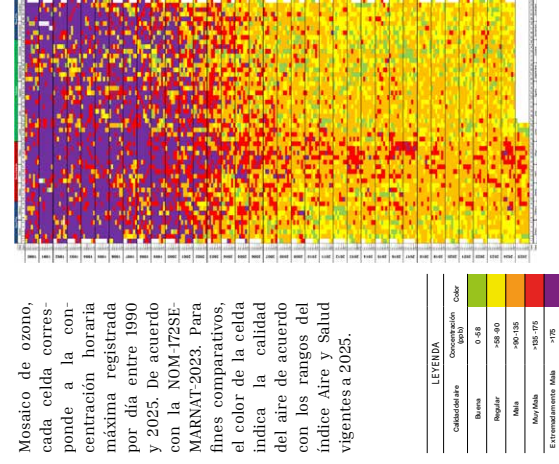
**Figura 10.** Exposición de plantas de tabaco en la Estación Pedregal.

**Figure 10.** Exposure of tobacco plants at the Pedregal Station.



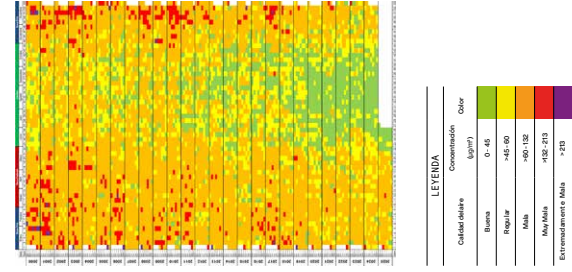
## MOSAICOS HISTÓRICOS DEL ÍNDICE AIRE Y SALUD

(NOM-172-SEMARNAT-2023) DE O<sub>3</sub> EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (1990-2025)



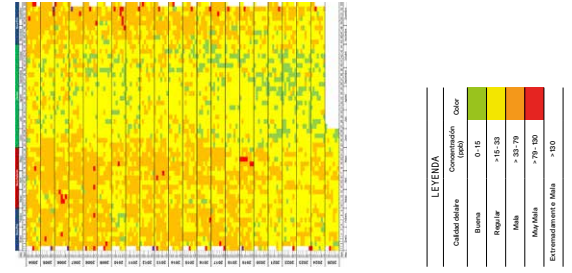
Mosaico de ozono, cada celda corresponde a la concentración horaria máxima registrada por día entre 1990 y 2025. De acuerdo con la NOM-172-SEMARNAT-2023, Para fines comparativos, el color de la celda indica la calidad del aire de acuerdo con los rangos del índice Aire y Salud vigentes a 2025.

(NOM-172-SEMARNAT-2023) DE PM10 EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (2000-2025)



Mosaico de PM10, cada celda corresponde a la concentración del valor máximo del promedio de 24 horas de acuerdo con la NOM-025SSA1-2021 y NOM-172-SEMARNAT-2023, registrado por día entre 2000 y 2025. Para fines comparativos, el color de la celda indica la calidad del aire de acuerdo con los rangos del índice Aire y Salud vigentes a 2025.

(NOM-172-SEMARNAT-2023) DE PM2.5 EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (2004-2025)



Mosaico de PM<sub>2.5</sub>, cada celda corresponde a la concentración del valor máximo del promedio de 24 horas de acuerdo con la NOM-025SSA1-2021 y NOM-172-SEMARNAT-2023, registrado por día entre 2004 y 2025. Para fines comparativos, el color de la celda indica la calidad del aire de acuerdo con los rangos del índice Aire y Salud vigentes a 2025.

**Figura 12.** Conjunto de Mosaicos históricos del índice de aire y salud en la Zona metropolitana de la Ciudad de México, publicados por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.

**Figure 12.** Set of historical mosaics of the Air and Health Index in the Mexico City Metropolitan Area, published by the Secretaría del Medio Ambiente of Mexico City.