



Programa de gestión para mejorar la CALIDAD DEL AIRE de la Zona Metropolitana del Valle de México



Ehécatl

Dios del viento en la mitología azteca y para otras culturas de Mesoamérica.

“ Yo quiero que respiren, tú eres lo único que tienen, por eso eres transparente, para que vean lo que vendrá mañana...”

Pablo Neruda

2021-2030



Directorio

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

María Luisa Albores González	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Tonatiuh Herrera Gutiérrez	Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental
Adolfo Cimadevilla Cervera	Director General de Gestión de Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
Daniel López Vicuña	Director de Calidad del Aire

Gobierno de la Ciudad de México

Claudia Sheinbaum Pardo	Jefa de Gobierno de la Ciudad de México
Marina Robles García	Secretaria del Medio Ambiente
Sergio Zirath Hernández Villaseñor	Director General de Calidad del Aire
Patricia Camacho Rodríguez	Directora de Proyectos de Calidad del Aire

Gobierno del Estado de México

Alfredo del Mazo Maza	Gobernador del Estado de México
Jorge Rescala Pérez	Secretario del Medio Ambiente
Carolina García Cañón	Directora General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica
Fátima Ramírez Rodríguez	Coordinadora del Programa Aire Limpio del Valle de Toluca

Gobierno del Estado de Hidalgo

Omar Fayad Meneses	Gobernador del Estado de Hidalgo
Said Javier Estrella García	Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Alma Irays Ramírez Vega	Secretaria Técnica
Ricardo Alberto Pérez Hernández	Subdirector de Mantenimiento de la Calidad del Aire

Comisión Ambiental de la Megalópolis

J. Víctor Hugo Páramo Figueroa	Coordinador Ejecutivo de Vinculación Institucional y de la CAME
Alejandro Villegas López	Director de Planeación, Sostenibilidad Metropolitana y Vinculación Institucional
Ramiro Barrios Castrejón	Director de Gestión de Calidad del Aire en Zonas Metropolitanas
Gloria Julissa Calva Cruz	Directora de Prevención y Control de la Contaminación Urbana en Zonas Metropolitanas
Luis Fernando Lahud Flores	Director de Coordinación y Vinculación Institucional

Citar este documento como:

Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021- 2030). SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH y SEMARNAT. Ciudad de México. Diciembre, 2021.

Primera edición, diciembre 2021.

Impreso y hecho en México.

Este documento se elaboró con recursos del Fideicomiso 1490 "Para Apoyar Los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis".

La reproducción total o parcial de este documento podrá efectuarse mediante autorización expresa de la fuente y dándole el crédito correspondiente.

D.R. © 2021

Comité Núcleo del ProAire

Adrián Fernández Bremauntz	Director de Iniciativa Climática México
Bárbara Arzate Hernández	JUD de Prevención de Impacto Ambiental de la Alcaldía de Iztapalapa
Carolina García Cañón	Directora General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica de la SMAGEM
Daniel López Vicuña	Director de Calidad del Aire de la SEMARNAT
Erik Hans Solórzano Pedroza	Director de Sustentabilidad de la Alcaldía Cuauhtémoc
Héctor Mayagoitia Domínguez	Responsable de la Coordinación Politécnica para la Sustentabilidad del Instituto Politécnico Nacional
Horacio Riojas Rodríguez	Director de Salud Ambiental, Centro de Investigación en Salud Poblacional. Instituto Nacional de Salud Pública
Jorge Alberto Landeros Sánchez	Municipio de Huixquilucan
J. Víctor Hugo Páramo Figueroa	Coordinador Ejecutivo de la Comisión Ambiental de la Megalópolis
Luis Gerardo Ruiz Suárez	Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Marina Robles García	Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Presidenta)
Oscar Moreno Zúñiga	Subdirector de Comisiones Metropolitanas de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano del Estado de México
Rubén Irvin Rojas Valdés	Investigador del Centro de Investigación y Docencia Económicas
Sergio Z. Hernández Villaseñor	Director General de Calidad del Aire de la SEDEMA (Secretario Técnico)
Stephan Brodziak de los Reyes	El Poder del Consumidor
Telma Gloria Castro Romero	Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México
Víctor Florencio Santes Hernández	Director del Centro de Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional

Elaboración del documento

Edición e integración a cargo del equipo de CAPSUS S.C., con recursos del Fideicomiso Ambiental FIDAM 1490 de la CAME:

Antares Velázquez Rivera (diseño)	Se agradece a la SEDEMA,	Se agradece también el apoyo
Dante Zayas Mendoza	Ricardo García Ruiz, Carmen	de otros miembros del equipo de
Guillermo Velasco Rodríguez	Valdez Berriozábal, Guillermo	CAPSUS S.C., en específico a María
Renata Rocha Ojeda	Velasco Rodríguez y María Blanco	Blanco Solana, Paola Cymet Monroy,
Sebastián Reyes de la Lanza	Solana por el apoyo brindando	Raúl Saucedo Ortiz, Ricardo García
	material fotográfico para	Ruiz, y colaboradores externos,
	esta publicación.	Jorge Macías y Roberto de la Maza.

Para el desarrollo del documento, fueron clave los insumos técnicos y las revisiones por parte del equipo de la SEDEMA de la Ciudad de México:

Mónica del Carmen Jaimes Palomera	Saira Mendoza Pelcastre	Se agradece también el apoyo del
Olivia Rivera Hernández	Stephanie Montero Bending	Equipo de Inventario de Emisiones
Patricia Camacho Rodríguez	Verónica Diego Santos	de la SEDEMA.
Petra Paz Ramírez	Yadira Reyes Aguilar	

Se agradece la valiosa colaboración de las siguientes instituciones gubernamentales, así como a todas las partes que proporcionaron información y retroalimentación para la elaboración de este documento:

Alcaldía Álvaro Obregón	Instituto Nacional de Salud Pública
Alcaldía Magdalena Contreras	Instituto Mexicano del Petróleo
Alcaldía Miguel Hidalgo	Instituto Politécnico Nacional
Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos	Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos, México
Asociación Interamericana para la Defensa del Medio Ambiente	Petróleos Mexicanos
Centro Mexicano de Derecho Ambiental	Secretaría de Desarrollo Económico de la Ciudad de México
Centro de Investigación y Docencia Económicas	Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Ciudad de México
Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente	Secretaría de las Mujeres de la Ciudad de México
Grupo de Liderazgo Climático C40	Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México
Consejo Internacional del Transporte Limpio	Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México
El Poder del Consumidor	Secretaría de Salud de la Ciudad de México
MCE2 Molina Center for Energy and Environmental	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
Iniciativa Climática de México	Subsecretaría de Coordinación Metropolitana y Enlace Gubernamental de la Ciudad de México
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM	Representantes de los sectores académico, de investigación, público y privado que participaron en los talleres de consulta
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	
Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias	

Tabla de contenidos

14	Siglas y símbolos
23	Presentación
28	Resumen ejecutivo
37	Antecedentes
40	Introducción
42	Justificación
44	Capítulo 1. Descripción de la zona de estudio
47	1.1 Delimitación geográfica
49	1.2 Aspectos físicos
49	1.2.1 Relieve
51	1.2.2 Hidrografía
54	1.2.3 Clima
63	1.2.4 Suelos
71	1.2.5 Áreas naturales protegidas
73	1.3 Cuenca atmosférica de la ZMVM
76	1.4 Aspectos socioeconómicos
76	1.4.1 Demografía
86	1.4.2 Actividad económica
93	1.5 Estructura urbana
93	1.5.1 Patrones de desarrollo y organización urbana
95	1.5.2 Movilidad, transporte y vías de comunicación
106	1.5.3 Disposición final de Residuos Sólidos Urbanos
107	1.5.4 Gobernanza y planeación urbana
108	1.6 Estructura institucional
112	Capítulo 2. Fundamento Jurídico y Marco Normativo
116	2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
117	2.2 Marco jurídico internacional
117	2.2.1 Calidad del aire y derechos humanos

121	2.2.2 Instrumentos Internacionales relativos a la calidad del aire
122	2.2.3 Agenda 2030
124	2.2.4 Acuerdos bilaterales y multilaterales celebrados por México en materia de calidad del aire
126	2.3 Legislación Federal
126	2.3.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
130	2.3.2 Ley General de Cambio Climático
130	2.3.3 Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos
131	2.3.4 Convenio de Coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental de la Megalópolis
131	2.3.5 Reglamento Interior de la SEMARNAT
132	2.3.6 Normas Oficiales Mexicanas
132	2.3.7 Estrategia Nacional de Calidad del Aire y programas de gestión federales
133	2.4 Legislación Estatal
133	2.4.1 Ciudad de México
137	2.4.2 Estado de México
142	2.4.3 Estado de Hidalgo
144	Capítulo 3. Diagnóstico de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México
148	3.1 Características de los contaminantes atmosféricos
154	3.2 Sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT)
157	3.2.1 La calidad de los datos que genera el SIMAT
158	3.2.2 Sistema de pronóstico de la calidad del aire
159	3.3 Indicadores de calidad del aire
160	3.3.1 Límites permisibles y normas de salud ambiental
162	3.3.2 Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud
163	3.3.3 Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud
163	3.4 Diagnóstico de la calidad del aire

164	3.4.1 Dióxido de azufre
167	3.4.2 Óxidos de nitrógeno
172	3.4.3 Monóxido de carbono
174	3.4.4 Ozono
178	3.4.5 Partículas suspendidas
185	3.4.6 Tendencia histórica de calidad del aire
187	3.4.7 Calidad del aire en el Estado de Hidalgo
189	3.5 Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas
189	3.5.1 Revisión histórica del Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas
193	3.6 Eventos extraordinarios de calidad del aire
193	3.6.1 Incendios de mayo de 2019
195	3.6.2 Pandemia causada por SARS-CoV2 (COVID-19)
199	3.7 Evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020
199	3.7.1 Avances en la implementación de acciones del ProAire ZMVM 2011-2020
202	3.7.2 Reducción de emisiones contaminantes
204	3.7.3 Mejoras en la calidad del aire
208	3.7.4 Lecciones aprendidas
210	3.8 Evidencia científica reciente sobre calidad del aire y química atmosférica en la ZMVM
218	Capítulo 4. El impacto del cambio climático en la calidad del aire de la zona metropolitana del Valle de México
222	4.1 El cambio climático y sus efectos
222	4.1.1 Calentamiento global y sus efectos en el medio ambiente
223	4.1.2 Impacto del cambio climático en la calidad del aire
226	4.1.3 Proyecciones de cambio climático a futuro
227	4.2 Cambio climático en la Zona Metropolitana del Valle de México
228	4.2.1 Aumento de la temperatura
230	4.2.2 Variación en los patrones de precipitación
232	4.2.3 Impactos económicos y sociales

234	4.3 Impacto del cambio climático en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México
238	4.4 Conclusiones
240	Capítulo 5. Inventario de emisiones de la zona metropolitana del Valle de México
244	5.1 Alcance del Inventario de Emisiones 2018
245	5.1.1 Matriz energética
246	5.2 Emisiones de contaminantes criterio y precursores de ozono
247	5.2.1 Partículas suspendidas
249	5.2.2 Precursores de ozono
252	5.3 Emisiones de contaminantes tóxicos
253	5.4 Emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero
256	5.5 Emisiones externas
257	5.5.1 Corredor industrial Tula-Vito-Aspasco
258	5.5.2 Actividad volcánica
260	Capítulo 6. Salud pública y calidad del aire
265	6.1 Factores sociodemográficos y condicionantes de la salud
265	6.1.1 Grupos de población vulnerables
275	6.1.2 Morbilidad y mortalidad general en la Zona Metropolitana del Valle de México
278	6.2 Efectos de la contaminación del aire en la salud humana
269	6.2.1 Efectos del dióxido de azufre
280	6.2.2 Efectos de los óxidos de nitrógeno
281	6.2.3 Efectos del monóxido de carbono
281	6.2.4 Efectos del ozono
283	6.2.5 Efectos de las partículas suspendidas
287	6.2.6 Efectos de los compuestos orgánicos volátiles
288	6.2.7 Relación entre la mala calidad del aire y enfermedades infecciosas
289	6.2.8 Impactos del cambio climático en la calidad del aire y la salud humana

290	6.3 Evidencia epidemiológica
291	6.3.1 Evidencia epidemiológica a largo plazo (estudios de cohorte y meta-análisis)
297	6.3.2 Evidencia epidemiológica a corto plazo (estudios de series de tiempo)
301	6.4 Evaluaciones de Impactos a la Salud
301	6.4.1 Metodología para estimar impactos a la salud derivados de mejoras en la calidad del aire
303	6.4.2 Resultados de Evaluaciones de Impactos a la Salud en la ZMVM
316	6.4.3 Beneficios sociales derivados de mejoras en la calidad el aire
316	6.5 Estrategias y acciones institucionales en materia de calidad del aire y salud pública
318	Capítulo 7. Estrategias, medidas y acciones de gestión de la calidad del aire y reducción de emisiones
322	7.1 Objetivos y metas del ProAire
322	7.1.1 Objetivo general
323	7.1.2 Objetivos específicos y metas de reducción de emisiones
324	7.2 Contexto
325	7.3 Estrategia para la definición de medidas del ProAire
327	7.4 Medidas y acciones
370	7.5 Costos y beneficios de la implementación del ProAire
370	7.5.1 Reducciones en emisiones
374	7.5.2 Costo de implementación
375	7.5.3 Beneficios en la calidad del aire y salud
381	7.6 Agenda regulatoria
384	Capítulo 8. Comunicación y participación ciudadana
389	8.1 Percepción ciudadana de la calidad del aire
397	8.2 Principales procesos y canales de comunicación
399	8.3 Participación e involucramiento de la ciudadanía en el desarrollo e implementación del ProAire

399	8.3.1 Procesos participativos para la elaboración del ProAire ZMVM 2021-2030
401	8.3.2 Participación intersectorial para la gestión de la calidad del aire
403	8.4 Estrategia de Comunicación y Participación Ciudadana
403	8.4.1 Eje A. Protección de la salud pública
415	8.4.2 Eje B. Participación ciudadana para disminuir emisiones contaminantes
420	8.4.3 Observaciones para el desarrollo e implementación de la Estrategia Integral de Comunicación
422	Capítulo 9. Financiamiento para mejorar la calidad del aire
428	9.1 Principios de la Estrategia Integral de Financiamiento
430	9.2 Financiamiento municipal, estatal y federal
430	9.2.1 Presupuestos públicos
431	9.2.2 Generación de recursos
432	9.2.3 Fuentes de financiamiento locales
433	9.2.4 Fuentes de financiamiento nacionales
435	9.3 Participación del sector privado, académico y social
435	9.3.1 Inversión de particulares a través de la acción pública
436	9.3.2 Financiamiento privado, académico y social
438	9.4 Colaboración internacional
439	9.4.1 Financiamiento multilateral
441	9.4.2 Financiamiento bilateral
446	Capítulo 10. Seguimiento, monitoreo y evaluación
450	10.1 Principios de la Estrategia de Seguimiento y Evaluación
450	10.1.1 Metodología del Marco Lógico
451	10.1.2 Principios de la Estrategia de Seguimiento y Evaluación
452	10.2 Estrategia de Seguimiento y Evaluación del ProAire
454	10.2.1 Actores clave
456	10.2.2 Herramientas para el seguimiento y evaluación
457	10.2.3 Proceso de seguimiento y mejora continua

460	10.2.4 Metodología de evaluación periódica
462	10.2.5 Digitalización para el seguimiento y evaluación del ProAire
464	10.3 Retos para el seguimiento y evaluación del ProAire
464	10.3.1 Limitaciones y retos para un efectivo seguimiento y monitoreo
465	10.3.2 Mecanismo de cumplimiento
466	Capítulo 11. Implementación
470	11.1 Cronograma general de implementación
474	11.2 Roles y responsabilidades
476	11.3 Barreras de implementación
476	11.3.1 Barreras presupuestales
478	11.3.2 Barreras económicas
478	11.3.3 Barreras sociales
479	11.3.4 Barreras políticas
479	11.3.5 Barreras institucionales
480	11.3.6 Barreras operativas
480	11.3.7 Barreras del sector involucrado
481	11.3.8 Barreras tecnológicas
482	Capítulo 12 Conclusiones
494	Fuentes de información

Siglas y símbolos

Siglas y acrónimos

ADIP	Agencia Digital de Innovación Pública de la Ciudad de México
AICM	Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México
ANP	Área Natural Protegida
APS	Agencia de Protección Sanitaria de la Ciudad de México
AQFS-Mex	Sistema de Pronóstico de la Calidad del Aire de la Ciudad de México (en inglés, <i>Air Quality Forecasting System</i>)
ASEA	Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos
AVU	Áreas Verdes Urbanas
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BRT	Autobús de Tránsito Rápido (en inglés, <i>Bus Rapid Transit</i>)
BSC	Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (en inglés, <i>Barcelona Supercomputing Center</i>)
BTX	Benceno, Tolueno y Xilenos
CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CAMe	Comisión Ambiental de la Megalópolis
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM
CDMX	Ciudad de México
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CEND	Coordinación de Estrategia Digital Nacional
CEPAL	Comisión Económica de América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas
CEPANAF	Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna del Estado de México
CETRAM	Centros de transferencia modal
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CICA	Centro de Información de la Calidad del Aire
CMM	Centro Mario Molina
COA	Cédula de Operación Anual
COFEPRIS	Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios

Siglas y acrónimos

COI	Cédula de Operación Integral
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
CONAPO	Consejo Nacional de Población
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
COVID-19	Enfermedad por Coronavirus
CPBEM	Código para la Biodiversidad del Estado de México
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DENUE	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas
EdoMex	Estado de México
EIC	Estrategia Integral de Comunicación
EIF	Estrategia Integral de Financiamiento
EIS	Evaluaciones de Impactos a la Salud
ELAC	Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México
ENCA	Estrategia Nacional de Calidad del Aire
ENOS	El Niño – Oscilación del Sur
EOD	Encuesta Origen Destino
EPOC	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
ESE	Estrategia de Seguimiento y Evaluación
FCR	Función concentración – respuesta
FIDAM	Fideicomiso Ambiental 1490 “Para Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis”
Gas L.P.	Gas Licuado de Petróleo
GCA	Guía de Calidad del Aire
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GyCEI	Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (también CyGEI)
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Siglas y acrónimos

HCNQ	Hidrocarburos No Quemados
HNC	Programa Hoy No Circula
IEECC	Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático del Estado de México
IGECEM	Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
IMSS	Instituto Mexicano del Seguro Social
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INSP	Instituto Nacional de Salud Pública
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IRA	Infecciones Respiratorias Agudas
IRPS	Índice de Riesgo para Personas Susceptibles
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental
LAPTFD	Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal
LAU-CDMX	Licencia Ambiental Única para la Ciudad de México
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LMP	Límite Máximo Permisible
LPAEH	Ley para la Protección al Ambiente del Estado de Hidalgo (LPAEH)
MB	Metrobús
MML	Metodología del Marco Lógico
m s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (en inglés, National Aeronautics and Space Administration)
NOM	Norma Oficial Mexicana
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONG	Organización no gubernamental

Siglas y acrónimos

ONU	Organización de las Naciones Unidas
PACCM	Programa de Acción Climática de la Ciudad de México
PBT	Peso bruto vehicular
PAOT	Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México
PCAA	Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PGD	Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México
PGEEE	Plantas Generadoras de Energía Eléctrica de Emergencia
PIB	Producto Interno Bruto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PPRECAA	Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas
PROBOSQUE	Protectora de Bosques del Estado de México
PROESPA	Procuraduría Estatal de Protección al Ambiente de Hidalgo
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PROPAEM	Procuraduría de Protección al Ambiente del Estado de México
PVVO	Programa de Verificación Vehicular Obligatorio
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
REDMA	Red Manual de Monitoreo Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
RHA	Región Hidrológico-Administrativa
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
RTP	Red de Transporte de Pasajeros
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SAF	Secretaría de Administración y Finanzas de la Ciudad de México
SAT	Servicio de Administración Tributaria

Siglas y acrónimos

SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SDF	Sitio de Disposición Final
SE	Secretaría de Economía
SECTEI	Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México
SECTUR	Secretaría de Turismo
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
SEDECO	Secretaría de Desarrollo Económico de la Ciudad de México
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SEDESA	Secretaría de Salud de la Ciudad de México
SEDUC	Secretaría de Educación del Estado de México
SEDUO	Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra del Estado de México
SEDUVI	Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Ciudad de México
SEFIN	Secretaría de Finanzas del Estado de México
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEMARNATH	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Hidalgo
SEMOV	Secretaría de Movilidad del Estado de México
SEMOVI	Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México
SENER	Secretaría de Energía
SEP	Secretaría de Educación Pública
SFP	Secretaría de la Función Pública
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
SIVEESCA	Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Efectos a la Salud relacionados con la Contaminación Atmosférica
SMAGEM	Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SOA	Aerosol Orgánico Secundario, por sus siglas en inglés (en inglés, <i>Secondary Organic Aerosol</i>)

Siglas y acrónimos

SOBSE	Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México
SRV	Sistemas de Recuperación de Vapores
SS	Secretaría de Salud
SSC	Secretaría de Seguridad Ciudadana de la Ciudad de México
SSP	Servicios de Salud Públicos de la Ciudad de México
STC Metro	Sistema de Transporte Colectivo Metro
STE	Servicio de Transportes Eléctricos
STPS	Secretaría del Trabajo y Previsión Social
SUV	Vehículo utilitario deportivo (en inglés, <i>Sport Utility Vehicle</i>)
TMCA	Tasa Media de Crecimiento Anual
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
UV	Ultravioleta
VSL	Valor de una Vida Estadística
ZBE	Zona de Bajas Emisiones
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Unidades

h	Hora
ha	Hectárea
J	Joule o julio
km²	Kilómetro cuadrado
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
MJ	Megajoule o megajulio
mm	Milímetro
mmHg	Milímetros de mercurio
PJ	Petajoule o petajulio
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
ppt	Partes por trillón
s	Segundo
t	Tonelada
W	Watt o vatio
µg	Microgramo
µm	Micrómetro
°C	Grado Celsius o centígrado

Sustancias, Compuestos y mezclas químicas

BTX	Benceno, Tolueno e Isómeros de Xileno
CH₄	Metano
CN	Carbono negro
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
CO₂eq	Dióxido de carbono equivalente
COV	Compuestos orgánicos volátiles
HNO₃	Ácido nítrico
H₂SO₄	Ácido sulfúrico
NH₃	Amoniaco
N₂O	Óxido nitroso
NO	Óxido nítrico
NO₂	Dióxido de nitrógeno
NO_x	Óxidos de nitrógeno
O₃	Ozono
Pb	Plomo
PM₁₀	Partículas con diámetro aero-dinámico igual o menor a 10 µm
PM_{2.5}	Partículas con diámetro aero-dinámico igual o menor a 2.5 µm
PM_{0.1}	Partículas con diámetro aero-dinámico igual o menor a 0.1 µm (ultrafinas)
PST	Partículas suspendidas totales
SO₂	Dióxido de azufre
HFC	Hidrofluorocarbonos

MENSAJE DE LA AUTORIDAD FEDERAL

PROAIRE ZMVM 2021 A 2030

María Luisa Albores González

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es la metrópoli con la mayor población en el país y una de las diez más grandes del mundo, en donde interactúan personas con una valiosa diversidad cultural que desarrollan múltiples actividades sociales, económicas y educativas que la posicionan como un área de interés nacional, tanto por las oportunidades que ofrece, como por los retos que implica, siendo la calidad ambiental uno de los más importantes y urgentes que la región tiene por delante.

En la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) estamos convencidos de que garantizar el derecho a un medio ambiente sano, incluido un aire limpio, es una condición primordial para asegurar un desarrollo sustentable de la mano de la justicia social y el equilibrio ecológico.

Esta coyuntura exige la intervención de todos los actores de la sociedad, desde los tres órdenes de gobierno, el sector privado, social y académico, hasta las propias comunidades, pues sólo coadyuvando entre todos se logrará generar la consciencia necesaria para elaborar e implementar las acciones para alcanzar un medio ambiente sano y limpio.

Por lo anterior, la SEMARNAT, en coordinación con el Estado de México, el Estado de Hidalgo y la Ciudad de México, trabaja activamente para mejorar la calidad del aire de la ZMVM a corto, mediano y largo plazo. En los próximos años, este esfuerzo común entre el sector público, el privado y el social será guiado por el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030 (ProAire), que contiene estrategias y acciones diseñadas en consenso con la sociedad y con la academia, para lograr una mejor calidad de aire en la región.

Este ProAire es el tercer programa en su tipo que abarca toda la metrópoli y plantea el camino a seguir para lograr un aire más limpio por los próximos 9 años. Así como otros programas impulsados por el Gobierno de la Cuarta Transformación, este ProAire tiene como objetivo principal proteger a la comunidad y a los sectores más vulnerables de los efectos adversos que la contaminación atmosférica causa en su salud y bienestar.

Las estrategias más relevantes de este documento están dirigidas a reducir las emisiones de sectores contaminantes, como el transporte particular y las industrias; además de impulsar el conocimiento

académico en la materia, la participación ciudadana, la comunicación y la educación.

Si bien el ProAire es un instrumento de gestión para revertir las tendencias del deterioro de la calidad del aire, su carácter no sólo es de tipo correctivo, ya que cuenta con un fuerte componente de acciones preventivas, que apuesta por la generación de conocimientos y habilidades ambientales desde lo individual a lo colectivo y permitirán conducirnos al origen de este problema ambiental, lo que también nos llevará a reducir su incidencia en el futuro.

En el proceso de elaboración de las estrategias alrededor de este Programa, se buscó establecer un número limitado de medidas contundentes, con la finalidad de dirigir la acción pública en actividades de alto beneficio social para las personas, sus familias y sus comunidades.

La SEMARNAT reitera su compromiso de implementar políticas ambientales que impacten positivamente en el territorio, en el patrimonio natural y en la vida de todas y todos los mexicanos, con miras a lograr un medio ambiente en armonía con nuestra madre tierra.

En el Gobierno de México tenemos la convicción de que el medio ambiente no sólo es el lugar que habitamos, sino también es nuestra fuente de vida y el espacio que permita crear mejores realidades y proyectos de vida para nuestros hijos y las generaciones venideras.

Mensaje de la Ciudad de México

PROAIRE ZMVM 2021 A 2030

Claudia Sheinbaum Pardo

Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

La Ciudad de México y su zona metropolitana representan uno de los principales motores del desarrollo económico del país. Generan la mayor cantidad de bienes y servicios y, si bien presenta oportunidades de crecimiento y desarrollo, también tiene retos para que ese desarrollo sea bajo las mejores condiciones de bienestar y calidad de vida de todas las personas que aquí habitamos.

Nuestra ciudad ha enfrentado varias crisis, algunas de ellas agudas como los terremotos y pandemias, y otros problemas crónicos como la degradación ambiental, donde la calidad del aire ha sido la más evidente y preocupante por sus efectos directos en la salud humana.

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030 (ProAire ZMVM) se presenta en un contexto de transformación de la ciudad, donde nuestro mayor propósito es proteger la salud pública de quienes vivimos, trabajamos, estudiamos y disfrutamos de esta urbe. En el mismo sentido que el Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México, este ProAire ZMVM confluye con la necesidad de establecer políticas públicas de largo alcance y de gran coordinación entre los distintos sectores y actores sociales.

Se articula con otros programas de la Ciudad de México para reducir emisiones de contaminantes atmosféricos locales y las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, como evidencia clara del compromiso que tenemos con el mundo por disminuir las emisiones de gases y compuestos causantes del cambio climático global.

El esfuerzo es conjunto con las entidades vecinas de la Ciudad de México, conscientes de que un reto de esta envergadura, sólo se alcanza bajo una lógica de trabajo común y coordinado.

La visión de este Proaire ZMVM tiene como referente las aspiraciones colectivas para los próximos 9 años. En él se sigue un esquema de planeación que busca garantizar el derecho a la ciudad, hacer efectiva su función social, económica, cultural, territorial y ambiental, y orientarse al ejercicio progresivo de los derechos, a la prosperidad y la funcionalidad de la urbe.

El Programa presenta estrategias que incorporan el sentido de transformación social e institucional que demanda una experiencia como la que hemos vivido con la pandemia del coronavirus; una nueva normalidad que debe llevarnos a cambios profundos, de gran compromiso y solidaridad. Estamos claros que la

pandemia es parte de una crisis múltiple, que nos coloca ante la prioridad de proteger la salud pública, y de favorecer políticas costo-efectivas que logren resultados en el corto y largo plazo.

En esta nueva transformación de la Ciudad, nos hemos propuesto y trabajamos con un modelo que busca el reequilibrio de las condiciones ambientales y sociales, claros de que, sólo así es posible una ciudad sustentable: con un ordenamiento territorial adecuado, un transporte público eficiente, seguro y limpio, y la ampliación de áreas verdes y espacios públicos.

En su condición de capital de la República, la Ciudad seguirá recibiendo a quienes la elijan para vivir, estudiar, trabajar y pasear, y por ello este Programa identifica y asume los retos diversos que enfrenta la metrópoli, reconociendo su complejidad y magnitud, y entendiendo también que es posible solucionarlos con un esfuerzo sostenido y con la participación de todos los sectores de la sociedad.

La Ciudad de México dispone de conocimientos y de personas preparadas en todas sus áreas críticas, cuenta con instituciones de investigación

y con universidades de alta calidad, y está en condiciones de acelerar los procesos de cambio para superar sus problemas ambientales y enfilarse hacia una nueva ciudad: innovadora y de derechos; una ciudad sustentable, vivible y amable para todas las personas.

Los objetivos y metas del ProAire ZMVM se evaluarán periódicamente y buscaremos la mayor articulación y difusión con otras entidades del país para que recorran y solucionen con más facilidad y velocidad los problemas que también están presentándose en ellas.

En el seguimiento y evaluación de este Programa estará garantizada la participación ciudadana y la difusión de resultados de su aplicación, como parte de nuestro compromiso con la transparencia y para hacer más evidente que una Ciudad Sustentable, sólo es posible con un gobierno honesto, cercano y de buena administración y con una sociedad comprometida con su futuro.

MENSAJE DEL ESTADO DE MÉXICO

PROAIRE ZMVM 2021 A 2030

Alfredo Del Mazo Maza
Gobernador Constitucional del Estado de México

En la última década hemos avanzado con firmeza y decisión en la resolución de nuestras problemáticas ambientales de nuestra región. Sin embargo, los retos continúan y la urgencia por atender las problemáticas ambientales se mantiene.

El mejoramiento de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México representa uno de los retos más importantes en materia ambiental. Por ello, comprometidos con la protección de la salud de los habitantes de esta importante zona, los Gobiernos Federal, de la Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo trabajaron de manera coordinada en la elaboración del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030, ProAire, el cual marcará la ruta para sortear los desafíos ambientales que enfrentará nuestra región durante la siguiente década.

Este Programa presenta una investigación extensa sobre las condiciones atmosféricas, económicas, sociales y urbanas que vivimos más de 20 millones de habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México, así como un estudio detallado sobre los efectos de la calidad del aire en la salud pública.

A través de 19 medidas, 40 acciones y 12 actividades orientadas a prevenir, controlar y reducir las emisiones contaminantes, atendemos integralmente temas transversales que fortalecen la gestión de la calidad del aire, como los procesos de comunicación de riesgos, la participación ciudadana, los arreglos institucionales, el seguimiento y coordinación metropolitana, el monitoreo atmosférico y la investigación científica.

Cabe destacar que el Estado de México lleva ya un camino avanzado gracias a los compromisos cumplidos del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de México 2018-2030, el cual fue presentado en enero de 2019. Este programa cuenta con la participación de los 125 municipios que conforman la entidad, así como de diversas instancias gubernamentales, organizaciones de la sociedad civil y la academia.

Con la implementación del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030, nuestra entidad reafirma su compromiso para trabajar por días más claros, limpios y saludables para los mexiquenses y los habitantes de la zona centro del país.

MENSAJE DEL ESTADO DE HIDALGO

PROAIRE ZMVM 2021 A 2030

Omar Fayad Meneses
Gobernador Constitucional del Estado de Hidalgo

En el Gobierno del Estado de Hidalgo estamos conscientes de que uno de los principales problemas ambientales y de salud pública que aquejan no solo a nuestro estado sino al mundo entero es la contaminación del aire.

Hidalgo cuenta con corredores industriales esenciales para el desarrollo económico del país que albergan industrias de energía eléctrica y de combustibles, además de actividades comerciales, de servicios y de transporte. Pero todas estas actividades impactan también en la calidad del aire que respiramos en todo el Valle de México. Este es un problema que nos afecta aquí en Hidalgo y en el resto del país. De hecho es uno de los más grandes desafíos globales que hoy enfrenta la humanidad.

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM) 2021-2030, es la estrategia conjunta que los tres órdenes de gobierno, la academia, la iniciativa privada y la sociedad or-

ganizada planteamos para poder enfrentar este enorme reto.

En este importante documento se establecen estrategias y medidas que buscan una mejora ambiental. El éxito de las acciones propuestas en esta iniciativa dependerá de la responsabilidad que asumamos todos.

De esta manera Hidalgo reafirma su compromiso con la protección ambiental y se une al esfuerzo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Federal, la Comisión Ambiental de la Megalópolis, el Gobierno del Estado de México y al Gobierno de la Ciudad de México, en beneficio de todos nuestros ciudadanos.

Para mi gobierno cuidar nuestro medio ambiente ha sido y sigue siendo una prioridad. Todos los seres humanos tenemos que hacer nuestra parte para cuidar y salvar nuestro planeta que es nuestra casa, la de nuestros hijos, nietos y de toda la humanidad.

Resumen ejecutivo

Históricamente, una de las principales problemáticas ambientales en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) ha sido la contaminación atmosférica. Inclusive, a inicios de los noventa, la Ciudad de México y su zona conurbada fueron clasificadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la ciudad con la peor calidad del aire a nivel mundial (OMS, 1992).

En la región, que está integrada por las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo, habita el 17% de la población del país y se genera el 22% del producto interno bruto nacional. El crecimiento de la población, la estructura urbana dispersa, distante y desconectada, y los patrones no sostenibles de producción, consumo y movilidad son la principal causa de la emisión de contaminantes atmosféricos, los cuales afectan a la salud de la población.

Para atender esta problemática, desde la década de los 90, las autoridades locales y federales han implementado exitosamente distintas estrategias para limitar las emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire. Estas políticas, que se centraron principalmente en limitar las emisiones de fuentes móviles e industriales a través de cambios tecnológicos y regulatorios, impulsaron una mejora continua en la calidad del aire. Las concentraciones atmosféricas de todos los contaminantes mostraron reducciones significativas y, actualmente, solo el ozono (O_3) y las partículas suspendidas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$) superan los límites normados, en tanto que el dióxido de nitrógeno (NO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO) y el plomo se mantiene por debajo de los umbrales permisibles. No obstante, también se detecta una desaceleración en la tasa de mejora, sin tendencias a la baja perceptibles en las concentraciones de estos contaminantes en la última década. Aun así, los resultados son interesantes, puesto que se ha limitado

la contaminación a pesar del crecimiento poblacional y la expansión del área urbana.

La complejidad de la gestión de la calidad del aire se debe en parte a que el clima y la orografía de la ZMVM favorecen de forma natural la acumulación de los contaminantes en el aire. Por ejemplo, la contaminación por partículas es más intensa en los meses de invierno, cuando las bajas temperaturas y las inversiones térmicas evitan la dispersión de la contaminación. Por su parte, la temporada de O_3 comienza en febrero y termina en junio; en esta época del año, la intensa radiación solar acelera las reacciones entre los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), que derivan en la formación de O_3 . Además, los cambios en el sistema climático derivados del aumento en la concentración de gases y contaminantes de efecto invernadero pueden tener una penalización sobre los niveles de contaminación, incrementando la concentración de O_3 y $PM_{2.5}$ independientemente de los niveles en emisiones.

De acuerdo con el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018, en ese año se emitieron más de 34 mil y 16 mil toneladas de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente. Las primeras provienen principalmente del sector transporte (39.6%), el tránsito sobre vialidades (24.4%), la labranza y cosecha (7.6%), y la quema a cielo abierto de residuos (5.4%). Las $PM_{2.5}$ se generan en su mayoría por el transporte (43.0%), donde los vehículos pesados a diésel tienen la mayor contribución. Las fuentes de área (35.8%) también tienen una fuerte incidencia en el nivel de partículas $PM_{2.5}$ emitidas, particularmente por la quema a cielo abierto de residuos, el tránsito sobre vialidades y la labranza y la cosecha.

En 2018 se emitieron 413 mil toneladas de COV y 144 mil toneladas de NO_x . Los NO_x provienen en su mayoría del transporte (85.8%), mientras que los COV son emitidos por diversas actividades

como el uso comercial y doméstico de solventes (31.6%), las fugas en instalaciones de gas L.P. (20.0%) y el sector transporte (22.2%). La formación de O_3 a partir de estos dos precursores es compleja; investigaciones recientes sugieren que, en el área urbana de la ZMVM, la producción de O_3 es sensible a los COV. Por ello, las políticas de control de contaminantes locales deben enfocarse en las fuentes que generan este tipo de compuestos, ya que solo reducir los NO_x no causará cambios significativos o incluso podría detonar aumentos en la concentración de O_3 . Ejemplo de esto es lo observado durante la pandemia por COVID-19, cuando las restricciones en la movilidad redujeron el tráfico vehicular en hasta 60%; si bien la concentración promedio de NO_x disminuyó en 44%, los niveles de O_3 incrementaron en 11% respecto de años anteriores.

A estos fenómenos se suma el impacto negativo que tienen algunas fuentes de emisión externas a la ZMVM, como las del sector energético y el petroquímico en la región de Tula, Hidalgo, que en conjunto producen 45 veces más SO_2 que toda la ZMVM, contaminante que puede ser transportado hacia la metrópoli. Asimismo, las tolvaneras y los incendios forestales pueden generar emisiones elevadas que afectan a la calidad del aire local, aun cuando estos fenómenos ocurren en estados aledaños. Cuando estas emisiones inusuales se combinan con condiciones meteorológicas adversas, se pueden presentar eventos extraordinarios y transitorios con concentraciones elevadas de contaminación en la ZMVM, comúnmente denominados contingencias ambientales atmosféricas.

Reducir las emisiones de partículas y precursores de O_3 es prioritario, puesto que estos contaminantes generan impactos en la salud de la población. La mala calidad del aire incrementa la tasa de incidencia y la mortalidad asociada a cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias, cardiovasculares y metabólicas. Distintos estudios estiman

que, en la ZMVM, se podrían evitar más de 6 mil 500 muertes anuales en caso de cumplir con los límites normados para partículas $PM_{2.5}$ y O_3 (INSP & INECC, 2017; Trejo-González *et al.*, 2019). Alrededor del 90% de estos beneficios se asocian a la contaminación por $PM_{2.5}$, contaminante que ocasiona los impactos a la salud más severos. Se destaca que evitar estas defunciones se traduciría en beneficios económicos que ascienden a 130 mil millones de pesos a precios de 2018. Además, el resto de los contaminantes atmosféricos también generan impactos negativos en la salud de la población; por ejemplo, algunos COV son altamente tóxicos y/o carcinogénicos, aunque su concentración en el aire ambiente aún no se regula a nivel nacional.

Resulta igualmente relevante garantizar una adecuada comunicación de los riesgos asociados a la contaminación atmosférica. Es necesario informar a la población sobre el estado de la calidad del aire, para que las personas implementen acciones que reduzcan su exposición en función de sus condiciones de vulnerabilidad, que dependen de factores biológicos como la edad y el sexo, así como condiciones sociales o de conducta. Algunos grupos de interés por su nivel de vulnerabilidad a los efectos de la mala calidad del aire son las niñas y niños, personas adultas mayores, embarazadas y la población con condiciones médicas preexistentes o prevalencia de enfermedades crónicas. También se consideran como factores que inciden en la vulnerabilidad el estatus socioeconómico, el nivel de actividad física en exteriores, el modo predominante de transporte utilizado, el lugar de residencia, la profesión ejercida y los roles de género, variables que determinan el grado de exposición a los contaminantes. Además, los esfuerzos de comunicación de riesgos se deben intensificar durante episodios de contaminación severa, como sucede durante las contingencias ambientales atmosféricas, durante las cuales también se limitan las emisiones de fuentes específicas para evitar que la situación continúe empeorando.

El diagnóstico de la situación actual y una serie de procesos participativos con actores relevantes permitió diseñar el Programa de Gestión de Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021 – 2030 (ProAire ZMVM 2021-2030). El presente instrumento establece metas, medidas y acciones con el objetivo de reducir las emisiones a la atmósfera de contaminantes atmosféricos, así como gases y compuestos de efecto invernadero, para mejorar la calidad del aire que respiran los habitantes de la región y proteger su salud, además de coadyuvar en la mitigación del cambio climático. En total, se cuenta con una cartera de 19 medidas, 40 acciones y 126 actividades orientadas a prevenir, controlar y reducir las emisiones de fuentes prioritarias, al mismo tiempo que se atienden temas transversales que fortalecen la gestión de la calidad del aire, como los procesos de comunicación de riesgos y participación ciudadana, los arreglos institucionales, el seguimiento y coordinación metropolitana, el monitoreo atmosférico y la investigación científica. En específico, las medidas del ProAire se centran en:

- Incrementar el uso de tecnologías más limpias y reforzar la normatividad para reducir las emisiones en el sector transporte.
- Administrar la demanda del transporte individual, para reducir el número de viajes, las distancias recorridas y los tiempos de traslado.
- Ampliar el uso de modos de transporte masivos y de bajas emisiones, y promover un desarrollo urbano sostenible.
- Extender el uso de combustibles fósiles más limpios (menor volatilidad y contenido de azufre) tanto para el transporte como para la industria.

- Modificar la normatividad para reducir las emisiones industriales, así como aplicar esquemas de auditoría y vigilancia para controlar las emisiones en industrias prioritarias (siderúrgica, del aluminio, del vidrio y la generación electricidad).
- Reducir el uso de gas L.P. y las fugas asociadas en distintas etapas de la cadena de suministro y consumo.
- Limitar el contenido de COV en productos de uso cosmético, doméstico, industrial, comercial y de servicios.
- Atender la emisión de partículas fugitivas por el tránsito en vialidades, actividades de labranza y cosecha y por la erosión eólica, a través del barrido húmedo y el mantenimiento de vialidades, buenas prácticas agrícolas y programas de reforestación, respectivamente.
- Mejorar la gestión de los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales.
- Mejorar el manejo del fuego y la capacidad para combatir incendios forestales.
- Limitar la contaminación por SO₂ en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco.
- Procurar la promoción de la salud entre la sociedad y reducir la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos.
- Mejorar el monitoreo de la calidad del aire en la ZMVM.
- Generar conocimiento científico para mejorar la gestión de la calidad del aire y la salud de la población.

Se estima que la implementación de las medidas del ProAire permitirá reducir, en promedio, entre 20% y 25% de la contaminación atmosférica al año 2030. En cuanto a los contaminantes prioritarios, las reducciones en emisiones ascienden a más del 20% de las PM₁₀, 35% de PM_{2.5}, 35% de NO_x y 20% de COV respecto de un escenario tendencial al año 2030. Estos beneficios se alinean con el objetivo a largo plazo de alcanzar los estándares de la OMS de calidad del aire durante dos terceras partes del año para el 2040.

El costo aproximado de la implementación de las medidas es de \$280.71 mil millones de pesos mexicanos a precios de 2021. En cuanto a los beneficios en calidad del aire por la reducción de emisiones, se determinó que con la aplicación y cumplimiento de las medidas del ProAire los niveles de concentración de PM_{2.5} serían ~22% (~4 µg/m³) menores en el promedio anual de 24 horas en toda la ZMVM. Así mismo, se reducirían los niveles de concentración promedio diaria de O₃ en ~2% (~3 ppb) y, si se considera el valor máximo horario de ozono, se presentaría una reducción de hasta el ~7% (~13 ppb). Los beneficios en salud debido a la menor exposición que tendría la población a la contaminación atmosférica de implementarse el ProAire, especialmente por la mejora en los niveles de NO₂ y PM_{2.5}, se calcula se podrían evitar al menos seis mil muertes en el año 2030, con un ahorro económico estimado de 119 mil 256 millones de pesos.

Estas medidas han sido conceptualizadas como esfuerzos a corto, mediano y largo plazo, de forma que no todas tendrán impactos en la calidad del aire de forma inmediata. Además, el escenario de reducción de emisiones y los beneficios estimados están condicionados al cumplimiento de las

medidas en tiempo y forma. Para garantizar la correcta implementación del ProAire, se integraron fichas descriptivas según los lineamientos de la Metodología del Marco Lógico de la Comisión Económica de América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas.

Además, para guiar la futura ejecución de las 19 medidas, se definieron lineamientos para el desarrollo de una Estrategia Integral de Comunicación, una Estrategia Integral de Financiamiento y una Estrategia de Seguimiento y Evaluación. Estas estrategias buscan garantizar el cumplimiento de los objetivos del Programa, a través de la participación ciudadana, la evaluación de resultados y mejora continua, mecanismos de seguimiento institucional, sistemas de reporte y la adecuada consecución y gestión de recursos financieros.

Por último, se subraya la necesidad de fortalecer esquemas de gobernanza que garanticen la colaboración entre el Gobierno Federal, los ejecutivos de la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo, los Municipios y las Alcaldías, dado que todos los niveles de gobierno tienen atribuciones distintas y jurisdicción sobre fuentes específicas de contaminación. La implementación del ProAire no debe recaer únicamente en las autoridades ambientales; en el ámbito público se requiere la colaboración de otros sectores como comunicaciones y transportes, tránsito, movilidad y desarrollo urbano, obras públicas, energía y agua, salud, educación, agricultura, desarrollo económico y fomento industrial, por poner algunos ejemplos. Asimismo, también se requiere la participación del sector privado, la academia y las organizaciones no gubernamentales, así como de la sociedad en general.

Executive summary

Historically, one of the main environmental problems in the Metropolitan Area of Mexico City (MCMA) has been air pollution. In the early nineties, Mexico City and its metropolitan area were classified by the World Health Organization (WHO) as the city with the worst air quality in the world (WHO, 1992).

The region, which is made up of the 16 mayoralties of Mexico City, 59 municipalities of the State of Mexico and the municipality of Tizayuca, Hidalgo, is home to 17% of the country's population and 22% of the national economy (measured as GDP). The growth of the population, the dispersed, distant and disconnected urban structure, and the unsustainable patterns of production, consumption and mobility are the main cause of the emission of atmospheric pollutants, which gravely affect the public health of the city's population.

To address this problem, since the 1990s, local and federal authorities have successfully implemented different strategies to improve the local air quality. These policies focused primarily on limiting emissions from the transportation and industrial sources through technological and regulatory changes. The atmospheric concentrations of all pollutants showed significant reductions in the last two decades and currently only ozone (O₃) and suspended particles smaller than 10 and 2.5 micrometers (PM₁₀ and PM_{2.5}) exceed the national air quality standards, while nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), carbon monoxide (CO) and lead remain below allowable thresholds. However, in the last years a slowdown in the rate of improvement has occurred, with no perceptible downward trends in the concentrations of these pollutants. Even so, the results are still positive, since air pollution has been limited despite population and economic growth, and the expansion of the urban area.

The complexity of managing air quality is partly due to the climate and orography of the MCMA, which favors the accumulation of pollutants in the air. For example, particulate pollution is most intense in the winter months, when low temperatures and thermal inversions prevent the spread of pollution; while the ozone season begins in February and ends in June, due to the intense solar radiation that fosters the formation of O₃. In addition, changes in the climate system derived from the increase in the concentration of greenhouse gases may have a penalty on pollution levels, increasing the concentration of O₃ and PM_{2.5}.

According to the 2018 MCMA Emissions Inventory, more than 34 thousand tons of PM₁₀ and 16 thousand tons of PM_{2.5} particles were emitted. The former come mainly from the transportation sector (39.6%), road traffic (24.4%), agriculture (7.6%), and open-air burning of solid waste (5.4%). While PM_{2.5} is generated mostly by transportation (43.0%), where heavy diesel vehicles have the highest contribution. Area sources (35.8%) also have a strong impact on the emission of PM_{2.5}, particularly from open-air burning of solid waste, road traffic, and agricultural activities.

In 2018, an estimated total of 413 thousand tons of volatile organic compounds (VOC) and 144 thousand tons of nitrogen oxides (NO_x) were emitted. NO_x comes mostly from transportation (85.8%), while VOCs are emitted by various activities such as commercial and domestic use of solvents (31.6%), LPG leaks (20.0%) and the transportation sector (22.2%). The formation of O₃ from these two precursors is complex; research suggests that, in the urban area of the MCMA, O₃ production is limited by VOCs. Therefore, local pollutant control policies should focus on the sources that generate VOCs, since reducing NO_x will not cause air quality improvements in O₃ concentration. A clear

example of this situation was observed during the COVID-19 pandemic, when mobility restrictions reduced vehicular traffic by up to 60% in the area, causing the average concentration of NO_x to decrease by 44%; however, a 11% increase of O₃ compared to previous years was detected in the same period of time.

Aside from the local sources, the MCMA receives the negative impact from external emission sources, such as those from the power plant and the refinery in the Tula, Hidalgo region, which together produce 45 times more SO₂ than the entire local sources. Likewise, regional dust storms and forest fires generate high emissions that affect local air quality, even when these phenomena occur in neighboring states. When these unusual emissions are combined with adverse weather conditions, extraordinary high concentrations of air pollution can occur in the MCMA, commonly referred to as atmospheric environmental contingencies.

Reducing emissions of particles and precursors of ozone is a priority, since these pollutants directly impact the public health. Poor air quality increases the morbidity and mortality associated with lung cancer and respiratory, cardiovascular and metabolic diseases. Research shows that in the MCMA, more than 6,500 deaths per year could be avoided if the national standards for PM_{2.5} and O₃ are met (INSP & INECC, 2017; Trejo-González *et al.*, 2019). Around 90% of these benefits are associated with PM_{2.5}, a pollutant that causes the most severe health impacts. The economic estimation of avoiding these deaths is equivalent to 130 billion Mexican pesos at 2018 prices.

Communicating the risks associated with air pollution is paramount. It is necessary to inform the population about the air quality conditions, so that people can act accordingly and reduce their

exposure based on their conditions of vulnerability, which depend on biological factors, as well as social conditions. The main sectors of public health concern are girls and boys, the elderly, pregnant women and the population with pre-existing medical conditions or prevalence of chronic diseases, since they are the most vulnerable to the effects of poor air quality. Aside from this biological factors, socioeconomic status, the quantity of outdoor activity, the mode of transport used, the place of residence, the profession practiced and gender roles, are all variables that determine the degree of exposure and the vulnerability to pollutants. Therefore, risk communication efforts should be tailored to these agencies and should be intensified during severe pollution episodes.

The design of the MCMA Air Quality Program for 2021-2030 is based on a deep diagnosis of the emission sources and atmospheric conditions, and from a series of participatory processes with relevant stakeholders and scientists. This instrument establishes goals, measures and actions with a public health vision and the objective of reducing air pollutants, as well as greenhouse gases. In total, the program includes 19 public policy measures, 40 actions and 126 activities aimed at preventing, controlling and reducing emissions from priority sources, while addressing cross-cutting issues that strengthen air quality management, such as risk communication processes, citizen participation, institutional arrangements, monitoring, metropolitan coordination, and scientific research. The Air Quality Program strategies focus on:

- Increasing the use of cleaner technologies and strengthen regulations in the transportation sector.
- Establishing travel demand management to reduce number of trips, distances and times.

- Expanding massive and low-emission transportation options.
- Promoting sustainable urban development.
- Extending the use of cleaner fossil fuels (lower volatility and sulfur content) for the transportation and industrial sectors.
- Modifying regulations to reduce industrial emissions and apply surveillance schemes to control emissions from the steel, aluminum, glass, oil and power generation industries.
- Reducing the use of LPG and associated leaks at different stages of the supply chain.
- Limiting the VOC content in cosmetic and domestic products as well as those aimed at industrial and commercial use.
- Addressing the emission of fugitive particles from road traffic, agricultural activities and wind erosion, through wet sweeping and road maintenance, good agricultural practices and reforestation programs, respectively.
- Improving the management of urban solid waste and sewage.
- Enhancing the ability to fight forest fires.
- Limiting SO₂ pollution in the Tula-Vito-Aspasco industrial corridor.
- Promoting healthy habits and air quality awareness among the urban population to reduce their exposure and vulnerability to atmospheric pollutants.
- Improving air quality monitoring in the MCMA.

- Generating scientific knowledge to help improve air quality and public health policies.

It is estimated that the implementation of the air quality strategies will reduce, on average, between 20% and 25% of air pollution by 2030. Regarding the priority pollutants, the reductions in emissions are more than 20% of PM₁₀, 35% of PM_{2.5}, 35% of NO_x and 20% of VOC compared to a trend scenario to the year 2030. These benefits are aligned with the long term objective of achieving the WHO air quality standards for more than 240 days per year by 2040.

The approximate cost of implementing the Air Quality program of the MCMA is estimated at \$280.71 billion Mexican pesos at 2021 prices. Regarding the benefits on air quality associated with the reduction of air pollutants, it is estimated that the successful application of the program, the concentration of PM_{2.5} could be ~22% (~4 µg/m³) lower in the 24-hour annual average at the MCMA. Although, the daily average concentration levels of O₃ would be reduced by ~2% (~3 ppb) and, considering the maximum hourly value of ozone, there would be a reduction of ~7% (~13 ppb) in this pollutant. The health benefits due to the lower exposure that the population would have to air pollution if ProAire were implemented especially due to the improvement in NO₂ and PM_{2.5} levels, it is calculated that at least six thousand deaths could be avoided in 2030, with an estimated economic saving of 119 thousand 256 million pesos.

The emission reduction scenario and the estimated benefits are conditional on compliance with the policies in a timely manner. To guarantee the correct implementation of the program, the environmental actions were developed according to the guidelines of the Logical Framework Methodology of the United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC).

To guide the implementation of the 19 public policy measures, a Comprehensive Communication Strategy, a Comprehensive Financing Strategy, and a Monitoring and Evaluation Strategy were developed. These strategies seek to guarantee compliance with the objectives of the Program, through citizen participation, evaluation of results, continuous improvement, institutional monitoring mechanisms, reporting systems and the adequate achievement and management of financial resources.

The program recognizes the coordination challenges that will be faced during the implementation of the program, these challenges will need and institutional reform that strengthens the existing governance and cooperation schemes to guarantee collaboration between the Federal Government, and the local governments of Mexico City, the State of Mexico

and Hidalgo, and the Municipalities and townships. This is especially important, because each government institution has different attributions and jurisdictions over specific pollution sources that need to be tackled. Furthermore, the implementation of the program should not fall solely on the environmental authorities, other public entities need to contribute to the implementation of the program, such as transportation, urban development, public works, energy, water, public health, education, agriculture, economic development and industrial development. Likewise, the participation of the private sector, the academia and non-governmental organizations, as well as society in general, is also required to reach the objectives set forth in the MCMA Air Quality Program.



Antecedentes

Los esfuerzos entre los distintos niveles de gobierno por mejorar la calidad del aire, la salud pública y el medio ambiente en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) han sido plasmados a través de la puesta en marcha de diferentes instrumentos de política pública, entre ellos, los Programas de Gestión de Calidad del Aire de la ZMVM, también conocidos como ProAire.

Diversos programas de mejoramiento ambiental precedieron al ProAire ZMVM 2002-2010, el cual fue el primer programa con vigencia de nueve años, que incluyó acciones de diferentes dependencias gubernamentales, el sector privado, educativo y de la sociedad en general, para atender la necesidad de reducir los contaminantes del aire y proteger la salud pública. El Programa tuvo una visión científica e integró investigaciones nacionales e internacionales.

Este programa destacó los impactos en la salud que causan la contaminación del aire en la ZMVM. En el proyecto, también se realizó una evaluación de los posibles escenarios entre los años 1998 y 2010, sobre el crecimiento del Valle de México y en consecuencia el aumento en los niveles de contaminación atmosférica sin la implementación de medidas para la gestión de la calidad del aire. Este programa también incluyó un análisis sobre los costos económicos y sociales asociados a la contaminación de aire.

El primer ProAire de la ZMVM realizó un análisis del comportamiento de los contaminantes entre la década de 1990 al 2000 y presentó un inventario de emisiones con proyecciones al año 2010 con y sin la implementación del Programa, además aplicó un modelo fotoquímico para simular la formación y el comportamiento del ozono.

En este sentido, los objetivos del ProAire 2002-2010 fueron reducir las concentraciones de ozono y PM_{10} en consonancia con los límites establecidos en la normatividad mexicana, así como el número de días en que las concentraciones sobrepasan dichos límites. Además, respecto a los $PM_{2.5}$, se contemplaba que para el año 2003 se pudiera contar con la tecnología suficiente para establecer una medición periódica de su concentración atmosférica, de forma que sirviera para encauzar políticas públicas en el futuro.

El ProAire 2011-2020 retomó las experiencias del Programa anterior y presentó un cambio en la concepción y tratamiento de los procesos que deterioran la calidad del aire. Este instrumento incluía los conocimientos científicos más actualizados para plantear un manejo ecosistémico de la ZMVM a través del fortalecimiento en la gestión de la calidad del aire, de forma sostenible con cobeneficios urbanos, económicos y sociales. El diseño de este instrumento recabó datos más precisos sobre las complejas características del Valle de México y su relación con la emisión de contaminantes en la atmósfera. La protección de la salud de la población fue el eje estratégico y se incorporó evidencia sobre los efectos negativos de la contaminación atmosférica en la salud pública.

El segundo ProAire de la ZMVM recogió, desde el punto de vista de la salud de la población, la medición y el registro espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos criterio e identificó las fuentes más emisoras en el Valle de México. Además, realizó una evaluación del estado de la calidad del aire y las tendencias de los contaminantes con relación al grado de cumplimiento de los límites que se establecen en las Normas Ofi-

ciales Mexicanas (NOM) de salud ambiental, incluyendo un análisis sobre la distribución espacial de los contaminantes y el riesgo de exposición que enfrenta la población. Asimismo, tomó en consideración experiencias internacionales exitosas para la gestión de la calidad del aire con el objeto de retomar algunas de ellas y ajustarlas a la ZMVM.

Además, el Programa 2011-2020 analizó de manera ecosistémica la relación entre la estructura urbana y la generación de contaminantes, incluyendo los índices de entropía urbana y de mezcla de usos del suelo, los cuales permitieron comprender el papel del desarrollo urbano en la emisión de contaminantes e introdujo un modelo de simulación de emisiones por los viajes de los vehículos, con una proyección de generación de contaminantes al año 2020.

Este ProAire planteó ocho estrategias centrales; 1) Ampliar y reforzar la protección a la salud, 2) Disminuir el consumo energético de la ZMVM, 3) Mejorar la calidad y eficiencia energética de todas las fuentes, 4) Regular el consumo energético del parque vehicular, 5) Controlar las emisiones mediante cambios tecnológicos, 6) Fomentar la educación ambiental, la cultura de sustentabilidad y la participación ciudadana, 7) Mejorar el manejo de las áreas verdes, reforestación y naturación urbana, y 8) Fortalecer instituciones e investigación científica en la materia. Finalmente, el Programa incluyó 81 medidas y 116 acciones con objetivos específicos en materia de calidad del aire.

Así mismo, la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA), en colaboración con el Barcelona Supercomputing Center (BSC), en el año 2017 llevó a cabo una evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020, sobre el impacto de la reducción de las emisiones que propician la formación de ozono en la ZMVM.

El análisis tomó en consideración 13 acciones del Programa, las cuales contaban con un potencial elevado para la reducción de los precursores del ozono y se destacó la necesidad de disminuir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles provenientes de fuentes de área para controlar los niveles de ozono.

Por su parte, el Estado de México cuenta con un ProAire con vigencia 2018-2030. Este Programa abarca a toda la entidad y se centra en la mitigación de emisiones de contaminantes criterio, como las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como el ozono, ya que son los que tienen un mayor impacto en la salud pública y más presencia en el Estado.

El programa considera una evaluación sobre la calidad del aire en el Estado en la década anterior, a partir de las tendencias en las concentraciones atmosféricas de los contaminantes y los límites que se establecen en las NOM de salud ambiental. Así mismo, identifica qué tipo de contaminantes se producen en el Estado y en qué magnitud. El Programa del Estado de México se estructura alrededor de ocho estrategias; 1) Reducción de emisiones en fuentes

móviles, 2) Reducción de emisiones en fuentes fijas, 3) Reducción de emisiones en fuentes naturales, 4) Reducción de Programa emisiones de en el sector doméstico, comercial y de servicios, 5) Desarrollo urbano, 6) Protección a la salud, 7) Fortalecimiento institucional y financiamiento y 8) Comunicación y educación ambiental.

El ProAire del Estado de México evalúa a detalle la relación entre el deterioro de calidad del aire y la salud, realizando un análisis sobre las estadísticas de mortalidad y morbilidad de la entidad. Los resultados que presenta este programa señalan que, al cumplir con las NOM se evitarían alrededor de 2 mil 200 muertes por la exposición a $PM_{2.5}$, poco más de mil 200 por PM_{10} y 35 por ozono. Asimismo, estima con base en estándares internacionales, que el costo relacionado con la contaminación del aire ronda los 35 mil millones de pesos.

Por su parte, el Estado de Hidalgo presentó el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire para el periodo 2016-2024. Este Programa es el instrumento central de la entidad para mitigar y prevenir la contaminación del aire en el Estado, además de prevenir las posibles contingencias que deterioren la calidad del aire y tiene por objeto integrar estrategias que coadyuven a la gestión de la calidad del aire, reducir las emisiones por medio de acuerdos, compromisos y programas con los principales emisores en la entidad, actualizar el marco normativo estatal que regule y controle a los generadores de contaminantes y reducir los efectos en la salud pública por el deterioro de la calidad del aire.

En el año 2019, la SEDEMA, la SMAGEM, la SEMARNAT y la Coordinación Ejecutiva de la CAME, presentaron las Medidas Necesarias para Mejorar la Calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (14 medidas), en respuesta a los episodios de mala calidad de aire que se presentaron en el mes de mayo del mismo año, y se orientan a la disminución de los principales contaminantes precursores del ozono (compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno) y partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$).

Las 14 medidas son las siguientes; 1) Reducción de emisiones en la distribución y uso de gas L.P., 2) Regulación de compuestos orgánicos volátiles en recubrimientos y productos de uso doméstico, 3) Inspección y vigilancia estratégica para el control de emisiones en gasolineras, 4) Distribución de gasolineras menos volátiles en la Megalópolis, 5) Mejores prácticas para el manejo del fuego y prevención de incendios, 6) Control de emisiones y uso de combustibles limpios en el sector industrial, 7) Reducción de emisiones por mantenimiento urbano, 8.1) Ordenamiento de la circulación del transporte de carga, 8.2) Detección de vehículos ostensiblemente contaminantes, 9) Normas de emisiones vehiculares, 10) Regulación de emisiones de motocicletas nuevas, 11) Implementación de un nuevo esquema para el otorgamiento de los hologramas de verificación vehicular, 12) Fomento de la movilidad sustentable, 13) Aumento de la capacidad del transporte público sustentable, y 14) Reto para el desarrollo tecnológico para mejorar la calidad del aire.

Introducción

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) confluyen tres entidades federativas y un total de 76 demarcaciones locales: 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca en el Estado de Hidalgo. La ZMVM es la metrópoli más poblada en el país, con alrededor de 22 millones de personas. Además, tiene un papel relevante como centro económico, político, financiero y cultural, y produce aproximadamente un cuarto del Producto Interno Bruto nacional. Su extensión territorial abarca una superficie total de más de 7 mil 800 km², la cual se caracteriza por contar con sistemas montañosos que rodean a un valle central y que actúan como barreras físicas naturales a la circulación del aire, limitando la dispersión de contaminantes e incrementando el reto de su gestión ambiental. Por otro lado, el clima de la ZMVM provoca una variación estacional en la contaminación y también propicia su acumulación bajo ciertas condiciones meteorológicas, lo cual suma desafíos adicionales.

Con el fin de que la ZMVM continúe con la mejora de su calidad del aire, se requiere una visión que defina una trayectoria de reducción consistente en las emisiones contaminantes. Para lograrlo, además de incorporar la investigación científica y el entendimiento del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, es necesario abordar la gestión de la calidad del aire con una visión sistémica que incluya las vertientes presupuestales, operativas y de aplicación de políticas públicas. La gestión de la calidad del aire se refiere a todas las actividades que una autoridad reguladora realiza para ayudar a proteger la salud humana de los efectos nocivos de la contaminación del aire.

En la ZMVM se ha avanzado significativamente en la mejora de calidad del aire, combinando políticas regulatorias con cambios tecnológicos y de protección a la salud. Como resultado, las concentraciones de contaminantes criterio han ido dismi-

nuyendo de manera paulatina; sin embargo, las concentraciones de ozono y partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) continúan excediendo los límites permisibles definidos en la normatividad. Diversos estudios técnicos han demostrado que es necesario priorizar acciones que tiendan a reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), con la finalidad de disminuir las concentraciones de ozono. Asimismo, se requiere enfocar esfuerzos para el control de emisiones de partículas finas, que son uno de los contaminantes de mayor impacto a la salud de la población. Por esta razón, se tiene el compromiso de desarrollar políticas que consideren los avances tecnológicos y los nuevos hallazgos científicos para mejorar la calidad del aire, atendiendo a las realidades institucionales y necesidades actuales de la población, su calidad de vida, el desarrollo económico y social.

El nuevo Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021 – 2030 (ProAire ZMVM 2021-2030) es un documento de planeación participativa que orientará, durante los próximos 10 años, las políticas públicas en materia de calidad del aire. Este es un instrumento clave para fomentar la aplicación coordinada de las medidas y acciones que previenen o revierten las tendencias de deterioro de la calidad del aire en la región, y con ello contribuir a mejorar la salud de la población y a la conformación de una sociedad más informada y colaboradora en la conservación del medio ambiente.

El ProAire ZMVM 2021 – 2030 es un instrumento de gestión ambiental que servirá como guía para las dependencias y ciudadanos en un proceso de mejora continua de la calidad del aire. Este es el resultado de retomar las experiencias de los programas anteriores, de un proceso de elaboración participativa con autoridades gubernamentales, académicos, especialistas y sociedad civil, y de abordar los nuevos y pasados retos de calidad de aire.

Este instrumento incluye una estrategia integral que toma en cuenta la incorporación de cobeneficios en materia de cambio climático, a través de acciones transversales en temas prioritarios como la movilidad urbana, industria y servicios, consumo energético, salud de la población y comunicación. Se desarrolla a lo largo de 12 Capítulos que guían la implementación del ProAire:

- 1) Descripción de la zona de estudio, 2) Fundamento jurídico y marco normativo, 3) Diagnóstico de la calidad del aire en la ZMVM, 4) Impacto del cambio climático en la calidad del aire de la ZMVM, 5) Inventario de emisiones de la ZMVM, 6) Salud pública y calidad del aire, 7) Estrategias, medidas y acciones de gestión de la calidad de aire y reducción de emisiones, 8) Comunicación y participación ciudadana, 9) Financiamiento para mejorar la calidad del aire, 10) Seguimiento, monitoreo y evaluación, 11) Implementación, y 12) Conclusiones.

La calidad del aire es un bien público cada vez más valorado por la población, pues es una condición necesaria para la preservación de la salud y de la calidad de vida. Por ello, las autoridades ambientales estatales y del Gobierno Federal tienen el compromiso de implementar medidas tendientes a mejorar la calidad del aire en la ZMVM por lo que, a través de la coordinación entre la Secretarías de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y las autoridades ambientales de la Ciudad de México (SEDEMA), del Estado de México (SMAGEM) y del Estado de Hidalgo (SEMARNATH), en colaboración con la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME), se implementarán las estrategias, medidas y acciones prioritarias para disminuir la concentración de contaminantes atmosféricos, de forma que se mejore el estado de la calidad del aire y se generen beneficios en salud, sociales, económicos y ambientales.

Justificación

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM) 2021-2030 tiene por objeto establecer el plan estratégico y operativo para el diseño de políticas públicas, medidas y acciones enfocadas a mejorar la calidad del aire, en beneficio de la salud de la población de la región. Las acciones planteadas se sustentan en el marco jurídico nacional y los marcos estatales, así como en evidencia técnica y científica para la gestión de la calidad del aire, y un análisis de los resultados del ProAire ZMVM 2011-2020, que permitirá dar seguimiento a los esfuerzos previos para el control y la prevención del deterioro de la calidad del aire a corto, mediano y largo plazo en la ZMVM en el periodo 2021-2030.

Entre los diferentes instrumentos normativos con los que México cuenta, se sostiene la importancia de garantizar un medio ambiente sano para el desarrollo y bienestar de las y los ciudadanos que residen y transitan en la ZMVM. Además, las leyes mexicanas reconocen al aire y la atmósfera como recursos naturales, por lo cual deben de ser protegidos por ser elementos esenciales para el desarrollo humano y por formar parte del ejercicio pleno al respeto de los derechos humanos, a la vida, a la salud, a un nivel de vida adecuado y a respirar aire puro.

La gestión de la calidad del aire en la ZMVM se materializa a través del presente Programa, al contar con metas específicas para reducir emisiones contaminantes, en línea con la Estrategia Nacional de Calidad del Aire y programas locales de las entidades de la ZMVM, para alcanzar estándares nacionales e internacionales. Las acciones descritas plantean indicadores para su evaluación y seguimiento, que al implementarse permitirán salvaguardar la salud de la población, con un respaldo técnico que analiza las tendencias de la calidad del aire en la metrópoli y el comporta-

miento de las fuentes de emisión que influyen en la mala calidad del aire, así como su relación con las características físicas propias de la región que propician niveles elevados de contaminación. Con esto en mente, se pone especial énfasis en atender las problemáticas ambientales que de manera más frecuente afectan a la ZMVM, la contaminación por ozono y por partículas suspendidas.

Por su cobertura geográfica, en la ZMVM confluye el actuar de múltiples Dependencias y Entidades de la Administración Pública del Gobierno Federal, de tres entidades federativas (la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo) y 76 gobiernos locales. Al mismo tiempo, una estructura urbana con patrones de expansión y movilidad complejos incide en el comportamiento de las fuentes de emisiones contaminantes. Es así que se justifica la incorporación de mecanismos de coordinación transversal al interior de los ejecutivos estatales y municipales, y entre estos e instituciones federales, para involucrar no solo a autoridades ambientales, sino también a otros departamentos gubernamentales, a la academia, a la sociedad civil, al sector privado y a los medios de comunicación para garantizar la correcta implementación de las acciones planteadas.

El presente ProAire reconoce la importancia de tomar acción ante el impacto o efectos perjudiciales de los contaminantes atmosféricos y toma como base los parámetros y límites permisibles establecidos por la normatividad ambiental mexicana para la concentración de contaminantes atmosféricos en el aire ambiente. Se presta especial atención a las Guías de Calidad el Aire de la Organización Mundial de la Salud, las cuales permiten orientar las metas establecidas en el ProAire en función de recomendaciones internacionales para reducir los efectos perjudiciales de la contaminación del aire en la salud. El uso y seguimiento de estos indicadores permitirá vigilar

y disminuir los efectos de los contaminantes en la salud pública de las personas que habitan y se desplazan en la ZMVM.

México también se ha suscrito en acuerdos y tratados de carácter bilateral y multilateral, donde las obligaciones relacionadas con la calidad del aire

influyen en las políticas públicas que buscan controlar las emisiones de contaminantes criterio que se regulan en este Programa. Además, la implementación de las medidas y recomendaciones que el presente ProAire establece, contribuirá en los esfuerzos nacionales e internacionales de mitigación del cambio climático y desarrollo sostenible.

01

Descripción
de la zona
de estudio



La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se encuentra en la región central de la República Mexicana y está integrada por un total de 76 demarcaciones.

01

7866.1
kilómetros
cuadrados



1.1. Delimitación geográfica

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se encuentra en la región central de la República Mexicana y está integrada por un total de 76 demarcaciones: 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo, abarcando una superficie total de 7866.1 kilómetros cuadrados (km²) (CONAPO, SEDATU, & INEGI, 2018). El

listado completo de las demarcaciones que conforman la ZMVM se encuentra en el Anexo 1.1. La ZMVM se localiza entre los 18°56' y 20°04' de Latitud Norte y los 98°36' y 99°39' de Longitud Oeste, colinda al norte con el estado de Hidalgo, al sur con el estado de Morelos, al este con los estados de Tlaxcala y Puebla y al oeste con el Estado de México (ver Figura 1.1).

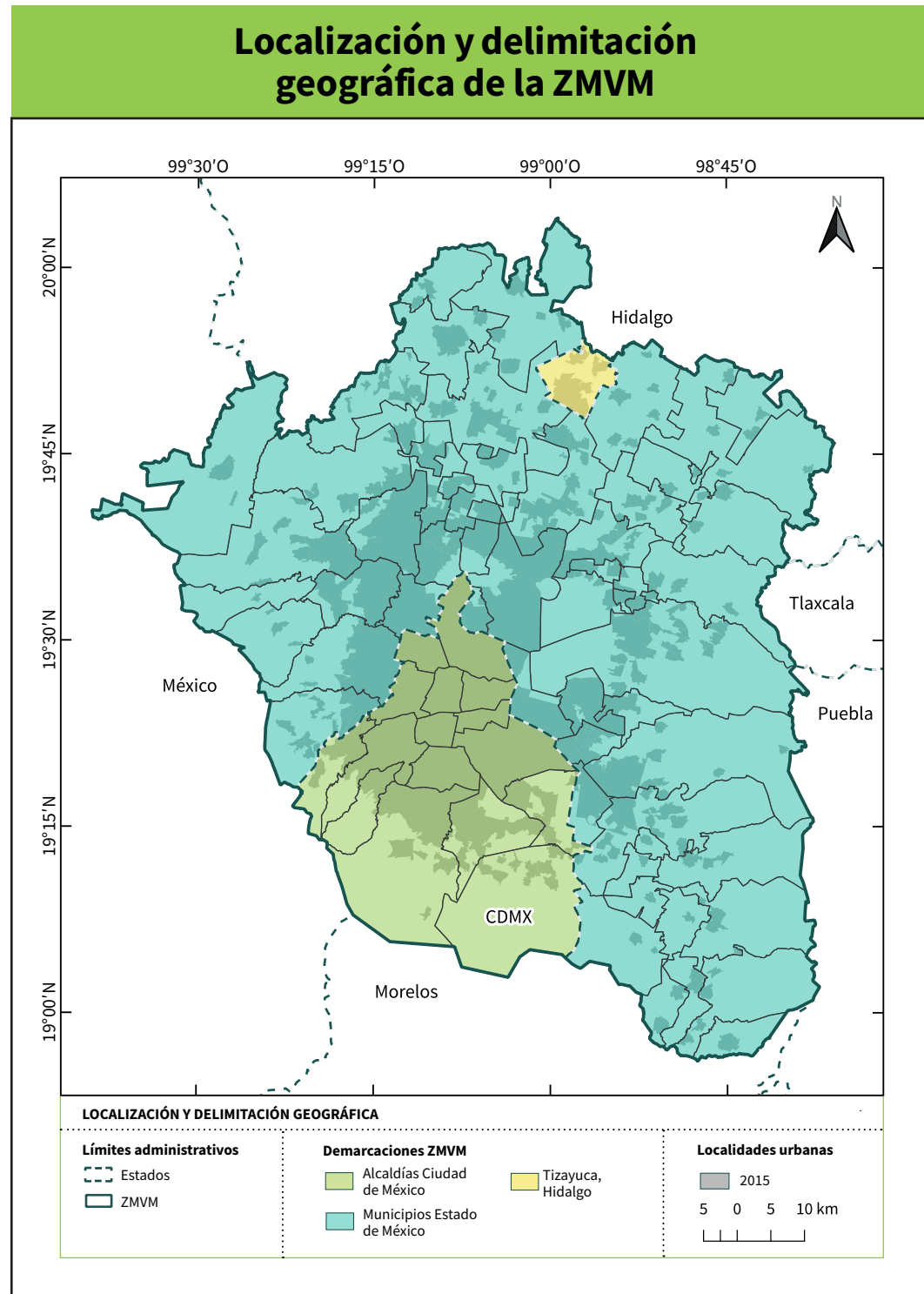


Figura 1.1 Localización y delimitación geográfica de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con datos del Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2019a).

1.2 Aspectos físicos

1.2.1 Relieve

La ZMVM se localiza en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, la cual se distribuye en la porción central del país (INEGI, 2019b, 2019c). En la región predominan las planicies y mon-

tañas, seguidas de áreas con lomeríos. En la Figura 1.2 se observa que la mayoría del territorio corresponde a llanuras y valles por encima de los 2000 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.).

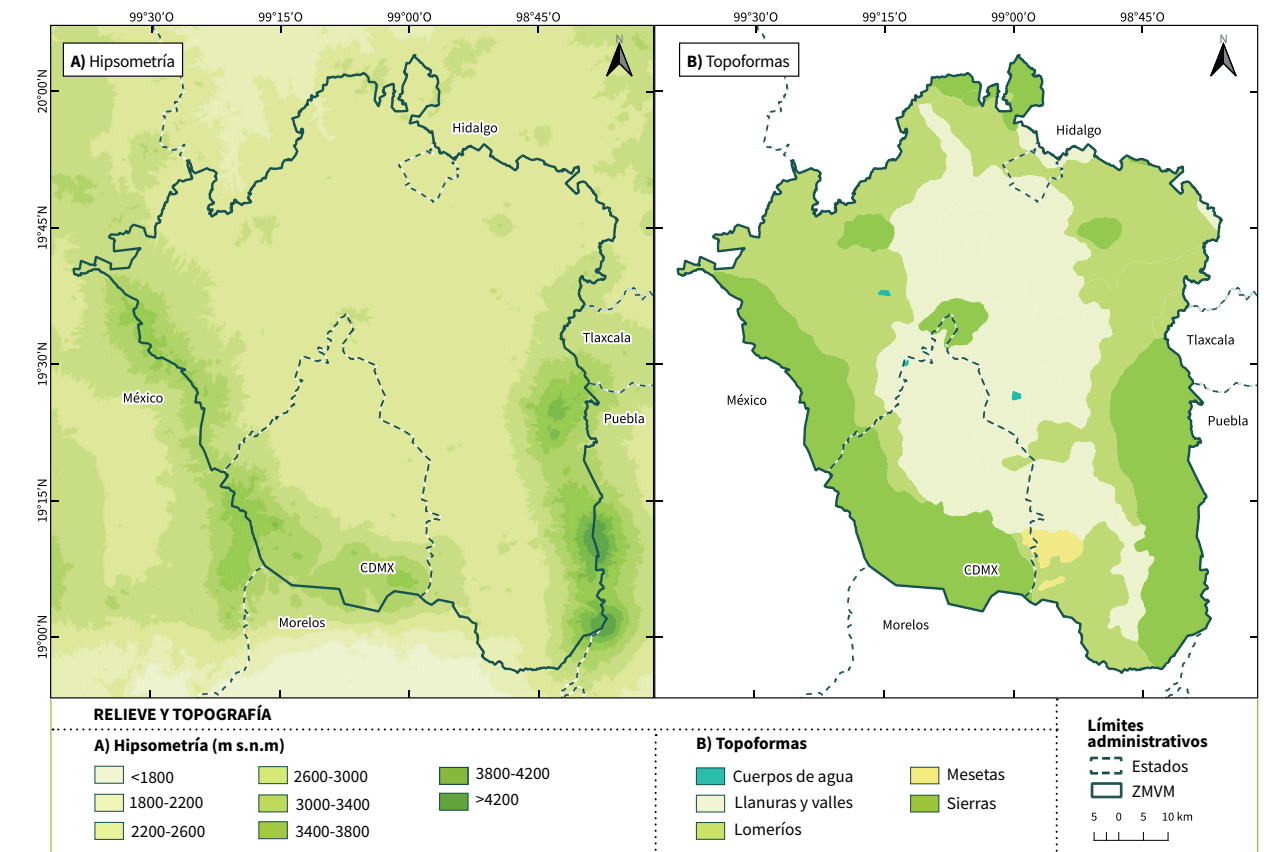


Figura 1.2 Relieve de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con datos del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0; el conjunto de datos vectoriales de información topográfica digital, por condensado estatal (edición 2015), escala 1:250 000, y el conjunto de datos vectoriales fisiográficos, serie I, sistema topoformas (INEGI, 2012b, 2020a).

El relieve de la ZMVM está definido por varios sistemas montañosos que rodean a un valle central. Al sur se localiza la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, la cual está conformada por rocas ígneas producto de episodios volcánicos. Esta sierra constituye el límite meridional de la ZMVM y la separa del valle de Cuernavaca (INEGI, 2001); su pico más elevado es el cerro La Cruz del Marqués o Ajusco, con 3930 m s.n.m., seguido del volcán Tláloc (3690 m s.n.m.) y el cerro Pelado (3620 m s.n.m.) (INEGI, 2019b). Al norte de la ZMVM, entre los límites de la Ciudad de México con el Estado de México, se encuentra la Sierra de Guadalupe, la cual tiene una altura que oscila entre los 2500 y 3050 m s.n.m., teniendo como picos principales al cerro Picacho-Moctezuma y el cerro del Chiquihuite (SEDEMA, 2016).

Al oeste de la Ciudad de México se ubica la Sierra de las Cruces, que separa a la ZMVM del valle de Toluca y cuenta con elevaciones de 3100 a 3600 m s.n.m., como los cerros La Columna, Los Potrilleros y La Campana (INEGI, 2001). La Sierra Nevada, en el oriente del Estado de México, forma un límite natural entre la metrópoli y Puebla; se des-

tacan sus dos elevaciones más características, los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, con picos por encima de los 5000 m s.n.m. (INEGI, 2001). Finalmente, la planicie del valle se ve interrumpida por la Sierra de Santa Catarina al oriente de la Ciudad de México, sistema al cual pertenecen el Cerro de la Estrella y el Volcán Guadalupe, también conocido como El Borrego (INEGI & Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

Las características orográficas son una barrera física natural para la circulación del viento, lo que limita la dispersión de contaminantes emitidos dentro de la ZMVM (SEMARNAT, Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, & Secretaría de Salud, 2001). Las cadenas montañosas forman entradas naturales de aire al norte y al sureste de la región. Se observan dos corredores en el norte: el primero está formado por las sierras de Guadalupe y de las Cruces, y el segundo por las sierras de Guadalupe y Nevada. Las sierras Ajusco-Chichinautzin y Nevada forman otro corredor al sureste de la ZMVM en la región de Chalco, el cual comunica a la ZMVM con el valle de Cuautla, Morelos (SEDEMA, 2015b).

Actividad volcánica

A partir de 1994, el volcán Popocatepetl reinició su actividad, presentando exhalaciones y explosiones acompañadas de emisiones de vapor de agua, gases y cenizas (CENAPRED, 2014). La actividad volcánica representa una fuente natural de contaminación atmosférica, particularmente de dióxido de azufre (SO₂) y partículas suspendidas, contaminantes que ponen en riesgo la salud pública al provocar problemas respiratorios por la inhalación de ceniza fina, así como efectos perjudiciales en los ecosistemas que se localizan en las inmediaciones del volcán (INECC, 2013).

Las emisiones del volcán afectan con mayor frecuencia al municipio de Amecameca en el Estado de México (SEMARNAT, CAME, & INECC, 2017). El viento en la región sopla hacia el oriente; sin embargo, durante el verano, vientos en dirección de este a oeste pueden acarrear cenizas hacia regiones urbanas en la ZMVM (Martin-Del Pozzo,

2012; UNAM & INECC, 2016). Algunos municipios de la región que se han visto más afectados por las emisiones de ceniza son Atlautla, Ayapango, Ecatingo, Juchitepec, Ozumba, Tenango y Tepetlixpa (SMAGEM, 2018b; UNAM, 2017).

De acuerdo con la actualización de los mapas de peligros del volcán Popocatepetl, las emisiones de ceniza con columnas menores a 10 kilómetros (km) de altura –como las que han acontecido de 1994 a la fecha– conforman el escenario de mayor probabilidad de ocurrencia. Bajo este supuesto, la totalidad de la ZMVM podría verse afectada por la caída de trazas de cenizas, con mayores impactos en el sureste del Estado de México y la Ciudad de México (Coordinación Nacional de Protección Civil, 2017). En la Figura 1.3 se muestran los radios de afectación por caída de ceniza del Popocatepetl bajo el escenario de mayor probabilidad de ocurrencia.

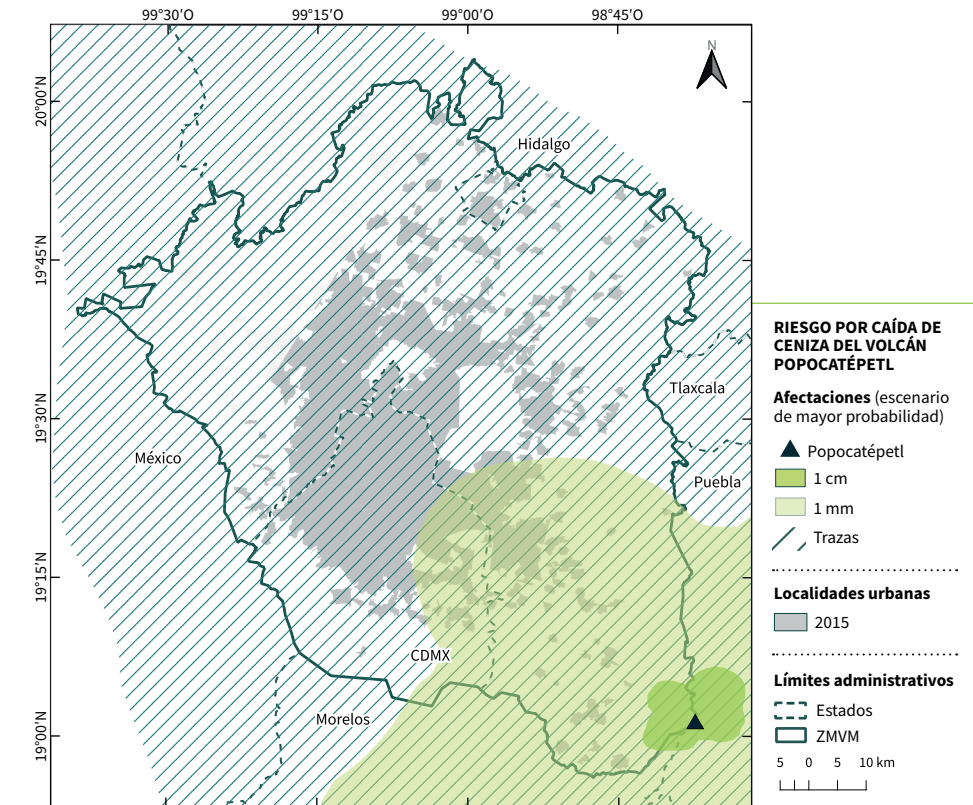


Figura 1.3 Mapa de riesgo por caída de ceniza del volcán Popocatepetl, escenario de mayor probabilidad

Fuente: Elaborado a partir de la memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatepetl (UNAM, 2017).

1.2.2 Hidrografía

La ZMVM se ubica principalmente en la Región Hidrológico-Administrativa (RHA) XIII “Aguas del Valle de México” y en la región hidrológica no. 26 “Pánuco”, de acuerdo con la división establecida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010). Una porción en el sureste de la ZMVM (5.8%) pertenece a la región hidrológico-administrativa IV, denominada “Balsas”, así como a la región hidrológica homónima¹. La Figura 1.4

muestra la división hidrológico-administrativa de la ZMVM, los principales cuerpos de agua en la región y el sistema de cuencas hidrológicas.

Los recursos hídricos de la RHA XIII tienen el mayor grado de presión registrado en todo el país, con un valor de 141.4%² (CONAGUA, 2018). Esto se debe a que la cantidad de agua empleada en usos consuntivos es significativamente mayor al

¹ El país está dividido en 37 regiones hidrológicas que agrupan un total de 757 cuencas. Al mismo tiempo, se tiene una división hidrológico-administrativa con 13 regiones. Este último sistema se ajustó a los límites municipales, mientras que el primero respeta los parteaguas naturales de las cuencas. Por esta razón, la delimitación hidrográfica de las cuencas varía ligeramente respecto de la administrativa (CONAGUA 2018; Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México 2014).

² El grado de presión representa el volumen de extracción de agua media anual total para usos consuntivos (volumen concesionado) respecto del total de recursos hídricos renovables. Un valor superior al 100% indica que se extrae un volumen mayor al escurrimiento medio superficial y la recarga media de los acuíferos que ocurren de forma natural en la región.

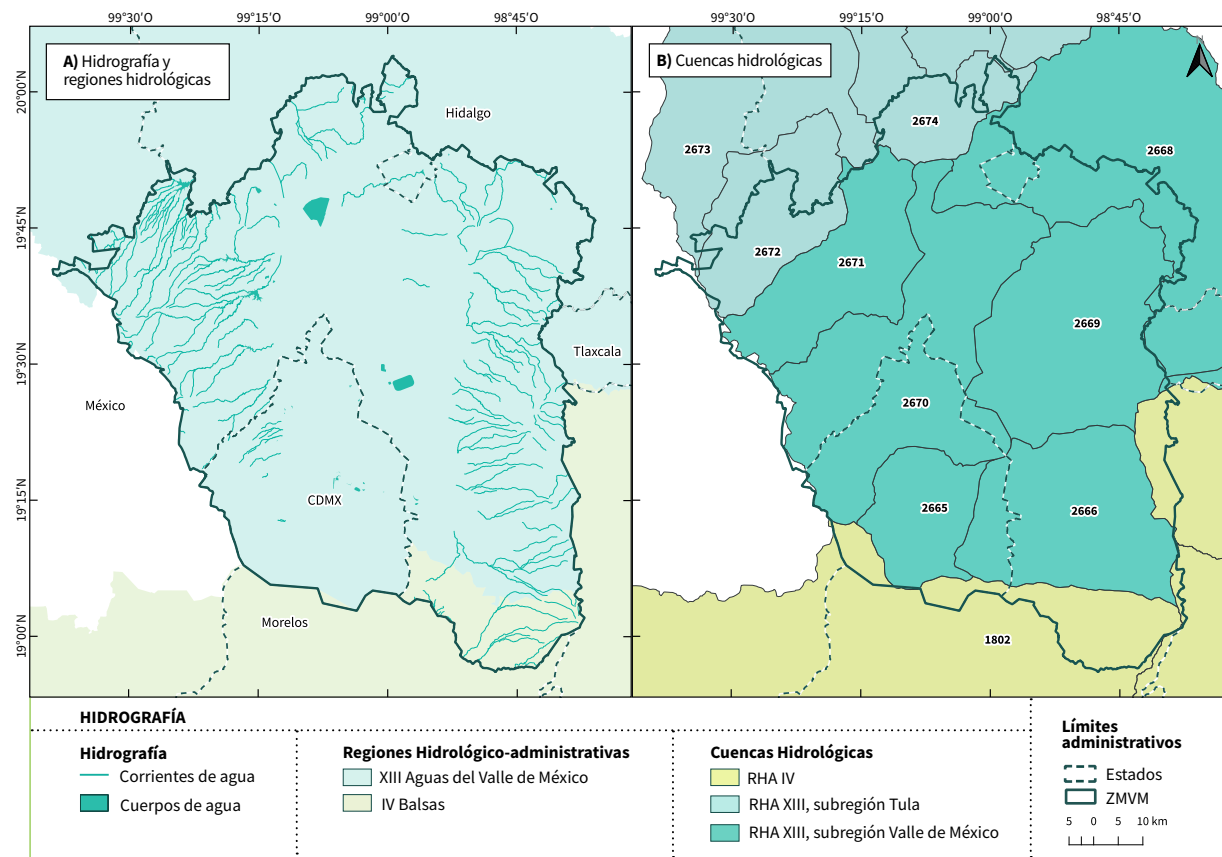


Figura 1.4 Características hidrográficas de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con datos del Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA, 2020) y el conjunto de datos vectoriales de información topográfica digital, por condensado estatal (edición 2015), escala 1:250 000 (INEGI, 2020a).

volumen de agua renovable de la cuenca. Este estrés se traduce en un deterioro en la cantidad y calidad de los recursos hídricos, y contribuye a la sobreexplotación de acuíferos, ríos secos, eutrofización, contaminación con materia orgánica e intrusión salina, entre otros problemas. La Tabla 1.1 resume las características principales de la RHA XIII.

El consumo de agua de la población de la región es atendido por dos de los acueductos principales del país, el Sistema Lerma y el Sistema Cutzamala,

los cuales suministran a la ZMVM recursos hídricos provenientes de otras cuencas. El primero abastece a ciertas alcaldías de la Ciudad de México a través de la extracción de agua subterránea del acuífero del Río Lerma, mientras que el segundo proporciona agua a toda la población de la ZMVM con recursos proveniente de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosques, entre otras (CONAGUA, 2018). También se cuenta con un sistema de pozos que permite la explotación de los acuíferos de la región (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2014).

Tabla 1.1 Características de la Región Hidrológico-Administrativa no. XIII

Superficie 18 229 km ²	Población (a) 23.55 millones de habitantes	Agua renovable 3401 hm ³ /año 144 m ³ /habitante/año
Aportación al PIB nacional (b) 24.63%	Volumen total concesionado 4808 hm ³ /año	Grado de presión Muy Alto 141.4%
a. Población a mediados de 2017.		b. Datos de Producto Interno Bruto al 2016.
Fuente: Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2018).		

Aguas superficiales

En el Valle de México existía originalmente un sistema lacustre de casi 2000 km², conformado por cinco grandes lagos (Xaltocan, Zumpango, Texcoco, Chalco y Xochimilco). Hoy en día estos cuerpos de agua se han reducido a un sistema de embalses con una superficie de 56.76 km². De las 757 cuencas existentes a nivel federal (CONAGUA, 2018), 13 pertenecen a la RHA XIII. Para fines de planeación, estas se agrupan en dos subregiones: Valle de México y Tula (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2014). La Figura 1.4 muestra gráficamente la distribución espacial de los cuerpos de agua y las cuencas hidrográficas en la ZMVM. En el Anexo 1.2 se enlistan los principales cuerpos de agua superficial que pertenecen a la RHA XIII.

Aguas subterráneas

En la RHA XIII se encuentran 14 de los 653 acuíferos del país, siete en cada subregión de planeación. Actualmente cuatro acuíferos están sobreexplotados, todos ubicados en la subregión Valle de México. El déficit total de la RHA XIII es negativo (-579.6 hm³/año), indicando que se extrae más de la cantidad límite establecida para no poner en riesgo el equilibrio de los ecosistemas dependientes de las descargas naturales del sistema de acuíferos. En la Tabla 1.2 se resumen las características principales del sistema de aguas subterráneas, en términos de la disponibilidad media anual y el nivel de explotación de los acuíferos. La tabla desagregada por acuífero y una representación gráfica de los mismos se pueden consultar en el Anexo 1.2.

Tabla 1.2 Características principales del sistema de aguas subterráneas de la Región Hidrológico-Administrativa no. XIII

Subregión	Acuíferos			R (hm ³ /año)	DNC (hm ³ /año)	VEAS (hm ³ /año)	DMA (hm ³ /año)	
	Sobre-explotados	Sin disponibilidad	Con disponibilidad				Positivo	Déficit
Valle de México	4	0	3	1209.0	30.4	1919.2	0.0	-740.6
Tula	0	1	6	1085.4	671.3	253.1	161.0	0.0

R: recarga total media anual
 DNC: descarga natural comprometida
 VEAS: volumen de extracción de aguas subterráneas
 DMA: disponibilidad media anual de agua del subsuelo

Fuente: Elaborado con información del Diario Oficial de la Federación (DOF, 2018).

1.2.3 Clima

El clima y las condiciones meteorológicas de la ZMVM están determinados por la fisiografía de la región y fenómenos meteorológicos a escala local, regional y sinóptica³. A continuación se describen, en primer instancia, los sistemas y fenómenos meteorológicos que influyen en la variabilidad anual y estacional de las condiciones meteorológicas en la

región. Posteriormente se describen los tipos de clima y los patrones anuales y estacionales de las variables meteorológicas en la ZMVM, puntualizando los valores registrados en el año 2018 para temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión barométrica, radiación solar y altura de la capa de mezclado.

Sistemas y fenómenos meteorológicos que afectan a la ZMVM

La ZMVM es impactada por sistemas anticiclónicos⁴ que se localizan tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico; específicamente se ve afectada por el sistema anticiclónico del Atlántico Norte y por el anticiclón del Pacífico. Estos sistemas generan estabilidad atmosférica, condición que inhibe el movimiento ascendente del aire y, por lo tanto, también la formación de nubes, lo cual propicia que una gran cantidad de radiación solar incida sobre la superficie terrestre. Estos factores hacen que la atmósfera de la ZMVM sea altamente foto-reactiva y favorecen las reacciones entre compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x). A su vez, estas reacciones pueden derivar en la formación de smog fotoquímico y ozono (O₃) troposférico.

En la época invernal, la presencia de la corriente en chorro subtropical, caracterizada por una fuerte velocidad de los vientos del oeste en niveles altos de la tropósfera (los cuales superan los 100 km por hora sobre la región), favorece el transporte de humedad y genera precipitaciones normalmente no muy importantes, en las cuales la orografía juega un papel decisivo. Durante esta época también se presentan incursiones de masas de aire frío y seco, impulsadas por sistemas anticiclónicos situados en la porción centro occidental de los Estados Uni-

dos o aún más al norte, que penetran por la región septentrional del territorio mexicano y avanzan hacia la zona central. Estos sistemas llegan a extenderse sobre la ZMVM, donde provocan descensos de temperatura, algunas heladas y nevadas, así como la estratificación de las capas troposféricas, induciendo la formación de inversiones térmicas en superficie o en capas atmosféricas muy bajas.

El verano corresponde a la época de lluvias en la ZMVM, periodo del año en el que esta se ve afectada por la entrada de aire cálido y húmedo procedente del Océano Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. Estos fenómenos favorecen el movimiento ascendente del aire e inhiben la formación de inversiones térmicas. Durante esta época también se registra un incremento en la humedad, debido al patrón de viento propio de la temporada (los vientos alisios⁵), así como la constante presencia de perturbaciones atmosféricas conocidas como ondas tropicales, las cuales generan grandes cantidades de precipitación sobre los lugares por los que se desplazan.

Es muy importante resaltar el papel del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) en las variaciones del clima en México (Magaña & Quintanar, 1997). Durante El Niño⁶, las lluvias de invierno se

intensifican y las de verano se debilitan, en tanto que en el Pacífico mexicano se incrementa la frecuencia con la que se presentan las tormentas tropicales y huracanes; en cambio, durante La Niña ocurre lo contrario, por lo que los inviernos son más secos. Bajo condiciones neutrales de ENOS, su influencia en los patrones observados de temperatura y precipitación es menos significativa.

Sin embargo, El Niño y La Niña no son los únicos factores que condicionan las características climáticas a nivel global y regional; existen otras oscilaciones de interconexión océano-atmósfera que se presentan en diversas escalas de tiempo y que modulan los patrones de circulación atmosférica global. En la ZMVM influyen oscilacio-

nes o tele-conexiones tales como la Oscilación Madden-Julian (MJO), la Oscilación del Ártico (AO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y el Patrón Pacífico Norte América (PNA).

Durante 2018 los patrones observados de circulación, temperatura y precipitación se asociaron en mayor medida a las condiciones atmosféricas y oceánicas registradas en el Pacífico Norte. El sistema océano-atmósfera durante los meses de enero y febrero de 2018 presentó un debilitamiento en las condiciones de La Niña. Entre los meses de marzo a mayo las condiciones observadas se mantuvieron en un escenario de transición de La Niña a condiciones neutrales de ENOS, situación que prevaleció hasta finales de 2018 (Pascual Ramírez *et al.*, 2018).

Unidades climáticas

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, el clima que predomina en la ZMVM es del tipo templado subhúmedo con lluvias en verano, el cual se caracteriza por una temperatura media anual que oscila entre los 12 y los 18 grados Celsius (°C), y un porcentaje de lluvia invernal entre el 5.0 y 10.2% del total anual. Los climas templados se concentran en los valles altos del noroeste de la ZMVM, así como en el centro y este de la región (ver Figura 1.5). En la zona centro-norte del Estado de México se registra un clima semiseco templado, con veranos cálidos y una temperatura media anual entre 12 y 18°C. Por último, en los sistemas montañosos, al este y suroeste del valle central, prevalece un clima semifrío subhúmedo, con lluvias en verano y una temperatura media anual entre 5 y 12°C (García, 2004; INEGI, 2005; SEDEMA, 2018a, 2020b). Las variaciones estacionales durante el año, relacionadas con los patrones de temperatura, humedad y eventos de gran escala, marcan temporadas climáticas al interior del Valle de México y mantienen una estrecha relación con la presencia de algunos contaminantes atmosféricos, lo cual se discutirá más a detalle en el Capítulo 3.

Clima predominante en la ZMVM



Templado subhúmedo con lluvias en verano

temperatura media anual entre los
12-18°C

porcentaje de lluvia invernal entre el
5.0-10.2%

Los climas templados se concentran en los valles altos del noroeste de la ZMVM, así como en el centro y este de la región.

³ También conocidos como fenómenos de gran escala, con una longitud horizontal superior a los 1000 km.

⁴ Zonas atmosféricas de alta presión, en las cuales la presión atmosférica es superior a la del área circundante.

⁵ Vientos de dirección e intensidad relativamente constante, que soplan entre los trópicos. En el hemisferio norte soplan del noreste.

⁶ El fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) hace referencia a un calentamiento en la temperatura superficial del mar desde el Pacífico central hacia el Pacífico tropical del este, a lo largo de la línea ecuatorial, el cual modifica patrones climáticos globales. ENOS resulta de una fluctuación interanual del sistema océano-atmósfera en el Océano Pacífico ecuatorial y tiene tres fases: una cálida (El Niño), una fría (La Niña) y una neutral, siendo esta última la fase donde el océano se comporta de manera normal. Según la Organización Mundial Meteorológica, El Niño y La Niña son condiciones anómalas en el Pacífico tropical del este; por “anómalo” se entiende una elevación (descenso en caso de La Niña) de 0.5°C o más (-0.5°C o menos) por encima (abajo) de la media del periodo 1971–2000, durante un trimestre, y debe permanecer al menos 5 trimestres con esas condiciones (CONAGUA, s/f.).

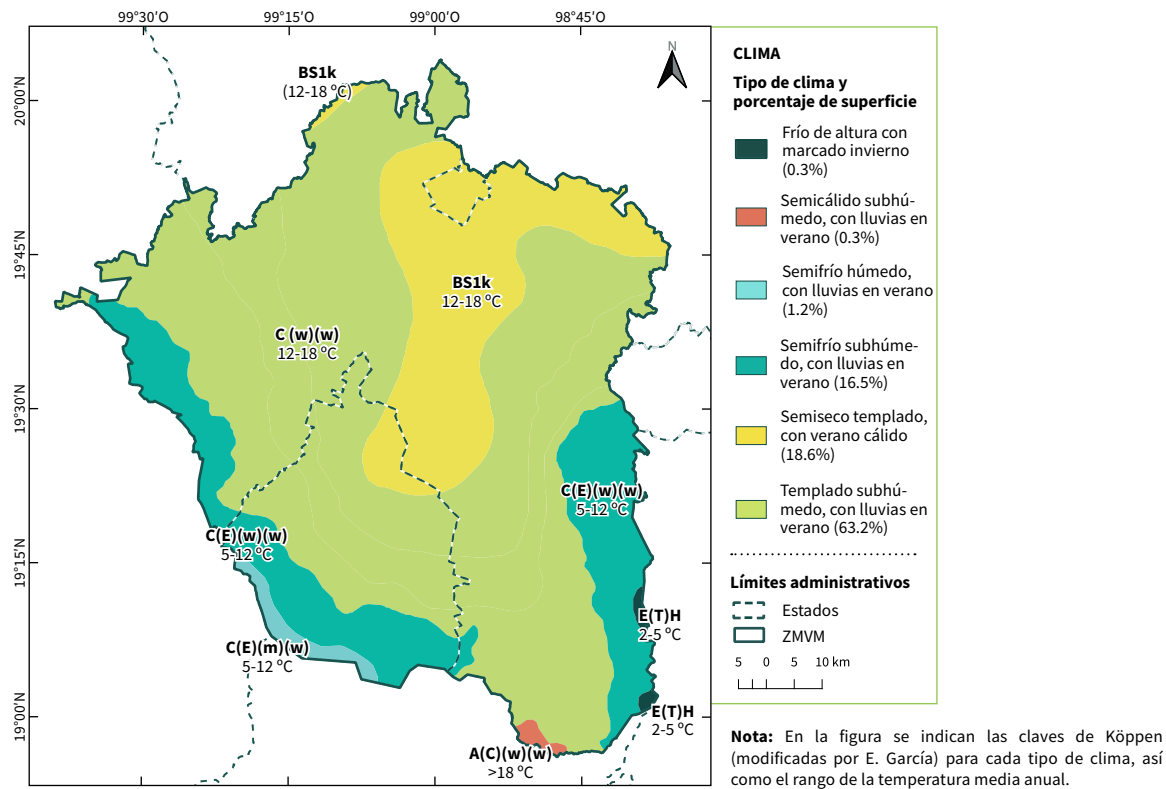
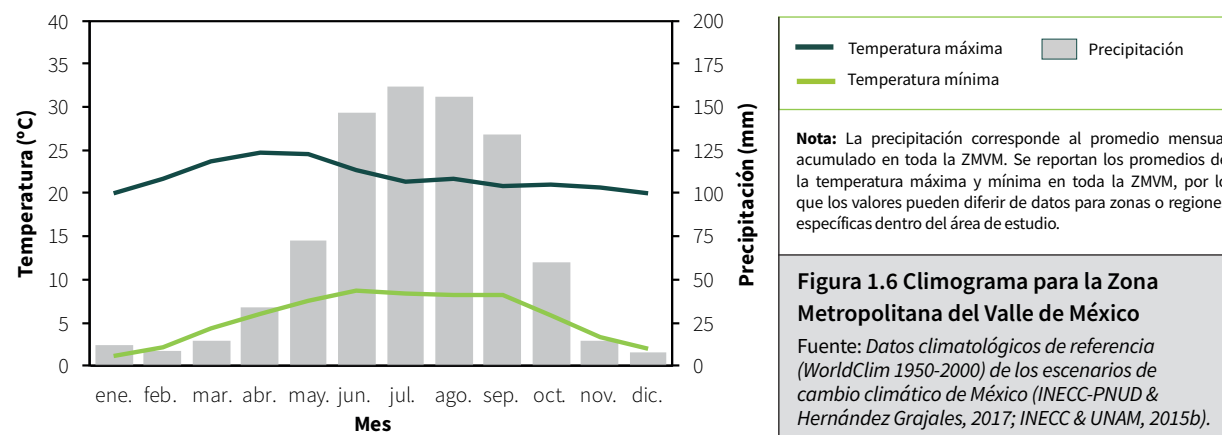


Figura 1.5 Clima de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con el conjunto de datos vectoriales de unidades climáticas, escala 1:1 000 000, edición 2008 (INEGI, 2020a).

El ciclo anual y variación estacional de la precipitación y la temperatura para la ZMVM se muestra en la Figura 1.6; los datos corresponden a las normales climatológicas durante el periodo 1950-2000. Se puede observar que los valores máximos de precipitación se presentan durante el verano, específicamente en los meses de julio y agosto, y los mínimos ocurren durante el invierno y la primavera. Las temperaturas más elevadas se registran en abril y mayo,

durante la primavera, mientras que las temperaturas más bajas se alcanzan en invierno, con mínimos en enero. Si bien las temperaturas máximas disminuyen durante el verano en comparación con los valores durante la primavera, la temperatura mínima sigue una tendencia distinta y sus valores máximos se registran de junio a septiembre (INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017; INECC & UNAM, 2015b; SEDEMA, 2018a).



Las consecuencias del cambio climático incluyen modificaciones en la temperatura atmosférica, los patrones de precipitación, vientos y pautas de circulación atmosférica y oceánica (SEMARNAT, 2014). Es importante comprender las anomalías en la temperatura y la precipitación a nivel regional y a escala mundial; por ejemplo, por efecto del cambio climático pueden modificarse las trayectorias de tormentas, corrientes en chorro y sistemas anti-

ciclónicos (Solomon, Qin, & Manning, 2007). Es así que los efectos del cambio climático pueden tener un impacto sobre el comportamiento de la contaminación atmosférica y el nivel de calidad del aire en la ZMVM. En el Capítulo 4 se analiza detalladamente la relación entre el cambio climático y la calidad del aire, así como las implicaciones que pudieran tener las anomalías en las variables meteorológicas sobre los niveles de contaminación.

Temperatura

La temperatura media anual en la ZMVM oscila entre los 12 y los 18°C. A lo largo del año se observan variaciones estacionales típicas, con temperaturas más cálidas entre abril y mayo, templadas entre mayo y principios de octubre, y mínimas durante el invierno. Las variaciones en la temperatura también se modifican en función de la altitud, con temperaturas medias anuales más bajas en

las zonas montañosas. La Figura 1.7 muestra gráficamente la variación regional de la temperatura media anual. En cuanto a las variaciones diurnas, los registros horarios indican que la temperatura disminuye durante la noche; los valores mínimos acontecen en la madrugada y aumentan a lo largo del día hasta alcanzar valores máximos entre las 14:00 y las 17:00 horas (SEDEMA, 2015b).

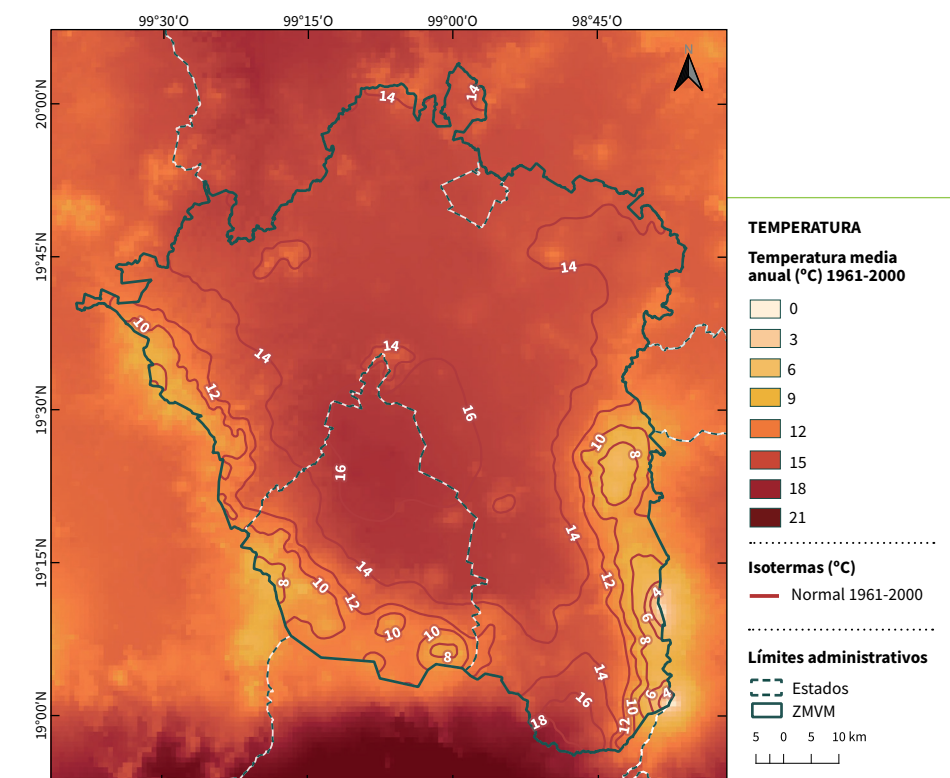


Figura 1.7 Variación espacial de la temperatura media anual en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con el conjunto de datos vectoriales de temperatura media anual (edición 2007), escala 1:1 000 000 (INEGI, 2020a), y datos climatológicos de referencia (SMN 1961-2000) de los escenarios de cambio climático de México (INECC & UNAM, 2015a).

El promedio reportado en 2018 por la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México⁷ fue de 16.7°C. La máxima temperatura registrada alcanzó los 32.8°C el 31 de mayo en la estación Montecillos (MON), en el municipio de Texcoco, Estado de México, y un mínimo de -6.2°C el 15 de enero en la estación Ajusco (AJU) en la zona montañosa de la Sierra Ajusco-Chichinautzin. El promedio mensual de temperatura muestra que, en 2018, el mes más frío fue enero, con un valor promedio de 12.5°C, mientras que el más cálido fue mayo con un promedio de 19.4°C. El promedio anual fue 0.1°C menor que el registrado en 2017 (SEDEMA, 2020b).

En general, las estaciones ubicadas en áreas suburbanas o rurales reportan las temperaturas más bajas, mientras que las estaciones ubicadas dentro del

área urbana registran valores promedio más altos. De igual manera, las estaciones suburbanas o rurales presentan un mayor contraste entre las temperaturas máxima y mínima diarias, en comparación con las estaciones urbanas (SEDEMA, 2018a), lo que evidencia el fenómeno de la isla de calor urbana.

La temperatura es inversamente proporcional a la densidad de un gas, por lo que se relaciona directamente con la estabilidad atmosférica; a bajas temperaturas en la región inferior de la atmósfera, el aire será más denso y la dispersión de la contaminación será desfavorable por las condiciones de estabilidad atmosférica. Cuando la temperatura aumenta, la capa de aire superficial se calienta, generando condiciones de inestabilidad que favorecen el mezclado del aire y la dispersión de los contaminantes (SEDEMA, 2015b).

Precipitación

La temporada de lluvias inicia en las últimas semanas de mayo y concluye durante las primeras semanas de octubre, con un periodo relativamente seco durante el resto del año, aunque se llegan a presentar lluvias aisladas. Este régimen pluvial refleja la intensidad y frecuencia de fenómenos

meteorológicos sinópticos en los océanos Pacífico y Atlántico (SEDEMA, 2006). En la RHA XIII, la precipitación normal anual entre 1981 y 2010 fue de 648.9 mm (CONAGUA, 2018); la Tabla 1.3 muestra la precipitación mensual normal para este mismo periodo de tiempo y para el año 2018.

Tabla 1.3 Precipitación pluvial normal (1981-2010) y en 2018 para la Zona Metropolitana del Valle de México

Periodo	Precipitación mensual (mm)												Precipitación anual (mm)
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
Normal 1981-2010, RHA XIII	11.2	11.2	11.6	27.6	51.4	109.2	125.8	114.7	110.4	56.9	13.3	5.6	648.9
Año 2018, ZMVM	7.9	7.7	12.2	44.5	59.1	127.4	85.9	198.2	120.7	86.8	31.1	4.8	786.2

Fuente: Para el periodo 1981-2010, Estadísticas del Agua en México 2018 (CONAGUA, 2018); para el año 2018, registros del Sistema Meteorológico Nacional, reportados por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2020b).

Al igual que con la temperatura, además de las variaciones estacionales, se observan cambios en la precipitación en función del tipo de clima y la altitud, producto del efecto orográfico. Dada la extensión de la ZMVM, el esquema de precipitación es desigual; se observa un aumento en la cantidad de precipitación

conforme incrementa la elevación del terreno, particularmente en las Sierras del Ajusco-Chichinautzin y de las Cruces, donde el clima es más húmedo que en la región centro-norte de la ZMVM. La Figura 1.8 muestra la variación regional de la precipitación anual de acuerdo con registros históricos de precipitación.

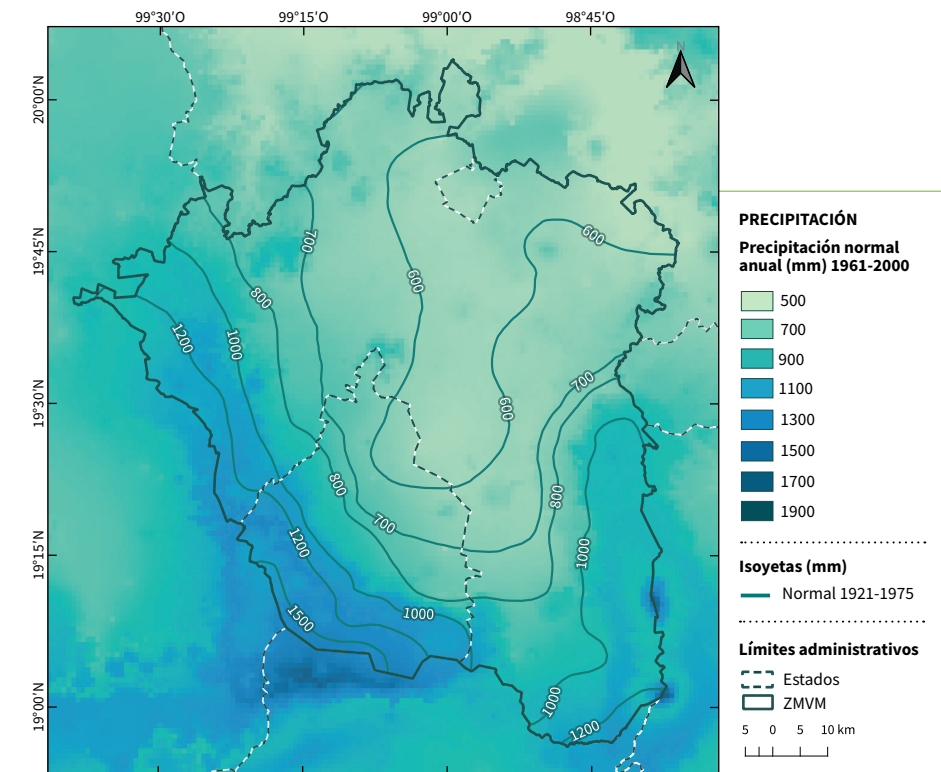


Figura 1.8 Variación espacial de la precipitación pluvial en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con el conjunto de datos vectoriales de precipitación media anual (edición 2006), escala 1:1 000 000 (INEGI, 2020a) y datos climatológicos de referencia (SMN 1961-2000) de los escenarios de cambio climático de México (INECC & UNAM, 2015a).

La precipitación tiene un efecto positivo sobre la calidad del aire. La fracción gruesa de partículas (con diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 micrómetros) eventualmente cae a la superficie de la tierra por gravitación o impactación inercial, aunque también son eliminadas de la atmósfera por gotas de lluvia conforme estas precipitan. En cambio, las partículas menores a 2.5 micrómetros no se remueven tan fácilmente de la atmósfera; estas tienden a incorporarse en las gotas de las nubes, por lo que su tiempo de residencia en la atmósfera es similar al del agua, aproximadamente de 10 días (INE-SEMARNAT, 2011).

Este fenómeno, conocido como deposición húmeda, puede tener efectos perjudiciales sobre la vegetación y la infraestructura. Cuando el agua en el aire reacciona con el SO₂ y los NO_x, forma ácidos que pueden depositarse a través de la lluvia. Los efectos dependen de las características de la vegetación y los materiales donde se da la deposición, e incluyen la acidificación de cuerpos de agua y la lixiviación de nutrientes del suelo; la deposición de partículas también genera efectos negativos en el follaje de plantas, reduciendo el crecimiento vegetal (INE-SEMARNAT, 2011).

Humedad relativa

La humedad relativa es un indicador de la cantidad de vapor de agua presente en el aire ambiente y depende estrechamente del régimen pluvial. Durante la temporada seca en la ZMVM, la humedad relativa promedio varía entre el 30 y 50%, mientras que du-

rante los meses de lluvia oscila entre el 60 y 80%. En 2018, el periodo del año con los valores mínimos de humedad relativa fue el trimestre de marzo a mayo, con un mínimo de 43% en marzo, los meses entre agosto y octubre presentaron los máximos de

⁷ La configuración del SIMAT y la REDMET se describen a detalle en el Capítulo 3.

humedad con valores superiores al 68%, y el promedio anual fue del 57% (SEDEMA, 2020b).

Este parámetro meteorológico también desempeña un papel importante en la química atmosférica, tanto diurna como nocturna. Durante el día, el agua participa en los procesos fotoquímicos de la atmósfera y tiene una influencia importante en las propiedades fisicoquímicas de los aerosoles atmosféricos. Durante el periodo nocturno la humedad se relaciona con la formación de compuestos secundarios (aerosoles y gases) a través de reacciones heterogéneas que ocurren en la

Vientos

Los campos de flujo de viento en la ZMVM están determinados por la fisiografía de la región y los fenómenos meteorológicos sinópticos. Las montañas que rodean al valle central influyen en la dirección y velocidad del viento; la abertura orográfica en la región nororiental, donde el relieve es casi plano, provoca que la dirección predominante de los vientos sea, con mayor frecuencia, del noreste hacia el suroeste. Sin embargo, al presentarse eventos de escala sinóptica, las condiciones meteorológicas y los campos de flujo de viento se modifican (SEDEMA, 2006). La Figura 1.9 muestra los campos de viento superficial promedio por mes para el año 2018.

En el análisis de los campos de viento promedio para los diferentes meses se puede observar que, durante la mayor parte del año (enero a octubre), la dirección del viento predominante es del norte y noreste. Sin embargo, se presentan algunas corrientes del sur, lo cual es más notorio en los meses de enero a abril; esta situación crea zonas de convergencia de vientos en el centro y sur de la ZMVM. En los meses de noviembre y diciembre la dirección de viento predominante es del sur y sureste, lo que deriva en la formación de zonas de convergencia de vientos en el centro y norte de la ZMVM (SEDEMA, 2020b).

De noviembre a abril también predomina un flujo desde el oeste (SEDEMA, 2015b); en esta época

superficie de los aerosoles, en las superficies de la infraestructura urbana y de la vegetación, así como en el suelo (SEDEMA, 2018a). La precipitación, la humedad relativa y la temperatura tienen un rol clave en la formación y remoción de contaminantes atmosféricos, principalmente de partículas suspendidas. Las propiedades termodinámicas de las partículas, en específico la distribución de su masa entre la fase gaseosa y de aerosol, también es un factor determinante en su tiempo de residencia en la atmósfera; esta relación depende de la temperatura y la humedad (INE-SEMARNAT, 2011).

del año es frecuente el registro de sistemas anticiclónicos en la región centro del país, ubicados tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico (SEDEMA, 2006; SEMARNAT, Gobierno de la Ciudad de México, & Gobierno del Estado de México, 1996). Cuando estos fenómenos impactan al Valle de México, se generan condiciones de estabilidad atmosférica que inhiben el movimiento vertical del aire y la formación de nubes, lo que puede generar cápsulas de aire inmóvil en áreas que llegan a extenderse sobre todo el Valle de México (SEMARNAT *et al.*, 2001). El resto del año los vientos alisios propios de la temporada acarrearán humedad desde el noreste; la entrada de aire cálido y húmedo favorece el movimiento ascendente del aire y coincide con la temporada de lluvias en la región.

El perfil horario del viento para las estaciones ubicadas en la región urbana se caracteriza por velocidades bajas durante la noche, con incrementos graduales a partir del amanecer y una aceleración más súbita a medida que el sol calienta la superficie del suelo durante la mañana y en las primeras horas de la tarde. Esto hace que los valores máximos de velocidad del viento se registren alrededor de las 18:00 horas (SEDEMA, 2018a, 2020b).

El promedio anual para la velocidad escalar del viento en 2018 fue de 2.0 metros por segundo

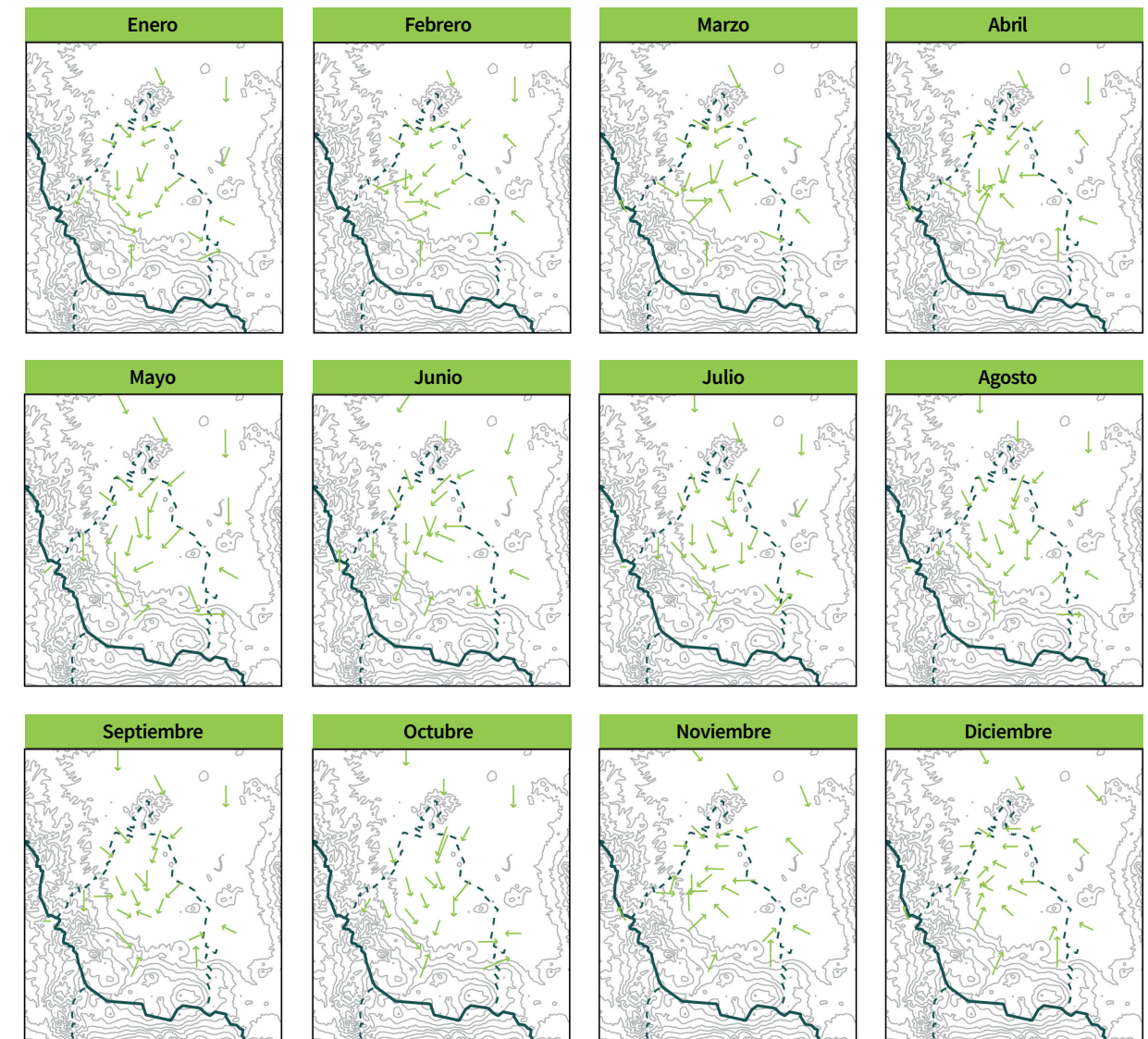


Figura 1.9 Campos de viento en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Informe 2018 de la calidad del aire en la Ciudad de México (SEDEMA, 2020b).

(m/s), similar a los reportados en 2017 y 2016. En mayo se presentó el máximo, con 2.3 m/s, mientras que el valor mínimo se registró en septiembre y diciembre, ambos con un promedio de 1.8 m/s. Las estaciones Ajusco Medio (AJM) y Milpa Alta (MPA) promediaron la velocidad máxima con 2.7 m/s, en tanto que el mínimo fue de 1.4 m/s y se registró en la estación San Agustín (SAG) en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México (SEDEMA, 2020b).

El viento influye en la calidad del aire de la ZMVM. Un viento fuerte, independientemente de su dirección, permite una mayor dispersión de los contaminantes atmosféricos. Por otro lado, un viento débil limita su dispersión y propicia un incremento en la concentración de los contaminantes, situación que se puede agravar cuando se presentan alturas bajas en la capa de mezclado y/o durante un episodio intenso de radiación solar (SEDEMA, 2018a).

Presión barométrica

La presión barométrica desciende conforme aumenta la altitud, y depende también de la humedad relativa. La presión será menor en días nublados y húmedos, dado que el contenido de humedad es inversamente proporcional a la densidad del aire. Los sistemas de baja presión traen consigo nubosidad y lluvia, mientras que los sistemas de alta presión (anticiclónicos) favorecen días despejados y sin precipitación (SEDEMA, 2015b). El fenómeno sinóptico conocido como la “corriente en chorro subtropical” favorece la disminución de la presión atmosférica, el incremento en la velocidad del viento y la dispersión de contaminantes (SEDEMA, 2018a). En 2018, el

promedio anual de la presión en las estaciones que se ubican dentro de la ZMVM fue de 584.9 milímetros de mercurio (mmHg) (SEDEMA, 2020b).

La magnitud de la emisión de ciertos contaminantes durante los procesos de combustión se puede explicar en términos de la presión barométrica. Cuando disminuye la presión y la densidad del aire con la altitud, la cantidad de oxígeno por unidad de volumen es menor. Es así que hay “menos” oxígeno para respirar o para participar en reacciones de combustión, provocando que este último proceso sea menos eficiente y que se genere una mayor cantidad de contaminantes (SEMARNAT *et al.*, 2001).

Radiación solar

La localización, fisiografía y el clima de la ZMVM determinan la cantidad de radiación solar que incide sobre su superficie. Por su latitud, en la región se registran periodos de radiación solar de 11 horas en invierno a 13 horas en verano. La elevación también influye en la incidencia de radiación, puesto que la luz solar debe atravesar un menor espesor de la atmósfera y hay una probabilidad más baja de que sea reflejada o absorbida por compuestos y moléculas presentes en esta. Finalmente, la ausencia de nubes propicia que una mayor cantidad de radiación solar llegue a la superficie terrestre; en ese sentido, los sistemas anticiclónicos favorecen cielos despejados y mayores niveles de radiación solar.

Dentro de la zona de estudio, la radiación ultravioleta (UV) es particularmente relevante. Este tipo de radiación tiene una longitud de onda entre 280 y 440 nanómetros (nm). Se divide al espectro en dos tipos de radiación UV, la banda “B” (UV-B) entre los 280-315 nm y la “A” (UV-A) de 315-400 nm. La radiación UV es un factor determinante en el avance de las reacciones químicas a través de las cuales se forma el *smog fotoquímico*. El nivel de radiación solar hace que la atmósfera de la ZMVM sea altamente foto-reactiva. En la tropósfera⁸, el O₃ se produce cuando los COV y los NO_x reaccionan en presencia

de luz solar, específicamente en la banda UV-B. La radiación también contribuye a la formación de aerosoles secundarios, resultado de la oxidación fotoquímica de COV (INE-SEMARNAT, 2011; SEDEMA, 2015b; UNAM & INECC, 2016).

La altitud de la ZMVM provoca que la región esté expuesta a un 20% más de radiación UV en comparación con el nivel del mar. Esta variable meteorológica se relaciona directamente con la temperatura ambiente y su variación estacional y diaria. De acuerdo con los registros de la REDMET, los máximos diarios de irradiancia se presentan comúnmente entre las 12:00 y 14:00 horas. Los registros tienen una menor variabilidad en los meses de la temporada seca, cuando predominan los días despejados, mientras que una distribución poco uniforme de la nubosidad en la temporada de lluvias ocasiona una mayor fluctuación en las mediciones. La intensidad máxima de radiación solar se recibe en verano, durante el mes de julio, cuando los días son más largos. Durante el invierno los días son más cortos, por lo que la radiación disminuye. Sin embargo, en la ZMVM, la nubosidad durante la temporada de lluvia reduce de manera considerable la intensidad de la radiación, por lo que los máximos se registran en primavera.

⁸ La tropósfera es la capa superficial de la atmósfera, la cual se extiende hasta una altitud de aproximadamente 10 km (Newman, 2018).

En 2018 el promedio anual para el período diurno (8:00 a 20:00 horas) de radiación UV-A fue de 2.0 vatios por metro cuadrado (W/m²) y para la radiación UV-B de 0.09 W/m². Los máximos de radiación solar ultravioleta se reportaron en el periodo comprendi-

do entre los meses de mayo a agosto, con valores de 6.275 W/m² y 0.375 W/m² (UV-A y UV-B, respectivamente); los mínimos se registraron en los meses de invierno, con 0.001 W/m² de radiación UV-A y 0.0001 W/m² UV-B, respectivamente (SEDEMA, 2020b).

Altura de mezcla e inversiones térmicas

Para entender los procesos de dispersión de contaminantes en la ZMVM es fundamental comprender el concepto de *altura de mezcla*. Los gases emitidos en la superficie terrestre se difunden y diluyen en la capa de aire adyacente, definida como capa límite atmosférica. Esta capa tiene una altura límite, denominada altura de mezcla o de mezclado, y su extensión determina el volumen de dilución y la concentración de los contaminantes en la atmósfera. La altura de la capa de mezclado depende de la temperatura ambiente y la evolución del calor en la capa. En general, las alturas máximas se observan entre las 14:00 y 16:00 horas, en los meses de abril y mayo, mientras que los valores mínimos se registran en la noche y durante la temporada de invierno⁹ (SEDEMA, 2018a).

Dentro de la tropósfera, donde se ubica la capa límite atmosférica, la condición normal es que la temperatura disminuya con la altitud. Sin embargo, en la ZMVM es común que una capa de aire caliente se forme encima de una fría; a este fenómeno se le denomina *inversión térmica*, e impide el movimien-

to convectivo natural del aire, lo que se traduce en la reducción de la capacidad de dilución de los contaminantes y un aumento en sus concentraciones. En la ZMVM, este tipo de fenómenos ocurren principalmente durante los meses de invierno.

Las inversiones térmicas radiativas o de superficie son las más comunes en la región. En las noches despejadas, el suelo y el aire en contacto con él se enfrían; esta capa de aire fría se vuelve más densa que la capa de aire inmediata superior, generando una inversión térmica que se “rompe” cuando la energía solar iguala la temperatura de las dos capas, permitiendo el transporte vertical de los contaminantes. Este fenómeno se agudiza en la época seca-fría, por la presencia de sistemas anticiclónicos y condiciones atmosféricas estables que provocan descensos de la temperatura y la estratificación de las capas troposféricas. En cambio, durante el verano, la entrada de aire cálido y húmedo proveniente de los océanos favorece procesos de convección e inhibe la formación de inversiones (SEDEMA, 2006).

1.2.4 Suelos

Edafología

Las unidades edafológicas predominantes en la ZMVM se representan gráficamente en la Figura 1.10. Los suelos del tipo feozem son comunes en las zonas más planas y representan un 55.6% del total del territorio. Estos suelos se caracterizan por tener una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y en nutrientes, por lo que coinciden con las zonas de cultivo en la región. Los feozems profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura

de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, donde tienen rendimientos altos. A su vez, los feozems más someros se sitúan en laderas o pendientes, teniendo como principal limitante la roca subyacente o alguna cementación muy fuerte en el suelo. Este tipo de suelo es susceptible a la desertificación en áreas donde la actividad humana requiere de sustratos libres de vegetación; esto acelera la erosión hídrica, especialmente en zonas semiáridas y templadas.

⁹ Por ejemplo, el promedio de la altura máxima de mezcla en 2017 fue de 2390 m s.n.m., con un intervalo de 729 a 4352 m s.n.m.

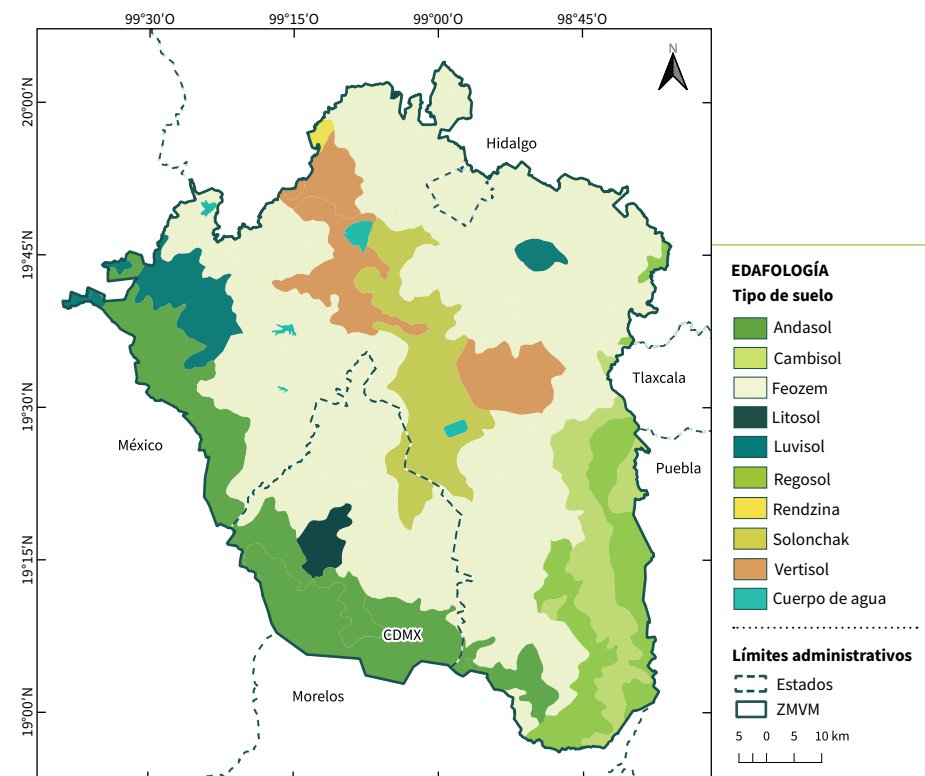


Figura 1.10 Tipos de suelo en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con el conjunto de datos vectoriales de perfiles de suelos (edición 2005), escala 1:1 000 000 (INEGI, 2020a).

En la región central de la ZMVM también predominan los suelos del tipo solonchack (7.1%) y vertisol (6.7%). Los solonchacks son suelos salinos que se presentan en lechos de lagos y en las regiones más bajas de los valles; en ellos predominan los pastizales y otros tipos de vegetación halófila. Los vertisoles son de textura fina a muy fina y poseen un contenido bajo de materia orgánica; son comunes en climas templados con una marcada estación seca y otra lluviosa, como es el caso de la ZMVM; su uso agrícola es extenso, variado y productivo ya que son muy fértiles, pero su dureza dificulta la labranza; presentan baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización.

En la zona montañosa prevalecen tres tipos de suelo: los andosoles (13.6% del territorio) en las sierras Ajusco-Chichinautzin y de las Cruces, al sur y al oeste; y los regosoles (6.4%) y cambisoles (5.4%) en la sierra Nevada, al este. En condiciones naturales, los andosoles, de origen volcánico,

presentan vegetación de bosque. Las actividades agrícolas y el uso pecuario, especialmente ovino, son actividades comunes en la zona a pesar de tener rendimientos bajos en este tipo de suelo. Se caracterizan por ser suelos sueltos con una gran capacidad de retención de humedad, por lo que son susceptibles a la erosión tanto hídrica como eólica, particularmente cuando se encuentran desprovistos de vegetación.

Por su parte, los suelos de tipo regosol y cambisol se presentan en diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Los regosoles muestran poco desarrollo y diferenciación del material parental; frecuentemente son someros y tienen contenidos bajos de materia orgánica, por lo que su fertilidad varía en función de la profundidad y la pedregosidad del terreno. Los cambisoles son suelos jóvenes y poco desarrollados, por lo que en ellos son evidentes los vestigios de la roca madre. Se destinan a muchos usos, con rendimientos variables, y son propensos a la erosión.

Erosión

La erosión es un proceso natural que implica el desgaste, disminución y deterioro del suelo por factores naturales como el agua, el hielo, vientos, cambios térmicos y la precipitación. Esta se ha visto acelerada en las últimas décadas por las actividades antropogénicas, que incluyen la construcción de infraestructura, actividades agrícolas y la tala de recursos forestales, así como por fenómenos naturales como los incendios forestales y el escurrimiento natural del agua.

De acuerdo con el conjunto de datos de erosión de suelo del INEGI (edición 2014), el tipo predominante de erosión en la ZMVM es hídrica; esto es, la pérdida de la capa superficial por la acción directa del agua. En total, 2024.6 km² de la región presentan erosión hídrica, con distintos grados de afectación; de esta área, la mayoría de los impactos se clasifican como leves (54.9%) o moderados (42.3%), con el porcentaje restante correspondiente a sitios afectados fuerte o extremadamente. Otros 43.1 km²

presentan erosión antrópica, asociada a modificaciones irreversibles del paisaje (por ejemplo, la construcción de caminos y carreteras) que facilitan la acción directa de otros agentes erosivos.

En la Figura 1.11 se observa que la erosión hídrica afecta primordialmente a las faldas de las sierras que enmarcan el valle central de la ZMVM, así como en los lomeríos al noreste y noroeste de la región. En estas zonas se llevan a cabo actividades agrícolas que, aunadas a las diferencias de altitud y a la susceptibilidad natural del tipo de suelo predominante (feozem), crean condiciones favorables para la erosión hídrica. Una vez que el suelo queda desprovisto de vegetación, el agua (en forma de torrente, lluvia o crecida de cuerpos de agua, así como por el efecto del riego) arrastra las partículas del suelo, el cual entra en un proceso de degradación por endurecimiento. El resultado final puede llegar a ser una región completamente desertificada.

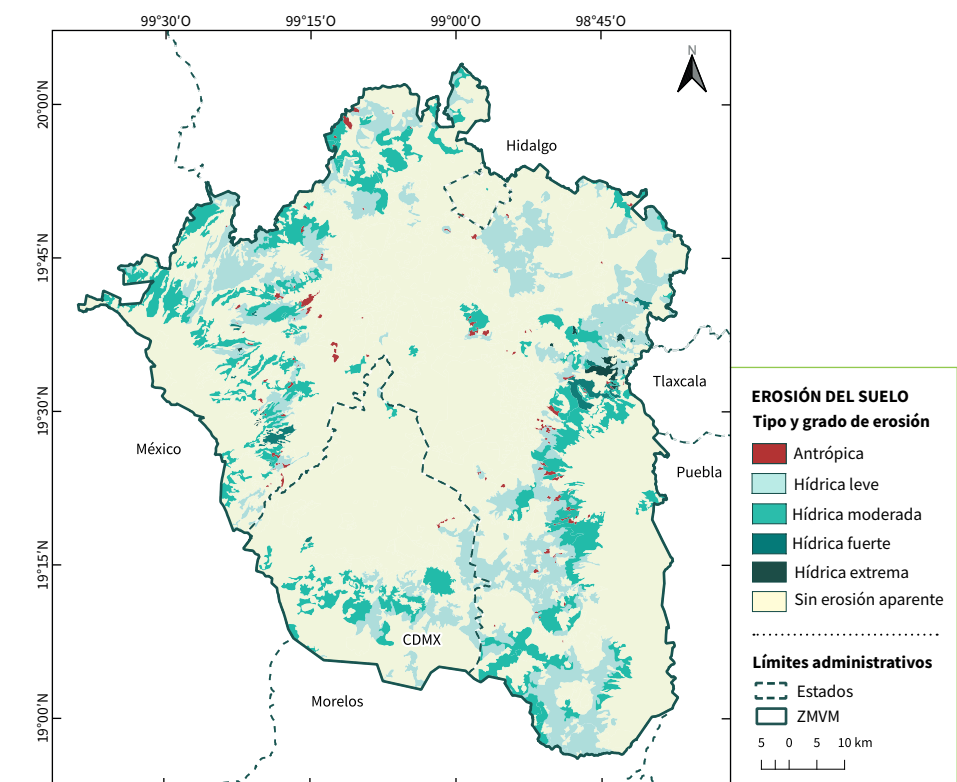


Figura 1.11 Erosión del suelo en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con el conjunto de datos de erosión de suelo, serie I (edición 2014), escala 1:250 000 (INEGI, 2020a).

La erosión eólica es una fuente natural de partículas suspendidas totales¹⁰ (PST) de origen mineral, las cuales pueden afectar a la salud y al medio ambiente. Estudios de modelación han identificado tres zonas en la ZMVM donde la erosión eólica puede derivar en la suspensión de partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) en el aire ambiente: el lago de Texcoco, el cual históricamente se ha considerado la fuente erosiva principal de partículas en la región (Jáuregui, 1989; López, Villaseñor, Quintanar, & Mora, 1970), y las zonas agrícolas al norte de la ZMVM y entre Chalco y Tenango del Aire (Díaz-Niğenda *et al.*, 2010; Sheinbaum Pardo, Jazcilevich Diamant, Siebe Grabach, & García, 2014). La región

Usos de suelo y vegetación

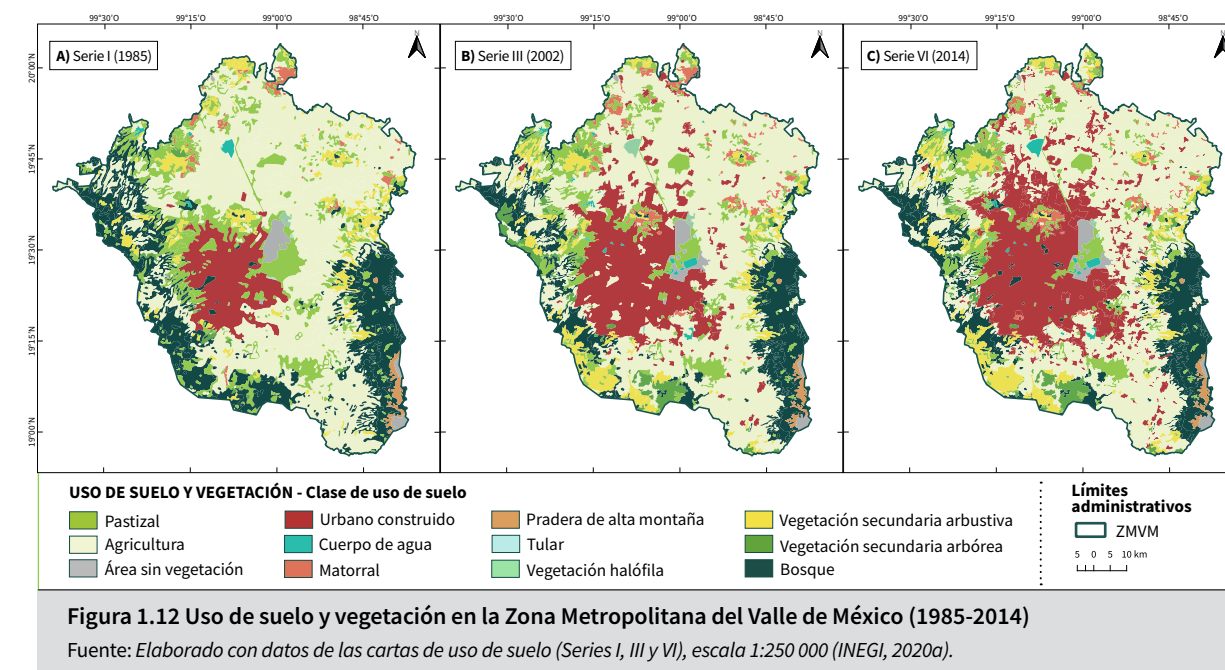
Se realizó un análisis comparativo de las cartas de uso de suelo y vegetación de tres años base: 1985 (Serie I del INEGI), 2002 (Serie III del INEGI) y 2014 (Serie VI del INEGI). En el periodo 1985-2014 la vegetación natural disminuyó principalmente por la conversión a zonas agropecuarias y por el crecimiento de la mancha urbana. El área ocupada por localidades urbanas casi se triplicó, con un crecimiento del 184.3% que afectó principalmente a pastizales y zonas agrícolas, mientras que las zonas agropecuarias se redujeron en un 15.5%. Se observa que los procesos de cambio de uso de suelo han resultado en la urbanización de zonas agrícolas ubicadas en la periferia de la mancha urbana; a su vez, se muestra un incremento de usos de suelo agrícolas en zonas que anteriormente eran forestales, reduciendo la vegetación primaria en 24.5%. En el periodo de estudio también se registró un aumento en la vegetación secundaria del 39.5%, la cual se caracteriza por formarse cuando un tipo de vegetación primaria es eliminado o alterado por diversos factores humanos o naturales. La Figura 1.12 muestra gráficamente la distribución de los usos de suelo en los tres años de estudio; en el Anexo 1.2 se indican los cambios históricos en el porcentaje de cobertura por tipo de suelo.

La causa principal de los cambios de uso de suelo y vegetación es el proceso de urbanización. Para el periodo 2011-2030 la tendencia indica un creci-

del Lago de Texcoco impacta principalmente a la población en el noreste; los modelos muestran que la magnitud de las emisiones ha disminuido notablemente gracias a intervenciones como la construcción del lago Nabor Carrillo y programas para plantar vegetación autóctona. La erosión en Tenango del Aire-Chalco afecta al sur, sureste y centro de la ZMVM, en donde la dirección e intensidad del viento puede tener un efecto significativo sobre la concentración de partículas que se alcanza en sitios específicos. La degradación del suelo por erosión eólica también se agrava por el abandono de suelos agrícolas a medida que la periferia de la mancha urbana se expande (UNAM & INECC, 2016).

miento de los asentamientos humanos sobre las tierras planas, aptas para la agricultura, las cuales dejarán de ser productivas, así como el crecimiento de vegetación secundaria por la disminución del área de bosques. Los cambios en la cubierta vegetal se relacionan directamente con la calidad del aire; la magnitud de los impactos depende del tipo de vegetación y transición de uso de suelo. La biósfera terrestre es una fuente natural de aerosoles y partículas primarias, así como de COV y NO_x, ambos precursores en la formación de aerosoles secundarios y O₃. La vegetación también actúa como un sumidero de dióxido de carbono (CO₂) y contaminantes atmosféricos a través de procesos de deposición seca: la vegetación puede funcionar como una barrera natural donde se interceptan partículas y aerosoles, mientras que absorbe partículas suspendidas y O₃ (Heald & Spracklen, 2015), lo cual puede tener efectos negativos sobre la vegetación (Calfapietra *et al.*, 2007; Lombardozzi, Sparks, Bonan, & Levis, 2012).

Además de impactar en la concentración en el aire ambiente de O₃ y partículas suspendidas, los cambios de uso de suelo modifican el ciclo biogeoquímico del nitrógeno y generan emisiones tanto de NO_x como de amoníaco (NH₃). Se estima que a nivel global, el 15% de las emisiones de nitrógeno provienen de incendios forestales, mientras que un 10-20% proviene de procesos microbiológicos que ocurren en el suelo. El uso de fertilizantes para la



agricultura es otro factor que incrementa las emisiones de precursores de partículas suspendidas como los NO_x y el NH₃ (Heald & Spracklen, 2015).

Finalmente, los cambios de uso de suelo y las emisiones asociadas se ven afectadas por el cambio climático y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). En primer lugar, se espera que el cambio climático modifique procesos naturales de cambio de uso de suelo, como los incendios forestales, las infestaciones por insectos y las sucesiones ecológicas. La “fertilización con dióxido de carbono” describe el proceso por el cual la densidad y productividad de la vegetación incrementa de manera proporcional a la concentración de CO₂ en la atmósfera (Drake, González-Meler, & Long, 1997). Esto provoca un aumento en las emisiones biogénicas de COV como el isopreno y el monoterpeno, así como en la formación de aerosoles secundarios orgánicos; no obstante, otros estudios también han demostrado que niveles elevados de CO₂ pueden inhibir la producción vegetal de isopreno (Possell & Hewitt, 2011). El isopreno, junto con el metano (CH₄), es uno de los flujos más importantes de carbono orgánico reactivo hacia la atmósfera; este compuesto juega un papel fundamental en la formación de O₃ (Wang & Shallcross, 2000) y aerosoles secundarios (Kroll, Ng, Murphy, Flagan, & Seinfeld, 2006).

En el territorio de la ZMVM es posible encontrar distintos ecosistemas y tipos de vegetación. Como se ha expuesto anteriormente, la vegetación funge como una barrera natural que intercepta partículas suspendidas en la atmósfera, además de que interviene en procesos de deposición seca de contaminantes. No obstante, esto puede repercutir negativamente en el desarrollo vegetal. Se ha documentado que la concentración elevada de contaminantes en la atmósfera perjudica a la vegetación, con posibles implicaciones en el crecimiento forestal y los rendimientos de los cultivos (Heald & Spracklen, 2015). Las partículas interceptadas por los árboles a menudo son resuspendidas hacia la atmósfera, son lavadas por la lluvia o caen al suelo junto con hojas y ramas, por lo que se puede decir que la vegetación también actúa como un sitio de retención temporal para muchas partículas atmosféricas (Nowak, Crane, & Stevens, 2006).

Para establecer las particularidades y atributos de los ecosistemas, existen diversos criterios e indicadores que permiten caracterizarlos. Frecuentemente se utiliza el reconocimiento de comunidades vegetales y criterios primordialmente fisionómicos, derivados del biotipo de las especies dominantes y determinados por factores climatológicos, geológicos y edafológicos (Miranda & Hernández, 1963; Rzedowski, 2006).

¹⁰ Partículas con un diámetro aerodinámico menor a 100 micrómetros (µm), medidas con un muestreador de alto volumen.

A nivel mundial se emplea la categorización “ecorregional”, la cual refleja la distribución de una amplia gama de fauna y flora en todo el planeta, clasificada por regiones biogeográficas y biomas (Olson *et al.*, 2001). Las ecorregiones proveen un marco para la identificación de hábitats representativos y conjuntos de especies; estas son áreas que contienen un conjunto geográficamente distintivo de comunidades naturales, así como condiciones ambientales similares, que interactúan ecológicamente de manera determinante para su subsistencia prolongada. Esta caracterización fomenta un enfoque ecológico común a escala regional e incluye unidades que se subdividen uti-

lizando criterios ambientales, por tipo de vegetación, rasgos fisiográficos como sierras o cuencas, y elementos del clima como humedad y temperatura (Comisión para la Cooperación Ambiental, 1997). Las unidades del nivel ecorregional I permiten distinguir las principales áreas ecológicas a escala global e intercontinental; el nivel II proporciona mayor detalle en la descripción de áreas ecológicas en México, en tanto que el nivel III describe áreas ecológicas más pequeñas, con características regionales y locales más precisas. En la ZMVM se identifican tres ecorregiones de nivel III (ver Figura 1.13):

Lomeríos y Sierras con Bosques de Coníferas, Encino y Mixtos del Centro de México:	Se extiende a lo largo del Eje Neovolcánico. Es la ecorregión predominante en la ZMVM, abarcando 57.7% de la superficie total. La vegetación principal corresponde a extensos bosques de pino, encino, oyamel y mixtos (pino-encino). Esta ecorregión abarca la región sur de la ZMVM, así como las zonas de mayor altitud en los sistemas de sierras y lomeríos al oriente y poniente.
Planicies y Piedemontes del Interior con Pastizal y Matorral Xerófilo:	Se localiza al norte y centro de la ZMVM y ocupa 40.1% del territorio. La vegetación predominante en esta ecorregión son sistemas extensos de pastizales inducidos y halófilos, así como vegetación xerófila crasicauale. Sin embargo, se ha modificado la vegetación natural en las últimas décadas, debido a los cambios de uso de suelo forestal a zonas agrícolas.
Lomeríos y Planicies del Interior con Matorral Xerófilo y Bosque Bajo de Mezquite:	En esta ecorregión prevalecen los matorrales xerófilos-crasicaules y bosques de encino. Ocupa una pequeña porción de la ZMVM (2.2%) en el extremo norte que limita con el estado de Hidalgo.

La cobertura vegetal en la ZMVM está conformada principalmente por tres tipos de bosque (pino, oyamel y encino), un tipo de matorral (crasicauale) y vegetación secundaria arbórea y arbustiva. Los bosques cubren 14.4% de los 7866.1 km² de la ZMVM y se distribuyen principalmente al este y suroeste, en las zonas montañosas. Los matorrales predominan al norte y noreste de la región, en donde el clima se vuelve más seco, cubriendo 1.9% de la superficie total. Aproximadamente 8.3% del territorio de la ZMVM corresponde a vegetación secundaria arbustiva y arbórea que ha reemplazado a la vegetación primaria por diversos factores antropogénicos o naturales. Finalmente, en la ZMVM también es posible encontrar pastizales naturales e inducidos (1.3% y 9.2% de la superficie total, res-

pectivamente), así como a otras comunidades vegetales en regiones específicas; ejemplo de esto es la pradera de alta montaña en las inmediaciones de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl. Para mayor información sobre las características y extensión de los distintos tipos de vegetación en la zona de estudio, consultar el Anexo 1.2.

La ZMVM posee una extensa biodiversidad de flora y fauna, misma que se ve afectada por la degradación de sus recursos por diferentes procesos. Algunos ejemplos de deterioro ambiental son la deforestación, cambios de uso de suelo en zonas forestales y el manejo inadecuado de los bosques, lo cual favorece la propagación de plagas y enfermedades, incendios forestales, tala ilegal, con-

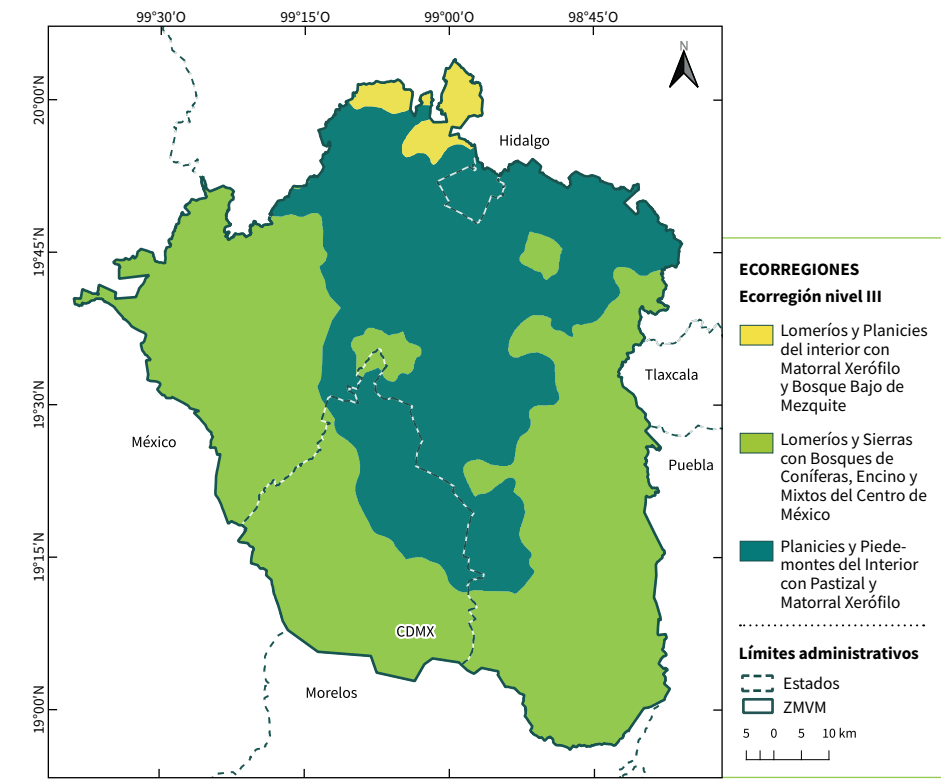


Figura 1.13 Ecorregiones de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con datos de la Comisión para la Cooperación Ambiental (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2011).

taminación ambiental y pastoreo excesivo, entre otros (SEDEMA, 2007).

La flora y fauna que habita en la Ciudad de México representa una gran riqueza natural. Se tienen registradas 2254 especies de fauna, entre gusanos, moluscos, artrópodos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos, y 1607 especies de plantas, de las cuales algunas son endémicas de la región (SEDEMA, 2015a). El municipio de Tizayuca, en el estado de Hidalgo, contiene una amplia riqueza vegetal, compuesta principalmente por maguey, nopal, cactus y arbustos leñosos (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2002).

Por su parte, la cubierta vegetal del territorio del Estado de México se encuentra muy fragmentada, particularmente en el Valle de México, donde las actividades humanas han reemplazado casi por completo a los ecosistemas originales, dejando los principales macizos relegados a las

zonas de topografía accidentada. El Estado de México cuenta con un registro de 6104 especies de flora, 830 especies de anfibios y reptiles, 134 especies de mamíferos y 535 especies de aves (SMAGEM, 2017).

Dentro de los diferentes niveles de gobierno y de la sociedad civil organizada se han realizado grandes esfuerzos que pretenden conservar la biodiversidad que integra la ZMVM. Estos se manifiestan en la conservación de miles de hectáreas con vegetación original de distintos tipos y con un gran valor paisajístico y estético, así como un valor ambiental por la prestación de servicios ecosistémicos (SMAGEM, 2018a). Algunos ejemplos de estos servicios son la captación y filtración de agua, la mitigación de los efectos del cambio climático, la generación de oxígeno y asimilación de diversos contaminantes, la protección de la biodiversidad, la retención de suelo, el refugio de fauna silvestre y la belleza escénica.

Incendios forestales

Los incendios forestales son la propagación libre y no programada de fuego sobre la vegetación en bosques, selvas y zonas áridas y semiáridas (CONAFOR, 2014). Los más comunes son incendios superficiales que se caracterizan por propagarse de forma horizontal sobre el terreno, con una altura máxima de 1.5 metros. También existen los incendios copa o aéreos y los subterráneos, que son poco comunes, pero más difíciles de controlar.

La magnitud de un incendio forestal dependerá de las condiciones meteorológicas, el tipo de vegetación, el contenido de humedad y la cantidad de material vegetal –el combustible– por unidad de área. Los incendios forestales tienen como consecuencia la pérdida de suelo y el aumento de contaminantes como CO₂, monóxido de carbono (CO), NO_x y partículas suspendidas en la atmósfera; la dirección y los patrones de viento determinarán el transporte atmosférico de estos contaminantes y las afectaciones sobre poblaciones específicas (Bravo, Sosa, Sánchez, Jaimes, & Saavedra, 2002). Además, la disminución de vegetación causada por los incendios expone al suelo a la erosión por viento y lluvia (CENAPRED, s/f).

Los incendios forestales son causados por acciones humanas o por fenómenos naturales, como tormentas eléctricas o erupciones volcánicas. El 99% de los incendios forestales son antropogénicos; algunas causas son las actividades agropecuarias, aunque también pueden acontecer por la quema de basura, fogatas, colillas de cigarro, limpieza de vías en carreteras y al uso del fuego en otras actividades productivas dentro de áreas forestales (CONAFOR, 2014).

En la ZMVM, la temporada de incendios abarca principalmente los meses de abril y mayo, durante la época seca-caliente. La Ciudad de México y

el Estado de México se encuentran dentro de las primeras cinco entidades con mayor número de incendios forestales en el país, destacando este último como el primer lugar (CONAFOR, 2019). En la ZMVM se registraron 973 incendios en el 2018, 590 en la Ciudad de México y 383 en los municipios conurbados del Estado de México, de los cuales el 63.7% fueron incendios forestales. La superficie siniestrada total fue de 4641.5 hectáreas (ha) y, en proporción al número de incendios, el Estado de México se vio más afectado (2299.7 ha, equivalente al 49.5%). Las demarcaciones que registraron la mayor área siniestrada fueron Milpa Alta y Tlalpan en la Ciudad de México, seguidas por los municipios de Tlalmanalco, Texcoco e Ixtapaluca en el Estado de México. La alcaldía Cuajimalpa y los municipios de Axapusco, Nicolás Romero, Otumba y Villa del Carbón también registraron afectaciones importantes. En el año de análisis no se registraron afectaciones en Tizayuca, Hidalgo. Se destaca que las causas principales de los incendios en el Estado de México son las actividades agropecuarias, en tanto que la Ciudad de México registra un importante número de incendios asociados a actividades vandálicas (CONAFOR, 2019).

Los incendios forestales en la región central del país impactan la calidad del aire en la ZMVM. Los procesos de transporte transfronterizo de contaminantes hacen que los incendios forestales en otras regiones de México también contribuyan al deterioro de la calidad del aire en la metrópoli. Ejemplo de ello sucedió en mayo de 2019, cuando los incendios en la región centro y sur del país, combinados con patrones climáticos desfavorables, intensificaron la concentración de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) en la ZMVM, lo que derivó en la activación de una contingencia ambiental atmosférica extraordinaria.

1.2.5 Áreas naturales protegidas

La principal función de un Área Natural Protegida (ANP) es la protección y conservación de recursos naturales de importancia especial, ya sean especies de fauna o flora que se encuentran catalogados bajo algún estatus de riesgo o bien ecosistemas representativos a nivel local. En materia de calidad del aire, la cobertura arbórea presente en estas zonas contribuye a la remoción de partículas suspendidas en el aire y a la absorción de ciertos contaminantes a través de procesos de deposición seca, aunque también contribuye a la emisión de COV biogénicos.

Más del 23% de la ZMVM se encuentra bajo algún estatus de protección como ANP (ver Figura 1.14). En primera instancia, las superficies decretadas como ANP de competencia federal que se ubican

dentro de los límites administrativos de la ZMVM, ya sea completa o parcialmente, suman un total de 486.6 km²; de esta área, el 73.1% se ubica dentro de la zona de estudio. En total se cuentan doce Parques Nacionales: siete en la Ciudad de México, cuatro en el Estado de México y uno compartido por ambas entidades. Se destaca al Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, localizado al oriente del Estado de México, como el ANP de competencia federal más extensa en la región (CONANP, 2019).

En lo que se refiere a áreas protegidas de competencia local, en la Ciudad de México las ANP estatales cubren 148.6 km² y se distribuyen a lo largo de 15 unidades clasificadas bajo distintas categorías¹¹: cuatro Zonas de Conservación Ecológica,

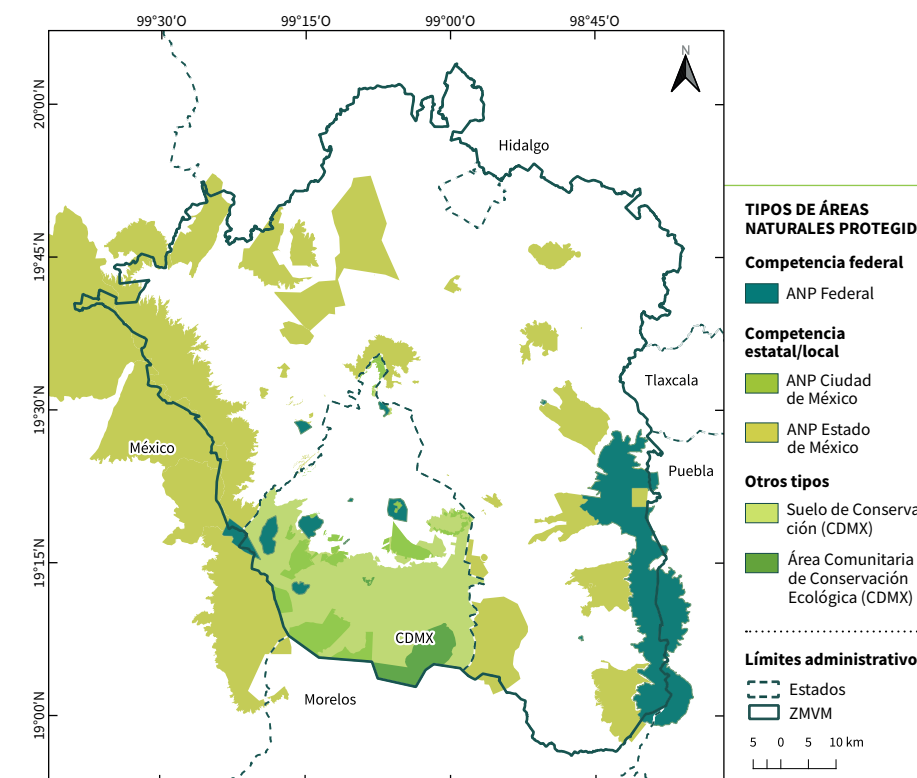


Figura 1.14 Áreas Naturales Protegidas en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con información geoespacial de las Áreas Naturales Protegidas administradas por la SEDEMA (SEDEMA, 2019b), la CEPANAF (CEPANAF, 2020) y la CONANP (CONANP, 2019).

¹¹ El ANP Sierra de Santa Catarina participa en dos categorías distintas, por lo que en ocasiones se contabiliza como dos ANP, dando un total de 16 áreas de competencia estatal en la Ciudad de México.

una Zona de Protección Hidrológica y Ecológica, dos Zonas Ecológicas y Culturales, cuatro Reservas Ecológicas Comunitarias y cinco Zonas Sujetas a Conservación Ecológica (SEDEMA, 2020a). Además, se tienen dos Áreas Comunitarias de Conservación Ecológica que cubren 76.9 km² (SEDEMA, 2019b) al sur de la Ciudad de México, mientras que más de la mitad del territorio (872.9 km²) de la entidad se clasifica como suelo de conservación (SEDEMA, 2020d).

En los municipios del Estado de México que forman parte de la zona metropolitana, las ANP de competencia estatal o local abarcan un total de 1264.0 km² e incluyen Parques Estatales, Parques Municipales, Parques Urbanos, Reservas Ecológicas Estatales y Santuarios del Agua (CEPANAF, 2020).

Regiones prioritarias para la conservación

La identificación de regiones prioritarias para la conservación de la biodiversidad en México es el resultado de diversas iniciativas auspiciadas por instituciones gubernamentales y no gubernamentales (Arriaga Cabrera, Aguilar, & Espinoza, 2009). Desde 1997, estas iniciativas concentran esfuerzos de investigación y conservación de la biodiversidad, e incluyen las Regiones Terrestres Prioritarias, las Regiones Hidrológicas Prioritarias, las Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA) y los sitios Ramsar (Humedales de Importancia Internacional, especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas).

Las Regiones Terrestres Prioritarias incluyen sitios con un alto valor de biodiversidad en los ambientes terrestres del país, determinados por criterios biológicos, criterios de amenaza para el mantenimiento de la biodiversidad y criterios de oportunidad para su conservación (Arriaga Cabrera *et al.*, 2009). Dentro de la ZMVM se ubican dos regiones de este tipo, el Ajusco-Chichinautzin, al sur de la Ciudad de México, y la Sierra Nevada, al sureste del Estado de México; ambos suman una superficie total de 1099.1 km² (CONABIO, 2017).

Las áreas de valor ambiental (AVA) son zonas en donde los ambientes originales han sido modificados por actividades antropogénicas y requieren ser restauradas o preservadas, en función de que aún mantienen ciertas características biofísicas y escénicas, las cuales les permiten contribuir a mantener la calidad ambiental de la región. En la Ciudad de México, bajo la categoría de AVA de Bosque Urbano, se tienen las siguientes: el Bosque de Nativitas, en la alcaldía de Xochimilco; el Bosque San Luis Tlaxialtemalco, en la alcaldía Cuauhtémoc; el Bosque de Chapultepec, en la alcaldía Miguel Hidalgo; el Bosque de San Juan de Aragón, en la alcaldía Gustavo A. Madero; y el Cerro Zacatépetl, en Coyoacán. En conjunto, las AVA abarcan un total de 9.0 km² (SEDEMA, 2019a).

Las AICA promueven la formación de una red de sitios importantes para el mantenimiento a largo plazo de las poblaciones de ornitofauna en todo el mundo. Dentro de la ZMVM se localizan cuatro AICA: la Ciénega de Tláhuac en la frontera este de la Ciudad de México con el Estado de México; la región denominada “Sur del Valle de México”, que cubre la sierra del Ajusco-Chichinautzin; los volcanes Iztaccíhuatl-Popocatepetl, y el Lago de Texcoco en el Estado de México. Estas cuatro zonas cubren una superficie de 1182.9 km² (CONABIO, 2017).

Debido a su valor ecológico excepcional, en la Ciudad de México se une a la lista internacional de sitios Ramsar la “Zona Lacustre Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”, ubicada en el centro-sureste de la ZMVM. Este sitio abarca una superficie de 26.1 km² (CONABIO & SEDEMA, 2016) y su importancia, en términos de biodiversidad, está determinada por la flora y fauna acuática y terrestre que en ella habita. Se destaca la presencia de algunas especies vulnerables y de distribución restringida como el ajolote neoténico (*Ambystoma mexicanum*), además de funcionar como zona de alimentación y reproducción de peces y aves (Aranza Sánchez, 2004).

1.3 Cuenca atmosférica de la ZMVM

Una cuenca atmosférica es un espacio geográfico delimitado parcial o totalmente por características fisiográficas (por ejemplo, elevaciones montañosas), factores climatológicos u otros atributos naturales, el cual es ocupado por un volumen de aire definido con características similares. Este concepto se ha concebido tradicionalmente con base en rasgos geográficos como los valles y las serranías. De esta manera, una cuenca será afectada principalmente por emisiones de origen antropogénico y natural dentro del área de flujo de la misma. No obstante, para la definición de una cuenca, en específico con el objetivo de aplicar medidas tendientes a mejorar la calidad del aire dentro de ella, es necesario considerar los límites en la capacidad de actuación de los entes reguladores de la gestión de la calidad del aire; por esta razón, la definición de una cuenca también obedece a límites administrativos metropolitanos, estatales o municipales. El estudio y gestión de la calidad del aire en la ZMVM, desde una perspectiva de cuenca atmosférica, es prioritario dado el tamaño de los centros urbanos y la intensidad energética y productiva de las actividades industriales en la región.

La definición de una cuenca atmosférica se valida a través de análisis de patrones de viento, cálculos de divergencia y estudios de intercambio de partículas. Como se ha expuesto anteriormente, en la ZMVM, los sistemas orográficos alrededor del valle central actúan como una barrera natural que limita la dispersión de contaminantes emitidos dentro de la cuenca; a su vez, fenómenos meteorológicos de gran escala también influyen en la circulación del aire y generan condiciones de estabilidad e inestabilidad

atmosférica que inhiben o favorecen, respectivamente, la dispersión de los contaminantes. En términos físicos, la cuenca atmosférica de la ZMVM está delimitada al sur por la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, al oeste por la Sierra de las Cruces y al oriente por la Sierra Nevada; al norte su delimitación es más difusa pues los intercambios de parcelas de aire se extienden hasta el estado de Hidalgo (UNAM & INECC, 2016).

Diferentes estudios a escala regional y a nivel de cuenca han permitido caracterizar la circulación del viento en la ZMVM, en específico durante las campañas de medición MCMA-2003 (de Foy *et al.*, 2005) y MILAGRO (de Foy *et al.*, 2008). La Figura 1.15 muestra seis patrones de flujo meteorológicos identificados durante estas campañas. Los eventos de tipo venteo-sur se asocian a vientos fuertes que soplan de norte a sur, generando condiciones despejadas y bajos niveles de contaminación. Los días clasificados como O₃-sur presentan tiempos de residencia prolongados por la formación de una zona de convergencia este-oeste que promueve concentraciones elevadas de O₃ en el sur de la ciudad. En contraste, los eventos O₃-norte se caracterizan por vientos del suroeste más fuertes, los cuales generan mejores condiciones de ventilación; en estos casos, el pico de O₃ ocurre al norte. Los eventos de frente frío traen consigo aire húmedo proveniente de la costa del Golfo de México que, cuando se combinan con vientos débiles del oeste, favorecen la convección del aire y precipitación durante las tardes. Este último fenómeno se divide en días donde la convección ocurre más al sur de la ciudad (convección-sur), y en días donde se presenta al norte (convección-norte) (de Foy *et al.*, 2008).

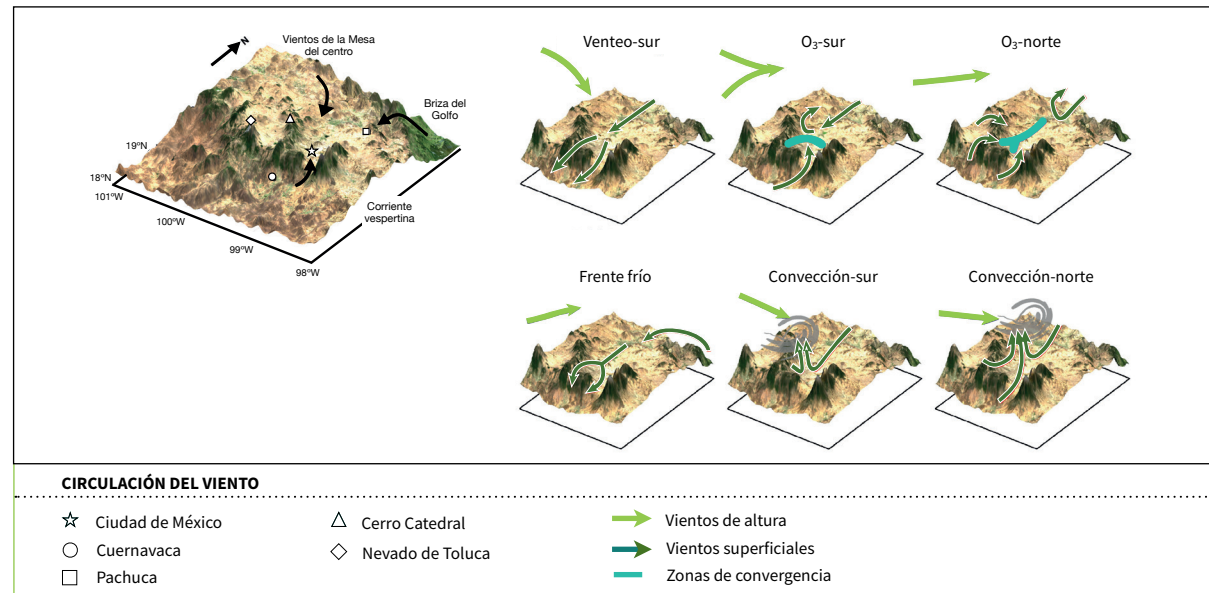


Figura 1.15 Modelo conceptual de la circulación del viento en la cuenca de la Zona Metropolitana del Valle de México durante las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO

Fuente: *Estudios de circulación de viento en la ZMVM (de Foy et al., 2005, 2008).*

Otro factor por considerar es el transporte de contaminantes entre cuencas. Recientemente, el diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México, elaborado por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en cooperación con el INECC (UNAM & INECC, 2016), resumió los hallazgos principales de campañas de monitoreo en cuencas vecinas a la cuenca atmosférica del Valle de México y en sitios de intercambio entre cuencas (García-Yee *et al.*, 2017; Salcedo *et al.*, 2012). Estos estudios demuestran el transporte de masas de aire entre el Valle de México y los Valles de Cuernavaca-Cuatla, el Valle de Toluca, la cuenca atmosférica de Puebla-Tlaxcala y las cuencas de Pachuca y Tula.

Los resultados de los estudios antes citados muestran que la cuenca atmosférica de la ZMVM exporta partículas y parcelas (o masas) de aire hacia el norte (Estado de México e Hidalgo) entre enero y marzo; hacia el estado de Morelos de julio a diciembre; hacia el este del Estado de México (Valle de Toluca) de septiembre a diciembre; y en mayo permanecen en el Valle de México y zonas aledañas (UNAM & INECC, 2016).

A su vez, la cuenca atmosférica de la ZMVM recibe emisiones y parcelas o masas de aire de las cuencas aledañas:

- Los valles de Cuernavaca y Cuatla exportan hacia la ZMVM a través de la Sierra del Ajusco-Chichinautzin y el Paso de Tenango del Aire.
- Pachuca exporta hacia el Estado de México a través del corredor Texcoco-Amecameca y Ozumba, principalmente entre junio y diciembre.
- Puebla-Tlaxcala exporta hacia el Valle de México a través del Paso de Tenango del Aire entre junio y septiembre.

La Megalópolis es una gran concentración urbana que se encuentra en la región centro de México, y está conformada por la Ciudad de México, el Estado de México y los estados de Hidalgo, Puebla, Morelos, Tlaxcala y Querétaro (CAME, 2018a; SEMARNAT *et al.*, 2017). En ella convergen 11 cuencas atmosféricas (ver Figura 1.16) cuya interacción determina la circulación de los vientos, el transporte transfronterizo de contaminantes y su subsecuente impacto sobre la población.

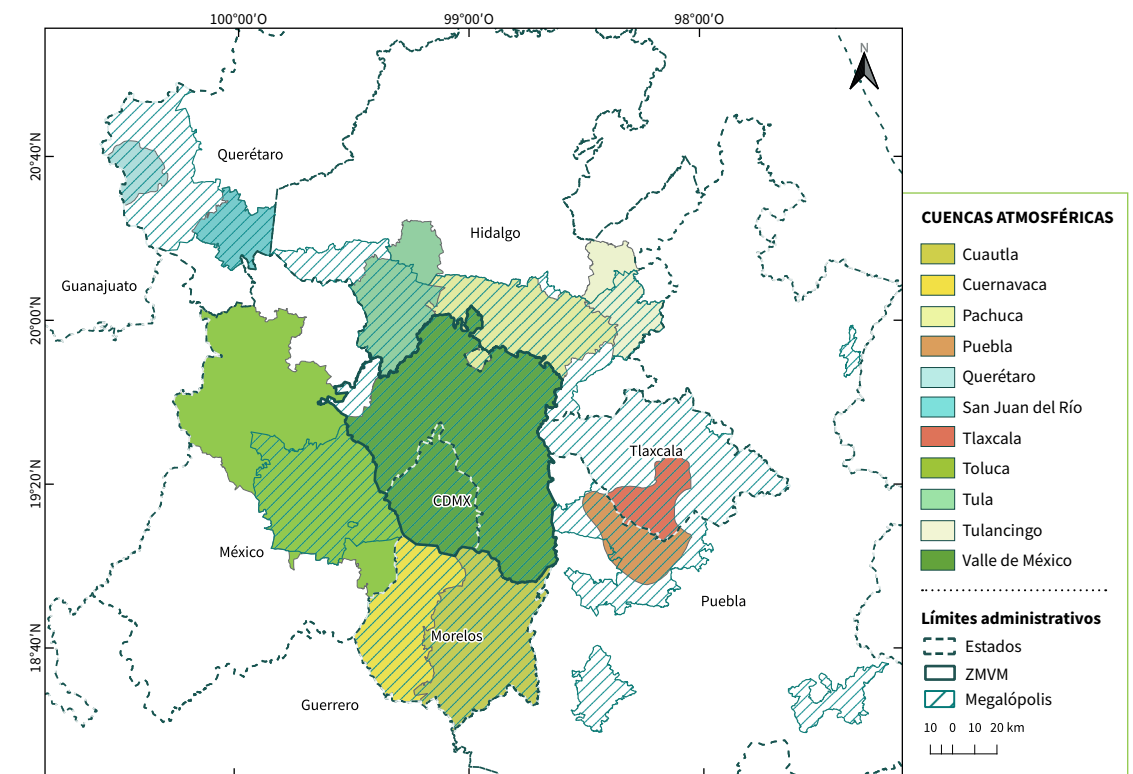


Figura 1.16 Cuencas atmosféricas de la Megalópolis

Fuente: *Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME, 2018a).*

La Megalópolis ha tenido un crecimiento acelerado caracterizado por la reconfiguración de procesos industriales hacia zonas periurbanas del Valle de México, la formación de “ciudades secundarias” y la generación de flujos continuos de personas entre las principales ciudades de la región y las ciudades secundarias, así como flujos semi-continuos de bienes y mercancías. Estas actividades inciden a su vez en el volumen y distribución espacial de las emisiones dentro de la Megalópolis, en donde la cuenca del Valle de México es la más grande, tanto en extensión territorial como en el tamaño de su población y la magnitud de sus emisiones contaminantes (CAME, 2018a).

El transporte transfronterizo de contaminantes entre cuencas en el centro de México tiene un impacto significativo en la calidad del aire. Diversos estudios basados en modelos, simulaciones, sensores remotos y comparaciones con mediciones *in situ* muestran cómo las emisiones en la

ZMVM influyen en la calidad del aire de cuencas adyacentes, así como los impactos de emisiones que ocurren fuera de la cuenca del Valle de México, pero que contribuyen a incrementar los niveles locales de concentración de contaminantes. Por ejemplo, algunos estudios sugieren que la refinera de Tula aporta del 10 al 28% de la concentración de SO₂ en ciertas regiones de la ZMVM (Almanza, Molina, & Sosa, 2012). Por su parte, las emisiones dentro de la ZMVM tienen impactos discernibles en la calidad del aire y la actividad fotoquímica regional, contribuyendo con 10 al 30% de las emisiones de CO y NO_x en un radio de 200 km, aunque los efectos se pueden extender hasta 900 km (Mena-Carrasco *et al.*, 2009). Un ejemplo más es el estudio de García-Yee, donde se demuestra el intercambio de masas de aire entre Cuatla y la ZMVM, a través del paso de Tenango del Aire, el cual implica un flujo neto de masas de aire ricas en O₃ (+10 ppb) hacia la metrópoli (García-Yee *et al.*, 2017).

El transporte transfronterizo de contaminantes no se limita únicamente a las emisiones cotidianas. Cuando ocurren eventos extraordinarios dentro o fuera de la cuenca del Valle de México, y en caso de que las condiciones meteorológicas lo favorezcan, masas de aire con concentraciones inusuales de contaminantes pueden ser transportadas grandes distancias. Ejemplo de esto es el evento ocurrido

el 3 de mayo de 2018, en el que una fuga de gasolina de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en Acolman, Estado de México, incrementó la concentración de COV. La masa de aire fue transportada desde el noreste de la ZMVM hacia el este y sur de la Ciudad de México, donde las estaciones de monitoreo registraron un concentración de O₃ con valores fuera de lo normal (CAME, 2018b).

1.4 Aspectos socioeconómicos

La ZMVM tiene un papel muy importante como centro económico, financiero, político y cultural del país (OCDE, 2015). Sin embargo, el crecimiento poblacional y la producción con modalidades de consumo no sostenibles es el agente de presión más importante sobre los ecosistemas en la región. En una ciudad, el volumen, tasa de crecimiento, estructura y distribución territorial de su población se interrelacionan de forma compleja con procesos de desarrollo económico y social; estos fenómenos son una de las múltiples causas que determinan el nivel de explotación de los recursos naturales, la generación de residuos

y la contaminación ambiental en la ZMVM, por mencionar solo algunos ejemplos de deterioro ambiental. A pesar de esto, la población humana tiene la capacidad de implementar acciones para revertir las tendencias de deterioro y conservar el medio ambiente (SEMARNAT, 2012; Velázquez Uribe, 1996).

A continuación se describen algunas de las características sociodemográficas y económicas más importantes de la ZMVM, que se relacionan directamente con el medio ambiente y la contaminación atmosférica en la región.

1.4.1 Demografía

En 2010, la ZMVM, integrada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo, contaba con una población total de 20 116 842

habitantes, equivalente al 17.9% de la población nacional (INEGI, 2013a). La Tabla 1.4 desagrega la población de la ZMVM por tipo de demarcación; se incluyen también los valores de pobla-

Tabla 1.4 Población de la Zona Metropolitana del Valle de México

Tipo de demarcación	Población (habitantes) y porcentaje respecto del total			
	Censo 2010	Encuesta Intercensal 2015	Proyección CONAPO 2018	Proyección CONAPO 2020
59 municipios del Estado de México	11 168 301 55.5%	11 854 629 56.7%	12 522 763 57.7%	12 786 856 58.3%
16 alcaldías de la Ciudad de México	8 851 080 44.0%	8 918 653 42.7%	9 041 395 41.7%	9 018 645 41.1%
Tizayuca, Hidalgo	97 461 0.5%	119 442 0.6%	130 160 0.6%	137 165 0.6%
ZMVM	20 116 842	20 892 724	21 694 318	21 942 666
México	112 336 538	119 530 753	125 327 797	127 792 286

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2013a), la Encuesta Intercensal 2015 (INEGI, 2015) y proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b).

ción actualizados con los datos reportados en la Encuesta Intercensal 2015 (INEGI, 2015) y las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO) a 2018 y 2020 (CONAPO, 2013b). Los datos por municipio y alcaldía para el año 2010 se reportan en el Anexo 1.1.

En el año 2010, 12 de las 76 demarcaciones de la ZMVM tenían más de 500 mil habitantes, agrupando más de la mitad de la población de la

ZMVM; de estos entes administrativos, seis eran alcaldías de la Ciudad de México y el resto municipios del Estado de México (ver Tabla 1.5). Según datos de la Encuesta Intercensal 2015, para ese año otros dos municipios del Estado de México, Atizapán de Zaragoza y Tultitlán, habrían superado la marca del medio millón de residentes, en tanto que para 2020 la CONAPO estima que también Tecámac e Ixtapaluca rebasarían este umbral.

Tabla 1.5 Demarcaciones de la Zona Metropolitana del Valle de México con más de 500 000 habitantes

No.	Demarcación	Entidad	Población (2020)	No.	Demarcación	Entidad	Población (2020)
1	Iztapalapa	CDMX	1 815 551	9	Tlalpan	CDMX	682 234
2	Ecatepec de Morelos	EdoMex	1 707 754	10	Coyoacán	CDMX	621 952
3	Gustavo A. Madero	CDMX	1 176 967	11	Cuautitlán Izcalli	EdoMex	577 190
4	Nezahualcóyotl	EdoMex	1 135 786	12	Atizapán de Zaragoza	EdoMex	557 108
5	Naucalpan de Juárez	EdoMex	910 187	13	Tultitlán	EdoMex	556 493
6	Tlalnepantla de Baz	EdoMex	756 537	14	Ixtapaluca	EdoMex	551 034
7	Álvaro Obregón	CDMX	755 537	15	Cuauhtémoc	CDMX	548 606
8	Chimalhuacán	EdoMex	720 207	16	Tecámac	EdoMex	500 585

Fuente: Proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b).

En términos de estructura, la población de la zona metropolitana sigue la tendencia observada a nivel nacional. De las 20.12 millones de personas que habitaban en la metrópoli en 2010, 51.63% eran mujeres y 48.37% hombres. Para 2020, la CONAPO proyectaba que dichos porcentajes se mantendrían iguales. En 2010 la población en edad de 0 a 4 años correspondía al 8.25% del total, valor por debajo del promedio nacional (9.49%). Las niñas, niños y adolescentes de 5 a 14 años sumaban el 17.25%, en tanto que las personas de más de 65 años representaban el 6.22% de la población de la ZMVM. La fracción restante corresponde a la población en edad productiva (entre 15 y 64 años) con una participación del 68.28%. Para 2020, las

proyecciones indican que la población de 0 a 4 años representará el 6.80% del total, las niñas, niños y adolescentes (5 a 14 años) el 14.48% y las personas mayores de 65 años el 8.69%.

Se observa que la base de la pirámide poblacional comienza a ser más angosta en la región inferior (ver Figura 1.17), lo cual indica que la población infantil y juvenil ha reducido su peso relativo. Otro indicador que representa este mismo fenómeno es la edad mediana de la población, es decir, la edad que divide en dos mitades iguales a los residentes de la ZMVM, que en 2010 era igual a 28 años, pero que para 2020 estará entre los 30 y 34 años según las proyecciones de CONAPO.

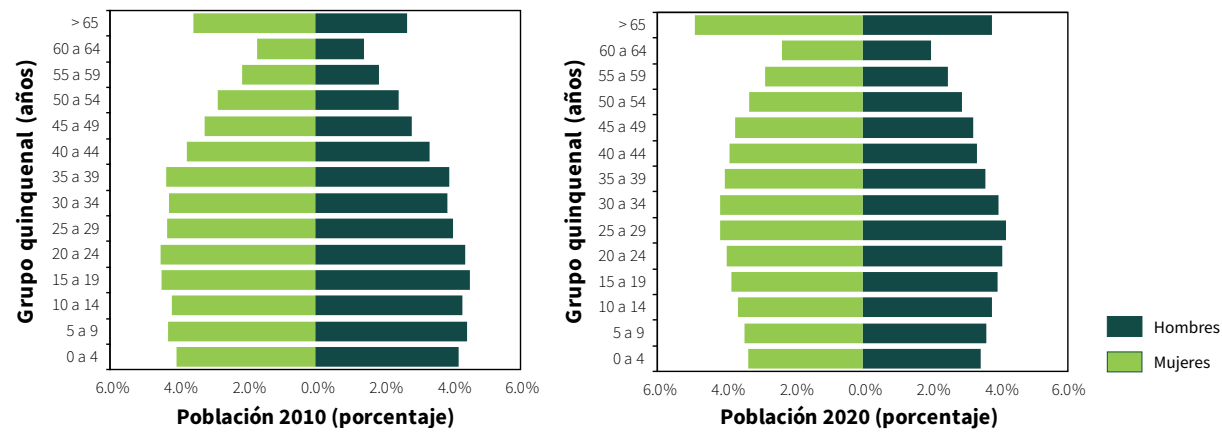


Figura 1.17 Pirámide poblacional de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2010 y proyección al 2020

Fuente: Elaborado con datos del Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2013a) y proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b).

Existe también una relación positiva entre la población en edades dependientes (niñas, niños y personas adultas mayores de 65 años) y la población productiva. La relación de dependencia muestra que en 2010 habían 46.5 personas dependientes por cada 100 productivas. Si se analizan por separado la dependencia infantil contra la dependencia de la población mayor a 65 años, los valores que se obtienen son iguales a 37.3 y 9.1 personas dependientes por cada 100 individuos entre 15 y 64 años.

De acuerdo con los datos censales más recientes (2000 – 2010), el peso relativo de la población en edad laboral se mantuvo estable, con una reduc-

ción prevista hacia 2030, como indican las pirámides poblacionales. A su vez, la proporción de la población infantil y adolescente disminuyó, y el de la población por encima de los 65 años incrementó, patrón que se espera continúe en las siguientes décadas a medida que prosigue la transición demográfica (Almejo & Téllez, 2016), en la cual la esperanza de vida va en aumento mientras que la fecundidad tiende a valores bajos (CONAPO, 2017). Se concluye que existe una tendencia al envejecimiento de la población en la ZMVM, por lo que se incrementará el peso relativo de este grupo, el cual es más vulnerable a la mala calidad del aire (en el Capítulo 6 se detalla información sobre los impactos a la salud por la contaminación atmosférica).

Distribución de la población

En 2010, 97.3% de población de la ZMVM vivía en localidades urbanas¹². Como sucede en la mayoría del país, gran parte del territorio de la zona metropolitana no está urbanizado, por lo que la mancha urbana constituía únicamente 29.3% (2302.8 km²) de la superficie total durante el ejercicio censal respectivo. Estas localidades se concentran en la mitad septentrional de la Ciudad de México y los

municipios aledaños en el Estado de México, donde la mancha urbana forma un continuo que, a medida que se acerca a las periferias de la ZMVM, comienza a fragmentarse hasta formar localidades individuales. Es así que los usos de suelo urbanos cubrían 55.2% de la Ciudad de México (825.6 km²), 23.5% de los 59 municipios mexiquenses (1477.2 km²) y 42.3% de Tizayuca, Hidalgo.

¹² El INEGI define como localidades urbanas a aquellas con una población igual o mayor a 2500 habitantes y también a todas las cabeceras municipales, aunque no alcancen este umbral.

La densidad media urbana¹³ de la ZMVM en 2010 era de 160.1 habitantes por hectárea (hab./ha), el valor más alto de todas las zonas metropolitanas del país y 47.8% por encima de la media

nacional (CONAPO *et al.*, 2018). Este indicador da cuenta del grado en que se concentra espacialmente la población urbana de una ciudad, municipio o localidad.

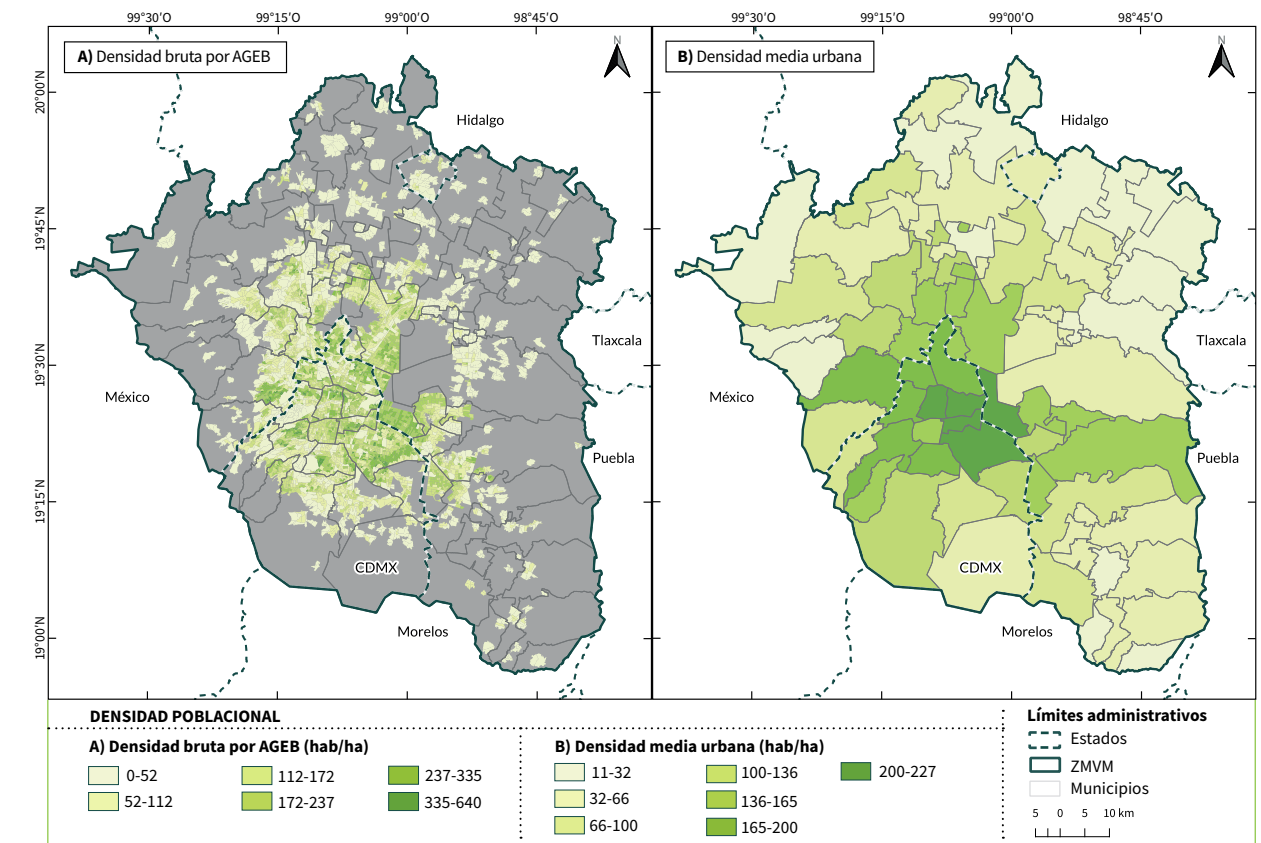


Figura 1.18 Densidad poblacional en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con datos del Censo de Población y Vivienda 2010 a nivel de AGE (INEGI, 2013a) y la Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015 (CONAPO *et al.*, 2018).

Bajo el criterio de densidad media urbana, la demarcación político-administrativa más densa es el municipio de Nezahualcóyotl, con un valor de 226.8 hab./ha, siguiendo en orden de magnitud cuatro alcaldías de la Ciudad de México: Cuauhtémoc (215.6 hab./ha), Iztapalapa (215.4 hab./ha), Iztacalco (210.4 hab./ha) y Venustiano Carranza (209.5 hab./ha). En la Figura 1.18 se muestra gráficamente la densidad de población bruta a nivel de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) que integran la mancha urbana de la

ZMVM, así como las demarcaciones de la metrópoli en función de su densidad media urbana.

En términos de densidad bruta, la ZMVM tiene aproximadamente 8500 habitantes por km². De acuerdo con las Naciones Unidas, una densidad bruta de al menos 15 000 habitantes por km² se considera apropiada para promover un crecimiento densificado, limitar la expansión urbana y maximizar el uso de suelo (UN-Habitat, 2016). En comparación, zonas metropolitanas como

¹³ La densidad media urbana se calcula a partir de la densidad bruta (población por unidad de superficie) de las AGEB que conforman una localidad, municipio o estado, ponderada por el tamaño de su población. De esta forma se toma en cuenta que en las demarcaciones habrá AGEB urbanas con una gran extensión territorial, pero con muy pocos habitantes, sobre todo en las periferias de las áreas urbanas, donde el crecimiento y la ocupación suele ser paulatino. La densidad media urbana de cada municipio de la ZMVM se reporta en el Anexo 1.1.

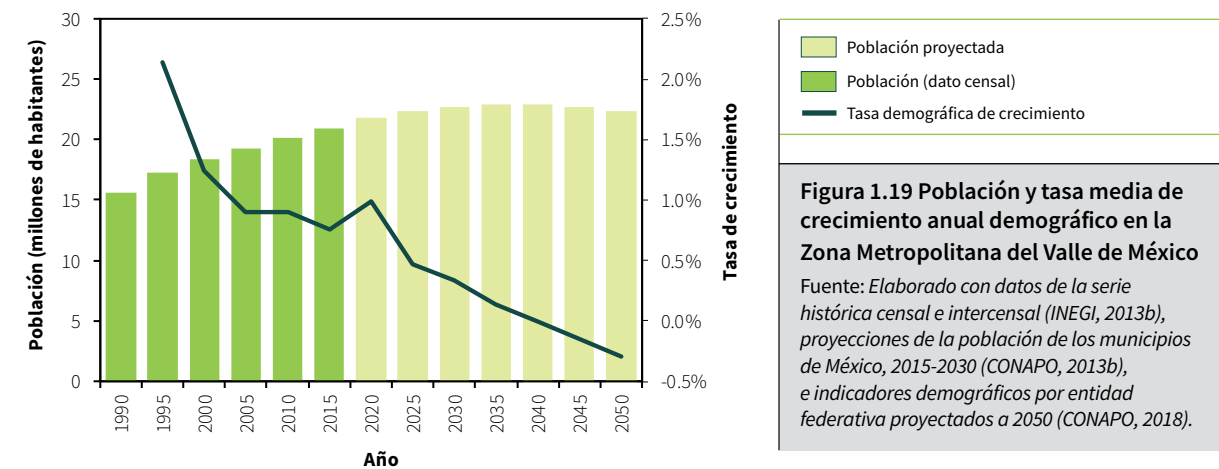
Mumbai, São Paulo, Shanghái y Nueva York, con poblaciones que rondan los 20 millones de habitantes, tienen densidades de 27 800, 9300, 5200 y 1900 habitantes por km², respectivamente. Tokio, la metrópoli más poblada con más de 35 millones de habitantes, tiene una densidad

bruta de 5400 habitantes por km², en tanto que Dhaka, Bangladesh, es el área urbana más densa en el mundo, con 40 mil habitantes por km² y una población de 13.5 millones de personas (UN-Habitat & New York University, 2016).

Dinámica de la población

El crecimiento físico de la ZMVM es un factor que presiona y degrada el medio ambiente, e incide en la vulnerabilidad y el riesgo (Almejo & Téllez, 2016). Entre 2000 y 2010, la tasa media de crecimiento anual (TMCA) de la población de la región fue de 0.90%, evidenciando una reducción en la rapidez de crecimiento de la ZMVM en comparación con la década anterior, la cual presentó una TMCA de 1.69%. No obstante, el crecimiento fue equivalente a la adición de 1.72 millones de personas. CONAPO estima que esta desaceleración

continuará en las décadas siguientes: entre 2010 y 2020, se estima que la TMCA será del 0.87%, y para el periodo 2020-2030 se reducirá a 0.40%. Para el 2030 la población de la ZMVM será de 22.83 millones de habitantes y continuará aumentando hasta alcanzar un pico cerca de 2040 (ver Figura 1.19). La desaceleración del crecimiento observada es resultado de la baja en la fecundidad, el aumento en la esperanza de vida y variaciones en la migración, que en conjunto determinan cómo es que crece la población (CONAPO, 2017).



La distribución de los distintos grupos de población en la ZMVM es heterogénea, y también lo es su crecimiento. En las décadas pasadas, la población en las zonas periféricas creció más rápido que la del núcleo urbano. La vivienda y el crecimiento poblacional se ha extendido hacia la periferia de la Ciudad de México, a sitios donde la regulación del uso del suelo y su aplicación tienden a ser menos restrictivas y la vivienda suele ser más asequible. Sin embargo, en el núcleo metropolitano se siguen concentrando fuentes de empleo, comercios y

servicios, incidiendo en las dinámicas de traslado de la población; por ejemplo, en la ZMVM más del 40% de la población cruza al menos una frontera municipal para llegar a su trabajo (OCDE, 2015). Del total de viajes originados en la zona conurbada de la ZMVM, 13.2% se dirigen hacia la Ciudad de México, mientras que 12.5% de los viajes originados en esta última tienen como destino alguno de los municipios del Estado de México o Tizayuca, Hidalgo (INEGI, 2017b). El creciente alejamiento entre los centros residenciales y los centros de empleo ha

provocado un aumento en las distancias y, por lo tanto, en el uso de medios de transporte colectivos y privados, así como de los tiempos de traslado, los kilómetros recorridos por vehículo y las emisiones netas de contaminantes. Por ejemplo, la duración promedio de un viaje en la ZMVM, independientemente de su propósito (ir al hogar, trabajo, estudio otro), es de 43 minutos (INEGI, 2017b).

La TMCA en los municipios conurbados del Estado de México en el periodo 2000-2010 fue casi cinco veces mayor que la tasa en la Ciudad de Mé-

xico. El menor crecimiento de la ciudad central en favor de los municipios periféricos es evidente al comparar las TMCA por municipio durante el periodo citado, análisis representado gráficamente en la Figura 1.20. De las 20 demarcaciones con los más altos ritmos de crecimiento poblacional, 18 pertenecen al Estado de México, incluyendo los primeros cuatro lugares: Huehuetoca, Chicoloapan, Acolman y Tecámac, con tasas entre el 7 y 10%; destaca Tizayuca, Hidalgo, en la quinta posición, y la alcaldía Milpa Alta en el número 17 con una tasa alrededor del 3%.

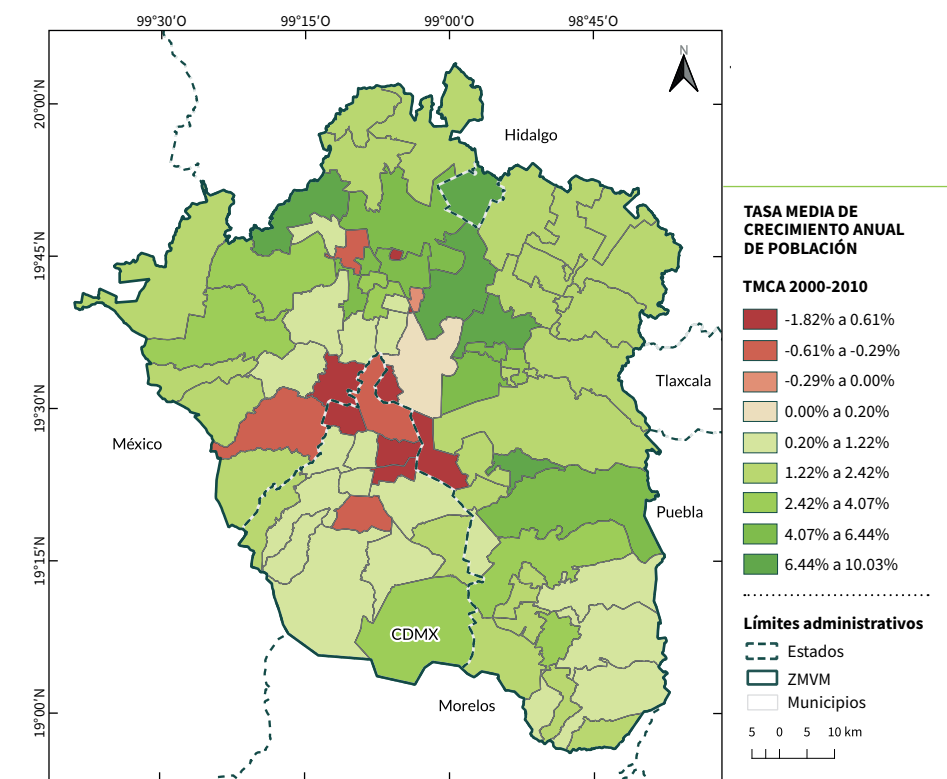


Figura 1.20 Tasa media de crecimiento anual demográfico por demarcación (2000-2010)

Fuente: Elaborado con datos de la serie histórica censal e intercensal (INEGI, 2013b).

Entre las 20 demarcaciones con menor crecimiento, 10 son alcaldías de la Ciudad de México y otros cinco son municipios del Estado de México conurbados con la Ciudad de México y que forman parte de un primer contorno urbano (Almejo & Téllez, 2016; Centro Mario Molina, 2012). Un total de 10 demarcaciones mostraron TMCA negativas, incluyendo cinco alcaldías de la Ci-

udad de México, que son, en orden de magnitud de la disminución de la población, Venustiano Carranza, Iztacalco, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero y Coyoacán. En esta misma situación se encuentran tres municipios del Estado de México con una población superior a 500 mil personas: Nezahualcóyotl, Tlalnepantla de Baz y Naucalpan de Juárez. Las proyecciones de población

indican que en el futuro estas tendencias se acrecentarán. A partir de 2025, la Ciudad de México tendrá una tasa de crecimiento demográfico negativa, mientras que en los municipios del Estado de México y Tizayuca continuarán siendo positiva, aunque con una aceleración cada vez más baja (ver Tabla 1.6).

El crecimiento poblacional y la expansión de las ciudades se asocia a la modificación o pérdida de

usos de suelo agrícolas y/o ecosistemas naturales, lo cual pone en riesgo el equilibrio ecológico. De igual forma, se reduce el área de vegetación disponible para prevenir la erosión y capturar emisiones contaminantes y partículas presentes en el aire. Estos efectos se dan de forma primordial bajo un modelo de crecimiento urbano expansivo, en el que una ciudad crece más rápido en términos de superficie que de población.

Tabla 1.6 Crecimiento demográfico en la Zona Metropolitana del Valle de México

Año	Ciudad de México		Estado de México		Tizayuca, Hidalgo		ZMVM	
	Población	TMCA	Población	TMCA	Población	TMCA	Población	TMCA
1990	8 235 744	-	7 297 758	-	30 293	-	15 563 795	-
1995	8 489 007	0.61%	8 769 175	3.74%	39 357	5.37%	17 297 539	2.13%
2000	8 605 239	0.27%	9 745 094	2.13%	46 344	3.32%	18 396 677	1.24%
2005	8 720 916	0.27%	10 462 421	1.43%	56 573	4.07%	19 239 910	0.90%
2010	8 851 080	0.30%	11 168 301	1.31%	97 461	11.49%	20 116 842	0.90%
2015	8 918 653	0.15%	11 854 629	1.20%	119 442	4.15%	20 892 724	0.76%
2020	9 018 645	0.22%	12 786 856	1.53%	137 165	2.81%	21 942 666	0.99%
2025	8 922 674	-0.21%	13 386 916	0.92%	147 884	1.52%	22 457 474	0.46%
2030	8 773 420	-0.34%	13 915 013	0.78%	145 738	-0.29%	22 834 171	0.33%

Fuente: Serie histórica censal e intercensal (INEGI, 2013b) y las proyecciones de población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b).

En el año 2010 la superficie urbana era de 2302.8 km². Si esta continúa creciendo bajo un modelo tendencial¹⁴, es decir que se repliquen los patrones de años anteriores, para el año 2030 su superficie será de 3285 km² (CAPSUS S.C., 2018a, 2018b). Esto equivale a un incremento en el área urbana del 42.6%, mientras que en el mismo periodo se estima que la población aumente únicamente en 9.3%. El creci-

miento expansivo reduce la densidad poblacional y merma la proximidad a equipamiento urbano, servicios y empleo, al mismo tiempo que aumenta el gasto promedio y los tiempos de traslado de la población; a su vez, esto genera un incremento en las emisiones de contaminantes asociadas a la movilidad poblacional. La Figura 1.21 muestra gráficamente la expansión tendencial modelada.

¹⁴ La estimación del escenario tendencial utiliza modelos estadísticos y herramientas computacionales (aprendizaje de máquinas) para simular y predecir patrones de expansión urbana. Los datos de entrada son las capas de cobertura de uso de suelo del INEGI (Serie II, III y VI) y variables explicativas que conducen o inciden en cómo se transforma la cobertura de uso de suelo, incluyendo la topografía, la distancia hacia carreteras y la distancia entre áreas urbanas. Para la topografía se retoma el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0). La distancia hacia carreteras se genera a partir de la Red Nacional de Caminos del Instituto Mexicano del Transporte, en colaboración con el INEGI. La distancia entre áreas urbanas se extrae de los polígonos correspondientes a asentamientos humanos de la capa de coberturas del suelo.

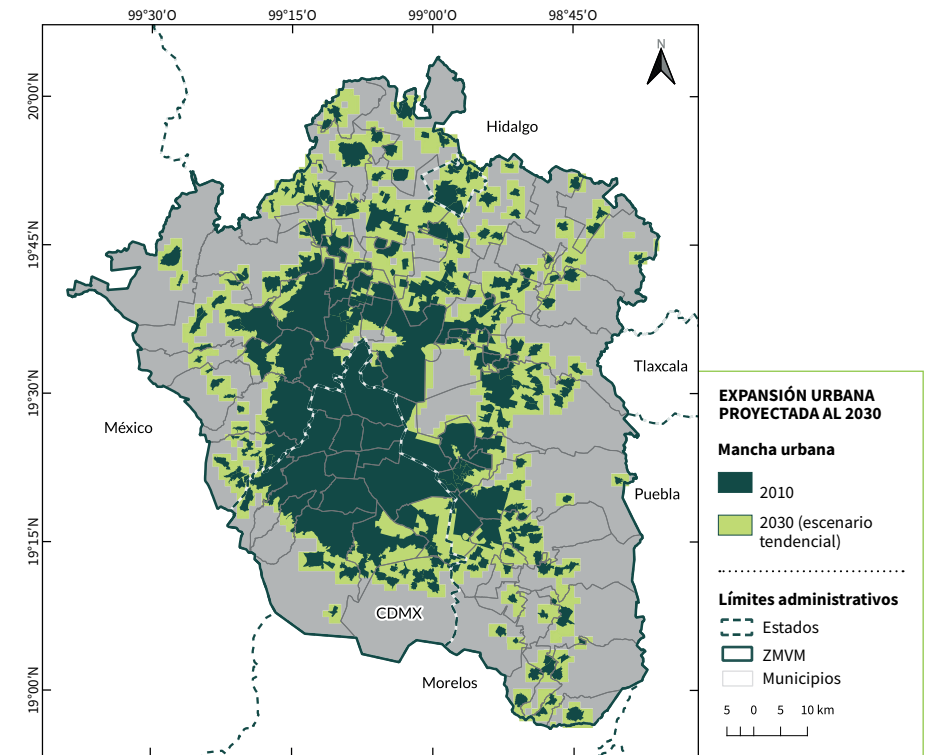


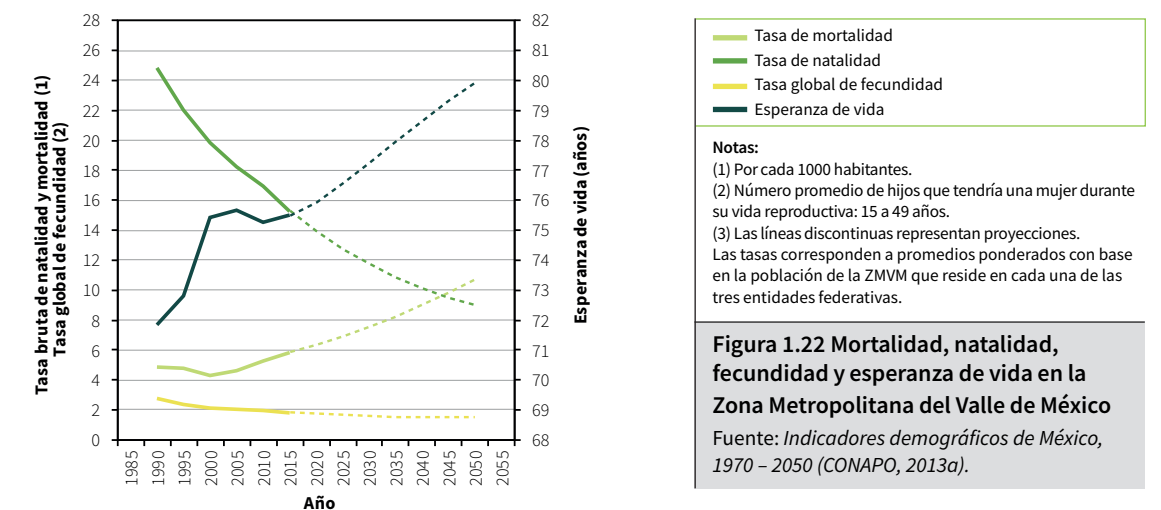
Figura 1.21 Expansión urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México proyectada a 2030

Fuente: Escenarios de crecimiento tendencial en la ZMVM (CAPSUS S.C., 2018a, 2018b).

Crecimiento natural de la población

Dentro de la ZMVM se prevé que la población continúe aumentando en las siguientes décadas (CONAPO, 2013b). Sin embargo, según proyecciones de CONAPO, el ritmo de crecimiento será cada vez menor, lo cual está asociado a la disminución de la tasa bruta de natalidad, al incremento en la esperanza de vida, la disminución de la fecundi-

dad y cambios en la tasa bruta de mortalidad de la población (ver Figura 1.22). La interacción entre estos fenómenos incide en la tasa de crecimiento natural de la ZMVM, la cual toma en cuenta el número de nacimientos menos el número total de defunciones de la población en un periodo de tiempo específico.



Notas:
 (1) Por cada 1000 habitantes.
 (2) Número promedio de hijos que tendría una mujer durante su vida reproductiva: 15 a 49 años.
 (3) Las líneas discontinuas representan proyecciones. Las tasas corresponden a promedios ponderados con base en la población de la ZMVM que reside en cada una de las tres entidades federativas.

Figura 1.22 Mortalidad, natalidad, fecundidad y esperanza de vida en la Zona Metropolitana del Valle de México
 Fuente: Indicadores demográficos de México, 1970 – 2050 (CONAPO, 2013a).

Los registros en Hidalgo, el Estado de México y la Ciudad de México indican que la tasa de crecimiento natural ha disminuido en las tres entidades, y se espera que continúe decreciendo en un futuro, según proyecciones de CONAPO. Como resultado, la población continuará incrementando a un ritmo cada vez menor, y para 2045 la tasa de

crecimiento natural en la ZMVM llegará a ser negativa, dado que se tendrán un mayor número de defunciones que de nacimientos. En el Anexo 1.3 se describen a mayor detalle los fenómenos que inciden en la tasa de crecimiento natural de la población, tales como los cambios en la natalidad, la mortalidad, la fecundidad y la esperanza de vida.

Migración

El crecimiento total de una población está dado por la variación de nacimientos, defunciones y movimientos migratorios; esto es, la suma algebraica de la tasa de crecimiento natural y la tasa de migración. En la ZMVM los fenómenos migratorios tienen una magnitud comparable con las tasas netas de natalidad y mortalidad. Debido al tamaño demográfico y geográfico de la ZMVM, así como su alta intensidad económica, hay una elevada capacidad tanto de expulsión como de atracción de población, desde y hacia la zona metropolitana, sobre todo en términos de migración y movilidad laboral. La dinámica de la región central del país continúa mostrando que en la ZMVM existe una elevada interacción e integración socioeconómica con ciudades circundantes (Romo Viramontes & Velázquez Isidro, 2018).

Hay una ausencia generalizada sobre información de flujos migratorios recogida en los censos de población antes del año 2000. Además, se atiende principalmente la migración internacional y la interestatal, dejando de lado los desplazamientos intraestatales. Sin embargo, la

Encuesta Nacional de Migración en Áreas Urbanas permite estimar la inmigración y emigración en la ZMVM desde 1965. En la Tabla 1.7 se muestra información del número de migrantes hacia y desde la ZMVM, para los quinquenios previos a los censos de población, de 1970 a 2010, así como los conteos intercensales de 2005 y 2015. En la última mitad del siglo pasado se muestra un importante decaimiento de la tasa de inmigrantes hacia la ZMVM (Partida-Bush, 2013). A partir de la década de los noventa, el saldo neto migratorio en la ZMVM es negativo, indicando que, desde entonces, han sido más los casos de emigrantes que de inmigrantes en esta zona metropolitana.

La migración intraestatal, o migración interna, también incide en la calidad del aire; los medios de transporte públicos y privados utilizados por la población migratoria para realizar viajes cotidianos incide en la emisión de contaminantes. De 2010 a 2015, más de 1.2 millones de residentes de la ZMVM reportaron un cambio de residencia entre demarcaciones que forman parte de la metrópo-

Tabla 1.7 Tasa de migración para la Zona Metropolitana del Valle de México, 1970-2015

Tasa	Tasa de migración por periodo quinquenal (migrantes por cada 1000 habitantes)						
	1965-1970	1975-1980	1985-1990	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015
Inmigración	20.8	11.3	7.3	5.9	3.3	4.3	3.0
Emigración	3.2	7.3	11.1	7.4	4.7	7.1	3.9
Saldo neto migratorio	17.6	4.0	-3.8	-1.5	-1.4	-2.8	-0.9

Fuente: Datos de Partida-Bush (2013) para el periodo 1970-2010 y de Romo Viramontes & Velázquez Isidro (2018) para el ejercicio 2010-2015.

li; esto corresponde a una tasa de 11.5 migrantes intrametropolitanos al año por cada 1000 habitantes. Asimismo, 40.3% de la población ocupada en la zona de estudio reporta trabajar en otro municipio diferente al de su residencia, por lo que entran bajo la clasificación de *commuters* (Romo Viramontes & Velázquez Isidro, 2018) que se desplazan regularmente.

En cuanto a movilidad diaria entre zonas metropolitanas circundantes, en la ZMVM trabajan aproximadamente 317 mil personas que viven fuera de esta, mientras que 212 mil habitantes se trasladan a un municipio no metropolitano para laborar. Estos pa-

trones de movilidad de población predominan en la ZMVM y la zona metropolitana de Toluca: poco menos de 42 mil personas se trasladan a trabajar a la ZMVM, mientras que 24 mil *commuters* que viven en la ZMVM y salen de esta, se dirigen a Toluca. Otros flujos importantes se detectan entre la ZMVM y las zonas metropolitanas de Pachuca, Cuernavaca, Puebla-Tlaxcala y Querétaro (Romo Viramontes & Velázquez Isidro, 2018). La Tabla 1.8 muestra el intercambio de *commuters* entre la ZMVM y seis zonas metropolitanas circundantes; los valores corresponden al número de personas que viven en una zona metropolitana y trabajan en otra, por lo que se desplazan con frecuencia entre ellas.

Tabla 1.8 Intercambio de *commuters* entre la Zona Metropolitana del Valle de México y otras zonas metropolitanas

	Número de <i>commuters</i> según zona metropolitana de origen/destino (2015)					
	Puebla-Tlaxcala	Toluca	Querétaro	Cuernavaca	Pachuca	Tlaxcala-Apizaco
<i>Commuters</i> que trabajan en la ZMVM y residen en otra zona metropolitana	7580	41 755	3244	8229	10 090	2300
<i>Commuters</i> que residen en la ZMVM y trabajan en otra zona metropolitana	4867	23 933	23 933	3712	4911	1180

Fuente: Romo Viramontes & Velázquez Isidro (2018).

Vivienda

En el Censo de Población y Vivienda 2010 se registraron un total de 5 311 593 viviendas habitadas en la ZMVM, de las cuales 5 310 552 correspondían a viviendas particulares, mientras que el resto eran viviendas colectivas¹⁵. Las viviendas particulares pueden ser de distintos tipos; se destacan las casas independientes, los departamentos en edificios y las viviendas en vecindad como las categorías predominantes. Otras tipologías son los cuartos en azoteas, locales no construidos para habitación, vivienda móvil y refugios. La Tabla

1.9 muestra la distribución del total de viviendas en la ZMVM por tipo y clase. El tipo de vivienda predominante son las casas independientes, con 74.9%, seguidas de departamentos en edificios, cuya distribución es mayor en la Ciudad de México. Respecto del número de habitantes por vivienda particular habitada, el promedio para toda la ZMVM fue de 3.8 según el ejercicio censal de 2010. En el Anexo 1.3 se detalla información sobre el número de viviendas habitadas y deshabitadas por municipio y alcaldía.

¹⁵ Una vivienda colectiva es aquella que proporciona alojamiento a personas que comparten o se someten a normas de convivencia y comportamiento por motivos de salud, educación, disciplina, religión, trabajo y asistencia social, entre otras razones, y que en el momento del levantamiento del censo tiene residentes habituales, pero que no es objeto de atención del ejercicio censal.

Tabla 1.9 Número de viviendas en la Zona Metropolitana del Valle de México por tipo y clase

	ZMVM	Ciudad de México	Estado de México	Tizayuca, Hidalgo
Número de viviendas habitadas	5 311 593	2 453 770	2 832 494	25 329
Número de viviendas particulares habitadas	5 310 552	2 453 031	2 832 194	25 327
% por clase de vivienda particular				
Casas independientes	74.91%	61.85%	86.07%	92.21%
Departamentos en edificios	17.09%	28.73%	7.14%	1.25%
Viviendas en vecindad	4.83%	5.69%	4.12%	1.61%
Otros	0.23%	0.39%	0.10%	0.12%
No especificado	2.93%	3.35%	2.56%	4.82%
Número de viviendas colectivas habitadas	1041	739	300	2

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2013a).

1.4.2 Actividad Económica

La ZMVM produce aproximadamente un cuarto del Producto Interno Bruto (PIB) nacional (23%). Según la definición de zona metropolitana, comparable internacionalmente y utilizada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el Valle de México representa el 17% de la población total y el 18% de las empleadas y empleados del país (OCDE, 2015),

quienes laboran en una variedad de actividades económicas.

De acuerdo con el INEGI, las actividades económicas se dividen en tres categorías: primarias, secundarias y terciarias (INEGI, 2012a). En 2018, estos sectores generaron dentro de la ZMVM un monto de 5.09 billones de pesos corrientes, sien-

Tabla 1.10 Producto Interno Bruto de la Zona Metropolitana del Valle de México

Sector	Producto Interno Bruto 2018 (millones de pesos corrientes)			
	Nacional	ZMVM*	Ciudad de México	Estado de México
Primario	\$795 383	\$5358	\$27	\$5332
Secundario	\$7 268 243	\$686 266	\$370 680	\$315 585
Terciario	\$14 127 538	\$4 402 121	\$3 263 461	\$1 138 660
Total	\$22 191 164	\$5 093 745	\$3 634 168	\$1 459 576

*Se excluye al municipio de Tizayuca al no contar con información del PIB municipal desagregado por sector.

Fuente: Elaborado con datos de PIB municipal (2018) para el Estado de México (IGCEM, 2019) y datos de PIB por entidad federativa del Banco de Información Económica (INEGI, 2016).

Tabla 1.11 Población ocupada por sector económico en la Zona Metropolitana del Valle de México

Sector	Población ocupada				
	ZMVM	Ciudad de México	Estado de México	Tizayuca	
Primario	82 101	19 705	61 643	753	
Secundario	1 723 999	599 381	1 110 369	14 249	
Terciario	Comercios	1 907 336	811 971	1 085 776	9589
	Servicios	4 832 108	2 483 182	2 328 050	20 876
No especificado	250 438	119 034	130 495	909	
Total	8 795 982	4 033 273	4 716 333	46 376	

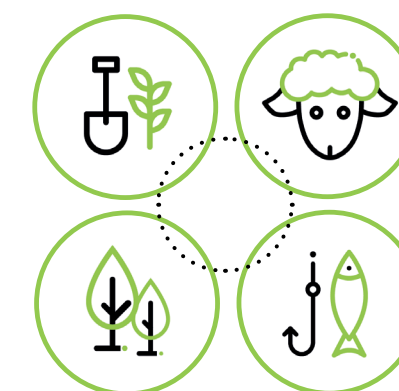
Fuente: Encuesta Intercensal 2015 (INEGI, 2015).

do el sector terciario el de mayor aportación, con 86.4%. La Tabla 1.10 desagrega el PIB metropolitano por tipo de actividad y región, mientras que la Tabla 1.11 muestra la distribución de la población ocupada que reside dentro de los límites administrativos de la ZMVM, por sector económico.

A continuación se describe la intensidad y distribución de las actividades económicas en la ZMVM, con base en información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), año base 2018 (INEGI, 2018).

Actividades primarias

Las actividades primarias se caracterizan por el aprovechamiento de recursos naturales que no han sufrido una transformación previa, como son la agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza. Este sector representa 0.1% del PIB metropolitano y genera aproximadamente 82 101 empleos entre la población ocupada que reside dentro de la ZMVM, equivalente al 0.9%. Se destaca que más del 75.1% de la población ocupada en el sector reside en el Estado de México (INEGI, 2015).



De acuerdo con la Serie VI de uso de suelo y vegetación del INEGI (año 2014), 39.8% de la superficie de la ZMVM, esto es 3134.1 km², corresponde a tierras agrícolas. De esta superficie, aproximadamente una quinta parte es utilizada para agricultura de temporal y el resto para agricultura de riego. La Figura 1.23 muestra la distribución espacial de los usos de suelo agrícolas; se puede apreciar que estos se

ubican en la periferia de la mancha urbana y que se concentran principalmente al norte y oriente del Estado de México. En la región también se registran actividades pecuarias, destacándose la avicultura y la producción bovina y porcina. Para mayor información sobre las características de las actividades primarias (agrícolas y pecuarias) en la ZMVM, consultar el Anexo 1.3.

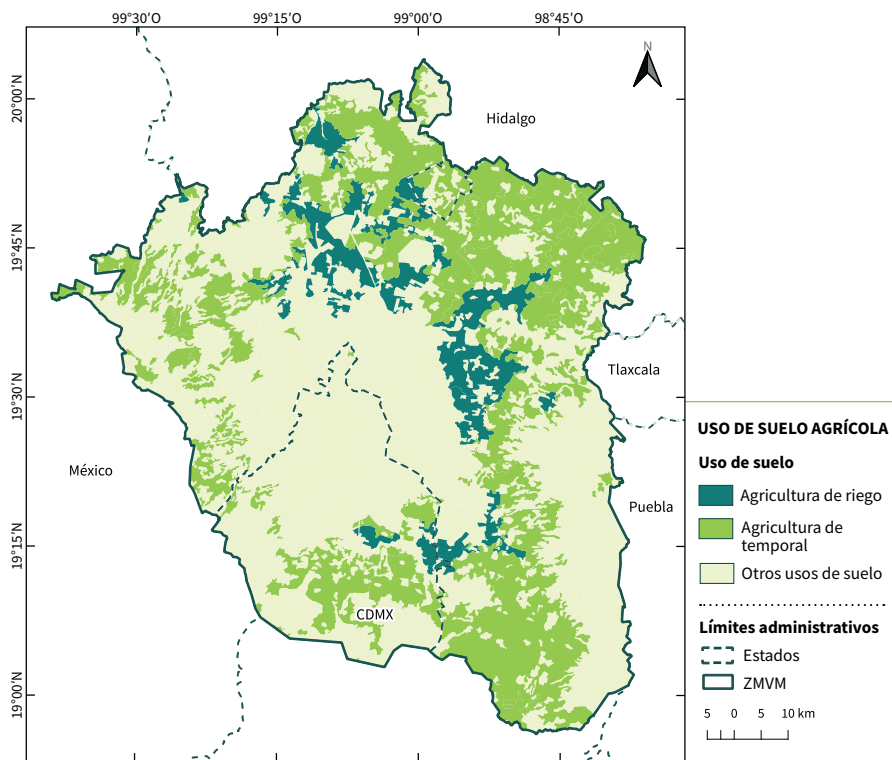


Figura 1.23 Usos de suelo agrícola en la Zona Metropolitana del Valle de México

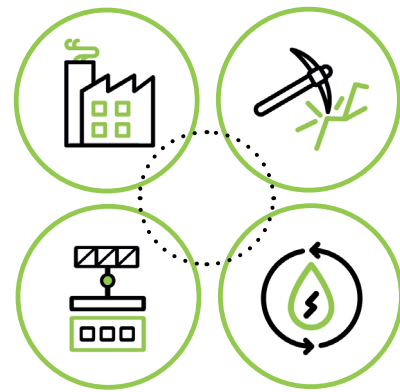
Fuente: Elaborado con datos de las cartas de uso de suelo (Series VI), escala 1:250 000 (INEGI, 2020a).

Las actividades del sector primario son una de las fuentes de emisiones contaminantes en la región. En primera instancia, los cambios de uso de suelo forestal a un uso agrícola inciden sobre la calidad del aire: se disminuye la cobertura vegetal que ofrece servicios ecosistémicos benéficos para la población y se crean condiciones favorables para la erosión del suelo, una fuente de partículas sus-

pendidas. Las prácticas de roza y quema, los incendios accidentales, la aplicación de fertilizantes nitrogenados, el uso de combustibles fósiles en maquinaria agrícola y las emisiones de CH₄ (un COV) por fermentación entérica y el manejo del estiércol, son algunas otras actividades que emiten contaminantes atmosféricos dentro de la cuenca del Valle de México.

Actividades secundarias

El sector secundario engloba todas las actividades que permiten la transformación de materias primas en bienes manufacturados para su consumo. El insumo de estas actividades puede provenir de las actividades primarias o del mismo grupo. Dentro de las actividades secundarias se identifican cuatro grandes grupos: las industrias manufactureras, la minería, la construcción y la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, agua y gas. Este sector representa 13.5% del PIB metropolitano y, de acuerdo con los datos de la

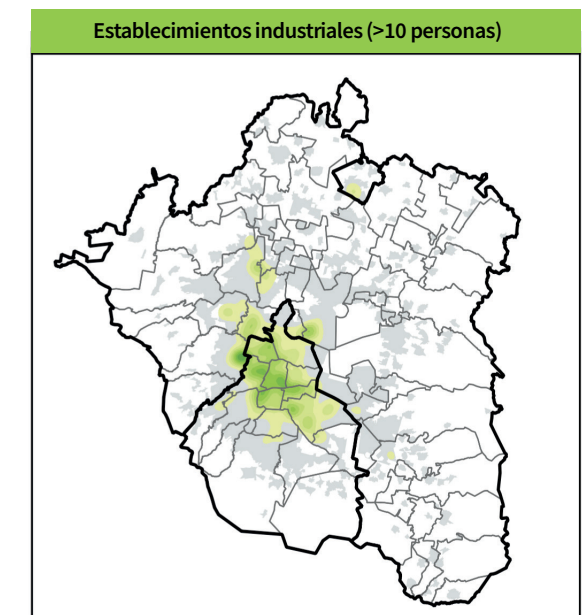


Encuesta Intercensal 2015, genera aproximadamente 1.72 millones de empleos entre la población ocupada que reside en la ZMVM (19.6% del total). Se destaca que, de la población ocupada que reside en el Estado de México, 23.5% labora en el sector; para Tizayuca este porcentaje es igual a 30.7%, mientras que para la Ciudad de México es del 14.9% (INEGI, 2015).

De acuerdo con los datos del DENU 2018, se tiene un registro de 77 710 establecimientos pertenecientes al sector en la ZMVM, los cuales generan 9.44% del PIB nacional respectivo. La aportación de la Ciudad de México y el Estado de México es de magnitud similar, con 54.0% y 46.0% del PIB. La actividad predominante en términos del número de unidades económicas es la industria manufacturera (94.2%), destacando la aportación de la industria alimentaria, así como las industrias metálicas básicas y la fabricación de productos metálicos. Dentro de las industrias con más de 100 empleados (2.1% del total), la mayoría de los establecimientos corresponden a industrias del giro alimenticio, químico, del plástico y del hule, y del papel; de acuerdo con el Balance Nacional de Energía 2017, las tres últimas se destacan por ser grandes consumidoras de combustibles fósiles y energía suministrada a través de la red eléctrica (SENER, 2018). Es importante mencionar que del total de establecimientos industriales, no todos tienen la obligación de reportar a las autoridades ambientales datos de consumo de combustibles y emisiones, ya que esto depende del número de personas empleadas, el tipo de actividad predominante, entre otras características.

El 89.4% del total de las actividades secundarias en la ZMVM son microempresas que emplean 10 o menos personas. Dentro de estas se distingue la microindustria dedicada a la elaboración de tortillas, la panificación, artes gráficas, herrería y purificación de agua; sin embargo, estas actividades, a pesar de ser consideradas industriales, producen bienes de consumo inmediato a un grupo de población reducido (de forma similar a un servicio), dificultando su regulación ambiental debido a su diversidad y tamaño. El desglose de actividades económicas secundarias en la ZMVM por tipo y tamaño de industria se reporta en el Anexo 1.3.

En cuanto a la distribución espacial de las actividades secundarias, se identifican zonas específicas dentro de la ZMVM con una elevada concentración de actividades industriales. Es importante destacar que la distribución varía en función del tamaño de los establecimientos y el tipo de actividad. Como se muestra en la Figura 1.24, los establecimientos industriales donde trabajan más de 10 personas, que ascienden a 8215 unidades, se concentran en la zona centro y norponiente de la Ciudad de México, así como en municipios conurbados del Estado de México, tales como Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla de Baz y Ecatepec de Morelos. También hay concentraciones significativas de actividad industrial en Cuautitlán Izcalli y Tultitlán, así como en las alcaldías de Azcapotzalco, Iztacalco e Iztapalapa en la Ciudad de México, y en Tizayuca, Hidalgo. En el Anexo 1.3 se pueden consultar mapas de calor que muestran las zonas de mayor acumulación de establecimientos individuales, por tipo de actividad industrial y tamaño de los establecimientos, así como un análisis de las tendencias en su distribución.



Nota: Las áreas de color verde oscuro representan una mayor concentración de establecimientos. La ausencia de color no indica que en la zona no hay establecimientos industriales.

Figura 1.24 Concentración de establecimientos industriales que emplean a más de 10 personas

Fuente: Elaborado a partir del DENU 2018 (INEGI, 2018).

La centralización de la industria al norte de la Ciudad de México y en los municipios colindantes del Estado de México se asocia a la movilización diaria de una gran cantidad de población que necesita desplazarse para llegar a su fuente de empleo. Es así que el sector industrial no solo produce emisiones contaminantes por la quema de combustibles fósiles y el uso de productos químicos en sus

procesos, sino que crea la necesidad de desplazamiento de recursos humanos, insumos materiales y mercancías hacia, desde y dentro de la zona metropolitana, incidiendo en las emisiones asociadas al transporte privado, público y de carga. Las emisiones y el consumo energético de estas fuentes se detallan en el inventario de emisiones del ProAire (Capítulo 5).

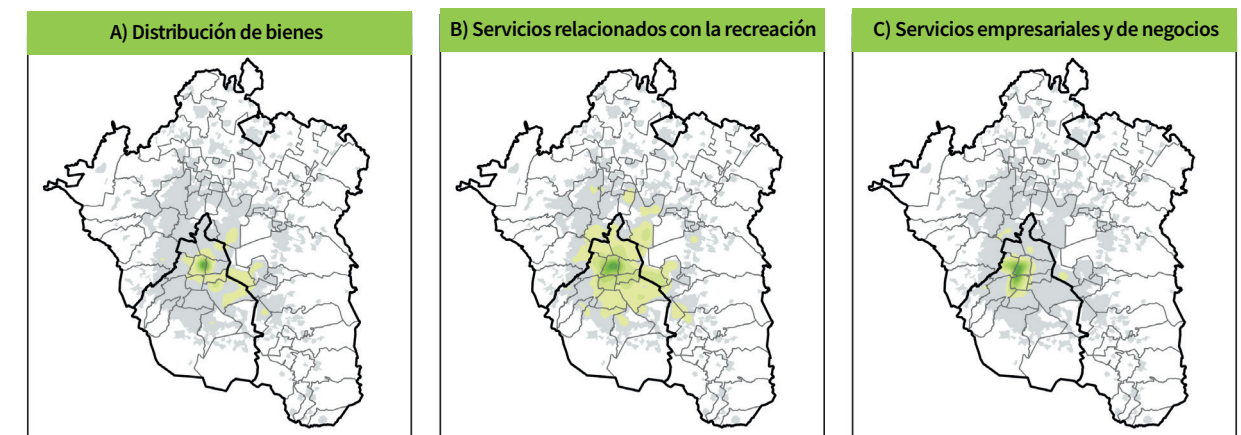
Actividades terciarias

Las actividades terciarias son las que predominan en la ZMVM. Estas consisten en la distribución de bienes, operaciones con activos e información, y otros tipos de servicios de negocios, recreativos, gubernamentales y sociales. Este sector agrega valor a los productos sin realizarles modificaciones físicas, ya que las actividades no elaboran bienes materiales, sino que brindan beneficios intangibles. El sector representa 86.4% del PIB metropolitano, 31.2% del total nacional para todas las actividades terciarias, y genera más de tres cuartos del total de empleos en la ZMVM. En el Anexo 1.3 se desglosa el número de establecimientos por tipo de actividad económica terciaria.



El sector terciario de la ZMVM concentra actividades con alto valor agregado, como los servicios financieros y de seguros; otros sub-grupos con porcentajes relativamente altos de empleo son las áreas de comunicaciones y transporte, bienes raíces y servicios empresariales (OCDE, 2015). La distribución de bienes, incluyendo el comercio al por mayor y al por menor, emplea a un total de 1 907 336 personas, de las cuales el 56.9% son residentes del Estado de México, 42.6% de la Ciudad de México y el 0.5% restante de Tizayuca, Hidalgo. Por su parte, el sector servicios es el que concentra la mayor cantidad de empleos dentro de la ZMVM, con un total de 4 832 108; 51.4% de la población ocupada vive en la Ciudad de México, 48.2% en alguno de los 59 municipios conurbados del Estado de México y 0.4% en el municipio de Tizayuca, Hidalgo (INEGI, 2015).

Si bien es conocido el impacto que genera el desarrollo industrial en la contaminación atmosférica, los comercios y servicios han tomado relevancia dado que son numerosos y diversos, y en su conjunto pueden ser causa de cantidades significativas de emisiones contaminantes. En la Figura 1.25 se puede observar la concentración de las actividades económicas terciarias dentro de la ZMVM; los mapas de calor representan las zonas de mayor acumulación de establecimientos individuales de comercios y servicios en la metrópoli. En general, la mayor parte de las actividades económicas terciarias en la ZMVM se concentran en la ciudad central, así como en algunos municipios del Estado de México que colindan con la capital. En el Anexo 1.3 se incluyen mapas de calor para actividades específicas, según la clasificación estándar del INEGI (2012a), así como descripciones más detalladas de su distribución espacial.



Nota: Las áreas de color verde oscuro representan una mayor concentración de establecimientos. La ausencia de color no indica que en la zona no hay establecimientos comerciales y de servicios. A) Incluye comercio al por mayor y al por menor, así como servicios de transporte, correos y almacenamiento. B) Incluye servicios de esparcimiento cultural y deportivo, servicios de alojamiento y servicios de preparación de alimentos y bebidas. C) Los servicios empresariales incluyen operaciones con información, operaciones con activos (servicios financieros, de seguros e inmobiliarios), y otros servicios cuyo insumo principal es el conocimiento y la experiencia del personal, tales como servicios técnicos, científicos y profesionales, así como corporativos; se excluyen servicios de educación y salud que, si bien comprenden actividades que requieren conocimientos y especialización por parte del personal, tienen un impacto primordialmente social; la distribución de estos últimos se aborda en el apartado de estructura urbana del presente capítulo.

Figura 1.25 Concentración de actividades económicas terciarias dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado a partir del DENUE 2018 (INEGI, 2018).

La distribución de bienes se divide en comercio al por mayor, comercio al por menor y servicios de transporte, correos y almacenamiento; se concentra principalmente en la ciudad central y la región metropolitana-oriente. Estas unidades económicas se dedican a la compra-venta (sin transformación) de bienes, materias primas y otros suministros. Se destaca que en la alcaldía Iztapalapa se ubica la Central de Abastos de la Ciudad de México, considerada por la Unión Mundial de Mercados Mayoristas como el centro de suministro de alimentos más grande del mundo y la cual concentra las transacciones de mercancías perecederas en la ZMVM; alrededor de 500 mil personas la visitan diariamente (FICEDA, s/f).

Los servicios se concentran, al igual que las actividades comerciales, en la zona centro de la Ciudad de México; sin embargo, también se aprecia una contribución importante de la zona poniente y sur de la capital, así como de algunos municipios del Estado de México, dependiendo del tipo de actividad económica. Las operaciones con activos e información, así como corporativos y otros servicios cuyo insumo principal es el conocimiento y la experiencia del personal, se concentran en las alcaldías Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Benito

Juárez, aunque también hay una densidad apreciable en las alcaldías Álvaro Obregón y Cuajimalpa, así como en algunos municipios conurbados como Tlalnepantla de Baz. Se destacan los centros financieros sobre Paseo de la Reforma, en Polanco-Lomas y en Santa Fe. Estas actividades, particularmente los servicios financieros y de seguros, tienen un valor agregado alto (OCDE, 2015). Entre 2003 y 2016, este tipo de servicios fue la actividad que más crecimiento tuvo, pasando del 4.75% al 13.13% en aportación del PIB terciario de la Ciudad de México (Secretaría de Desarrollo Económico, 2019); a su vez, esto representa más del 45% del PIB nacional para la actividad respectiva (INEGI & Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

Los servicios recreativos incluyen unidades económicas que se dedican a los servicios artísticos, culturales y deportivos, así como a servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas. Estos servicios también se concentran en la Ciudad de México, aunque muestran una mayor dispersión que el resto de las actividades económicas terciarias. Tan solo en la Ciudad de México hay más de 838 centros y atractivos con potencial turístico, incluyendo más de 170 museos y galerías (SECTUR & Gobierno del Distrito Federal,

2013). El Centro Histórico y la colonia Cuauhtémoc forman el complejo cultural, de entretenimiento, hospedaje y turismo de negocios y vacacional más importante de la ZMVM; la derrama económica de la actividad turística en la Ciudad de México superó los 4800 millones de dólares en 2018, con más de la mitad asociada al turismo internacional (Secretaría de Turismo, 2019).

Todos los establecimientos comerciales y de servicios representan atractores de viaje, ya sea como fuente de empleo, para la adquisición de bienes o para la recreación de la población de la ZMVM. Es así que su ubicación incide en el transporte de mercancías para su comercialización, en los patrones de desplazamiento de la población del Valle de México y, en ausencia de medios de transporte

eficientes y sustentables, puede propiciar la generación de contaminación por el uso de medios de transporte a base de combustibles fósiles.

Finalmente, las actividades relacionadas con el gobierno también muestran un patrón de centralización en la zona centro de la capital mexicana. La Ciudad de México es el centro administrativo del país, por lo que concentra las sedes de dependencias de la Administración Pública del Gobierno Federal, además de los entes administrativos locales, organismos internacionales, embajadas y consulados de otros países, entre otros. Estos establecimientos también incitan el desplazamiento de la población para la atención de trámites y la realización de otros procedimientos administrativos.

Índice de volumen físico

El índice de volumen físico es un indicador estadístico que mide la evolución real de los volúmenes de la producción física en los distintos niveles de agregación establecidos para cada sector económico, a partir de un año base. Este indicador refleja la tendencia o variación producida en el corto plazo en la producción económica, a partir de información de cantidades producidas, valores de producción y precios a nivel de producto, por lo que puede utilizarse para evaluar el comportamiento de los distintos sectores.

Dentro de los tres tipos de actividades y tomando como año base el 2013, las actividades terciarias tienen la mayor pendiente positiva (ver Figura 1.26); es decir, su producción ha crecido con mayor rapidez desde el siglo pasado. Las actividades secundarias muestran una tendencia similar a las actividades terciarias, pero con una pendiente menor, infiriendo que si bien su producción ha crecido, no lo ha hecho con el mismo ritmo que las actividades terciarias. Por otro lado, las actividades primarias tienen una pendiente ligeramente negativa a partir del año 2000, la cual indica una desaceleración en su producción.

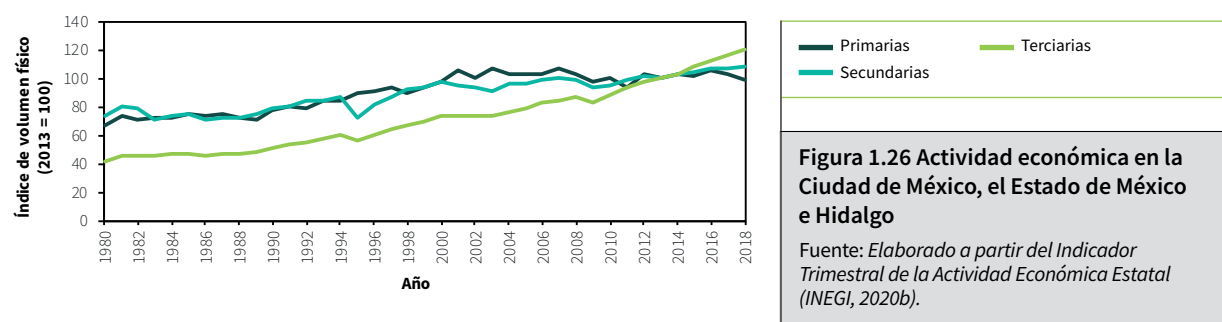


Figura 1.26 Actividad económica en la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo

Fuente: Elaborado a partir del Indicador Trimestral de la Actividad Económica Estatal (INEGI, 2020b).

1.5 Estructura urbana

La exposición a contaminantes atmosféricos es resultado de distintas fuerzas motrices que ejercen presión sobre el medio ambiente y que están estrechamente ligadas al desarrollo urbano (OMS, 2000). La estructura urbana de la ZMVM refleja los patrones en los usos e intensidad de uso del suelo, así como la distribución de densidades de población, hogares y empleo. Estas variables inciden en la demanda de transporte, la generación de viajes, los kilómetros recorridos por vehículo y, por lo tanto, en la generación de contaminantes atmosféricos.

La descripción de la estructura urbana de una ciudad busca evaluar el uso y distribución de las actividades en el espacio físico, así como la estratificación social y económica de la población, la zonificación de la ciudad y la evolución en el tiempo de fenómenos como la expansión y la densificación (Álvarez De la Torre & Ayala Macías, 2018). La estructura urbana impacta en el funcionamiento de la metrópoli y la satisfacción de necesidades de la población, tales como la demanda de vivien-

da, empleo y actividades económicas, el acceso a servicios urbanos y vialidades, comercios y áreas recreativas, entre otras. La satisfacción de estas necesidades deriva en una demanda de recursos, donde se destaca un componente energético para el sector transporte.

Las actividades urbanas generan la necesidad de desplazamiento de la población. La infraestructura del sistema de transporte público y la red vial son elementos que articulan la estructura urbana y permiten el movimiento al interior de la ZMVM. En este contexto, identificar y especificar las funciones que generan los viajes cotidianos de la población, desde los orígenes hacia los destinos dentro de la ZMVM, son aspectos clave de la descripción de la zona de estudio. Posteriormente, se deben identificar las áreas donde es necesario incidir para lograr una gestión integral de la calidad del aire, dado que los factores que establecen la distribución espacial y temporal de viajes y traslados son estrictamente urbanos.

1.5.1 Patrones de desarrollo y organización urbana

Desde el siglo pasado, la ZMVM ha crecido de manera constante tanto en población como superficie, aunque con variaciones temporales. Desde la mitad del siglo pasado, el crecimiento urbano superó los límites de las demarcaciones del entonces Distrito Federal y se extendió hacia al Estado de México, principalmente en los municipios de Tlalnepantla de Baz, Naucalpan de Juárez y Ecatepec de Morelos; con ello inició el proceso de metropolización del Valle de México (Cobos, 2016). Posteriormente, la construcción de vivienda de interés social en grandes conjuntos alejados del perímetro urbano favoreció la expansión al norte y noreste de la ZMVM, donde se propició el cambio de uso de suelo agrícola a urbano-residencial.

El crecimiento metropolitano ha continuado desde entonces bajo un modelo expansivo, extendiéndose a lo largo de las 76 demarcaciones

que actualmente conforman la ZMVM. Es así que en el área de estudio se identifican los siguientes patrones de desarrollo urbano (OCDE, 2015):

- La población de la ZMVM aún está en crecimiento, sobre todo en las periferias. Aunque el crecimiento neto muestra una desaceleración, la población en las zonas periféricas está creciendo más rápido que la del núcleo urbano.
- En la ZMVM prevalecen condiciones de desigualdad económica y social. Por ejemplo, los servicios básicos en algunas colonias tanto del centro como de la periferia son precarios y la mayoría de la región muestra altos niveles de desigualdad por ingreso, impactando en la cohesión social.

En términos de vivienda, las zonas más ase- quibles se ubican en las periferias, aunque los empleos siguen concentrándose en el núcleo metropolitano. Como consecuencia, aumenta la distancia y tiempos de traslado entre los centros residenciales y las fuentes de empleo.

El desarrollo de la metrópoli se ha consolidado de manera dispersa, incidiendo en la calidad de vida de la población y la sustentabilidad de la región. La expansión de la huella urbana se relaciona con la dispersión de sus actividades económicas y de vivienda. Tomando como referencia el Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México (SEDESOL, Gobierno de la Ciudad de México, Gobierno del Estado de México, & Gobierno del Estado de Hidalgo, 2011), se pueden distinguir los siguientes patrones de localización de dichas actividades:

Los sectores de especialización económica, incluyendo servicios vinculados a la economía global, servicios financieros y de seguros, corporativos y empresariales, entre otros, se localizan en las alcaldías y municipios del centro y poniente de la ZMVM. Estos comprenden las alcaldías de Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez y Cuajimalpa, y el municipio de Huixquilucan en el Estado de México.

En el caso del comercio, las actividades se concentran en las alcaldías de Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Iztapalapa y Álvaro Obregón; se destaca también el municipio de Naucalpan en el Estado de México y las áreas de establecimientos comerciales como el Centro Histórico de la Ciudad de México y Polanco. Los corredores urbanos también concentran una importante actividad comercial, particularmente en el Paseo de la Reforma y en la Avenida Insurgentes, en la alcaldía Cuauhtémoc, y en el corredor de Periférico.

Con respecto a la actividad industrial, la concentración de su producción se ubica en las alcaldías de Azcapotzalco, Miguel Hidalgo

El sistema de transporte no se ha desarrollado a la par del crecimiento urbano, particularmente en zonas periféricas donde predominan modos de baja capacidad y mala calidad. Por ejemplo, se estima que solo 25% de la población vive en un radio de 1 km de una estación o parada de autobús.

e Iztapalapa, y en los municipios de Tlalnepantla de Baz, Ecatepec de Morelos, Cuautitlán Izcalli, Naucalpan de Juárez y Tultitlán, en el Estado de México.

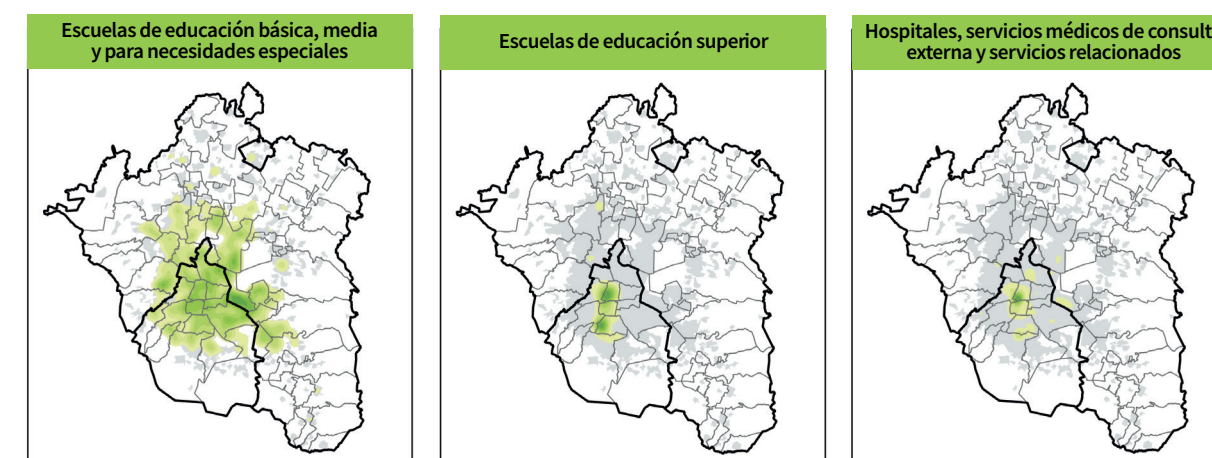
En el caso de la vivienda, en la Ciudad de México predominan patrones de concentración, mientras que en el Estado de México e Hidalgo prevalece la dispersión de la vivienda. La Ciudad de México prácticamente ya no expande su huella urbana y ha iniciado un proceso de recuperación de áreas centrales; se identifican también procesos de consolidación periférica (áreas que ganan población sin crecer horizontalmente). El Estado de México e Hidalgo se caracterizan por una fuerte expansión periférica; solo en algunos municipios mexiquenses como Ecatepec, Valle de Chalco e Ixtapaluca, entre otros, se identifican procesos de consolidación periférica.

La dispersión en la ZMVM se impulsó por la vivienda de interés social institucional, que se construyó en la periferia y dejó grandes vacíos entre los nuevos desarrollos y los territorios urbanos continuos (por ejemplo, en Tecámac, Zumpango y Huehuetoca).

Los patrones de desarrollo urbano metropolitano y la distribución espacial de las distintas actividades de la población dan una respuesta al comportamiento de la ciudad como generadora de viajes. Como consecuencia de la estructura urbana, se generan flujos masivos de fuerza laboral y costos de movilidad que impactan directamente en el medio ambiente, en específico por el uso de medios de transporte motorizados a base de combustibles fósiles.

Además del papel que juega la vivienda y las fuentes de empleo en los patrones de movilidad de la población, la ubicación y acceso a servicios de educación y salud es otro factor ligado a la necesidad de desplazamiento de las personas que viven en la ZMVM. La Figura 1.27 muestra mapas de calor generados a partir de los puntos de servicios de educación y salud dentro de la metrópoli. Las escuelas de educación básica, media y necesidades especiales muestran la distribución más

homogénea, con puntos de mayor concentración que coinciden con los municipios y alcaldías más densamente poblados; tal es el caso de los municipios de Ecatepec de Morelos, Nezahualcóyotl y Naucalpan de Juárez, y las alcaldías Benito Juárez, Cuauhtémoc e Iztapalapa. Para las instituciones de educación superior, se observan dos polos dentro de la Ciudad de México: el primero al sur de la capital, en torno a Ciudad Universitaria, y otro al norte, en la alcaldía Cuauhtémoc.



Nota: Las áreas de color verde oscuro representan una mayor concentración de establecimientos. La ausencia de color no indica que en la zona no hay establecimientos de servicios de educación o salud.

Figura 1.27 Concentración de servicios de educación y salud en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado a partir del DENUE 2018 (INEGI, 2018).

Los servicios de salud, si bien también se concentran en la región central de la ZMVM, muestran una densidad más homogénea a lo largo de toda la región, con concentraciones más elevadas en los municipios con mayor población y que, por lo tanto, requieren una mayor capacidad de este tipo de servicios, como sucede en los municipios de Ecatepec

de Morelos, Nezahualcóyotl y Naucalpan de Juárez, en el Estado de México. En el caso específico de los hospitales, su distribución también se concentra en la Ciudad de México y los municipios conurbados más poblados. Cuando se trata de servicios especializados la centralización es más evidente, como es el caso de la zona de hospitales en Tlalpan.

1.5.2 Movilidad, transporte y vías de comunicación

Mejorar la movilidad coadyuva en la mitigación de emisiones asociadas al transporte de población y bienes dentro de la ZMVM. La gestión de la calidad del aire, desde una perspectiva de sustentabilidad, implica mejorar la eficiencia de los

diferentes modos de transporte para incidir en un uso más eficiente de la energía. En esta sección se resumen los principales elementos de la infraestructura vial, al mismo tiempo que se analiza la demanda de movilidad de la región.

Sistema vial

El sistema vial de la ZMVM está integrado por el conjunto de elementos que permiten la circulación, el intercambio entre las funciones que se desarrollan en la región y la movilización de sus habitantes. Este sistema está conformado por dos subsistemas distintos (SEDESOL, 2012):

- Subsistema vial primario: estructura que conecta al conjunto de núcleos que forman la ZMVM. Está destinado a desplazamientos más largos y de mayor volumen; se conforma por vías de acceso controlado, ejes viales y arterias principales.
- Subsistema vial secundario: distribuye el tránsito hacia y desde el subsistema primario. Se caracteriza por desplazamientos cortos y volúmenes de menor importancia. Incluye calles colectoras, locales y peatonales, entre otras clasificaciones.

La red vial de la ZMVM tiene una longitud estimada de 10 182.21 km; esta red facilita el movimiento de la población, bienes y servicios, al mismo tiempo que determina y condiciona los patrones de desarrollo urbano (SEDESOL *et al.*, 2011). Su estructura responde a procesos de expansión, producto del crecimiento demográfico y la creación de nuevos poli-centros que concentran infraestructura urbana, población y actividades económicas. La Figura 1.28 muestra un mapa de las vías de comunicación principales en la región, incluyendo la red vial primaria (913.15 km) y secundaria (9269.06 km) de la ZMVM. Se observa que el sistema vial se caracteriza por tener una red de acceso que desemboca en el sistema vial primario de la Ciudad de México, además de contar con vías perimetrales que intercomunican la estructura vial en general. En la Tabla 1.12 se enlistan las vialidades principales en la ZMVM; para más información sobre la estructura vial, consultar el Anexo 1.4.

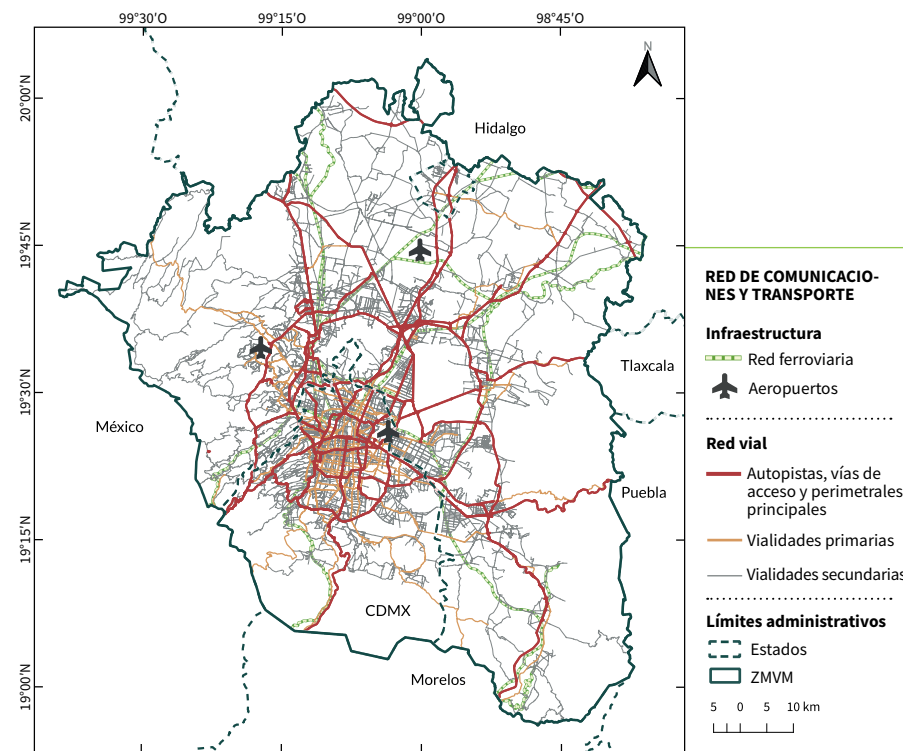


Figura 1.28 Red de vías de comunicación y transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México
 Fuente: Elaborado con datos de Open Street Maps y los Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) (Instituto de Geografía UNAM, 2017).

Tabla 1.12 Principales Vialidades en la Zona Metropolitana del Valle de México

Principales vialidades de la Ciudad de México				Vías de acceso controlado	
Ejes viales					
Eje Central	Eje 2 y 2A Sur	Eje 10 Sur	Eje 1 Poniente	Circuito Bicentenario	Aquiles Serdán
Eje 1 Norte	Eje 3 Sur	Eje 1 Oriente	Eje 2 Poniente	Anillo Periférico	Miguel Alemán
Eje 2 Norte	Eje 4 Sur	Eje 2 Oriente	Eje 3 Poniente	Insurgentes Norte	Río de la Piedad
Eje 3 Norte	Eje 5 Sur	Eje 3 Oriente	Eje 4 y 4A Poniente	Ignacio Zaragoza	Río Becerra
Eje 4 Norte	Eje 6 Sur	Eje 4 Oriente	Eje 5 Poniente	San Antonio Abad	Carlos Luis Cabrera
Eje 5 Norte	Eje 7 y 7A Sur	Eje 5 Oriente	Eje 6 Poniente	Constituyentes	Tlalpan
Eje 6 Norte	Eje 8 Sur	Eje 6 Oriente	Eje 7 Poniente	Ejército Nacional	Autopista Urbana Norte y Sur
Eje 1 y 1A Sur	Eje 9 Sur	Eje 7 Oriente		Río San Joaquín	

Principales vialidades del Estado de México			
Río de los Remedios	Manuel Ávila Camacho	Naucalpan-Ecatepec	Quéretaro-México
Pantitlán	Vía Gustavo Baz	México-Puebla	México-Toluca
José López Portillo	Tlalnepantla-Atlacomulco	Pachuca-México	La Venta-Chamapa-Lechería
Primero de Mayo	Viaducto Elevado Bicentenario	Circuito Exterior Mexiquense	Peñón-Texcoco
Carlos Hank González	México-Texcoco		

Fuente: Secretaría de Seguridad Ciudadana (SSP, 2015b, 2015a) y el estudio “Transporte Público Masivo en la Zona Metropolitana del Valle de México: Proyecciones de demanda y soluciones al 2024” (ITDP, 2015).

En cuanto a la infraestructura ciclista, esta se concentra en la Ciudad de México, abarcando un total de 194 km de ciclovías. Esta red está desarticulada y se ubica principalmente en las alcaldías Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Benito Juárez.

Si bien en Xochimilco, Tláhuac e Iztapalapa, así como en el Estado de México, hay significativa actividad ciclista, en estas zonas no se cuenta con la infraestructura para satisfacer de forma segura la demanda de movilidad (SEMOVI, 2019b).

Sistema de transporte público

La ZMVM tiene un sistema de transporte público complejo, integrado por un agregado de subsistemas y componentes administrados por distintos gestores de transporte. Las instituciones responsables de la operación del sistema son la Secretaría de Movilidad (SEMOVI) de la Ciudad de México y la Secretaría de Movilidad (SEMOV) del Estado de México, aunque la administración recae tanto en entes públicos y semipúblicos, como en concesionarios privados.

Diferentes estudios diagnóstico (Instituto de Investigaciones Parlamentarias, 2017; ITDP, 2015) concluyen que la desarticulación de los subsistemas de transporte entre el Estado de México y la Ciudad de México es una de las principales razones que empuja a la población a adquirir un automóvil particular. Problemas de coordinación institucional obstaculizan los esfuerzos por establecer una política de movilidad integral y resultan en una inadecuada planeación y gestión de las redes de transporte pú-

blico en sus distintas modalidades (SEMOVI, 2019b). A continuación se describen los principales sistemas y redes de transporte público que operan en la ZMVM (ITDP, 2015; SEMOVI, 2019a) mientras que la Figura 1.29 muestra un mapa de los mismos. La

distribución del total de viajes diarios en los distintos modos de transporte se aborda más adelante, en la descripción de los resultados de la encuesta origen-destino para la ZMVM, año base 2017, realizada por el INEGI.

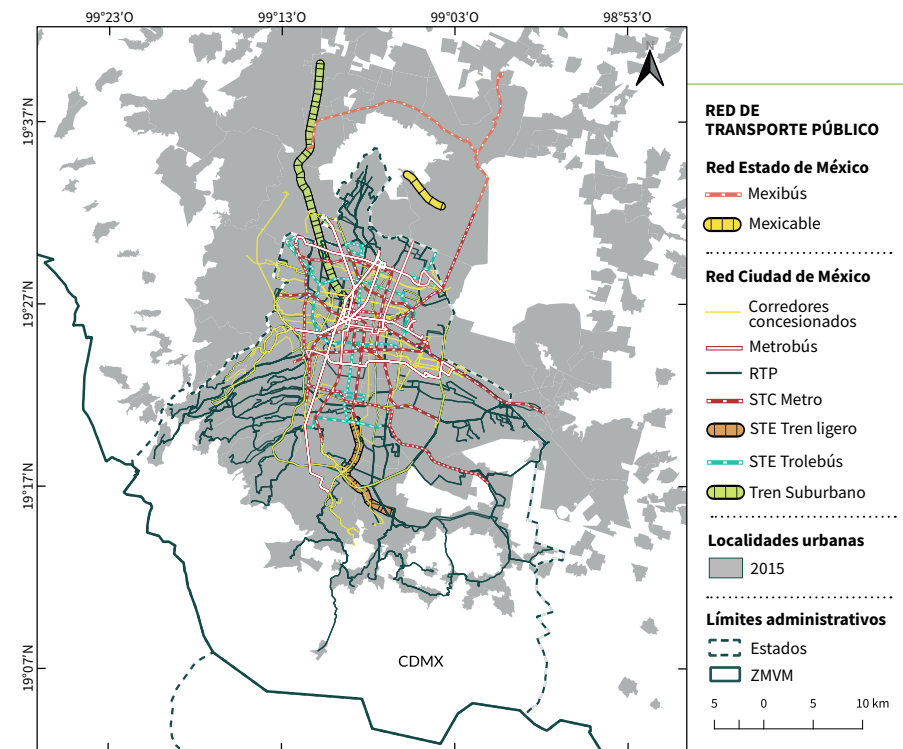


Figura 1.29 Red de transporte público en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Elaborado con información del GTFS estático (General Transit Feed Specifications) de la Ciudad de México (SEMOVI, 2020).

El **Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro** es el principal modo de transporte estructurado por su capacidad y cobertura. El servicio se concentra en las alcaldías centrales de la Ciudad de México y cuenta con 12 líneas en operación, de las cuales dos (Líneas A y B) también atienden a municipios del Estado de México. En total cuenta con 226.5 km de longitud, 195 estaciones y más de 380 trenes que atienden a 2.39 millones de personas en un día entre semana.

La **Red de Transporte de Pasajeros (RTP)** opera en toda la Ciudad de México, principalmente en zonas de difícil acceso y de bajos recursos. Cuenta con una flota total disponible que oscila entre 1200 y 1300 unidades de autobuses públicos (con capacidad de 80 o más personas, dependiendo del tipo de unidad), más de 90 rutas en operación y una cobertura de 3300 km de longitud.

El **Servicio de Transportes Eléctricos (STE)** consta de 8 líneas de trolebús y un tren ligero. El tren ligero cubre 25.31 km al sur de la Ciudad de México. Por su parte, las 8 líneas de trolebús, las cuales reemplazaron gradualmente a la Red de Tranvías de la Ciudad de México, acumulan un parque vehicular total de 300 unidades que circulan en una red de 203.64 km.

El **Metrobús (MB)** es una red de BRT (*Bus Rapid Transit*, por sus siglas en inglés) que transita en la Ciudad de México. Está conformado por 7 líneas y 24 rutas en operación que cubren 140 km. Después del STC Metro, es el segundo sistema estructurado de mayor cobertura en la Ciudad de México.

ECOBICI es un sistema de bicicletas públicas que cuenta con 480 cicloestaciones y más de 6800 unidades; 28 de las estaciones y 340 bicicletas forman parte del nuevo sistema de bicicletas eléctricas de pedaleo asistido. Actualmente se tienen más de 170 000 usuarias y usuarios registrados; en un día entre semana el número de viajes puede sumar más de 30 mil.

El **Tren Suburbano** resultó de una cooperación entre el Estado de México y la Ciudad de México. Este conecta a municipios mexiquenses con la Ciudad de México, aprovechando infraestructura ferroviaria existente en la antigua ruta México-Querétaro. Consta de una única línea con una longitud de 27 km.

El **Mexibús** es otro sistema de BRT disponible en la ZMVM, pero administrado por el gobierno del Estado de México. Un total de tres líneas cubren 57.3 km y dan servicio principalmente a los municipios de Ecatepec de Morelos, Tecámac, Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Coacalco de Berriozábal, Tultitlán y Cuautitlán Izcalli, aunque las rutas también se adentran en la Ciudad de México.

El **Mexicable** es un sistema teleférico de 4.9 km de longitud y 7 estaciones que atiende a la región San Andrés de la Cañada, en Ecatepec de Morelos.

Los **concesionarios de transporte de baja capacidad** incluyen la flota de vagonetas y colectivos que conforman el modo de transporte con mayor cobertura y el más utilizado en toda la ZMVM. La situación particular de este sistema hace que sea el más irregular en términos de horas de servicio y frecuencia, aunque tanto la Ciudad de México como el Estado de México lideran esfuerzos para aumentar su regulación.

Se tiene proyectada también la construcción del sistema **Cablebús** de la Ciudad de México, un teleférico que prestará servicios de transporte público en zonas de difícil acceso y con conectividad al STC Metro. El proyecto incluye cuatro líneas, con una longitud total de 34 km, y la capacidad de atender 117 millones de viajes anuales. La Línea 1 se encuentra actualmente en construcción en la zona de Cuauhtémoc, en la alcaldía Gustavo A. Madero; esta tendrá un eje troncal con capacidad de 4000 personas por hora, y un antena de 1.7 km con capacidad de 1000 personas por hora. Recientemente se inició la construcción de la Línea 2 Constitución de 1917 – Santa Marta (SEMOVI, 2019c).

También se prevé la terminación de la obra y la operación del Tren Interurbano Toluca-Valle de México. Este tren dará servicio a 230 mil pasajeros al día y tendrá una longitud de 57.7 kilómetros

con 6 estaciones (dos terminales y cuatro intermedias). Con el tren se espera disminuir los trayectos en automóviles particulares y disminuir el tráfico vehicular (SMAGEM, 2018b).

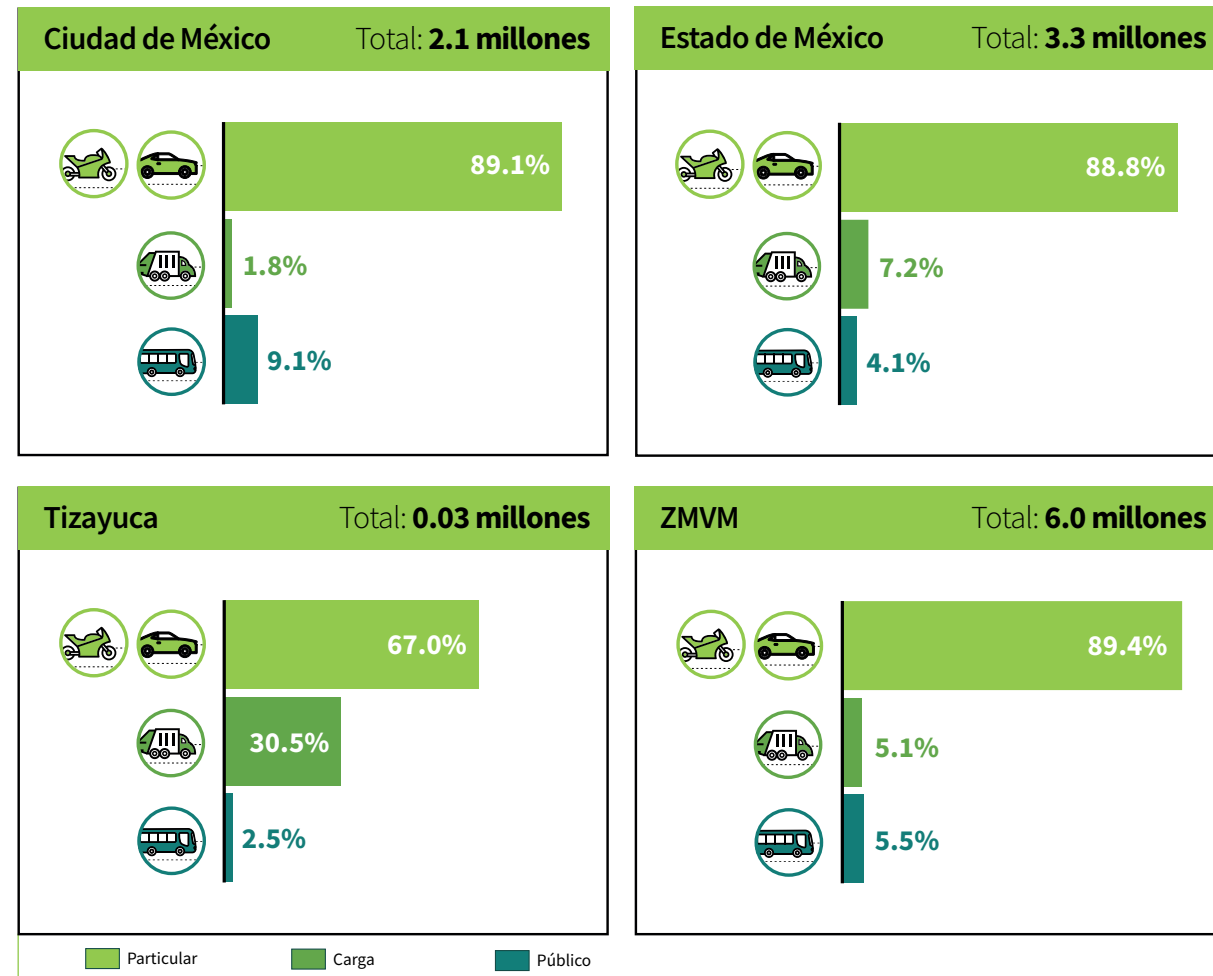
Los servicios de infraestructura vial y transporte están centralizados. En la Ciudad de México, el STC y MB dejan a amplias zonas del oriente y a zonas de serranías sin acceso directo a redes de transporte estructurado masivo (SEMOVI, 2019b). Las alcaldías Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza y Azcapotzalco son las mejor dotadas, mientras que las alcaldías con menos infraestructura son Milpa Alta, Xochimilco, la Magdalena Contreras, Tláhuac y Tlalpan; por otro lado, la infraestructura en la zona conurbada del Estado de México está desarticulada y desconectada de los sistemas de transporte masivo de la Ciudad de México.

Motorización

La flota vehicular de la ZMVM está integrada por vehículos particulares, transporte público de pasajeros y de carga locales, así como unidades de placa federal que incluyen autobuses de pasaje, turismo y vehículos de carga. El consumo de gasolina, diésel, gas natural y gas licuado de petróleo (gas L.P.) por la flota vehicular representa una de las principales fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera dentro de la zona de estudio.

Para el año 2018, el total de vehículos que circulaban en la ZMVM se estimó en 6.0 millones (SEDEMA, 2020c). De estos, 89.4% son vehículos particulares

(automóviles, camionetas tipo SUV y motocicletas), el 5.1% corresponde a transporte de carga (tractocamiones, vehículos tipo *pick up* y otros de carga, independientemente de su peso vehicular) y el 5.5% restante compone la flota pública (taxis, vagonetas, microbuses, autobuses y las unidades de BRT). Cuando se consideran únicamente los vehículos particulares, el índice de motorización de la ZMVM es igual a poco más de 270 unidades por cada 1000 habitantes. La Figura 1.30 muestra la distribución porcentual de los diferentes tipos de vehículos en cada una de las tres entidades que conforman la zona de estudio.



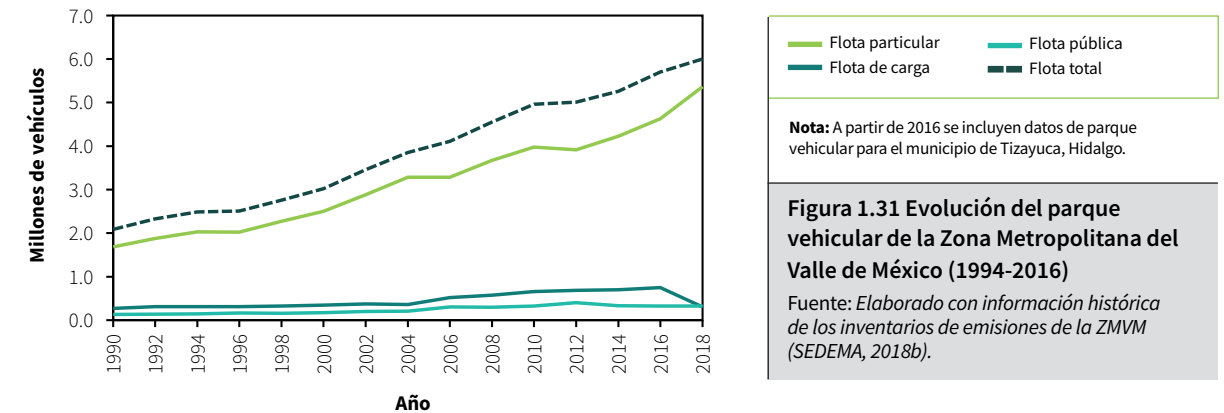
Nota: El total de vehículos de la ZMVM incluye un estimado de 600 mil unidades que no se encuentran registradas ante los gobiernos estatales y que circulan dentro de los límites territoriales de la zona de estudio, tales como vehículos emplacados en otras entidades, así como autobuses, tractocamiones y unidades de carga de más de 3.8 toneladas de placa federal, registradas a partir de aforos vehiculares de la SCT en las entradas a la ZMVM.

Figura 1.30 Flota vehicular de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2018

Fuente: *Inventario de emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2020c).*

El número de vehículos que circulan en la ZMVM ha crecido de manera constante y no se observan tendencias en cuanto a una desaceleración. El crecimiento más rápido se observa en la flota vehicular privada (ver Figura 1.31). Según la encuesta origen-destino de 2017, del total de hogares en la zona metropolitana (5.9 millones), 2.45 millones reporta-

ron contar con al menos un automóvil particular o camioneta, lo que es igual a 41 de cada 100. Este valor incrementa ligeramente en la Ciudad de México, donde el 44% de los hogares cuenta con al menos una unidad, mientras que en los municipios conurbados desciende a 38% (INEGI, 2017b).



Nota: A partir de 2016 se incluyen datos de parque vehicular para el municipio de Tizayuca, Hidalgo.

Figura 1.31 Evolución del parque vehicular de la Zona Metropolitana del Valle de México (1994-2016)

Fuente: *Elaborado con información histórica de los inventarios de emisiones de la ZMVM (SEDEMA, 2018b).*

En la ZMVM, se tienen registrados poco más de 307 mil unidades de carga. La cantidad de vehículos pesados de jurisdicción federal es considerable (tractocamiones, autobuses y vehículos con peso bruto vehicular superior a 3.8 toneladas). Este sector ocasiona problemas de circulación vial, aumento del ruido y de emisiones, en específico de carbono negro (CN) y partículas finas. De ello deriva la importancia de la regulación de vehículos con placa federal para reducir emisiones contaminantes.

En la ZMVM, 4.5% de los vehículos son año modelo 1992 o anterior. Se destaca que los programas vehiculares que se aplican en la Ciudad de México han favorecido la renovación de la flota, la cual actualmente se considera la más nueva del país; únicamente el 1.7% de los vehículos es modelo 1992 o anterior, en tanto que en el Estado de México la flota es más vieja, con una aportación del 6.6% para estos modelos. En términos del combustible utilizado, 97.1% son vehículos a gasolina y 2.1% a diésel, en tanto que el resto utiliza gas L.P., gas natural o tecnología híbrida o eléctrica. Para vehículos a gasolina, 4.2% son año 1992 o anterior, mientras que para vehículos a diésel el porcentaje de vehículos de edad avanzada es más significativo, grupo donde 11.2% son año modelo 1993 o anterior. Mayor información sobre las emisiones provenientes de fuentes móviles, desagregadas por tipo de vehículo y combustible, se encuentra en el Capítulo 5.

En términos de emisiones, existen indicadores del potencial de generación de contaminantes, como son el año modelo de la flota, el combustible que utiliza y el tipo de tecnología de control de emisiones con el que cuenta. Normalmente a mayor edad se presentan más emisiones debido al deterioro de los vehículos y al uso de tecnologías menos eficientes para el control de las emisiones.

Encuesta origen-destino 2017

Los desplazamientos cotidianos en la ZMVM permiten la circulación de personas y facilitan intercambios entre diversas actividades. Los motivos, duración, medios de transporte y horarios de los desplazamientos, entre otros aspectos, producen patrones de movilidad complejos. Las encuestas

origen-destino son una herramienta útil para caracterizar el reparto modal de los viajes, así como para identificar los principales flujos en términos de su volumen y dirección. A continuación se describen los resultados principales de la encuesta origen-destino, año 2017 (INEGI, 2017b).

Un total de 15.62 millones de personas de 6 años o más en la ZMVM realizan viajes en un día entre semana, de las cuales 44.4% residen en la Ciudad de México y el 55.6% en alguno de los municipios conurbados del Estado de México o Tizayuca. En total se realizan 34.56 millones de viajes¹⁶

en un día entre semana, en tanto que en sábado hay menos personas viajeras y, en general, estas solamente hacen un viaje de ida a algún lugar específico y otro más de vuelta al hogar, dando un total de 21.34 millones de viajes y 10.35 millones de viajeros.

Reparto modal

De los 34.56 millones de viajes que se realizan en un día entre semana, casi la mitad (45.1%) se llevan a cabo utilizando transporte público, seguidos de viajes exclusivamente caminando (32.3%) y después por transporte privado (21.1%). Se destaca a los colectivos (microbús o combi) como el principal modo de transporte público, utilizado en 3 de cada 4 viajes. En cuanto a modos estructurados de transporte, el STC Metro reporta 4.47 millones de viajes al día, seguido de los sistemas de

BRT con 1.11 millones de viajes. Cuando se desagrega por área geográfica, se observa que en la zona conurbada del Estado de México y Tizayuca el uso de colectivos es mayor; 4 de cada 5 viajes utilizan en alguno de sus tramos un colectivo. En cuanto al transporte privado, el 90.6% de los viajes son en automóvil privado, 5.1% en motocicleta y el resto en transporte escolar o de personal. La Tabla 1.13 desagrega los viajes por modo y tipo de transporte, así como por área geográfica.

Tabla 1.13 Viajes realizados en un día entre semana por la población de 6 años y más en la Zona Metropolitana del Valle de México, por tipo y modo de transporte

Modo	Millones de viajes (a)		
	ZMVM	CDMX	Municipios conurbados
Transporte público (b)	15.57	8.62	6.88
Colectivo (microbús o combi)	74.1%	67.8%	82.1%
Metro	28.7%	38.2%	16.8%
Taxi de sitio, calle o aplicación	10.5%	11.2%	9.7%
BRT (Metrobús o Mexibús)	7.1%	8.8%	5.1%
Autobús suburbano	5.8%	5.3%	6.3%
Autobús RTP o M1	2.6%	4.0%	0.9%
Mototaxi	1.8%	1.1%	2.6%
Otro tipo (c)	3.5%	4.1%	2.7%
Transporte privado	7.29	4.06	3.17
Automóvil o camioneta	90.6%	92.7%	87.9%
Motocicleta	5.1%	3.7%	6.9%
Transporte escolar y de personal	4.4%	3.6%	5.3%
Bicicleta	0.72	0.24	0.48
Exclusivamente caminando	11.15	4.50	6.62
Otro (d)	0.04	0.02	0.02
Total	34.56	17.30	17.09

(a) La suma por área geográfica puede ser menor que el total, debido a que se excluyen 154 mil viajes con origen no especificado.

(b) La suma de los porcentajes por modo de transporte puede ser mayor al 100%, porque en un viaje una persona puede emplear más de un modo de transporte para diferentes tramos.

(c) Considera al tren suburbano, trolebús, tren ligero, bicitaxi y Mexicable.

(d) Incluye trajinera, lancha, patineta, entre otros.

Fuente: Encuesta Origen-Destino en Hogares de la ZMVM 2017 (INEGI, 2017b).

¹⁶ Incluye 52 mil viajes con lugar de destino no especificado.

Motivo, duración y hora de inicio de los viajes

De los viajes realizados en un día entre semana, casi la mitad (el 47.4%) tienen como destino el hogar de la persona. El 18.9% de los viajes tienen como destino la escuela, 12.0% un centro comercial, tienda o mercado, y 8.1% una oficina; siguen en orden de magnitud los viajes cuyo destino es una fábrica o taller (3.9%), otra vivienda (3.0%), un hospital, clínica, consultorio o laboratorio (2.4%) u otro lugar (4.1%). El 0.2% restante corresponde a viajes cuyo destino no fue especificado. En cuanto al motivo de los viajes, 47.3% son para regresar al hogar, 22.0% para ir al trabajo, 11.9% para ir a estudiar, 6.6% para llevar o recoger a alguien, 6.5% para ir de compras, 2.9% tienen un fin social o de diversión, 0.8% son para hacer un trámite y el resto (2.0%) tiene otro propósito.

El tiempo promedio de todos los viajes realizados en un día entre semana es de 43 minutos. Los viajes para regresar al hogar duran en promedio menos que los viajes para ir al trabajo; los primeros tienen una duración promedio de 45 minutos, mientras que los segundos, de 57 minutos, en tanto que los viajes para ir a la escuela tienen una duración promedio de 33 minutos. En la Ciudad de México la gente tarda en promedio 20 minutos más en regresar a sus residencias, en comparación con la zona conurbada; por motivos de trabajo la tendencia se invierte y la población de la zona conurbada emplea 6 minutos más que su contraparte de la Ciudad de México. Se destaca que el 32.7% de los viajes para ir al trabajo toman más de una hora, mientras que para regresar al hogar este porcentaje se reduce al 21.9%.

Movilidad entre áreas geográficas

Del total de viajes con origen en los municipios conurbados del Estado de México y Tizayuca, 85.9% son viajes internos y cerca del 13.2% tienen como destino alguna de las alcaldías de la Ciudad de México; el porcentaje restante son viajes con destino fuera de la metrópoli o con destino no especificado. De las alcaldías de la Ciudad de México, cinco son las principales “atractoras” de viajes provenientes de la zona conurbada:

En términos de la hora de inicio de los viajes, la hora pico es entre las 07:00 y 07:59, periodo en el que inician más de 4 millones de viajes. Otras olas significativas en cuanto al número de viajes iniciados ocurren a las 8:00, 13:00, 14:00 y 18:00 horas. Entre las 6:00 y las 8:59 se observa la mayor actividad de viajes hacia el trabajo y la escuela; entre las 18:00 y 18:59 los viajes iniciados tienen como principal motivo el retorno al hogar.

Como se ha expuesto anteriormente, la red vial de la ZMVM prioriza al automóvil y, por consiguiente, los gastos de mantenimiento que se destinan a la red vial son para la superficie de rodamiento (SEMOVI, 2016), aun cuando el reparto modal indica que la mayoría de las personas (65.9%) camina por la calle en alguno de sus trayectos. Este factor, aunado a la desarticulación y fragmentación del servicio de transporte público, genera una disparidad en los tiempos de traslado e incrementa el número de transbordos o “cambios de modo” en un mismo viaje, particularmente cuando este se origina en las periferias. En promedio, un viaje en metro toma 39% más tiempo que un viaje en automóvil particular; para transporte colectivo el efecto es aún más drástico, con un incremento del 54%; en autobús suburbano los viajes son 33% más largos y en RTP, 22% (SEMOVI, 2019b). La desigualdad en la movilidad tiene un patrón espacial definido entre el centro y la periferia urbana, derivado de la ubicación de los sistemas de transporte e infraestructura, y la desarticulación de las zonas que concentran el empleo y las zonas residenciales.

Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Iztapalapa y Azcapotzalco; esto se atribuye a la magnitud de las actividades económicas y de servicios en estas alcaldías. En cuanto a los viajes con origen en la Ciudad de México, 87.2% son internos y 12.5% tienen un destino en la zona conurbada, principalmente en Ecatepec de Morelos, Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla de Baz y Tecámac. La Figura 1.32 muestra en un mapa

los principales distritos atractores de viajes, según los resultados de la encuesta origen-destino 2017. Es importante mencionar que, si bien estos resultados son generales, se identifican parejas de demarcaciones con un alto índice de

movilidad entre sí; tal es el caso de Ecatepec de Morelos y la alcaldía Gustavo A. Madero, con el número más grande de viajes entre un municipio de la zona conurbada y una alcaldía de la Ciudad de México.

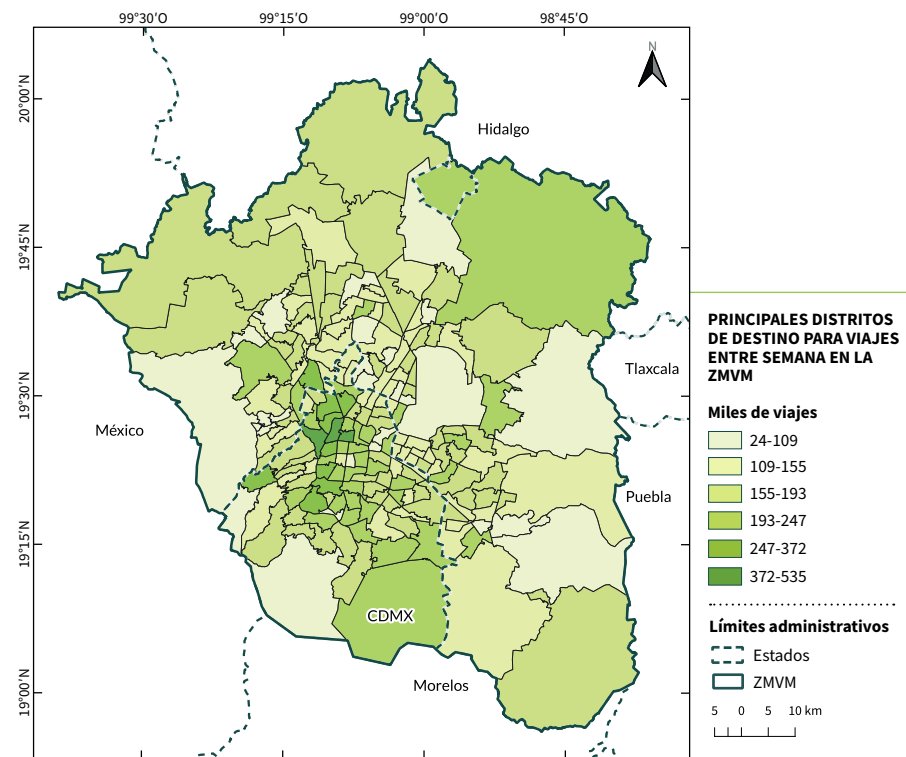


Figura 1.32 Principales distritos de destino para viajes entre semana en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Encuesta Origen-Destino en Hogares de la ZMVM 2017 (INEGI, 2017b).

La falta de cobertura de transporte público genera que la población opte por adquirir un vehículo privado, sea automóvil, camioneta o motocicleta, en el momento en que su poder adquisitivo lo permite y al no existir alguna otra alternativa viable. Estos vehículos se utilizan de manera ineficiente al transportar, en promedio, 1.5 ocupantes por vehículo; la encuesta origen-destino 2017 reporta que 68.3% de los viajes realizados en automóvil particular dentro de la ZMVM transportan únicamente a un pasajero, el conductor (INEGI, 2017b).

La crisis del sistema de movilidad se refleja en los crecientes niveles de tráfico; la Ciudad de México fue catalogada como la de mayor congestión vehicular en el mundo en 2016 (SEMOVI, 2019b). La velocidad de circulación se ha reducido de manera sostenida y se estima en un promedio de 11 km/h en zonas centrales de la región (BID, 2018). El aumento de la motorización privada incrementa los tiempos de traslado, ejerce presión para invertir en infraestructura vial y agudiza los problemas ambientales asociados a modos de transporte motorizados y la quema de combus-

tibles fósiles, una de las principales fuentes de contaminantes atmosféricos.

Reducir el uso del automóvil exige mejorar y ampliar la oferta de transporte público. Si se generan las condiciones apropiadas en la red vial, y se fomenta un desarrollo orientado al transporte público, se podrá inducir un incremento en su demanda. De lo contrario, se prevén efectos adversos como el aumento en los costos de traslado y el hacinamiento

en el transporte público. El incremento de la oferta vial no es una solución a largo plazo, pues tiende a generar un aumento de los niveles de motorización, producto de la expansión de la superficie vial (tráfico inducido), además de fragmentar y deteriorar el espacio público. Cualquier estrategia debe tener como punto focal la mejora y fomento al uso del transporte público masivo y no motorizado en la ZMVM (SEMOVI, 2019b).

Vías ferroviarias

La ZMVM es un importante punto nodal dentro de los tres corredores ferroviarios del país, los cuales convergen en la región centro y tienen origen en los pasos fronterizos del norte (Nuevo Laredo y Piedras Negras), el litoral del Pacífico (Manzanillo, Colima) y el Puerto de Veracruz en el Atlántico. La metrópoli cuenta con un total de 571 km de vías férreas (ver Figura 1.28) y la Estación Intermodal

Pántaco es el nodo ferroviario más importante en la región. En 2016, Pántaco ocupó el séptimo lugar a nivel nacional en volumen de tráfico local, moviendo más de 5.5 millones de toneladas de carga (García Ortega & Martner Peyrelongue, 2018), proceso para el cual se requiere del consumo de diésel ferroviario y que representa una fuente de emisión de contaminantes dentro de la región.

Aeropuertos

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), también conocido como el Aeropuerto Internacional Benito Juárez, es el aeropuerto más importante a nivel nacional. Anualmente moviliza a casi 50 millones de viajeros comerciales nacionales e internacionales. En 2018, el AICM registró 412 mil vuelos comerciales, de los cuales 280 mil fueron nacionales y 132 mil internacionales, más 5 mil vuelos comerciales de carga (SCT, 2020). El AICM atrae viajes y moviliza a población no solo de la región, sino de todo el país, mientras que la quema de turbotina y gasaviación representa otra fuente de emisiones dentro de la ZMVM.

Dada la saturación del AICM y la incapacidad de la infraestructura actual para satisfacer la demanda a largo plazo, desde 1990 se han evaluado distintos proyectos para un nuevo aeropuerto internacional en la ZMVM. Actualmente la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en conjunto con la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA),

dirigen la construcción de un nuevo aeropuerto internacional en la Base Aérea Militar no. 1 Santa Lucía, ubicada en el municipio de Zumpango en el Estado de México (SEDENA, s/f). Se prevé que las obras de la primera etapa del Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles concluyan en octubre de 2021 y que comience a operar en marzo de 2022 (SEDENA, 2019), con una capacidad para atender alrededor de 19 millones de personas al año.

Las necesidades de transporte aéreo de la ZMVM también son atendidas por otros dos aeropuertos en el Estado de México. En el municipio de Atizapán de Zaragoza se ubica el Aeropuerto Nacional Jorge Jiménez Cantú. Por su parte, el Aeropuerto Internacional Lic. Adolfo López Mateos en el municipio de Toluca de Lerdo, Estado de México, si bien se encuentra fuera de la ZMVM, forma junto con el AICM la red aeroportuaria principal de la ZMVM, al atender parte de la demanda de viajes nacionales e internacionales.

1.5.3 Disposición final de Residuos Sólidos Urbanos

La generación de residuos se relaciona directamente con el proceso de urbanización y desarrollo de una ciudad o zona metropolitana. El Estado de México y la Ciudad de México son las dos entidades federativas que generan mayor volumen de residuos sólidos urbanos (RSU) en todo el país; por ejemplo, en 2012 estas dos entidades generaron el 27.9% del total nacional (SEMARNAT, 2016). La elevada generación de residuos dentro de la ZMVM no solo se asocia a la cantidad de población, sino también a la actividad económica; en términos sencillos, la tendencia general es que a mayor PIB y nivel de consumo, mayor será el volumen de RSU generados.

En 2018, la Ciudad de México reportó una generación de más de 13 mil toneladas al día dentro de los límites de la ciudad (4.77 millones de toneladas al año), originadas en diversas fuentes como residencias, comercios, servicios, la central de abastos y otras fuentes que generan residuos de manejo especial y residuos peligrosos (SEDEMA, 2019c). Esto equivale a una generación per cápita de 1.4 kg de residuos al día, los cuales deben ser recolectados para después recibir tratamiento y/o ser trasladados a un sitio de disposición final.

La mayoría de los RSU generados dentro de la Ciudad de México se disponen en rellenos sanitarios localizados en municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM. Desde el cierre definitivo del relleno sanitario Bordo Poniente, IV Etapa, la Ciudad de México no cuenta con un espacio donde disponer sus residuos, por lo que a través de acuerdos con otros estados se usan cuatro rellenos ubicados en los municipios de Chicoloapan, Cuautitlán Izcalli (Bicentenario) e Ixtapaluca (Milagro y Cañada), en el Estado de México, así como un relleno en Cuautla, Morelos. A estos rellenos llegan más de 8000 toneladas al día provenientes de la Ciudad de México; la mayor parte, el 98%, se dispone en los rellenos sanitarios del Estado de México, siendo los rellenos

Milagro y Cañada los que reciben la mayor cantidad de residuos: alrededor de 3400 y 2700 toneladas al día, respectivamente. De la generación total en la Ciudad de México, el resto del volumen es recolectado en actividades de prepeña o recibe tratamiento para su recuperación, compostaje o uso como combustible alterno. En 2018 se recuperaron aproximadamente 180 toneladas de residuos valorizables al día, lo que equivale al 5% del total de RSU que llegan a plantas de selección. El volumen de RSU orgánicos que se procesaron en plantas de composta en 2018 superó las 1300 toneladas a día, de los cuales aproximadamente 98% se procesó en la planta de composta Bordo Poniente (SEDEMA, 2019c).

Por su parte, para los 59 municipios del Estado de México se estima una generación de 4.3 millones de toneladas al año, lo que equivale a una generación per cápita de 0.9 kg al día. En la entidad se tiene un registro de 48 sitios de disposición final, de los cuales únicamente 12 cuentan con disposición adecuada; es decir, infraestructura para el control de lixiviados y biogás (SMAGEM, 2019). Se reporta una recolección de más de 12 mil toneladas al día y se tienen 16 rellenos sanitarios (activos e inactivos), con una recepción de residuos promedio de más de 7 mil toneladas al día. Estos rellenos se localizan en los municipios de: Atizapán de Zaragoza, Ayapango-Juchitepec, Cuautitlán Izcalli, Chicoloapan, Ecatepec de Morelos, Ixtapaluca, Nicolás de Romero Rubio, Naucalpan y La Paz, Tecámac, Tepetzotlán, Tlalnepantla de Baz y Teoloyucan; además, se contabilizan otros 32 sitios de disposición, controlados y no controlados (SMAGEM, 2019).

En Tizayuca, Hidalgo, se recolectan aproximadamente 240 toneladas de residuos al día (INEGI, 2017a). Actualmente el municipio no cuenta con un relleno sanitario que cumpla con características para el manejo adecuado de RSU. Se reporta un tiradero donde se disponen RSU de forma

irregular, en tanto que otra fracción de los residuos se traslada a sitios de disposición localizados en el Estado de México (H. Ayuntamiento de Tizayuca, 2018; SEMARNATH, 2014).

La disposición inadecuada de los residuos sólidos que se generan en una ciudad se asocia a distintas problemáticas ambientales y de salud, como malos olores, contaminación del suelo y del agua. En lo que concierne al tema de calidad del aire, en los rellenos sanitarios se genera biogás, compuesto principalmente por CH₄ y CO₂, ambos GEI. También se generan trazas de CO, un contaminante criterio, además de NH₃ y COV (INEGI, 2017a), los cuales son precursores de contaminantes secundarios. No obstante, el problema principal se suscita en sitios no controlados, donde las prácticas inadecuadas de disposición de residuos pueden derivar en problemáticas como (Köfalusi & Aguilar, 2006):

- Incendios provocados o repentinos en tiraderos a cielo abierto y sitios de disposición final sin infraestructura adecuada para la gestión y manejo de biogás. Como resultado, se emiten partículas suspendidas, CO, NO_x, SO₂ y COV. Estos contaminantes también se generan durante la quema a cielo abierto de residuos sólidos, práctica que responde a usos y costumbres para eliminar los residuos, especialmente en zonas donde los servicios de recolección son inadecuados, y en procesos de incineración donde las condiciones de combustión no son apropiadas.
- Suspensión y arrastre de partículas y microorganismos patógenos por efecto del viento, a falta de prácticas de compactación y recubrimiento diario de los residuos dispuestos en sitios no controlados y tiraderos a cielo abierto.

1.5.4 Gobernanza y planeación urbana

La gobernanza de la planeación urbana en la ZMVM está dividida y fragmentada en términos políticos (OCDE, 2015). Si bien los sistemas económicos, de uso de suelo y de transporte han evolucionado, las fronteras político-administrativas de la región, tanto estatales como municipales, generan barreras para la atención de las necesidades de la población, tanto en términos económicos como sociales. Es así que se crean marcadas diferencias entre la cobertura y la calidad de los servicios públicos entre las tres entidades federativas y las 76 demarcaciones de segundo nivel que conforman la ZMVM. Por ejemplo, muchas decisiones en materia de uso de suelo se toman a nivel municipal, generando contradicciones y conflictos que dificultan la cooperación entre las áreas que definen e implementan políticas públicas urbanas a nivel de gobierno central.

En los gobiernos de la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo, así como en el Gobierno Federal, se identifican múltiples actores, organismos,

comisiones, comités y consejos de coordinación y planeación. El gran número de jurisdicciones –a veces administrativamente independientes– complica la planeación a nivel metropolitano. Además, pese a los esfuerzos de coordinación, el modo de operación de las instituciones presenta distintos obstáculos que impiden que se establezca una política integral de desarrollo urbano y movilidad para el total de la ZMVM, destacando los siguientes puntos:

- Organismos que atienden a un solo sector.
- Cultura reactiva en lugar de preventiva ante asuntos o problemas específicos.
- Falta de una visión metropolitana común que guíe las acciones a implementar.
- La estructura legislativa e institucional vigente no es vinculante en materia de coordinación metropolitana.

1.6 Estructura institucional

La gestión de la calidad del aire tiene como objetivo reducir la concentración de los contaminantes atmosféricos. Las políticas públicas en materia de calidad del aire se materializan a través de los Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire, también llamados ProAire, instrumentos en los que se establecen metas, medidas y acciones, a corto, mediano y largo plazo, para mejorar la calidad del aire en una región en específico. Un ProAire permite coordinar de manera transversal a los diferentes actores involucrados en la gestión de la calidad del aire, al interior de los ejecutivos estatales y municipales, y en cooperación con instituciones federales (SEMARNAT, 2017).

Para garantizar el derecho de la población de la ZMVM a un medio ambiente sano (Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 2008) varias dependencias en los tres órdenes de gobierno requieren actuar de manera armoniosa y coordinada según sus responsabilidades y funciones, las cuales se detallan en el Capítulo 2. Por su cobertura geográfica, en la ZMVM, en materia de calidad del aire y asuntos relacionados a la misma, actúan Dependencias y Entidades de la Administración Pública del Gobierno Federal, los Gobiernos Estatales de tres entidades federativas (Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo) y autoridades de 76 Municipios y Alcaldías. Además, dentro de cada uno de los tres niveles actúan diferentes secretarías, direcciones y departamentos; si bien la gestión de la calidad del aire será responsabilidad principal de las dependencias en materia ambiental, por la naturaleza de las fuentes de emisión y el alcance de los impactos de la mala calidad del aire, se requiere la cooperación con autoridades en materia de comunicaciones y transportes, movilidad, tránsito, salud pública, desarrollo urbano, energía, desarrollo económico y fomento industrial, por poner algunos ejemplos.

A nivel nacional, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de

Contaminantes (DGGCARETC), coordina la política nacional de gestión de calidad del aire. La herramienta de planeación de mayor jerarquía en la materia es la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (ENCA), la cual orienta y coordina *“acciones entre diferentes instancias gubernamentales para controlar, mitigar y prevenir la emisión y concentración de contaminantes en la atmósfera en ambientes rurales y urbanos”* (SEMARNAT, 2017). Dichas acciones requieren de la colaboración con otras secretarías federales como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de Salud (SS) y la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) es un organismo público descentralizado y sectorizado en la SEMARNAT, el cual juega un papel importante en el ámbito federal, al tener como objeto *“realizar investigación científica o tecnológica en materia de... protección al ambiente y preservación y restauración del equilibrio ecológico”* (INECC, 2016). Es así que el INECC coordina varios esfuerzos relacionados con el diagnóstico de fuentes de emisión, el estado de la calidad del aire y su impactos en la población. El monitoreo y vigilancia del cumplimiento de la legislación ambiental requiere a su vez de la participación de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), por ejemplo, para monitorear y sancionar a fuentes fijas de jurisdicción federal.

Finalmente, a nivel nacional la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) funge como organismo de coordinación política en la materia, entre autoridades federales, estatales y municipales ambientales en el centro de México. Esta fue creada mediante un convenio de coordinación entre el Gobierno Federal, por conducto de la SEMARNAT, y los Gobiernos de la Ciudad de México y los estados de México, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala. La CAME cuenta con un instrumento vigente para la gestión de la calidad del aire en los estados antes mencionados, tres de los cuales forman parte de la ZMVM; este instrumento es el Programa de Ges-

tión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis, ProAire de la Megalópolis 2017-2030.

Dentro de la ZMVM, tres autoridades estatales en materia de medio ambiente se encargan de instrumentar los ProAire:

- la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), a través de la Dirección General de Calidad del Aire;
- la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM), a través de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, y
- la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo (SEMARNATH), a través de la Dirección General de Gestión de Calidad del Aire.

El presente ProAire corresponde a la actualización del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. Sin embargo, en el área de estudio se encuentran vigentes el ProAire de la Megalópolis 2017 - 2030, y otros dos ProAire a nivel estatal que cubren parcialmente el territorio de la ZMVM, que son:

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México, ProAire 2018-2030

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Hidalgo, ProAire 2016-2024

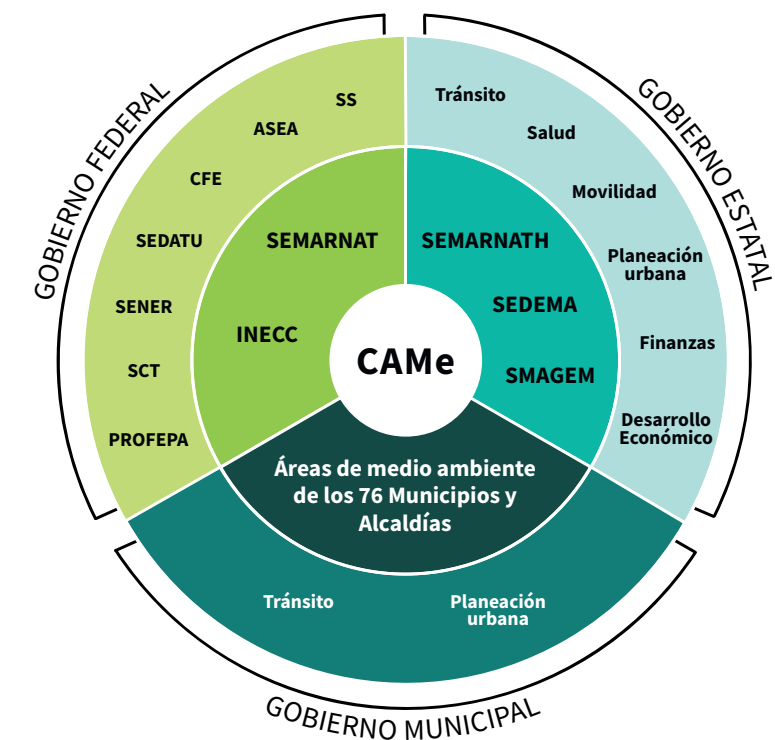


Figura 1.33 Ejemplo de instituciones gubernamentales en materia de calidad del aire dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaboración propia.*

Es así que la implementación de las medidas y acciones para mejorar la calidad del aire en la ZMVM implica un trabajo coordinado entre los tres gobiernos estatales y con las dependencias federales pertinentes. Además, las procuradurías ambientales estatales serán las encargadas de vigilar el cumplimiento de la legislación ambiental en materia de contaminación atmosférica; en la ZMVM actúan la Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT) de la Ciudad de México, la Procuraduría de Protección al Ambiente (PROPAEM) del Estado de México y la Procuraduría Estatal de Protección al Ambiente (PROESPA) de Hidalgo. A nivel estatal también participan otros órganos descentralizados que promueven la investigación científica y tecnológica, como el Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático del Estado de México (IEECC).

Los gobiernos locales también se deben involucrar en la gestión de la calidad del aire, al contar con atribuciones específicas para la protección, restauración y conservación del medio ambiente. Las áreas de medio ambiente dentro de los ayuntamientos y alcaldías deben ser partícipes de las acciones orientadas a la prevención de la contaminación atmosférica que dicte un ProAire. Cabe mencionar que la implementación de programas transversales también requiere la participación del sector privado, la academia, los medios de comunicación, las organizaciones no gubernamentales y la sociedad.

Un ejemplo del tipo de coordinación que exige un ProAire metropolitano es la operación de Programas de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO) homologados. El Gobierno Federal expide las Normas Oficiales Mexicanas¹⁷ que establecen los límites máximos permisibles de gases contaminantes, en tanto que el Estado de México y la Ciudad de México implementan sus respectivos PVVO que se publican de manera semestral. La coordinación es necesaria para garantizar que la Ciudad de México reconozca los hologramas de verificación otorgados por el Gobierno del Estado de México y viceversa. Posteriormente, los hologramas emitidos

a los vehículos se vinculan con otros programas y medidas para mejorar la calidad del aire, como el programa Hoy No Circula, y para implementar acciones específicas durante episodios de contaminación severos, como lo hace el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas. Finalmente, los agentes de tránsito estatales y municipales vigilan que los vehículos circulen en cumplimiento con el PVVO. Para que el programa funcione de manera adecuada en toda la ZMVM, se requiere el trabajo coordinado y consensuado de aproximadamente 80 autoridades diferentes.

Es evidente la necesidad de un órgano de coordinación que se encargue de la planeación y ejecución de acciones tendientes a proteger el medio ambiente, y preservar y restaurar el equilibrio ecológico en la zona. El papel de la CAME cobra relevancia al facilitar la implementación de una visión metropolitana y regional que guíe las acciones encaminadas a revertir las tendencias de deterioro y mejorar la calidad del aire. Además de mecanismos adecuados de coordinación, la generación de recursos propios para el financiamiento de acciones ambientales es un factor determinante en la implementación de los ProAire. En ese sentido, el Fideicomiso no. 1490 “Fideicomiso para Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis”, administrado por la CAME, establece procedimientos para captar recursos financieros y después permite destinarlos al pago de gastos para contribuir a cumplir los fines del mismo fideicomiso.

Sin embargo, la división y fragmentación en términos políticos dentro de la ZMVM (OCDE, 2015), derivada del gran número de jurisdicciones independientes que actúan dentro de ella, es uno de los principales obstáculos para el tipo de coordinación que persigue la CAME. Si bien la Comisión facilita la coordinación entre autoridades ambientales, pueden existir barreras en la gobernanza de otros sectores que deberían participar en la gestión integral de la calidad del aire. Esto genera marcadas diferencias entre la cobertura y

la calidad de los servicios públicos –por ejemplo infraestructura para transporte no motorizado– y las políticas que se implementan en la ZMVM para mejorar la calidad del aire. La planeación a nivel metropolitano requiere de una visión común que integre a todos los sectores involucrados y no únicamente al sector ambiental.

Finalmente se destaca la existencia de entes administrativos a nivel estatal cuyo objetivo es coordinar relaciones inter-gubernamentales y contribuir

a una planeación y seguimiento metropolitano. En específico, la Ciudad de México cuenta con una Subsecretaría de Coordinación Metropolitana y Enlace Gubernamental, en tanto que la Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano del Gobierno del Estado de México tiene entre sus funciones “*ampliar y fortalecer los mecanismos de coordinación con los gobiernos Federal, de la Ciudad México, de las entidades federativas vecinas y de los municipios conurbados, para atender de manera integral los asuntos de carácter metropolitano.*”

¹⁷ Estas normas son: NOM-041-SEMARNAT-2015, NOM-042-SEMARNAT-2003, NOM-045-SEMARNAT-2017, NOM-047-SEMARNAT-2014 y NOM-167-SEMARNAT-2017. Estas se describen en el Capítulo 2 del presente ProAire.