
**Diseño del monitoreo
de precursores oxidantes
fotoquímicos en la ciudad de México
y su área metropolitana**

**M. I. Mónica del Carmen Jaimes Palomera
y col.**

Ayudas a la investigación 2010

Autores

M.I. Mónica del Carmen Jaimes Palomera

Estudiante de Doctorado en Ingeniería Ambiental, UNAM

Dr. Humberto Bravo Álvarez

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México

Q. Armando Retama Hernández

Director de Monitoreo Atmosférico,
Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

Índice

	Página
1. RESUMEN	4
2. INTRODUCCIÓN	4
2.1. Formación del Ozono	5
2.2. El ozono en la Ciudad de México y su área metropolitana	6
2.3. Monitoreo de Compuestos Orgánicos Volátiles en la Ciudad de México y su Área Metropolitana	9
3. OBJETIVOS Y ALCANCES	10
3.1. Hipótesis	10
3.2. Meta	11
3.3. Objetivos	11
3.4. Alcance	11
4. MÉTODO	11
4.1. Plan de Trabajo	11
4.2. Definición de los objetivos de monitoreo	11
4.3. Diseño de la red de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono	11
4.3.1. Evaluación de la escala espacial	12
4.3.2. Caracterización del área de monitoreo	12
4.3.3. Definición del tipo de sitios de monitoreo	12
4.3.4. Selección final de los sitios de monitoreo	13
4.3.5. Número de sitios	13
4.3.6. Evaluación del entorno físico	13
4.4. Recursos para el proceso de selección de los sitios de monitoreo	13
5. RESULTADOS	14
5.1. Objetivos de monitoreo	14
5.2. Selección de los sitios de monitoreo	14
5.2.1. Definición del centroide para el análisis de sector	14
5.2.2. Selección del sitio Tipo I	14
5.2.2. Selección del sitio Tipo II	16
5.2.3. Selección del sitio Tipo III	19
5.2.4. Selección del sitio Tipo IV	21
5.3. Propuesta de la configuración de la red de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono	22
6. CONCLUSIONES	22
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1. RESUMEN

La Ciudad de México y su Área Metropolitana (CMAM) es una región que presenta condiciones que favorecen la presencia de ozono en la atmósfera como son: altitud de 2240 sobre el nivel del mar, elevada radiación solar, localización fisiográfica, altas emisiones de precursores de ozono, óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos reactivos. Sin embargo, es a partir de 1986 cuando se incrementan dramáticamente los niveles de ozono en la atmósfera, así como el número de excedencias a su norma de calidad del aire de México (0.11 ppm en una hora no más de una vez al año). Cabe mencionar que en 1991 se rebasó la norma de calidad del aire para ozono en 2,432 horas, y en 2010 se rebasó 450 horas. Por lo anterior es innegable el efecto para la salud.

La importancia del monitoreo de los COV en la Ciudad de México y su área metropolitana, se fundamenta en su reactividad y toxicidad, ya que dependiendo de su reactividad constituyen un factor esencial en la formación del ozono. El ozono es el principal problema de contaminación del aire en la Ciudad de México, por lo tanto se requiere de acciones dirigidas a disminuir eficazmente sus niveles, sin embargo, la complejidad de la formación del ozono requiere del conocimiento de la relación que existe entre sus precursores, y para ello es necesario la medición de los compuestos reactivos precursores del ozono para definir las características de estos contaminantes en la atmósfera.

La metodología para el diseño de la selección de los sitios de monitoreo se realizó considerando las recomendaciones de la U.S. EPA, con base en el programa "Photochemical Assessment Monitoring Station Program (PAMS)". Los sitios seleccionados de acuerdo a las características y necesidades de la Ciudad de México y su área metropolitana son: un sitio para la evaluación de precursores en una estación localizada en la zona centro de la CMAM, dos estaciones para determinar las máximas concentraciones de ozono (una en el suroeste y otra en el noroeste), un sitio para evaluar las concentraciones de fondo de precursores localizada en el noreste de la CMAM y un sitio para evaluar el transporte del ozono, localizado al sur de la Ciudad. Lo anterior después de una evaluación minuciosa de las condiciones de los sitios, meteorología del lugar e información de calidad del aire existente.

Ozono, Monitoreo de Precursores de Ozono, Diseño de la Red de Precursores de Ozono.

2. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es un requisito básico para la salud y el bienestar de los seres humanos. Su deterioro representa una amenaza importante para la salud a nivel mundial. Según una evaluación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) el efecto de las enfermedades producto de la contaminación del aire, representan más de dos millo-

nes de muertes prematuras en exteriores urbanos e interiores. Más de la mitad de este problema de salud recae en las poblaciones de los países en vías de desarrollo (1). En la década de los 90 la Ciudad de México fue considerada como la región más contaminada del mundo, ya que en los primeros 5 años en más del 90% de los días del año se reportaban concentraciones que superaban por mucho las recomendaciones nacionales e internacionales. Las acciones implementadas en los últimos 20 años, han permitido una reducción importante en las concentraciones de los contaminantes primarios y ha disminuido la frecuencia con la que se exceden las normas nacionales para contaminantes secundarios (2).

De acuerdo con el último informe anual de la calidad del aire en la Ciudad de México, los niveles de ozono alcanzaron un valor máximo de 0.198 ppm, muy por encima del valor límite (0.110 ppm, promedio horario) que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-020-SSA1-1993) de salud ambiental para este contaminante. Asimismo, este valor límite se excedió en 149 días y en un total de 450 horas. A pesar de los esfuerzos realizados para mejorar la calidad del aire y disminuir paulatinamente las concentraciones de ozono (O₃) en la tropósfera, alrededor de 20 millones de personas continúan expuestas a concentraciones que implican riesgo para su salud (3).

El ozono troposférico es el mayor componente del smog fotoquímico, existe evidencia sobre el riesgo significativo que tiene para la salud humana (4,5). El ozono es un contaminante secundario cuyo control requiere de estrategias con fundamento científico y social de acuerdo con la política económica actual y la voluntad política existente. Sus precursores, óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV), tienen una amplia variedad de fuentes y pueden involucrar interacciones complejas no lineales entre ellos (6,7).

La formación de ozono troposférico es un proceso complejo que involucra no solo a los precursores (óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos reactivos), sino también a las características meteorológicas y fisiográficas de la región. En la Ciudad de México coinciden diversos factores que propician el incremento en la concentración de ozono: la latitud que permite una intensa radiación solar a lo largo del año, estabilidad atmosférica durante la temporada seca, frecuentes inversiones térmicas de superficie durante el invierno y de altura durante la primavera, y la presencia de montañas alrededor de la cuenca que limitan la dispersión y favorecen la formación de inversiones térmicas (8).

Los automóviles se encuentran dentro de las principales fuentes de emisión de precursores, anualmente generan 60,662 toneladas de óxidos de nitrógeno; 638,104 toneladas de monóxido de carbono y 90,653 toneladas de hidrocarburos; por su parte la industria en su conjunto genera anualmente 161,219 toneladas de estos contaminantes (9).

La disminución de la concentración de ozono en aire ambiente solo se puede conseguir a través de la disminución y control de sus precursores. La elaboración de

políticas adecuadas de gestión ambiental requiere del conocimiento de la distribución, caracterización y comportamiento de las especies reactivas antes y durante la activación de los procesos fotoquímicos.

El monitoreo continuo de los compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NOx) en la Ciudad de México, es crítico para evaluar la producción de O₃ troposférico. Estas mediciones preverán información importante para la evaluación y manejo de la calidad del aire, y mejorarán las propuestas de estrategias de control, en forma efectiva y progresiva para resolver el grave problema de ozono que se tiene en la Ciudad de México.

En este contexto, la importancia de un estudio a fondo sobre el diseño del monitoreo de precursores oxidantes fotoquímicos en la Ciudad de México y su área metropolitana, se justifica plenamente por el grave problema de contaminación atmosférica por ozono en el área, y se fundamenta en la medición sistemática de precursores de ozono como son los óxidos de hidrógeno, los compuestos orgánicos volátiles (COV) que se identifican por su reactividad conjuntamente con los NOx y la radiación solar en el rango UV, en la formación de ozono y en la necesidad de establecer políticas y programas eficaces para la prevención, minimización y control de la contaminación atmosférica y mejorar la calidad del aire en la ciudad.

2.1. Formación del Ozono

El ozono (O₃) es un gas oxidante producido naturalmente en cantidades muy pequeñas (≈10 ppb). La molécula de ozono es compuesta por tres átomos de oxígeno, en contraste con la molécula normal de oxígeno (O₂), el cual ocupa el 21% del aire. El ozono se forma cuando un átomo de oxígeno (O), producido usualmente en la troposfera por la fotodisociación de dióxido de nitrógeno (NO₂), se combina con una molécula de oxígeno para formar el ozono. El ozono fue descubierto por Shönbein a mediados del siglo XXIX y fue el primero en detectarlo en el aire (10).

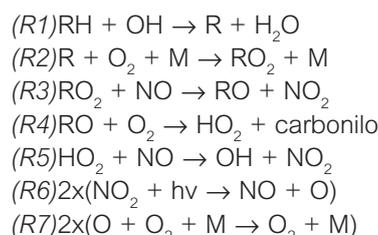
El ozono se encuentra de manera natural en la troposfera por la intrusión del ozono estratosférico aunado a las reacciones fotoquímicas de precursores biogénicos y geogénicos. La concentración natural del ozono varía con la altitud, a mayor altitud se registra una concentración mayor. El ozono troposférico, en su mayoría es un contaminante secundario formado por reacciones fotoquímicas de sus precursores, no es emitido directamente por ninguna fuente. El ozono y otros oxidantes, como el peroxiacetil nitrato (PAN) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) se forman en áreas contaminadas por reacciones atmosféricas que involucran dos clases de contaminantes precursores: los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NOx). La formación del O₃, otros oxidantes y sus productos es compleja, ya que es una función no lineal en la que se involucran muchos factores: 1) la intensidad y distribución del espectro de la luz solar; 2) la mezcla atmosférica; 3) la concentración de los precursores en el ambiente y sus tasas de reacción química; y 4)

la transformación por efectos meteorológicos y de aerosoles (11,12).

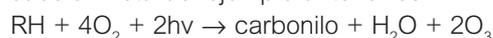
Las fuentes antropogénicas más importantes de los precursores de ozono son las emisiones vehiculares, emisiones industriales y los solventes químicos. A pesar de que estos precursores se originan en áreas urbanas, también pueden ser arrastrados por los vientos a lo largo de varios kilómetros provocando incrementos en la concentración de ozono en regiones menos pobladas.

El nivel máximo de ozono que se puede alcanzar en una atmósfera contaminada depende no solamente de las concentraciones absolutas de COV y de óxidos de nitrógeno, sino también de su proporción. En áreas rurales la producción de ozono generalmente está limitada por la producción de óxidos de nitrógeno. Cuando la proporción de COV/NOx es de 4/1 y 10/1, las condiciones son favorables para la producción de ozono.

En la troposfera contaminada la producción de ozono ocurre vía la oxidación de los COV y CO iniciada por radicales libres en presencia de NOx (NO + NO₂) y luz solar. La siguiente secuencia muestra de manera simple el proceso:



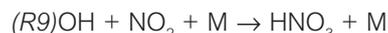
La reacción neta del ejemplo anterior es:



Donde RH representa un hidrocarburo genérico, R es una cadena de hidrocarburo y M puede ser N₂ u O₂. El carbonilo producido en la secuencia puede continuar con la oxidación hasta producir ozono. En la secuencia se puede ver que existe un consumo de COV, mientras que los radicales OH/HO₂ y el NOx actúan como catalizadores. El ciclo concluye cuando se remueven los catalizadores, lo cual puede ocurrir por la combinación del radical peróxido y formar peróxidos (R8) o de la reacción del radical hidroxilo con NO₂ y formar ácido nítrico (R9).



ó



En términos generales la formación de ozono puede estar limitada por los COV o los NOx. La existencia de estos dos regímenes puede entenderse mecánicamente en términos de las fuentes relativas de OH y NOx (Figura 1). Cuando la fuente de OH es mayor que la fuente de NOx la terminación está dominada por la formación de peróxido (línea azul en la Figura 1). Bajo estas condiciones la formación de peróxido de hidrógeno H₂O₂ es mucho mayor que la formación de ácido nítrico HNO₃, la concentración de NOx es baja y como resultado la velocidad de producción está limitada por NOx. Esto significa que la concentración de O₃ se reduce de manera efectiva disminuyendo la emisión/concentración de NOx en lugar de los COV. Cuando la fuente de OH es menor que

la fuente de NO_x, la terminación procede predominantemente vía la formación de HNO₃, la formación de este compuesto es mayor que la de H₂O₂, el NO_x es relativamente abundante y la producción de O₃ está limitada por COV. Entre estos extremos existe una región en donde la producción de O₃ es igualmente sensible a los COV y los NO_x, ver Figura 2 (13).

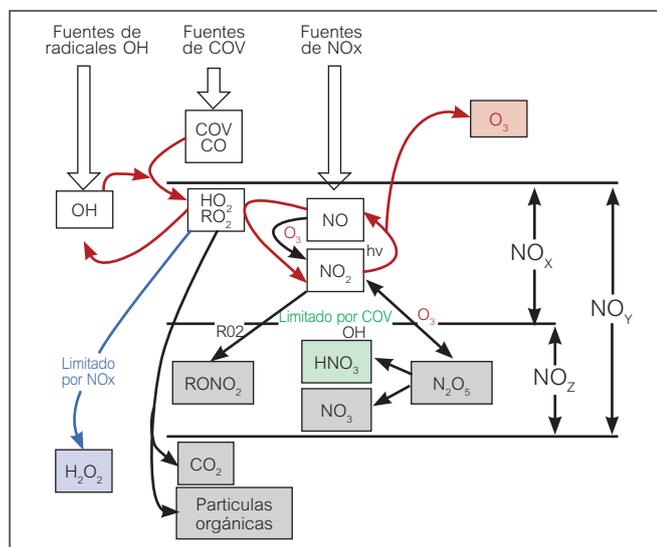


Figura 1. Rutas fotoquímicas involucradas en la producción de ozono (línea roja) y pasos de terminación que dominan bajo limitación por NO_x (línea azul) o limitación por COV (línea verde). Fuente: adaptado de "An assessment of Tropospheric Ozone Pollution (13)" y tomado de www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/

La identificación y medición de variables críticas es esencial para definir y entender el estado de la atmósfera y los cambios a través del tiempo. Los países de América del norte han realizado mejoras en sus redes de monitoreo, al innovar e ir monitoreando los contaminantes relevantes a través del tiempo. Algunos contaminantes son formados por reacciones atmosféricas, por eso es necesario caracterizar los precursores que participan en su producción. La medición sistemática de NO_x y COV es crítica para la gestión más efectiva del problema de contaminación atmosférica por ozono. (13).

El monitoreo atmosférico sistemático del ozono y sus precursores es prioritario para diseñar estrategias de control efectivas; la mejora progresiva de la calidad del aire se dará como resultado de la implementación de estrategias de control para NO_x y COV.

2.2. El ozono en la Ciudad de México y su área metropolitana

El ozono (O₃) es un contaminante secundario producto de la reacción fotoquímica entre los compuestos orgánicos reactivos (COR) y los óxidos de nitrógeno emitidos principalmente por los vehículos. En la Ciudad de México y su área metropolitana (CMAM) su concentración y distribución espacial refleja la influencia de las condiciones fisiográficas, la meteorología, las emisiones de los precursores

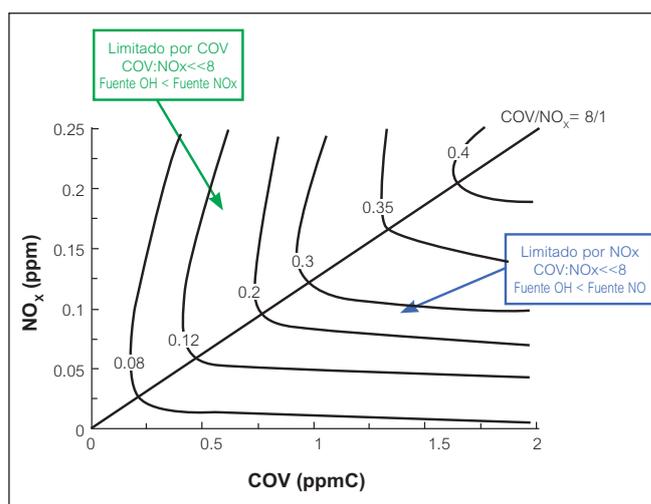


Figura 2. Isopletas de la concentración máxima de un hora de O₃ (ppm), calculada en función de las concentraciones iniciales de COV y NO_x, representación de las regiones que son caracterizadas por la limitación de COV ó NO_x.

Fuente: adaptado de "An assessment of Tropospheric Ozone Pollution(13)".

generados por sus habitantes y las características oxidativas de su atmósfera. La contaminación por ozono es actualmente el mayor problema para la calidad del aire en la CMAM. Desde 1986, año en el que inició el monitoreo continuo de la contaminación del aire, todos los años se han registrado concentraciones con valores superiores a los límites definidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM) de salud ambiental para ozono. Durante los primeros años de la década de los 90, los niveles de ozono alcanzaron los máximos históricos en la Ciudad de México, registrando concentraciones de hasta cuatro veces el valor de la norma de 0.110 ppm. La reducción de las concentraciones de este contaminante es uno de los retos más difíciles para la gestión de la calidad del aire, por la complejidad de los procesos que lo originan (14, 15, 16, 17, 18, 19).

En el informe de calidad del aire elaborado por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal de 2008, se reporta que de los 15.7 millones de habitantes que se encuentran en el área de cobertura de la red de monitoreo para ozono, el 61% se expone a concentraciones que rebasan el valor límite de la NOM de 0.110 ppm por más de 100 horas al año, y 1.5 millones de habitantes se encuentran en regiones con alto riesgo de exposición donde se excede más de 200 horas al año el valor límite de la NOM (2).

El año 1990 representa el punto de partida para la gestión de la calidad del aire, en ese año se publicó el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PICCA) en un intento por estructurar un conjunto de acciones coordinadas y orientadas a reducir las emisiones de plomo, dióxido de azufre, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. Desde ese año se ha mantenido una continuidad en los programas de gestión de la calidad del aire, y se van renovando periódicamente en función de las

metas cumplidas e identificando deficiencias en las estrategias previas, de acuerdo a la dinámica de los contaminantes. Es por ello que en 1995 se desarrolló el “Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000” (PROAIRE I) y en 2000 el “Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010” (PROAIRE II), estos representan la continuidad de la gestión de la calidad del aire iniciada con el PICCA (20,21). Con estos programas se ha logrado disminuir las concentraciones altas de ozono, sin embargo, aún no se cumple con el valor de la NOM y en 2009 se presentaron 180 días con valores que excedieron el valor límite y la estación Pedregal registró 287 horas por arriba del valor de 0.110 ppm. Una manera de evaluar la eficacia de los programas de gestión de la calidad del aire es a través del análisis de la tendencia durante su periodo de ejecución o vigencia que representa la comparación de los niveles de concentración al inicio de la gestión, durante y en la conclusión de los programas evaluando su comportamiento y la tasa de cambio a través del tiempo. En 2009 el ozono presentó un comportamiento decreciente desde 1990 y una reducción del 28% de los niveles de concentración, considerando el promedio de las 5 estaciones históricas (Figura 3).

En la Ciudad de México y su área metropolitana se combinan una serie de factores que favorecen la contaminación fotoquímica, en primer lugar sus características fisiográficas, ya que se encuentra en un altiplano rodeado de montañas a 2,240 metros sobre el nivel del mar en promedio y cubre un área de 3,540 km² que representa el 37% de la cuenca del Valle de México, cuenta con prominencias topográficas aisladas como el Cerro de la Estrella, el Peñón, la Sierra de Guadalupe y el Cerro de Chapultepec, entre otros. Su ubicación en la latitud 19°20' N y 99°05' O, la hace especialmente susceptible de recibir radiación solar de altos niveles de energía en todo el año, se encuentra limitada al este por el lago de Texcoco, y al oeste y sur por altas montañas con un promedio de altura de 3000 m, con elevaciones que superan los 5,400 m sobre el nivel del terreno, la zona montañosa del suroeste de la ciudad, constituyen una barrera física que dificulta la salida de los contaminantes y permite su acumulación (Figura 4). Por otra parte, están las condiciones climáticas, en invierno incluyen una ausencia de vientos y masas estacionarias de aire frío, favoreciendo las condiciones para las inversiones térmicas, lo cual es más frecuente durante la temporada seca (especialmente en los meses de diciembre a abril), por lo tanto son las temporadas más adversas para la ventilación en la

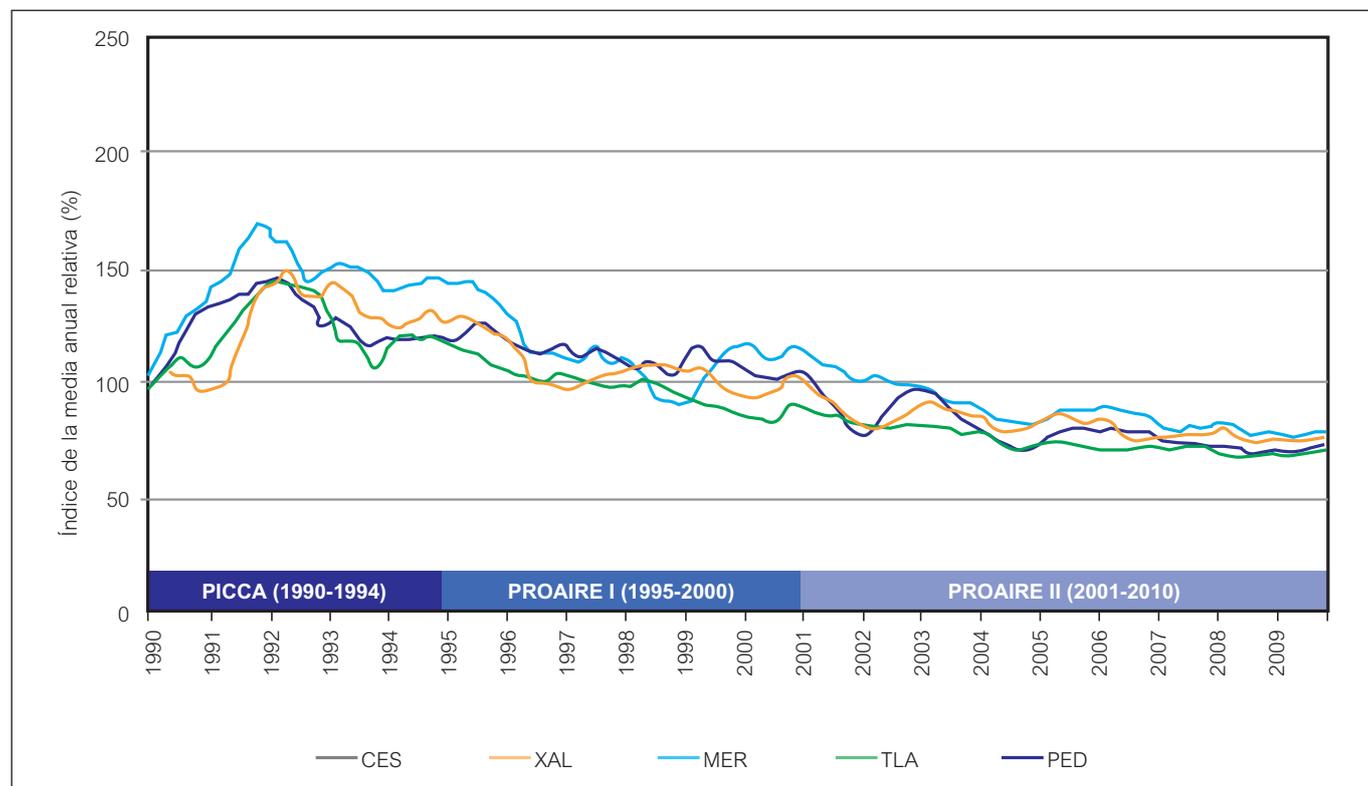


Figura 3. Tendencia del ozono (O₃) de 1990 a 2009.

La línea de tendencia representa la tasa de cambio porcentual del contaminante evaluada mes a mes con respecto a la concentración del promedio anual de 1989, antes del inicio de los programas para la mejora de la calidad del aire, esta tasa de cambio se define como el índice de la media anual relativa.

La concentración promedio anual de 1989 representa el punto de partida de la línea de tendencia y se le asigna un valor de índice de 100%. Cualquier punto de la línea de tendencia superior al 100% indica un incremento en la concentración del contaminante, un valor menor al 100% indica una disminución en la concentración del contaminante.

A manera de ejemplo, en 1991 la estación Merced registró un valor máximo para el índice de 165% en los primeros meses de ese año, esto significa que en este periodo la concentración del contaminante alcanzó un incremento de casi el 65%, con respecto al valor de referencia (22).

cuenca. En este período las inversiones térmicas se presentan casi a diario, durante el invierno predominan las inversiones de superficie, mientras que en la primavera las de subsidencia (descenso del aire desde capas superiores de la tropósfera). En el invierno es común que se presenten altos niveles de partículas suspendidas, en cambio, en la primavera los días son largos y con mayor radiación que favorecen la formación del smog fotoquímico provocando altas concentraciones de ozono y partículas finas, entre otros contaminantes. En general, el clima de la CMAM es templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio anual oscila alrededor de los 16°C, el viento dominante es de noreste a suroeste, cuenta con dos temporadas bien definidas; la seca, que por el régimen térmico se divide en seca-caliente (marzo a mayo) y seca-fría (noviembre a febrero), y la temporada de lluvias que comprende los meses de junio a octubre, donde las inversiones térmicas disminuyen notablemente debido a la inestabilidad atmosférica ocasionada por la presencia de sistemas de baja presión y la incursión de masas de aire tropical húmedo, procedentes del Mar Caribe, Golfo de México y Océano Pacífico. La extensión de nubosidad que se genera de los sistemas mencionados, ayuda a que la radiación solar disminuya y por consiguiente disminuya la intensidad de las reacciones fotoquímicas para la formación de ozono, históricamente el promedio de precipitación anual oscila entre los 600 mm a los 850 mm de lluvia (22).

Otro factor importante son las fuentes de emisión, de acuerdo al inventario de emisiones de 2008, el consumo de energía fue de 576 petajoules, la mayor demanda es del sector transporte con el 60%, seguido de la industria

con el 24%, el uso residencial con el 16% y por último los servicios consumen el 3%. El transporte y la industria consumen la mayor parte de la energía y por lo tanto la mayor contribución de emisiones directas a la atmósfera proviene del uso de combustibles. En 2008 se consumieron 3,522 millones de litros de combustible, de los cuales el 59% eran gasolinas, el 21% gas natural y el 20% gas LP.

Se estima que en el Distrito Federal y su zona conurbada existen 4.5 millones de vehículos automotores, de los cuales alrededor de 3.7 millones son vehículos particulares y menos del 7% está dedicado al transporte público de pasajeros. El 95% de la flota vehicular utiliza gasolina como combustible, el 4% diesel y los vehículos restantes utilizan gas LP y gas natural. Las fuentes móviles son el principal aporte de emisiones en la CMAM, generan anualmente 1,552,204 toneladas de monóxido de carbono (CO); 185,384 toneladas de compuestos orgánicos volátiles (COV); 154,919 toneladas de óxidos de nitrógeno (NOx); 3,902 toneladas de partículas menores a 10 micrómetros y 3306 toneladas de bióxido de azufre (SO₂). El otro sector importante es la industria que cuenta con el 16% del total de la industria manufacturera del país (aproximadamente 50,000), sin embargo, el inventario sólo registra 5146 industrias. La industria genera anualmente 3,375 toneladas de dióxido de azufre, 6,961 toneladas de monóxido de carbono, 20,094 toneladas de óxidos de nitrógeno, 4,986 toneladas de PM₁₀ y 859 toneladas de PM_{2.5}. La mayor parte de la industria se concentra en las delegaciones Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa y en los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla y Ecatepec –Figura 5– (23).

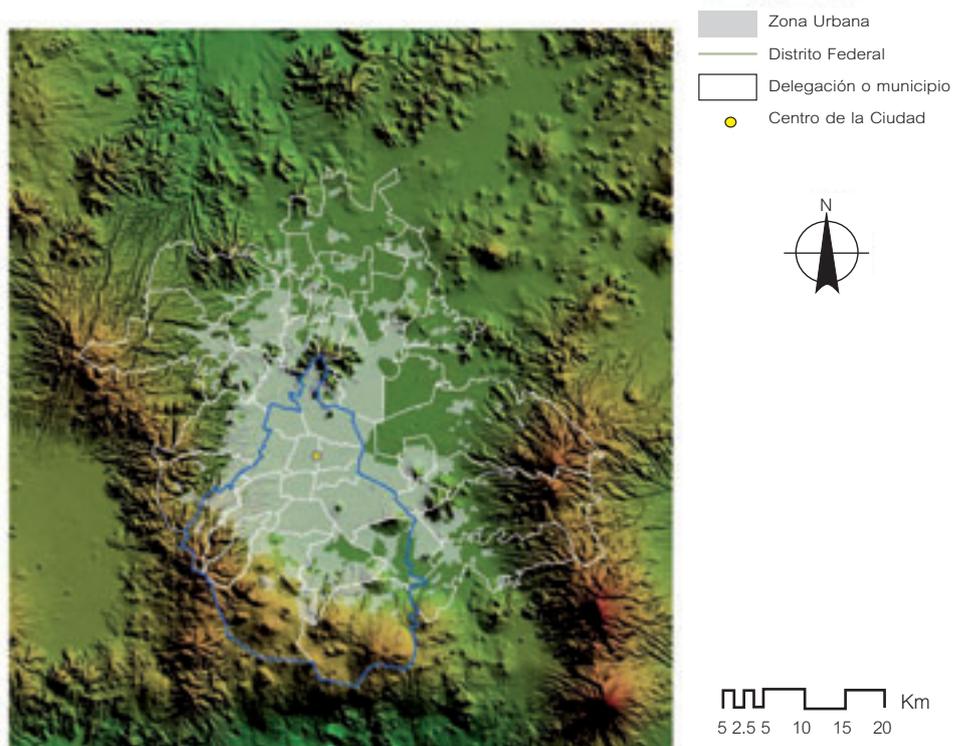


Figura 4. Aspectos topográficos de la Ciudad de México y su área metropolitana.

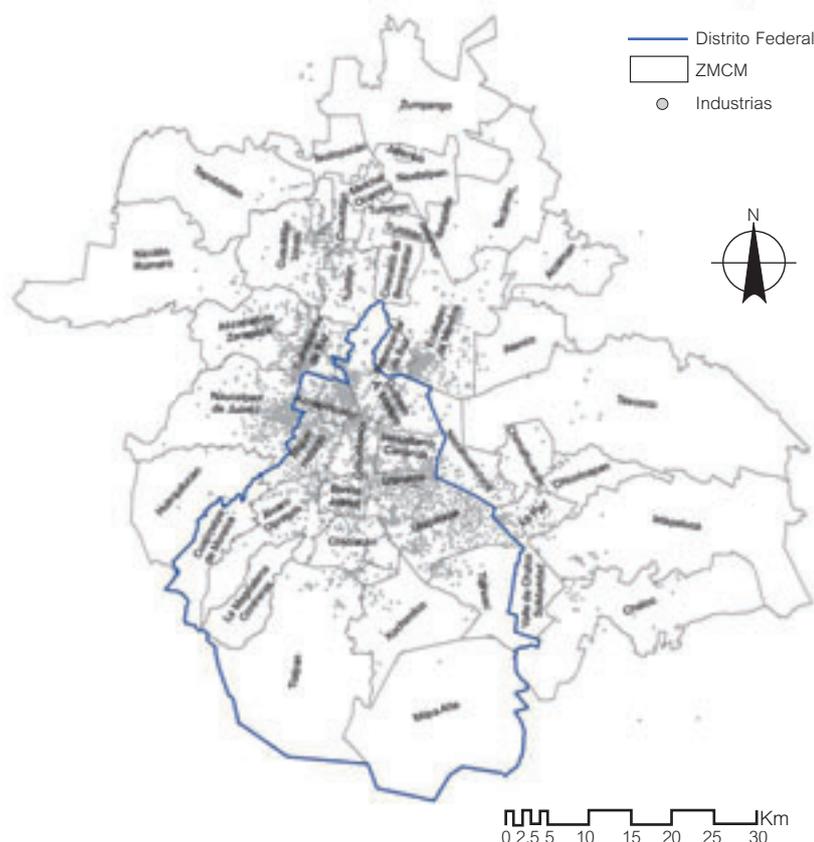


Figura 5. División política de la Ciudad de México y su área metropolitana y distribución de las industrias.

2.3. Monitoreo de Compuestos Orgánicos Volátiles en la Ciudad de México y su Área Metropolitana

Los primeros esfuerzos para determinar la concentración de hidrocarburos totales en el aire ambiente fueron realizados durante los años 80 por en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (24). En ellos se resalta el vínculo de estos contaminantes con las concentraciones de ozono y la necesidad de conocer la composición de este tipo de compuestos. En 1992 Bravo (25) estimó la emisión de los COV en 1,080 toneladas diarias provenientes principalmente de vehículos a gasolina.

Entre 1990 y 1993 el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y el Laboratorio Nacional de Los Álamos desarrollaron el proyecto Global sobre la Calidad del Aire en la Ciudad de México (MARI, por sus siglas en inglés). El estudio se desarrolló en cuatro etapas, la primera y segunda orientadas a meteorología y caracterización de perfiles verticales meteorológicos y de concentración para ozono, SO₂ y partículas, mientras que la tercera y cuarta etapas contemplaban la medición y caracterización de los hidrocarburos dentro de los que se incluyeron los compuestos aromáticos, los alcoholes, cetonas, compuestos poliaromáticos y los hidrocarburos alifáticos desde propano hasta C-12 (26,27). Los resultados del análisis de muestras de hidrocarburos recolectadas entre el 6 y el 24 de marzo de 1992, reportaron niveles de hidrocarburos,

excepto metano, mayores a los obtenidos en Estados Unidos y otros países. El valor de la proporción de COV/NO_x fue de 35, con una producción de ozono sensible a los óxidos de nitrógeno y el valor representaba el doble de la tasa máxima encontrada en zonas urbanas de Estados Unidos. Los niveles registrados de butano y propano fueron elevados, las concentraciones de benceno representaban un riesgo para la salud por ser un compuesto cancerígeno. En el análisis de la especiación de COV se encontró que entre el 25 y el 45 % del total lo conformaban el propano, butano, tolueno, etano y acetileno (28). Durante el proyecto se evaluó la operación de un equipo DOAS ubicado en la estación Merced en el centro de la ciudad, este equipo es capaz de determinar benceno, tolueno, formaldehído, p-xileno, estireno, fenol, y gases como dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ácido nítrico. Se encontró que los niveles de formaldehído eran similares a los encontrados utilizando otras metodologías, en cambio los niveles de benceno y tolueno fueron menores.

La siguiente campaña denominada IMADA-VER se realizó con la colaboración de diversas instituciones de Estados Unidos como: el Laboratorio de Los Álamos, el del Pacífico Noroeste, NOAA, EPA, e instituciones mexicanas como: IMP, ININ, CAM, UNAM, IPN, INAH, INE. Esta campaña se desarrolló de febrero a marzo de 1997. Se

realizaron mediciones de hidrocarburos poliaromáticos, peroxiacetil nitrato (PAN) y COV. Se encontró que los PAN tenían una alta variabilidad diaria, con concentraciones cercanas a cero por la noche y de 40 ppb durante el día. Las concentraciones encontradas de PAN fueron de las más altas registradas en el mundo desde 1970 en los Ángeles. Se encontró que la mayor fuente de emisión del butano eran los vehículos a gas LP. Los COV se midieron en tres sitios (Merced, Pedregal y Xalostoc) en promedios de tres horas por la mañana (6:00 a 9:00 horas) y para Merced además se midieron promedios de 6 horas (6:00 a 12:00 y 12:00 a 18:00 horas). Las concentraciones más altas se registraron en el periodo de 6:00 a 9:00 horas, en la estación Merced con 4.1 ppmC (29). Asimismo se encontró que los hidrocarburos más abundantes fueron el propano y butano (35%), seguido del tolueno, m-xileno, p-xileno y benceno (10%). Sin embargo, no se consideró la importancia de cada especie en la formación del ozono.

Arriaga en 1997(30), realizó estudios sobre COV en la atmósfera de la CMAM, clasificando los COV por su importancia dependiendo de las concentraciones que encontraba y por su potencial de reactividad. Sus resultados indicaron que al norte de la CMAM predominan las concentraciones altas de tolueno y xileno, y en la zona centro predomina el etileno y el acetileno.

En otros estudios realizados por el IMP, se encontró que los alcanos son los COV más abundantes en la CMAM (31, 32). Arriaga identificó 16 especies químicas que constituyen entre el 52% y 64% del total de los COV muestreados, en este estudio se identificaron 76 especies que se distribuían de la siguiente manera: 43 eran parafinas (alcanos), 18 olefinas (alquenos) y 14 compuestos aromáticos.

Durante las campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006, investigadores de diferentes instituciones realizaron mediciones de COV en la Zona Metropolitana del Valle de México. Entre los resultados destacan la composición de los COV, con el 60% de alcanos, el 15% de aromáticos, el 5% de olefinas y el restante 20 % conformada por una mezcla de alquinos, hidrocarburos halogenados, especies oxigenadas y otros COV no identificados. En términos de la producción de ozono las olefinas son las más relevantes. Se encontraron niveles altos de hidrocarburos tóxicos como el 1,3-butadieno, benceno, tolueno y xileno. Los patrones de emisión se relacionan con el tránsito vehicular matutino aunado a los factores meteorológicos, confirmando que la fuente principal son las emisiones vehiculares (33, 34, 35).

Los resultados obtenidos del informe técnico de COV realizado por la Secretaría del Medio Ambiente del GDF (SMA), y el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) en 2008, también confirman la composición de los COV, ya que se encontró que los alcanos constituyen el 54% de los COV totales analizados, seguido por los aromáticos (26%) y los alquenos (18%). Los alcanos con mayor abundancia fueron el propano y n-butano, las cuales son componentes del gas licuado del petróleo (LP), lo cual señala que la principal fuente de

contaminación por estos compuestos es el uso de gas doméstico. La presencia de aromáticos y alquenos indica la contribución por emisiones vehiculares y evaporación de solventes (36).

En otros estudios se identifica la distribución espacial de los COV, determinando que la zona centro de la CMAM presenta la mayor concentración, seguida de la zona noroeste por lo que se clasifican como áreas críticas y que se sugiere se dé prioridad en el monitoreo y control de emisiones de los COV (32, 36).

En un estudio con modelos de transporte se encontró que la producción de ozono durante la tarde era limitada por los COV (37), en contraste con otro modelo anterior que indicaba que la producción de ozono estaba limitada por NOx, la eficiencia de producción que encontraron fue de 4 a 10 veces mayor que cualquier ciudad de Estados Unidos, esto se debe a la abundancia de emisiones de COV en la Ciudad de México. Asimismo se identificó que los alcanos, alquenos y aromáticos contribuyen significativamente a la alta reactividad de la atmósfera durante el día (33).

La relación entre el ozono y sus principales precursores, compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NOx), es una de las mayores fuentes de incertidumbre en regiones contaminadas. Se conoce que bajo ciertas condiciones la producción del ozono se incrementa con el incremento de NOx, mientras que en otras la producción de O3 decrece con el incremento de NOx e incremento de COV. Sin embargo, es muy difícil determinar cuál y cuando prevalecen para determinadas zonas urbanas. Ya que la formación de O3 es una función compleja que depende de muchos factores, que incluyen la intensidad de la luz solar, el mezclado atmosférico, la concentración de los precursores en el aire ambiente, la relación entre sus concentraciones y la reactividad de los precursores orgánicos (COV), los patrones meteorológicos y las fuentes de emisión. Esto da como resultado que el desarrollo de estrategias de control efectivas para reducir el O3 no sea fácil.

El monitoreo atmosférico sistemático del ozono y sus precursores es prioritario para diseñar estrategias de control efectivas; la mejora progresiva de la calidad del aire se dará como resultado de la implementación de estrategias de control para NOx y COV, ya que reducir la concentración de uno de los precursores no es suficiente, puesto que lo que importa es la relación existente entre ambos. En definitiva, sólo la reducción óptima de los precursores es garantía de éxito.

3. OBJETIVOS Y ALCANCES

3.1. Hipótesis

El programa de monitoreo es una actividad prioritaria con el propósito de evaluar y dar lugar a estrategias de control que permitan conocer y resolver el problema del ozono atmosférico en la Ciudad de México y su área metropoli-

tana, por lo que es necesario establecer una red que cuantifique las concentraciones de los compuestos precursores del ozono en la atmósfera.

3.2. Meta

Diseñar la red de monitoreo de compuestos precursores del ozono en la Ciudad de México y su área metropolitana, de acuerdo con la mejor metodología existente adaptada a las condiciones propias de la cuenca, así como sugerir alternativas de control para el ozono.

3.3. Objetivos

1. Seleccionar los sitios idóneos para el monitoreo atmosférico orientado a los compuestos precursores del ozono, considerando la infraestructura actual del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.

2. Establecer el diseño de la red de monitoreo atmosférico orientado a los compuestos precursores del ozono en la Ciudad de México y su área metropolitana, considerando la mejor metodología existente.

3.4. Alcance

Se seleccionaron los sitios para la red de monitoreo de compuestos precursores de ozono en la Ciudad de México y su área metropolitana. Y se definieron los parámetros de calidad del aire y meteorológicos en función de la formación del ozono, para cada sitio.

Los sitios seleccionados serán utilizados para conformar la Red de Precursores Reactivos de Ozono, para el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, operado por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Distrito Federal.

4. MÉTODO

4.1. Plan de Trabajo

Actividades realizadas	Tiempo
Revisión bibliográfica, metodológica	1 mes
Recopilación de la información: Inventarios, meteorología, topográfica, poblacional	2 meses
Análisis de la información de Calidad del Aire en la Ciudad de México y su Área metropolitana	1 mes
Definición del centroide y análisis de los entornos de los sitios de monitoreo	1 mes
Desarrollo de la metodología	3 meses
Selección de sitios, propuesta del diseño de la red	3 meses
Escribir reporte final	1 mes

4.2. Definición de los objetivos de monitoreo

El diseño de cualquier programa de monitoreo depende fundamentalmente de los objetivos específicos de monitoreo que persigue la gestión de la calidad del aire en el área de interés. Es necesario definir el problema que se pretende resolver así como los posibles resultados esperados. La definición de estos objetivos determinarán el diseño de la red y asegurarán la optimización de los recursos destinados al monitoreo.

La primera fase es definir los objetivos de monitoreo para la red de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono.

4.3. Diseño de la red de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono

En términos generales, el diseño de la red para el monitoreo de los compuestos reactivos precursores del ozono debe considerar la instalación de sitios representativos

capaces de caracterizar el impacto de las áreas de emisión de los precursores de ozono, bajo condiciones del viento predominante durante eventos de altas concentraciones de ozono. Los sitios deben proporcionar información sobre el proceso fotoquímico de formación del ozono, así como del transporte del ozono y sus precursores. Es importante mencionar que los criterios para seleccionar los sitios de una red de monitoreo de compuestos reactivos precursores del ozono, son diferentes a los que se utilizan en el diseño y establecimiento de estaciones convencionales de monitoreo de la calidad del aire para contaminantes criterio, ya que cada sitio en un diseño orientado a la medición del ozono y sus precursores cumple una función particular y está orientado a generar información con un propósito específico.

La Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos cuenta con experiencia en el monitoreo de compuestos precursores de ozono, a través de la instalación de sitios de monitoreo denominados PAMS (siglas en

inglés de Photochemical Assessment Monitoring Stations). Estos sitios tienen el objetivo de obtener y reportar datos detallados sobre los compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno, ozono y de parámetros meteorológicos. El análisis de estos datos proporciona información útil para entender las causas de la contaminación por ozono, los resultados se emplean para proponer soluciones efectivas para disminuir los niveles de ozono y evaluar la mejora en la calidad del aire.

Debido a que la red para el monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono de la Ciudad de México tendrá propósitos similares que las estaciones PAMS, y estará orientada a generar información para entender los procesos fotoquímicos particulares de la Ciudad de México, se espera que sus resultados permitan proponer mejores políticas para resolver el problema de calidad del aire por ozono en la Ciudad de México. La metodología para el diseño de la selección de los sitios de monitoreo se realizará aplicando las recomendaciones de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (U. S. EPA, por sus siglas en inglés), descritas dentro del documento "Photochemical Assessment Monitoring Stations Implementation Manual (38)".

La selección de los sitios para instalar los monitores es una de las tareas más importantes del diseño de redes de monitoreo atmosférico, ya que ubica el lugar más representativo para monitorear las condiciones de calidad del aire.

4.3.1. Evaluación de la escala espacial

El monitoreo atmosférico implica evaluar el comportamiento de los contaminantes tanto en el espacio como en el tiempo. Por lo tanto, un buen diseño de red debería buscar la optimización de la cobertura espacial y temporal dentro de los límites que imponen los recursos disponibles (39).

La escala espacial es la integración entre los objetivos de monitoreo, tipo de sitio, y su localización física. Se puede definir en términos de la dimensión física de una parcela de aire que caracteriza un sitio de monitoreo de contaminantes atmosféricos, en la cual se considera una concentración homogénea del contaminante de interés.

El primer paso es relacionar los objetivos de cada sitio de monitoreo con la escala espacial de representatividad adecuada y elegir el lugar de acuerdo a las características de cada escala. La US EPA define 5 escalas espaciales que se aplican al monitoreo atmosférico: micro, media, vecinal, urbana y regional. Las escalas relevantes para el monitoreo de los precursores fotoquímicos oxidantes son la escala vecinal y urbana.

La escala urbana caracteriza las condiciones de la ciudad y abarca una dimensión de 4 a 50 km de diámetro. Las mediciones a una escala urbana representan la distribución de las concentraciones en la Ciudad de México.

La escala vecinal define condiciones en áreas extensas de la ciudad con un uso de suelo relativamente uniforme y su rango de representatividad está entre 0.5 a 4

km de diámetro. Las mediciones a una escala vecinal representan condiciones de una subregión homogénea urbana. El área de cobertura de esta escala permite la mezcla de los contaminantes y puede utilizarse para evaluar el impacto de exposición y la trayectoria de las emisiones. Los datos vecinales proporcionan información sobre los contaminantes en zonas residenciales y de negocios o comerciales.

4.3.2. Caracterización del área de monitoreo

Es importante definir la región en donde se podrían ubicar los sitios de monitoreo, conforme a los requerimientos particulares de cada escala espacial y en consistencia con los objetivos de monitoreo establecidos. Para ello se requiere recopilar y analizar la información del uso de suelo, inventario de emisiones, densidad poblacional, distribución del tránsito y vías de circulación, datos meteorológicos y datos de monitoreo de calidad del aire.

La meteorología es fundamental en los procesos de producción de contaminantes fotoquímicos, la trayectoria del viento es importante en la definición de sitios viento arriba o viento abajo de las emisiones de los precursores de ozono. La selección depende parcialmente de las condiciones meteorológicas del viento, sin embargo, cuando se encuentren disponibles, es recomendable utilizar modelos fotoquímicos como apoyo.

4.3.3. Definición del tipo de sitios de monitoreo

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), que tiene amplia experiencia en el monitoreo atmosférico ha desarrollado innumerables estudios y análisis al respecto, define 4 tipos de sitio que se describen a continuación:

Tipo I– Sitio que se caracteriza por estar localizado viento arriba del área donde se presentan las emisiones máximas de los precursores. Su objetivo es caracterizar las concentraciones de fondo y el transporte del ozono y sus precursores de áreas de mínima emisión. Se localiza a una distancia suficiente para obtener mediciones a una escala urbana.

Tipo II– Sitio que se caracteriza por el impacto de las emisiones máximas de los precursores de ozono. El objetivo de estas estaciones es medir la magnitud y tipo de emisiones de los precursores, en un área representativa de la distribución de las fuentes de emisión. Se localizan cerca de las zonas céntricas y de negocios de la ciudad o en áreas primarias de la mezcla de las emisiones de los precursores justo viento abajo de las mismas para obtener mediciones a una escala vecinal.

Tipo III– Sitio que representa las concentraciones máximas de ozono. El objetivo es detectar las concentraciones máximas de ozono que se registran justo viento abajo de las zonas de emisión máxima de los precursores. De preferencia ubicar estos sitios a una distancia de 15 a 45 km de las fuentes de emisión, cerca del límite de la zona urbana.

Tipo IV– Sitio que caracteriza el transporte del ozono y sus precursores viento abajo. Se localizan en zonas donde la dirección del viento predominante vespertino viene de las áreas que registran la emisión máxima de los precursores, a una distancia suficiente para obtener mediciones con una escala de representatividad urbana. Estas estaciones se establecen para caracterizar el O_3 transportado viento abajo y permiten identificar aquellas zonas que contribuyen potencialmente al incremento del transporte de los contaminantes hacia otras regiones.

Considerando la descripción anterior de los sitios, se deben hacer adecuaciones de acuerdo a las características de la Ciudad de México y área metropolitana.

4.3.4. Selección final de los sitios de monitoreo

Para la selección final de los sitios, se requiere hacer un análisis sobre tres criterios fundamentales:

1. Análisis de sector, tiene como objetivo definir dentro del área de estudio el sector correspondiente a la dirección viento arriba o viento abajo de las emisiones máximas de los precursores, para ello se identifica el centroide de las emisiones de precursores, utilizando los datos del inventario, y generando rosas de viento para determinar la trayectoria de los vientos dominantes.

2. Distancia, tiene como objetivo situar las estaciones a una distancia adecuada para obtener muestras representativas de las emisiones de los precursores, de acuerdo a su escala espacial y los objetivos de monitoreo; su distribución espacial debe abarcar la mayor parte del área de estudio.

3. Proximidad de las fuentes, tiene como objetivo localizar los sitios en lugares estratégicos que permitan evaluar la mezcla representativa de los precursores de ozono, con este fin es necesario analizar la distribución del aporte de las fuentes de emisión cercanas a los sitios de monitoreo, empleando el inventario de emisiones.

4.3.5 Número de sitios

En Estados Unidos el número de sitios depende de la severidad de las concentraciones registradas de ozono, por lo tanto en las ciudades con más de 2 millones de habitantes se recomendaban 5 sitios; sin embargo, en octubre de 2006 la USEPA publicó las modificaciones a los requerimientos para el monitoreo de estaciones de evaluación fotoquímica haciendo algunas consideraciones que se listan a continuación:

- Sólo debe considerarse un sitio Tipo II por área de estudio.
- La instalación del sitio Tipo IV es opcional, según las condiciones del área de estudio.
- La medición de COV es obligatoria en el sitio Tipo II y en un sitio más del Tipo I ó III por área de estudio.
- El monitoreo de carbonilos es necesario solo en sitios con problemas muy graves de contaminación, conforme a la norma del promedio anual de 8 horas de ozono.

- Los equipos convencionales para medir NO_2/NO_x solo son necesarios en el sitio Tipo II.
- Se requiere un equipo que mida NO_y en un sitio de Tipo I ó III por área de estudio.
- Se requiere un equipo que mida CO en el sitio Tipo II.

Con estas recomendaciones se puede decir que una red de este tipo puede contar con sólo 3 sitios: Tipo I, Tipo II y Tipo III. Sin embargo para la Ciudad de México y su área Metropolitana y debido a la extensión y problemática del ozono se tiene contemplado un mayor número de sitios.

4.3.6. Evaluación del entorno físico

Una consideración importante es evaluar los criterios del entorno físico del sitio de monitoreo con respecto a la inspección previa del sitio seleccionado, para esto es necesario considerar la distancia de la toma de muestra a obstáculos, la altura de la toma de muestra con respecto al piso, la distancia mínima a los árboles y la distancia a las vías de rodamiento de vehículos. Es importante este punto, ya que de esto depende la selección final de la estación.

4.4. Recursos para el proceso de selección de los sitios de monitoreo

El proceso de selección de los sitios de monitoreo requiere analizar las características del área de cobertura. Para ello se requirió de la siguiente información:

1. Los datos sobre la distribución de fuentes y la emisión de precursores se obtuvieron del inventario de emisiones de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal en su actualización 2008. El inventario contiene información de fuentes fijas, de área, móvil y biogénicas. Los datos del inventario de emisiones fueron proporcionados por tipo de fuente y contaminante para celdas de 2x2 km, en unidades de ton/año (23).

2. Los datos de uso de suelo del Estado de México se obtuvieron de la información del Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), para el año 2000. En el caso del Distrito Federal se emplearon los datos del Centro GEO para el año 2003.

3. Para la meteorología se analizaron los datos del Sistema de Monitoreo Atmosférico para los años de 2005 a 2009. También se analizó la información del Servicio Meteorológico Nacional para el mismo periodo. Es importante mencionar que para ambas fuentes de información, durante el proceso de validación se encontró una ausencia considerable e inconsistencia en los datos de varias estaciones.

4. Los datos de calidad del aire se obtuvieron de las bases de datos públicas del Sistema de Monitoreo Atmosférico, para las estaciones que miden ozono, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno totales y monóxido de carbono. Se analizaron los datos horarios para los años de 2005 a 2009. A partir de los datos se analizó la distribución espacial y temporal de estos contaminantes. La distribución del monóxido de carbono se utilizó como un sustituto

de la distribución de hidrocarburo. En el caso de ozono, se realizó un análisis de distribución de frecuencias para identificar aquellas estaciones en donde se registran las concentraciones máximas. Se identificaron todos los días en los cuales se registró la activación de cualquiera de las fases del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas. En cada uno de ellos se analizó cuidadosamente las condiciones meteorológicas y de calidad del aire que motivaron la activación.

5. Adicionalmente, empleando el modelo de dispersión Lagrangiano CALPUFF, se simularon los días de 2010 en los que se activó la Fase de Precontingencia por ozono. Los resultados del modelo permiten observar en detalle las condiciones de la dinámica atmosférica y su influencia en la distribución de la contaminación. Debido a que el modelo requiere de datos meteorológicos (en superficie y en altura) y de emisiones con una alta resolución espacial y temporal, no fue posible simular escenarios para años previos. La información meteorológica fue proporcionada por el Departamento de Meteorología Tropical del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

6. Por último, se analizó la información del censo de población del año 2000 con la proyección de la base del Consejo Nacional de Población para 2009, por área geoesestadística básica (AGEB).

7. La información de la topografía del Valle de México se obtuvo de los modelos digitales de elevación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

5. RESULTADOS

5.1. Objetivos de monitoreo

Tomando en consideración la problemática de la Ciudad de México y las necesidades de la gestión de la calidad del aire se proponen los siguientes objetivos para el programa de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono en la Ciudad de México:

1. Analizar la tendencia en el control o reducción de las emisiones de las especies reactivas involucradas en la producción de ozono, a través del monitoreo y los inventarios de emisiones.
2. Proveer de información adecuada para el desarrollo, evaluación y redefinición de las estrategias de control para el ozono.
3. Proveer de insumos a los modelos de pronóstico de los contaminantes fotoquímicos.
4. Generar datos confiables para evaluar y mejorar la predicción de los modelos fotoquímicos.
5. Analizar la tendencia de la calidad del aire y caracterizar la naturaleza y el alcance del problema del ozono.
6. Generar datos sobre la concentración de los compuestos orgánicos reactivos precursores de ozono, para informar sobre los posibles riesgos a la salud.
7. Generar información adecuada sobre los procesos que intervienen en la producción de ozono y otros contaminantes fotoquímicos.

5.2. Selección de los sitios de monitoreo

En esta sección se describen los resultados de la evaluación para la selección de cada uno de los sitios que integrarán la red para el monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono. En la selección se analizó la información de inventarios de emisiones, uso de suelo, meteorología, calidad del aire y distribución de la población.

5.2.1. Definición del centroide para el análisis de sector

De acuerdo a las recomendaciones de la U. S. EPA es necesario realizar la sectorización de la zona metropolitana, para facilitar la búsqueda de los posibles sitios de monitoreo. Esta técnica propone establecer una referencia geográfica en el centro de la zona metropolitana, o mejor aun, en el centroide de las emisiones de la región. A partir de este centroide se definen sectores de 45° para localizar los sitios viento arriba y viento abajo, en función de los vientos predominantes en la zona metropolitana. El centroide se estimó con métodos de estadística geoespacial empleando la información de inventarios y la distribución de las fuentes de emisión. La ubicación del centroide se puede observar en la Figura 6.

La Tabla 1 resume las características necesarias para cada uno de los sitios. Es importante mencionar que con propósitos de reducción de costos y aprovechamiento de la infraestructura, en este proyecto se dio prioridad a las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

5.2.2. Selección del sitio Tipo I

El sitio Tipo I debe encontrarse en un lugar en el que intercepte la pluma entrante de precursores y de ozono proveniente de otras áreas urbanas viento arriba de la Ciudad de México, debe localizarse a una distancia razonable de las fuentes más importantes de emisión de precursores. La ubicación del sitio se determina por el análisis de sector, empleando como referencia para la construcción de los sectores la dirección predominante del viento.

El análisis de los datos de viento de 2005 a 2009 en la Ciudad de México, indica un viento predominante con dirección norte y alguna influencia de la dirección este. Este patrón se observa tanto para el horario matutino (6:00 a 12:00), como para el vespertino (13:00 a 18:00). En la Figura 7 se observan las rosas de viento construidas con datos de todas las estaciones de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del SIMAT. La línea negra en las rosas de viento indica el vector resultante de cada una de ellas. Empleando la información de vientos predominantes, se trazaron dos líneas con un ángulo de 45 grados entre ellas, para definir los sectores viento arriba y viento abajo. Las líneas se cruzan en el centroide de las emisiones, el cual coincide geográficamente con el centro de la ciudad. El sector viento arriba se encuentra al noreste de la ciudad, mientras que el sector viento abajo coincide con el suroeste.

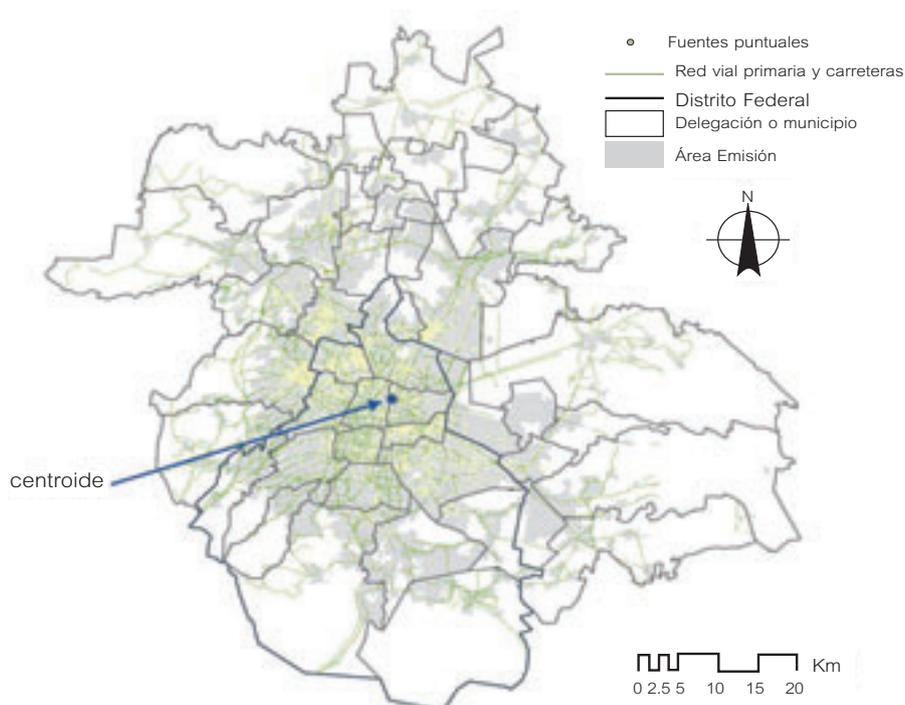


Figura 6. Ubicación del centroide de emisiones para la Ciudad de México y su área metropolitana.

Tabla 1. Características de los sitios PAMS por tipo.

	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Propósito	Monitoreo viento arriba, evaluación de las concentraciones de ozono y sus precursores	Evaluación de las emisiones máximas de precursores	Evaluación de las concentraciones máximas de ozono	Monitoreo viento abajo, evaluación del transporte de ozono y sus precursores
Escala de representatividad recomendada	Urbana	Vecinal	Urbana	Urbana
Proximidad a fuentes de emisión de precursores	Alejada de la influencia de las emisiones de los precursores	Cerca de la zona en donde la mezcla favorece las concentraciones máximas de precursores	Alejada de las zonas de las máximas emisiones (15 a 45 km)	Alejada de las zonas de las máximas emisiones
Tipo de uso de suelo recomendado	Residencial	Comercial, industrial, de servicios	Residencial	Residencial
Proximidad a tránsito y vialidades	Alejada de las vialidades	Cerca de las vialidades	Lejos de la influencia de emisiones de NOx	Lejos de la influencia de emisiones de NOx
Meteorología	Viento arriba de la zona de emisiones	Viento abajo de la zona de máxima emisión	Viento abajo de la zona de máxima emisión entre 5 a 7 horas de distancia	Viento abajo de la zona de máxima emisión entre 5 a 7 horas de distancia y de las zonas del máximo de ozono
Calidad del aire	Concentraciones bajas de precursores	Concentraciones altas de precursores	Concentraciones altas de ozono	Concentraciones altas de ozono
Obligatoriedad	Sitio obligatorio, su instalación puede ser 9 meses después del Tipo 2	Sitio obligatorio y primero a instalar	Sitio obligatorio, su instalación puede ser 6 meses después del Tipo 2	Opcional
Monitoreo obligatorio	O ₃ , NO ₂ /NO _x , meteorología de superficie	COV, NO ₂ /NO _x , O ₃ , CO, meteorología de superficie	O ₃ , COV, NO ₂ /NO _x meteorología de superficie	O ₃ , meteorología de superficie
Monitoreo opcional	NO _y , COV	PM _{2.5}	NO _y , PM _{2.5}	NO ₂ /NO _x , CO, COV

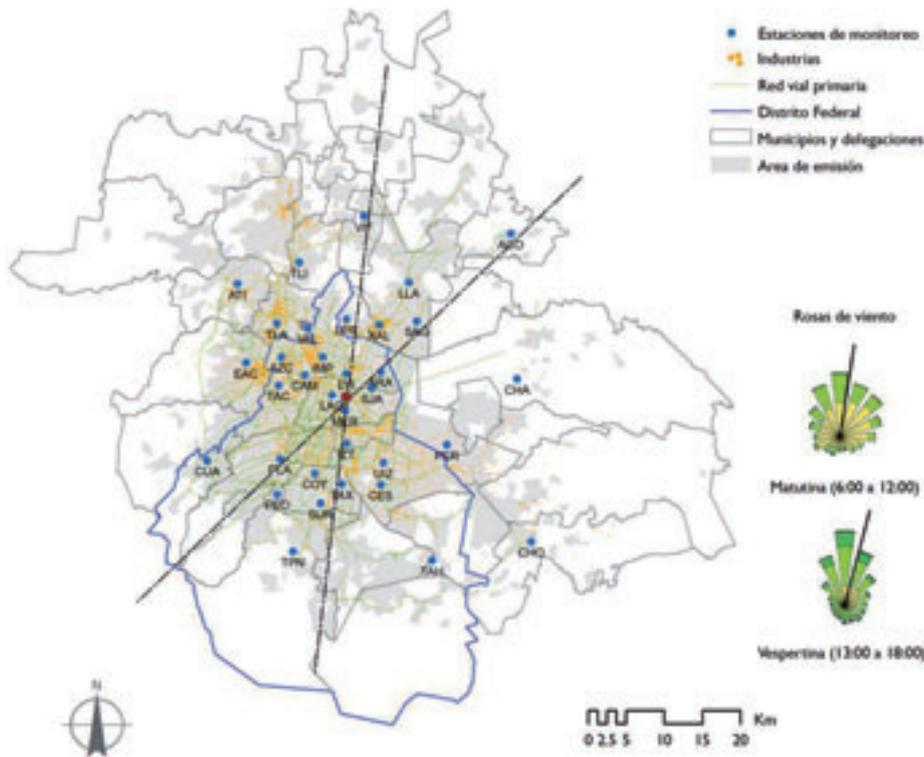


Figura 7. Análisis de sector para la selección del sitio Tipo I.

En la figura se puede observar que dentro del sector viento arriba se encuentran las estaciones Xalostoc (XAL), San Agustín (SAG), Los Laureles (LLA) y Acolman (ACO). Todas las estaciones, con excepción de ACO, se encuentran bajo la influencia de fuentes fijas y móviles. La estación ACO cuenta con las mejores características requeridas para el sitio TIPO I: se encuentra en la trayectoria de los vientos predominantes, se localiza viento arriba de las emisiones, no se encuentra bajo la influencia directa de fuentes de emisión cercana.

La estación de monitoreo ACO se ubica en la azotea del Palacio Municipal de Acolman de Netzahualcóyotl. La toma de muestra no presenta obstáculos que obstruyan el libre flujo del aire, no tiene fuentes de emisión cercanas y cuenta con la infraestructura necesaria para la instalación adicional de los parámetros de monitoreo. La estación de monitoreo se encuentra en operación desde 2007 y está orientada a evaluar las concentraciones de fondo y el transporte de contaminantes. Las características del entorno garantizan una representatividad de escala urbana.

El sitio se localiza en los límites de la zona metropolitana, la región está medianamente urbanizada, sin embargo, el principal uso de suelo es rural o semirural. La estación cuenta con analizadores para O3, SO2 y PM10 (Figura 8).

5.2.2. Selección del sitio Tipo II

Un sitio Tipo II debe colocarse en un área donde se espera que impacte la mezcla representativa de los precursores, es decir debe encontrarse en un punto tal que per-

mita evaluar la composición del inventario de emisiones de la ciudad. La Ciudad de México y su área metropolitana concentran alrededor de 5,146 industrias que equivale al 16% de la industria nacional y más de 4.5 millones de vehículos. De acuerdo con el inventario de emisiones de la Secretaría del Medio Ambiente (2010b) anualmente se emiten 591,399 toneladas de compuestos orgánicos volátiles y 188,087 toneladas de óxidos de nitrógeno (NOx). Las principales fuentes de los compuestos orgánicos volátiles son las de área que aportan 241,252 toneladas y las fuentes móviles que contribuyen con 185,384 toneladas, la vegetación contribuye con 35,585 toneladas de estos compuestos. En cuanto a los NOx, las fuentes móviles aportan el 82% del total.

La distribución espacial de la industria y las vialidades determina la distribución de las emisiones de los contaminantes precursores del ozono. Esto se observa en la Figura 9 para los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono. En el caso de los óxidos de nitrógeno las fuentes más importantes se encuentra en el norte, sin embargo en la región central de la zona metropolitana se identifica el grueso de las emisiones. En el caso de monóxido de carbono, la mayor cantidad de emisiones se identifica para la región central del Distrito Federal.

La identificación y ubicación de las fuentes no es suficiente para proponer la ubicación de los sitios, es necesario conocer la mezcla y distribución de los precursores durante las primeras horas del día, previo a los máximos de ozono. Los vientos dominantes durante la mañana arrastran una gran parte de las emisiones desde el norte

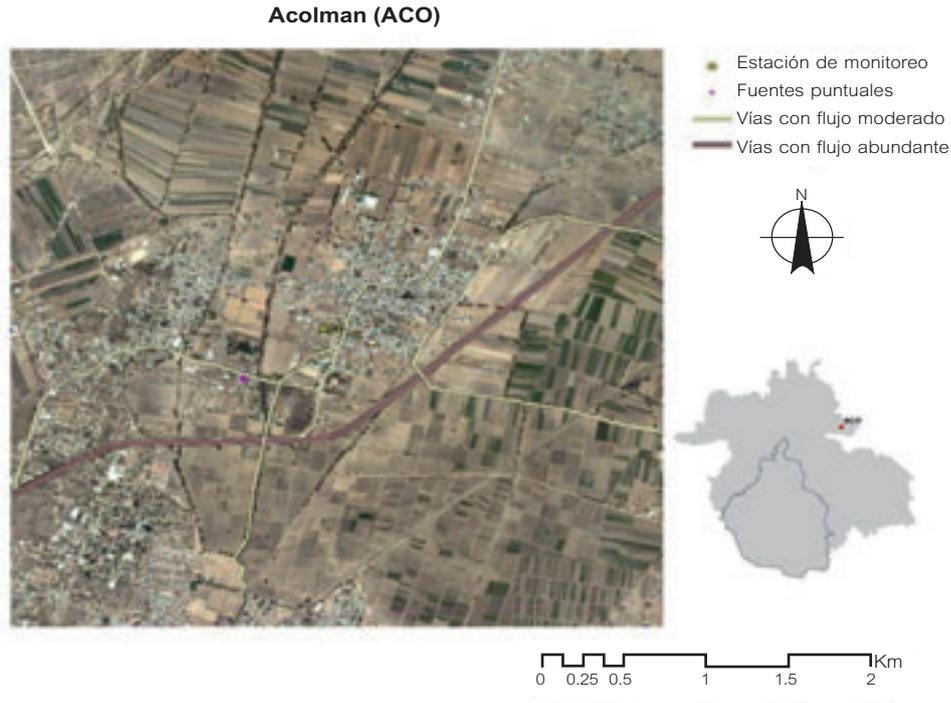


Figura 8. Localización de la estación de monitoreo de calidad del aire Acolman (ACO).

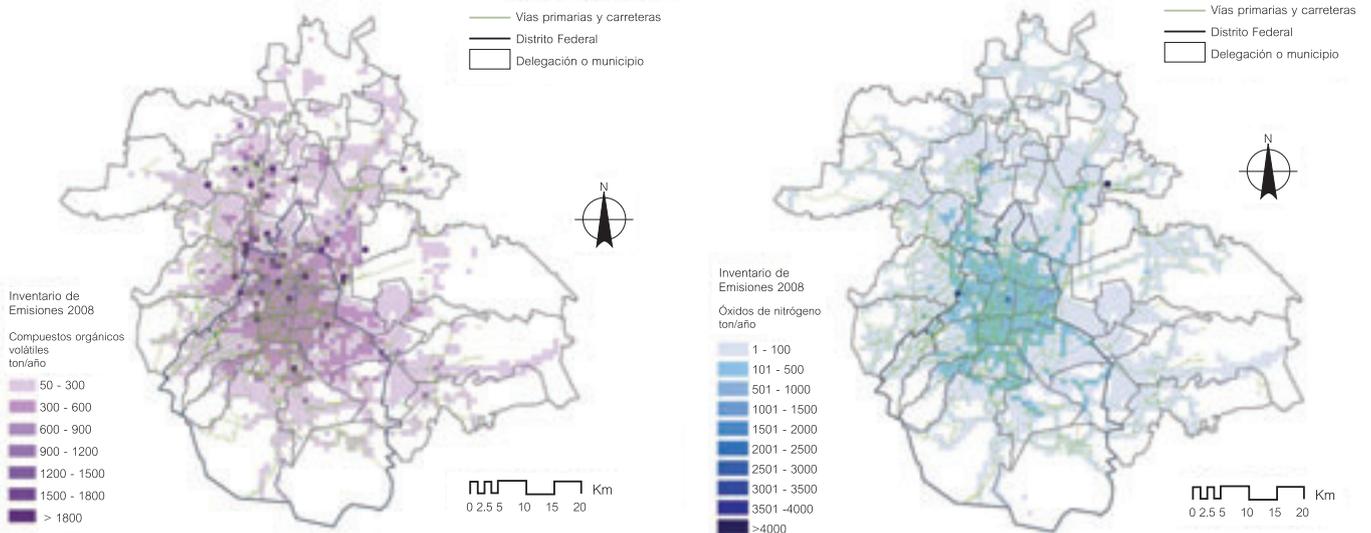


Figura 9. Distribución espacial de las emisiones anuales de los compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno, de acuerdo con el inventario 2008 de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

hacia el centro y sur de la zona metropolitana. A partir de los resultados de la modelación con CALPUFF, se espera que el impacto máximo de la concentración de precursor-

res sea en la región central de la ciudad. En la Figura 8 se observa un ejemplo para la simulación de los días 6 de abril y 3 de mayo.

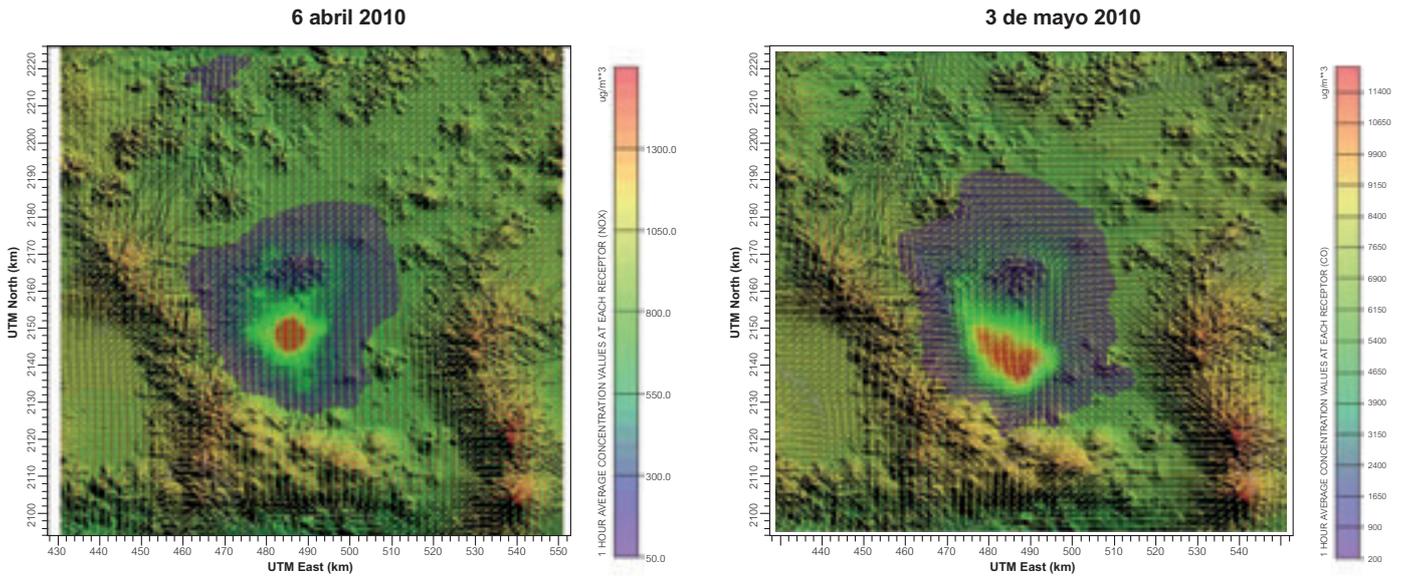


Figura 10. Ejemplos de modelación.

De acuerdo con los resultados, los sitios en donde se ubican las estaciones Merced (MER), Lagunilla (LAG) e Iztacalco (IZT) se encuentran dentro de la región para la instalación de un sitio de monitoreo Tipo II. La inspección física de cada uno de ellos junto con el análisis detallado de los entornos, reveló que la estación LAG se encuentra bajo la influencia directa de las emisiones de fuentes móviles provenientes de las avenidas primarias Paseo de la Reforma, Eje 1 Norte, Eje central, etc. En el caso de IZT se

identificaron fuentes de área, además se identificaron un gran número de talleres mecánicos en la cercanía de la estación. En el caso de la estación de MER las condiciones actuales la identifican como la mejor alternativa, las vialidades cercanas están a la distancia que marcan los criterios para establecer sitios de monitoreo, no tiene obstáculos que limiten el flujo libre del aire y la toma de muestra está a la altura recomendada. Las características del entorno garantizan una representatividad de escala vecinal (Figura 11).

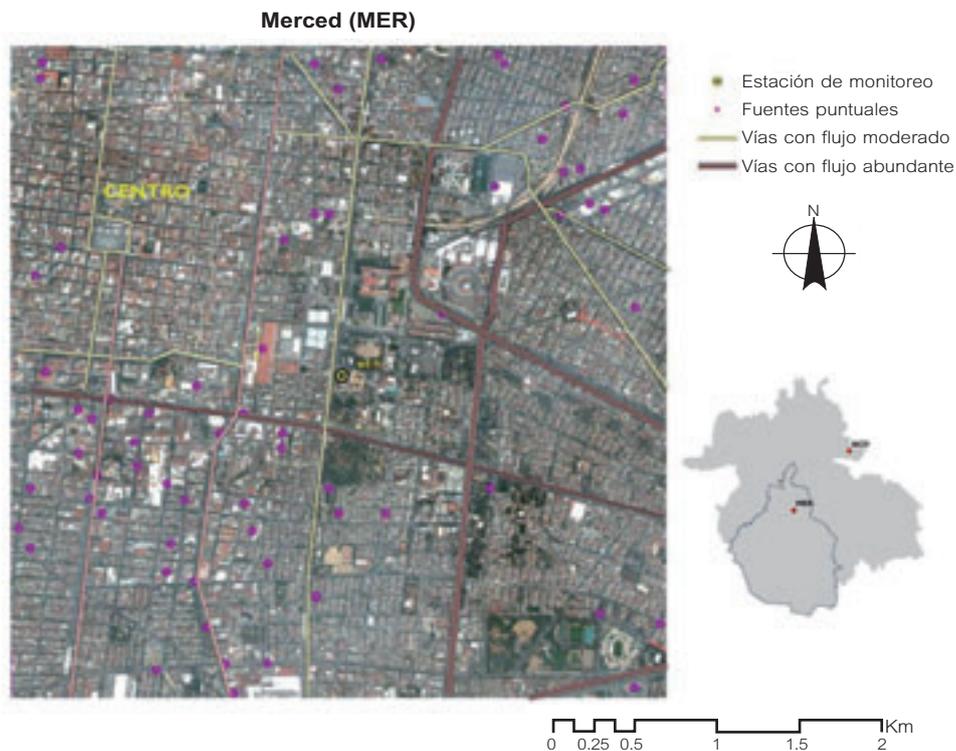


Figura 11. Ubicación de la estación de monitoreo Merced seleccionada como sitio del Tipo II.

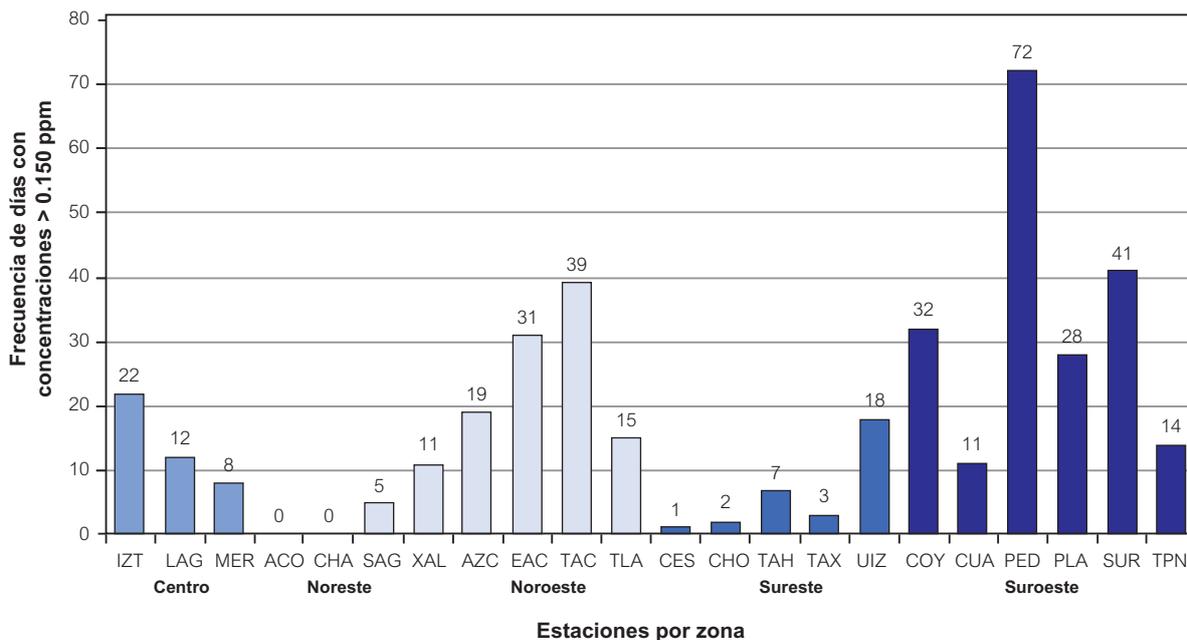


Figura 12. Frecuencia de días con concentraciones de ozono superiores a 0.150 ppm por estación de monitoreo durante el periodo 2008-2009.

5.2.3. Selección del sitio Tipo III

El sitio está orientado al monitoreo del máximo de ozono y se localiza viento abajo de las fuentes de emisión. Se recomienda que se localice en el límite del área metropolitana, a una distancia entre 5 a 7 horas del viaje de las emisiones desde las fuentes, preferentemente se sugieren

localidades que se encuentren en la trayectoria del viento y que tengan emisiones bajas de NO.

De acuerdo con los registros del SIMAT, el suroeste experimenta con mayor frecuencia las concentraciones máximas de ozono. Los factores que influyen en este fenómeno son la dirección predominante del viento desde el

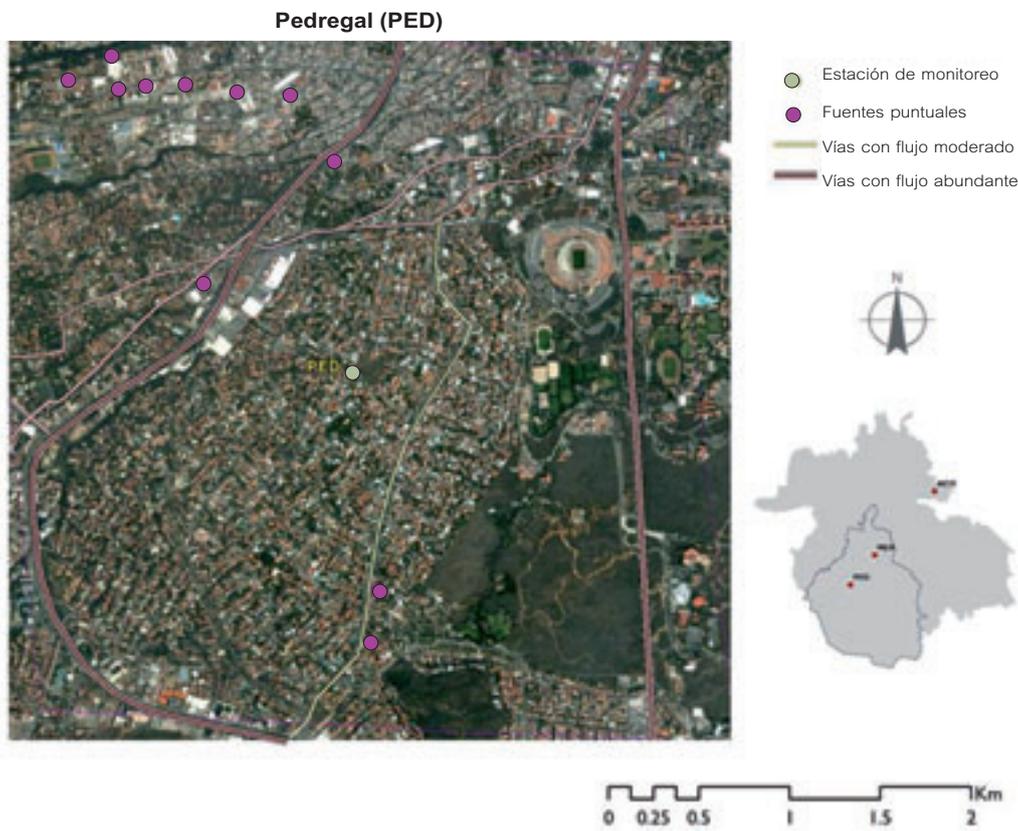


Figura 13. Ubicación de la estación de monitoreo Pedregal seleccionada como sitio del Tipo III.

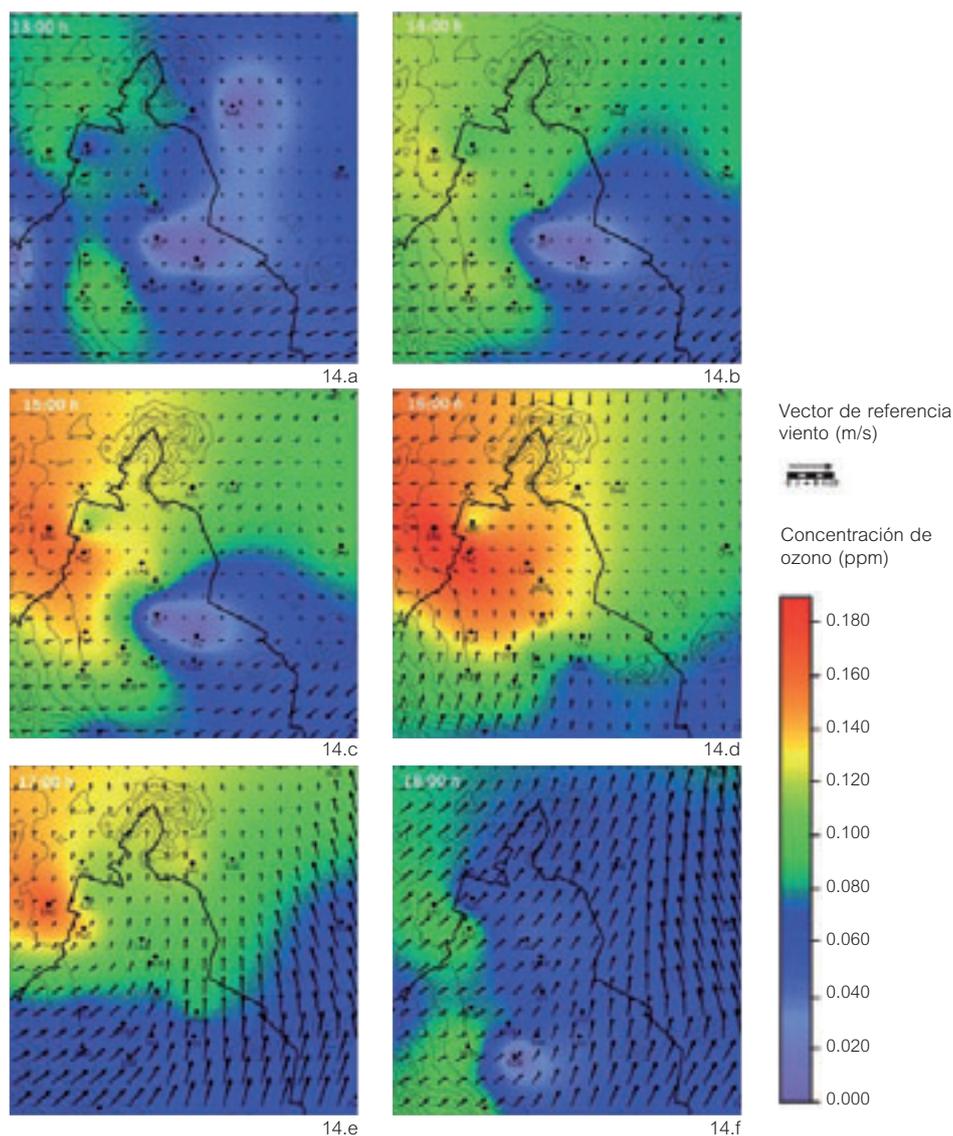


Figura 14. Secuencia de la distribución espacial del ozono durante el día 8 de abril de 2008, de las 13:00 a las 18:00 horas.

norte y la limitación de la dispersión por la presencia de las montañas de la Sierra del Ajusco, que favorece la acumulación del ozono y de sus precursores. El pico máximo de ozono se registra entre las 15:00 y 17:00 horas, con concentraciones que con frecuencia rebasan los valores recomendados por la Norma Oficial Mexicana.

El análisis de sector (Figura 8) identifica a varias estaciones en el suroeste, sin embargo, algunas de ellas tienen la influencia de altas concentraciones de NO por la cercanía a vialidades primarias, como el caso de Santa Úrsula (SUR) y Coyoacán (COY). La estación Plateros (PLA) tiene obstrucciones importantes para el libre flujo del viento. El análisis detallado de la información disponible indica que las estaciones Pedregal (PED) y Tlalpan (TPN) son candidatos probables para el sitio. De estas la estación PED registra una mayor frecuencia de máximos de ozono (Figura 12).

La estación Pedregal (PED), se localiza en la azotea de la Escuela Primaria "John F. Kennedy" en un área predomi-

nantemente habitacional, con domicilio en la esquina de la calle Cañada y Avenida Cráter (Figura 13). Las características de la estación, su entorno y distribución de la contaminación garantizan una representatividad de escala urbana.

Durante la evaluación de la información se observó que algunas de las estaciones localizadas al poniente de la Ciudad de México, registraban con frecuencia concentraciones elevadas de ozono, con magnitudes iguales o mayores que las estaciones localizadas viento abajo. El análisis de los patrones de viento reveló que bajo ciertas condiciones con vientos débiles y alta estabilidad atmosférica, se observa arrastre de las masas de aire contaminado desde el sureste hacia el noroeste bordeando lentamente desde la Sierra del Ajusco y la Sierra de las Cruces. Este proceso favorece el incremento en las concentraciones de ozono a medida que la pluma de ozono y precursores se desplaza desde el sur hacia el norte. Cuando esto ocurre las concentraciones en esa región son mayores que las reportadas en el sureste. En otras circunstan-

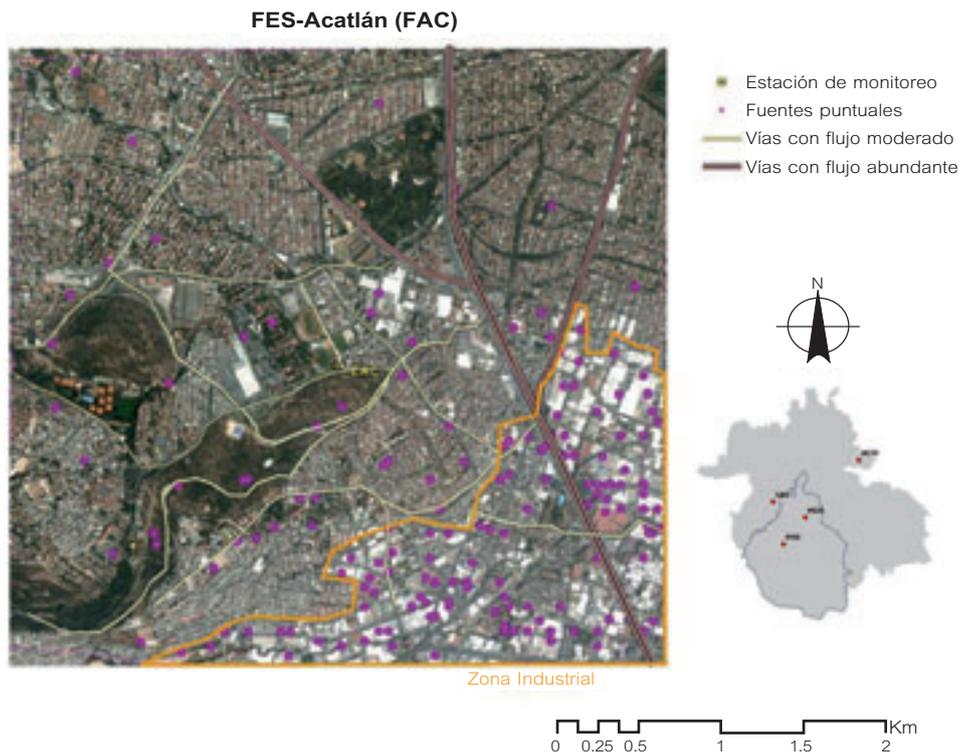


Figura 15. Ubicación de la estación de monitoreo FES Acatlán.

cias, que son menos frecuentes, se produce un lento arrastre de los precursores desde el noroeste hacia el sur, quizá con una contribución importante de las zonas industriales del corredor Cuautitlán-Tula-Tepeji y bajo ciertas condiciones desde el Valle de Toluca.

En estas condiciones particulares se puede afirmar que esta región se encuentra viento abajo de las emisiones de precursores. Por lo tanto, para caracterizar con mayor detalle este fenómeno se sugiere la instalación de un sitio Tipo III en la zona (Figura 14). De los sitios que pueden ser candidatos se sugieren las estaciones TAC y EAC, sin embargo en el caso de TAC recientemente se ha construido un edificio que supera por mucho la altura de la toma de muestra e impide el libre flujo del viento. Por lo tanto se recomienda la instalación en la estación EAC.

La estación de monitoreo FES Acatlán (antes E150NEP Acatlán) se localiza en la Clínica Odontológica de la FES-Acatlán de la UNAM, en un área urbana, principalmente habitacional y de servicios. Se ubica en la esquina de dos avenidas: a 50 m al sur, la Avenida Alcanfores de circulación en ambos sentidos, y a 19 m al este, la calle Yaqui de circulación en un solo sentido. Éstas avenidas presentan flujo vehicular moderado de autos (Figura 15).

5.2.4. Selección del sitio Tipo IV

Este tipo de sitios están orientados a la evaluación del transporte del ozono y sus precursores hacia otras regiones más allá del área metropolitana, tienen el propósito de estimar la contribución de la contaminación de la Ciudad de México a otras áreas urbanas o rurales. Es indispensable

que se su ubicación se encuentre viento abajo de los sitios en donde se registran las concentraciones máximas de ozono, en el camino de la trayectoria de los vientos predominantes vespertinos. Se hace evidente que el criterio más importante a considerar es la dirección del viento dominante vespertino durante los días con concentraciones máximas de ozono.

Los vientos dominantes durante el horario entre las 13:00 y 18:00 tienen una dirección de norte a sur (Figura 16). El análisis del comportamiento del viento en el valle muestra un marcado flujo en dirección sur durante los meses en los que se registran las mayores concentraciones de ozono. Por otra parte, los resultados de la modela-

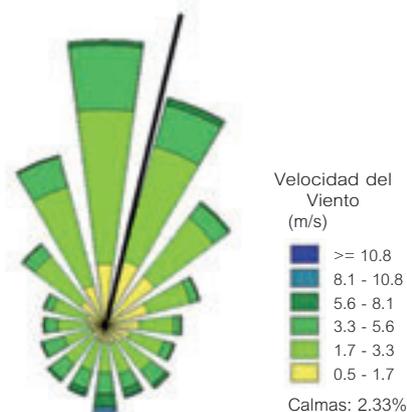


Figura 16. Vientos dominantes durante las 13:00 a 18:00 horas, para el periodo de marzo a julio.

ción meteorológica ofrecen una descripción detallada sobre el comportamiento de los vientos en las montañas de las Sierras del Ajusco y de las Cruces. Cuando se simula la dispersión de los contaminantes es posible observar el arrastre de la contaminación a través de las partes bajas entre las montañas de la sierra, formando un paso natural para las masas de aire que se desplazan desde el centro y norte. En años previos algunos estudios realizados por el SIMAT, en colaboración con el CENICA y el Instituto de Meteorología de la República de Cuba, se demostró la existencia de daño en los cultivos realizados en esa región, así como un estudio reciente realizado por Ali, et al (40), donde muestra el impacto de los compuestos orgánicos volátiles hacia esta zona. Empleando esta evidencia se propone la instalación del sitio Tipo IV en esta zona, específicamente en la localidad de Parres, en la delegación Tlalpan, en los límites con el Estado de Morelos (Figura 17). Esta estación será denominada con el nombre de Ajusco (AJS).

5.3. Propuesta de la configuración de la red de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono

A partir de los resultados presentados en las secciones previas se propone la siguiente configuración para la red de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono:

- Sitio Tipo I para caracterización viento arriba y de concentraciones de fondo: Acolman (ACO).
- Sitio Tipo II para la evaluación del impacto de las emisiones máximas de precursores: Merced (MER).
- Sitio Tipo III para la evaluación de la concentración máxima de ozono. Pedregal (PED) y FES Acatlán (EAC).
- Sitio Tipo IV para el monitoreo viento abajo: Ajusco (AJS).

6. CONCLUSIONES

El diseño de la red de compuestos reactivos precursores de ozono, empleó como modelo las recomendaciones de la U.S. EPA para las Estaciones de Monitoreo para la Evaluación Fotoquímica de ozono (PAMS por sus siglas en inglés). Como resultado del análisis, la red de compuestos reactivos precursores de ozono quedó conformada por las estaciones Acolman (ACO), Merced (MER), Pedregal (PED) y FES Acatlán (FAC). Debido a que el monitoreo en estas estaciones está orientado a la caracterización del problema de ozono de la ciudad y a los diferentes tipos de sitio que deben conformar la red, se sugiere que las estaciones seleccionadas sean equi-

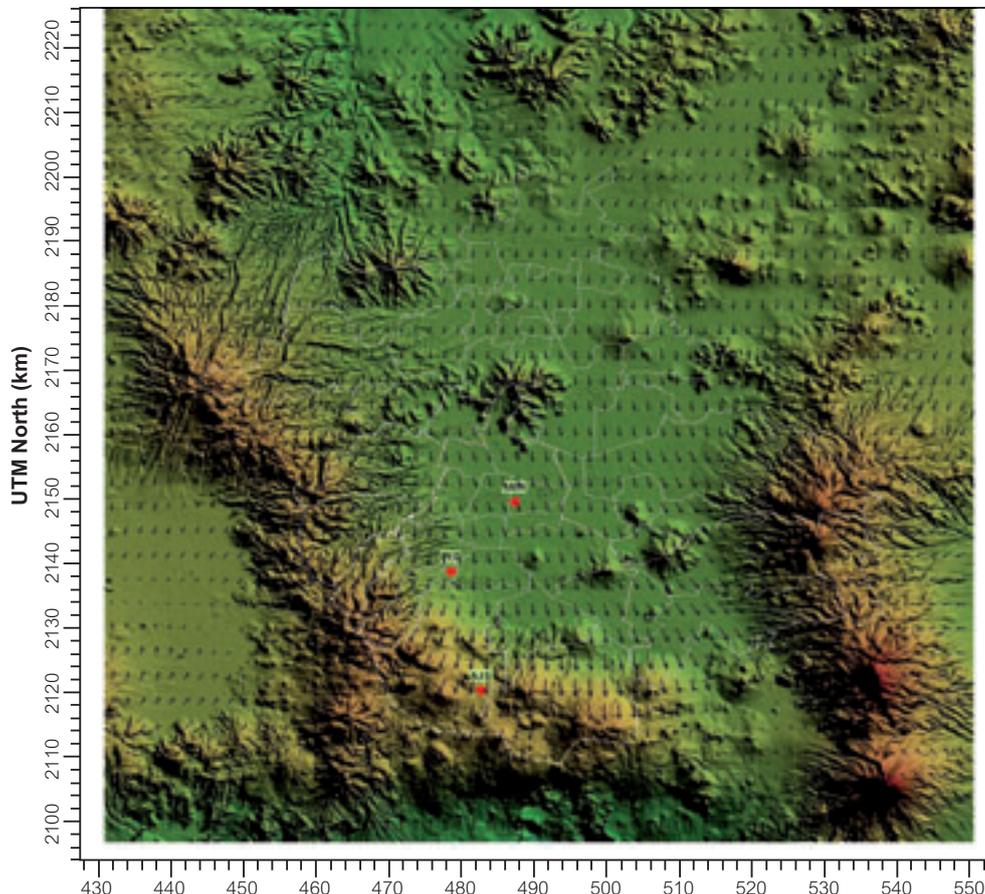


Figura 17. Representación de los campos de viento dominantes del periodo de 13:00 a 18:00 hr.

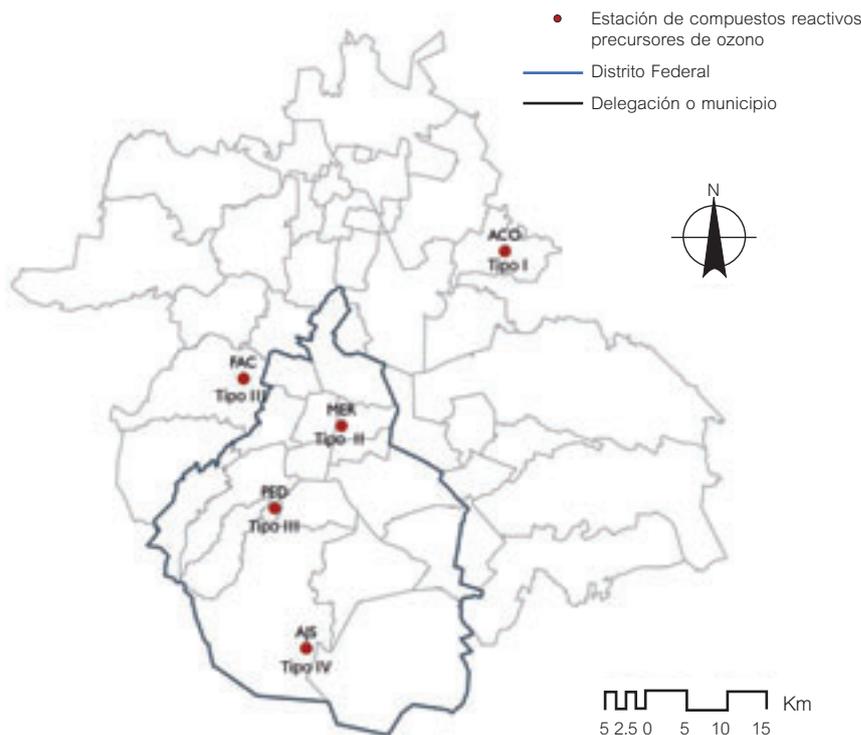


Figura 18. Red de Compuestos reactivos precursores de ozono para la Ciudad de México y su área metropolitana.

padas para el monitoreo de ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y de compuestos orgánicos volátiles con un número de carbono comprendido entre C2 y C12 (Tabla 2); asimismo, se sugiere implementar el monitoreo de óxidos de nitrógeno reactivos (NOy), principalmente en los sitios Tipo 1 y/o Tipo 3. Esta configuración

inicial no es estática y está sujeta a la evaluación de los primeros resultados del monitoreo. El diseño de la red permitirá obtener información en promedio horarios y los datos estarán disponibles para su acceso público una vez desarrollados los procedimientos de validación de la información.

Tabla 2. Descripción de los sitios de monitoreo para la red de monitoreo de compuestos orgánicos reactivos precursores de ozono.

Tipo de sitio	Nombre y clave	Parámetros recomendados por la U.S. EPA para sitios PAMS	Configuración final	Observaciones
Tipo 1	Acolman (ACO)	Requeridos: O ₃ , NO ₂ , NO _x , meteorología Opcionales: COV, NO _y	O ₃ , NO ₂ , NO _x , meteorología	Estos sitios deberán iniciar el monitoreo en los primeros 9 meses después de la instalación del sitio Tipo 2.
Tipo 2	Merced (MER)	Requeridos: O ₃ , NO ₂ , NO _x , COV, CO, meteorología. Opcionales: PM _{2.5}	O ₃ , NO ₂ , NO _x , COV, CO, PM _{2.5} , meteorología	Este sitio deberá instalarse primero.
Tipo 3	Pedregal (PED) FES Acatlán (FAC)	Requeridos: O ₃ , NO ₂ , NO _x , COV, meteorología. Opcionales: NO _y , PM _{2.5}	Pedregal: O ₃ , NO ₂ , NO _x , NO _y , PM _{2.5} , COV, meteorología. FES Acatlán: O ₃ , NO ₂ , NO _x , COV, meteorología.	Estos sitios deberán iniciar el monitoreo en los primeros 6 meses después de la instalación del sitio Tipo 2.
Tipo 4	Ajusco (AJS)	Requeridos: O ₃ , meteorología. Opcionales: , NO ₂ , NO _x , COV, CO	O ₃ , meteorología	La estación esta en instalación.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Organización Mundial de la Salud –OMS–. “Informe sobre la salud en el mundo 2002. Reducir los riesgos y promover una vida sana”. Ginebra, 2002.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal –SMA-GDF–. Calidad del Aire en la Ciudad de México, Informe 2009. México, D.F. 2010.
- Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal –SIMAT-SMA-GDF–. “Calidad del Aire en la Ciudad de México, Informe 2011”. México, D.F. 2009.
- Mudway, I.S., Kelly, F.J. “Ozone and the lung: a sensitive issue”. *Molecular Aspects of Medicine* 21, 1–48.
- Múgica, V., Watson, J., Vega, E., Reyes, E., Ruiz, M. E. and Chow, J. (2000). “Receptor Model Source Apportionment of Non-methane Hydrocarbons in Mexico City”. *The Scientific World*, 2000; 2: 844-860.
- Organización Mundial de la Salud –OMS–. “Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre”. Actualización mundial 2005 Resumen de evaluación de riesgos. Ginebra, 2005.
- Finlayson-Pitts, B. J. and Pitts, J. N. “Chemistry of the upper and lower atmosphere”. Academic Press, USA. 2000.
- Seinfeld, J.H. and Prendis S.N. “Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change”, New York, USA, John Wiley & Sons. 2006.
- Stephens, S., Madronich, S., Wu, F., Olson, J. B., Ramos, R., Retama, A., and Muñoz, R. “Weekly patterns of México City’s surface concentrations of CO, NO_x, PM₁₀ and O₃ during 1986–2007”, *Atmos. Chem. Phys.* 2008; 8, 5313-5325.
- SMA, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del D.F. “Inventario de Emisiones de la ZMVM, 2006”. Primera Edición. México, D.F. 2008.
- Committee on Tropospheric Ozone Formation and Measurement; Board on Environmental Studies and Toxicology; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Commission on Geosciences, Environment, and Resources; National Research Council, “Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution”. NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington, D.C. 1991
- U.S. Environmental Protection Agency. “Technical assistance document for sampling and analysis of ozone precursors”. National Exposure Research Laboratory, Research Triangle Park, NC, EPA/600-R-98/161, September, USA, 1998.
- U. S. Environmental Protection Agency. “Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1”. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC 27711. EPA-454/R-98-044. August. USA, 1998.
- NARSTO. “An Assessment of Tropospheric Ozone Pollution”: A North American Perspective, June. USA, 2000.
- Sánchez J. R. Pablo. Importancia de la Evaluación de la Calidad del Aire por Ozono en la Zona Suroeste de la Ciudad de México, Tesis de licenciatura. UNAM, México D.F. 1999.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y ecología –SEDUE–. “La Contaminación Atmosférica en el Valle de México”, México, D.F. 1988.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y ecología –SEDUE-FUNDACIÓN FRIEDRICH EBERT–. “Primer Seminario Internacional sobre administración de la Calidad del Aire”, Metepec, Puebla, 2 al 6 de noviembre, 1987.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y ecología –SEDUE–. “Diseño Detallado para la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México”. México, 1991.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales –SEMARNAT–. “Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico”, 2004. Instituto Nacional de Ecología. México. 2004.
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación de la Ciudad de México –CMPCCAVM–. “Red Automática de Monitorio Atmosférico”. Dirección General de Ecología. México, 1992.
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación de la Ciudad de México –CMPCCAVM–. “Avances a Junio 1994. Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México”. Diciembre. México, 1994.
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación de la Ciudad de México –CMPCCAVM–. “La contaminación atmosférica en el Valle de México, acciones para su control 1988-1994”. México 1995.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal –SMA-GDF–. Calidad del Aire en la Ciudad de México, Informe 2009. México, D.F. 2010.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal –SMA-GDF– (2010a). Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM 2008.
- Bravo, A.H., R. Sosa E., F. Perrin G., R. Torres J. “Incremento de la Contaminación Atmosférica por Ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México”. *Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 1988: Año 1, núm. 1: 23-25.
- Bravo A. H., Sánchez A P, Sosa E. R., Torres J. R., “Proceeding 90th AWMA Annual Meeting. “Air pollution problem in the Mexico City Metropolitan Zone: Photochemical Pollution”. Toronto, Canada, 1997.
- LAN/IMP –Los Alamos National Laboratory and Instituto Mexicano del Petróleo–. “Mexico City Air Quality research Initiative”. Los Alamos, USA. 1994.
- IMP –Instituto Mexicano del Petróleo–. “Investigación sobre materia particulada y deterioro atmosférico” –IMADA, Subdirección de Protección Ambiental, 1994-1998, México, 1998.
- Ruiz, M.E., J.L. Arriaga and I. García. Determinación de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la Ciudad de México mediante el uso de sistemas ópticos y métodos convencionales. *Atmósfera*, 1996. 9:119-135.
- Edgerton, S.A., Arriaga, J.L., Archuleta, J., Bian, X., Chow, J.C., Coulter, R.L., Neff, W., Petty, R., et al., “Particulate air pollution in Mexico City. A Collaborative Research Project”. *Journal of the Air and Waste Management Association* 1999: 49, 1221–1229.
- Arriaga, J. L.; Escalona Sergio; Cervantes Alma y Ordúñez Rogelio. Simposio II de Contaminación Atmosférica, Noviembre. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. “Seguimiento de COV en el aire urbano de la ZMCM”. México, D.F. 1997.
- Arriaga, J. L.; Escalona Sergio; Cervantes Alma y Ordúñez Rogelio. (1997). “Seguimiento de COV en el aire urbano de la ZMCM”. Simposio II de Contaminación Atmosférica, Noviembre. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa
- Vega, E., Múgica, V., Carmona, R. and Valencia, E. “Hydrocarbon source apportionment in México City using the chemical mass balance receptor model”. *Atmospheric Environment* 2000; 34:4121-4129.
- Velasco, E., Lamb, B., Westberg, H., Allwine, E., Sosa, G., Arriaga-Colina, J. L., Jobson, B. T., Alexander, M. L., Prazeller, P., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Grutter, M., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, L. T., and Molina, M. J. “Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns”, *Atmos. Chem. Phys.* 2007; 7, 329-353.
- Volkamer, R., Sheehy, P.M., Molina, L.T., Molina, M.J. “Oxidative capacity of Mexico City atmosphere – Part 1: A radical source perspective”, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2007; 7, 5365-5412.
- Tie, X., Madronich, S., Li, G., Ying, Z., Zhang, R., Garcia, A. R., Lee-Taylor, J., and Liu, Y. “Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF-Chem) study”, *Atmos. Environ.* 2007; 41, 1989–2008.
- SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI. “Informe técnico de Monitoreo y Evaluación de las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México”. México, D.F. 28 pp. 2008.
- Lei, W., de Foy, B., Zavala, M., Volkamer, R., and Molina, L. T. “Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model”. *Atmos. Chem. Phys.* 2007; 7, 1347-1366.

38. U.S. Environmental Protection Agency. "Photochemical assessment monitoring stations implementation manual". Report prepared by Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-454/B-93-051, March, USA, 1994.
39. PNUMA. "Red Consumers Internacional". Manual de Ciudadanía Ambiental Global. 2005.
40. Ali S., Chen G., Zhang H., Ying Q., Cureño I., Marin A., Bravo H. Sosa R. 9th Annual CMAS Conference: "High Resolution Air Quality Modeling for the Mexico City Metropolitan Zone using a Source-Oriented CMAQ model –Part I: Emission Inventory and Base case Model Results., Chapel Hill, NC, USA, October 2010.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Fundación MAPFRE, por la beca "Ignacio Hernando de Larramendi", 2010 y se realizó con el apoyo y la participación del personal de la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.