

Diseño de la monitorización de precursores oxidantes fotoquímicos en

Ciudad de México y su área metropolitana

El ozono es el principal problema de contaminación del aire en Ciudad de México, por lo que se necesitan 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 medir los compuestos reactivos precursores del ozono con objeto de definir las características de estos contaminantes en la atmósfera. Este proyecto presenta el diseño de la primera red para la monitorización de precursores de ozono en Latinoamérica.

En los años 90, Ciudad de México fue considerada como la región más contaminada del mundo, ya que en el primer lustro de esa década en más del 90% de los días del año se registraban concentraciones que superaban ampliamente 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, disminuyendo la frecuencia con la que se exceden las normas nacionales para contaminantes secundarios ⁽¹⁾.

Por **M.I. MÓNICA DEL CARMEN JAIMES**

PALOMERA. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
(mjaimes@comunidad.unam.mx).

Q. ARMANDO RETAMA HERNÁNDEZ. Director de Monitoreo Atmosférico. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
(aretama@asma.df.gob.mx).

Selección de sitios para la monitorización

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 2.240 metros sobre el nivel del mar, elevada radiación solar, localización fisiográfica, altas emisiones de precursores de ozono, óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos reactivos. Sin embargo, es a partir del año 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, mientras que en 2010 se rebasó en 450 horas. Por ello, es innegable el efecto para la salud.

La importancia de la monitorización de los compuestos orgánicos volátiles (COV) en Ciudad de México y su área metropolitana se basa en su reactividad y toxicidad, ya que dependiendo de su reactividad son un factor esencial en la formación del ozono. El ozono es el principal problema de contaminación del aire en Ciudad de México, por lo que se requieren acciones dirigi-

das 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 definir las características de estos contaminantes en la atmósfera.

La metodología para el diseño de la selección de los sitios de monitorización se realizó considerando las recomendaciones de la U.S. EPA, según el programa *Photochemical Assessment Monitoring Station* (PAMS).

Los sitios seleccionados según las características y necesidades de Ciudad de México y su área metropolitana son: un sitio para la evaluación de precursores localizado 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 localizado en el noreste de CMAM y un sitio para evaluar el transporte del ozono, localizado al sur de la ciudad. La selección se llevó a cabo tras una evaluación minuciosa de las condiciones de los sitios, meteorología del lugar e información de calidad del aire existente.

Durante los años 90 del pasado siglo, Ciudad de México fue considerada como la región más contaminada del mundo.

En Ciudad de México los niveles de ozono registran concentraciones que exceden frecuentemente los valores establecidos por la Norma Oficial Mexicana, así como las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud

De acuerdo con el último informe anual sobre calidad del aire en 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) ^[2] 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 troposfera, alrededor de 20 millones de personas continúan expuestas a concentraciones que implican riesgo para su salud ^[3].

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 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 ^[4].

Los automóviles figuran entre las prin-



El elevado volumen de tráfico es una de las principales fuentes de emisión de precursores de ozono en Ciudad de México.

cipales 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 ^[5].

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 conocer la distribución, caracterización y comportamiento de las especies reactivas antes y durante la activación de los procesos fotoquímicos.

La monitorización continua de los compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxi-

dos de nitrógeno (NO_x) en Ciudad de México es crítica para evaluar la producción de O₃ troposférico. Estas mediciones proporcionarán información importante para la evaluación y gestión 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 existente en Ciudad de México.

Antecedentes

Los primeros esfuerzos para determinar la concentración de hidrocarburos totales en el aire ambiente los realizó durante los años 80 del pasado siglo el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM ^[6]. En ellos se resalta el vínculo



Latinstock

lo de estos contaminantes con las concentraciones de ozono y la necesidad de conocer la composición de este tipo de compuestos.

En Ciudad de México y su área metropolitana se han realizado a través de los años diversas campañas de medición de compuestos orgánicos volátiles. 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% conformado 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 por ser las más reactivas. Se encontraron niveles altos de hidrocarburos tóxicos como 1,3-butadieno, benceno, tolueno y xile-

Los automóviles son la principal fuente 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

no. Los patrones de emisión se relacionan con el tránsito vehicular matutino sumado a los factores meteorológicos, confirmando que la fuente principal son las emisiones vehiculares^[7,8,9,10,11,12,13]. Asimismo, en estos estudios se identifica la distribución espacial de los COV, determinando que la zona centro de la ciudad presenta la mayor concentración seguida de la zona noreste, por lo que se clasifican como áreas críticas y se sugiere dar prioridad en la monitorización y control de emisiones de los COV^[14,15].

Contenido

Este artículo describe el proceso para el diseño de una red orientada a la monitorización de compuestos orgánicos precursores del ozono en una ciudad con un grave problema de contaminación fotoquímica.

Método

En términos generales, el diseño de la red para la monitorización 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 de su transporte y de sus precursores. Es importante mencionar que los criterios para seleccionar los sitios de una red de mo-

onitorización de compuestos reactivos precursores del ozono son diferentes a los que se utilizan en el diseño y establecimiento de estaciones convencionales de monitorización 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 para generar información con un propósito específico.

Debido a que la red para la monitorización de compuestos reactivos precursores de ozono de Ciudad de México tendrá propósitos similares que las estaciones PAMS (por sus siglas en inglés de *Photochemical Assessment Monitoring Stations*), y estará orientada a generar información para entender los procesos fotoquímicos particulares de la capital mexicana, se espera que sus resultados permitan proponer mejores políticas para resolver el problema de calidad del aire por ozono en Ciudad de México. La metodología para el diseño de la selección de los sitios de monitorización 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 en el documento *Photochemical Assessment Monitoring Stations Implementation Manual*^[16].

Descripción del proceso de selección de los sitios de monitorización

De acuerdo a los objetivos de la monitorización, la red de compuestos reactivos precursores de ozono debe estar orientada a generar información para comprender el problema del ozono en

Ciudad de México. Es necesario que su diseño esté dirigido a la selección de un arreglo de sitios localizados específicamente para evaluar el transporte e impacto de las emisiones de los precursores de ozono, en función de las características geográficas y meteorológicas durante los eventos con elevadas concentraciones de ozono. Por lo anterior, se pretende que la red en su conjunto provea información suficiente para desarrollar estrategias de control de ozono costo-efectivas, información apropiada que soporte los esfuerzos de modelación fotoquímica, la reconciliación o validación de los inventarios de emisiones, la caracterización del ozono y sus precursores, y las tendencias meteorológicas. Adicionalmente, proveerá información adecuada para determinar la exposición de la población a los compuestos de toxicidad importante.

La selección de los sitios es la tarea más importante del diseño de la red y debe concluir en la ubicación más representativa para evaluar el propósito del sitio. La selección prevé una secuencia de pasos que se describe a continuación:

■ **PASO 1. Evaluación de la escala espacial.** En este paso se define la escala espacial asociada a cada uno de los objetivos de la monitorización. Las escalas urbana y vecinal son las más relevantes. La escala urbana caracteriza las condiciones en un orden de 4 a 50 kilómetros. Típicamente, las mediciones en una escala urbana representan la distribución de la concentración en un área metropolitana, que a su vez se relacionan con las estrategias de control. Por otra parte, la esca-

la vecinal representa condiciones en un orden de 0,5 a 4 kilómetros, donde sus mediciones representan la distribución de la mezcla de los contaminantes en una subregión urbana. La monitorización en esta escala se utiliza para evaluar los impactos de exposición y trayectoria de las emisiones, además de proporcionar información sobre los contaminantes en zonas residenciales, de negocios y comerciales.

■ **PASO 2. Caracterización del área de monitorización.** En este paso se define el área donde se podrían ubicar los sitios de monitorización conforme a los requerimientos particulares de cada escala espacial y en consonancia con los objetivos de monitorización. Para ello se recopiló y analizó la información del uso de suelo, inventario de emisiones, densidad poblacional, distribución del tránsito y vías de circulación, datos meteorológicos y datos de monitorización de calidad del aire. La meteorología es básica en los procesos de producción de contaminantes fotoquímicos, ya que 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 del comportamiento del viento, pero es recomendable utilizar modelos fotoquímicos como apoyo.

■ **PASO 3. Definición del tipo de sitios de monitorización.** En este paso se seleccionan el número y el tipo de sitios que deben conformar la red de acuerdo a la densidad poblacional y a la severidad del problema de ozono. La U.S.

EPA recomienda una configuración que incluye algunos de los siguientes cuatro tipos de sitios:

■ **Tipo 1:** Sitio para la caracterización viento arriba y de concentraciones de fondo. Este sitio permite conocer la concentración de fondo y de transporte del ozono y sus precursores. Debe localizarse viento arriba del área donde se generan las emisiones máximas de precursores con respecto a la dirección dominante de los vientos durante la mañana, a una distancia suficiente para obtener mediciones de escala urbana.

Tipo 2: Sitio para la evaluación del impacto de las emisiones máximas de precursores. Su objetivo es evaluar la magnitud y tipo de emisiones de los precursores en el área donde se esperan las máximas concentraciones y que sean representativas de la ciudad. Este tipo de sitio es recomendable también para la monitorización de los contaminantes tóxicos. Se recomienda su ubicación en zonas viento abajo del área de máxima emisión de precursores, cerca de las áreas céntricas y de negocios de la ciudad o en zonas que presenten la mezcla de las emisiones de los precursores. Se recomienda una escala de representatividad vecinal.

Tipo 3: Sitio para la evaluación de la concentración máxima de ozono. El objetivo es detectar las concentraciones máximas de ozono que se registran viento abajo de las zonas de máxima emisión de precursores. Su ubicación debe ser de escala urbana y localizarse a una distancia de 15 a 45 kilómetros de las fuentes de emisión, cerca del límite de la zona urbana.

La red de precursores reactivos de ozono proporcionará información importante para la evaluación y gestión de la calidad del aire, y mejorará las propuestas de estrategias de control, en forma efectiva y progresiva, para resolver el grave problema de ozono en Ciudad de México



Uno de los principales problemas de contaminación del aire en Ciudad de México se debe al ozono y desde 1986 anualmente se ha excedido los límites que establecen las NOM en más del 50% de los días

cursores de acuerdo a su escala espacial y a los objetivos de monitorización. Su distribución debe abarcar la mayor parte del área de estudio.

- Por último, el criterio de 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 el aporte de las fuentes de emisión cercanas a los sitios de monitorización considerando el inventario de emisiones.

- **PASO 5. Evaluación del entorno físico.** El entorno físico de una estación de monitorización define la capacidad para el cumplimiento de los objetivos de la monitorización relacionados con la representatividad y cobertura espacial. Una estación en donde el libre flujo de viento se encuentra impedido puede limitar significativamente su representatividad espacial. Por lo tanto, es importante definir previamente las condiciones del entorno físico de un sitio durante la fase del diseño. En este paso se evalúan los criterios del entorno físico del sitio a partir de la inspección del sitio candidato, lo que incluye, entre otros aspectos, 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.

Tipo 4: Sitio para la monitorización viento abajo. Estos sitios se instalan para caracterizar el transporte extremo del ozono y de sus precursores viento abajo con objeto de identificar aquellas áreas remotas que pudieran experimentar el impacto del transporte del ozono. Debe ubicarse viento abajo de la dirección vespertina dominante del área de máxima emisión de precursores y a una distancia suficiente para garantizar una escala urbana.

- **PASO 4. Selección final de los sitios de monitorización.** En este paso se tienen en cuenta tres criterios básicos:

- El primero es el análisis de sector, que 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 según los datos del inventario y las rosas de viento que determinan la trayectoria de los vientos dominantes.
- El segundo criterio es la distancia, que tiene como objetivo situar las estaciones a una distancia adecuada para obtener muestras representativas de las emisiones de los pre-

Latinstock

Recursos para el proceso de selección de los sitios de la monitorización

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

- Los datos sobre 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, móviles y biogénicas. Los datos del inventario de emisiones fueron proporcionados por tipo de fuente y contaminante para celdas de 2x2 kilómetros, en unidades de ton/año.
- Los datos del uso del suelo del Distrito Federal se obtuvieron del centro GEO para el año 2003, y en el caso de los datos del Estado de México se obtuvieron de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) para el año 2000.
- Para la meteorología se analizaron los datos del Sistema de Monitoreo Atmosférico para el periodo 2005-2009. 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.
- 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 el periodo 2005-2009. A partir de los datos se analizó la distribu-

ción 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 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 analizaron cuidadosamente las condiciones meteorológicas y de calidad del aire que motivaron la activación.

■ 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.

■ 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 geo-estadística básica (AGEB).

■ 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.

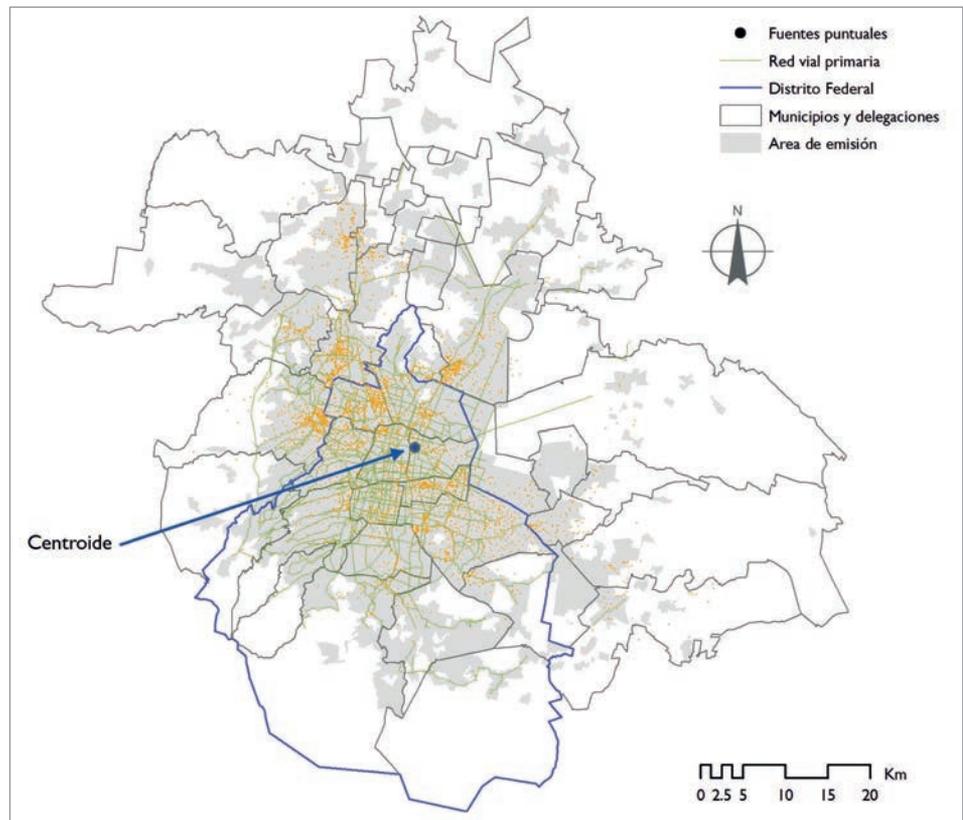


Figura 1. Ubicación del centroide de las emisiones de precursores de la región.

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 donde la mezcla favorece las concentraciones máximas de precursores	Alejada de las zonas de las máximas emisiones (15 a 45 kilómetros)	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 NO _x	Lejos de la influencia de emisiones de NO _x
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 nueve meses después del Tipo 2	Sitio obligatorio y primero a instalar	Sitio obligatorio, su instalación puede ser seis 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

Resultados

Selección de los sitios de monitorización

En esta sección se describen los resultados de la evaluación para la selección de cada uno de los sitios que integrarán la red para la monitorización de compuestos reactivos precursores de ozono.

Definición del centroide para el análisis de sector

Para facilitar la búsqueda de los posibles sitios de monitorización es necesario realizar la sectorización de la zona metropolitana, de acuerdo a las recomendaciones de la U. S. EPA. Esta técnica

propone establecer una referencia geográfica en el centro de la zona metropolitana, o mejor aún, 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 1.

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 monitorización de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

Selección del sitio Tipo 1

El sitio Tipo 1 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 Ciudad de México. Asimismo, 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 construc-

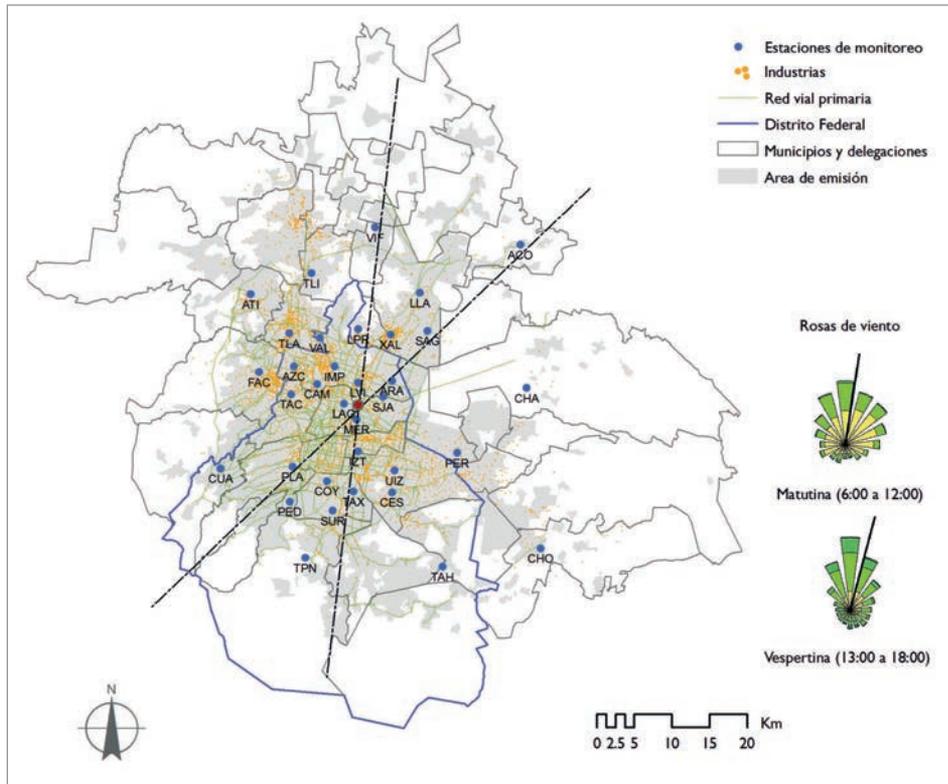


Figura 2. Situación de las estaciones de monitorización en Ciudad de México.

ción de los sectores la dirección predominante del viento.

El análisis de los datos de viento entre 2005 y 2009 en Ciudad de México indica un viento predominante con dirección norte y alguna influencia de la dirección este. Dicho patrón se observa tanto para el horario matutino (6:00 a 12:00 horas), como para el vespertino (13:00 a 18:00). En la Figura 2 se observan las rosas de viento construidas con datos de todas las estaciones de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico de Ciudad de México (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 con objeto de 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.

En la Figura 2 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 1: se encuentra en la trayectoria de los vientos predominantes, se localiza viento arriba de las emisiones y no se encuentra bajo la influencia directa de fuentes de emisión cercana.

La estación de monitoreo ACO se localiza en los límites de la zona metropolitana, una región medianamente urbanizada cuyo principal uso de suelo es rural o semirural. La estación dispone de analizadores para O₃, SO₂ y PM₁₀ (Figura 3).

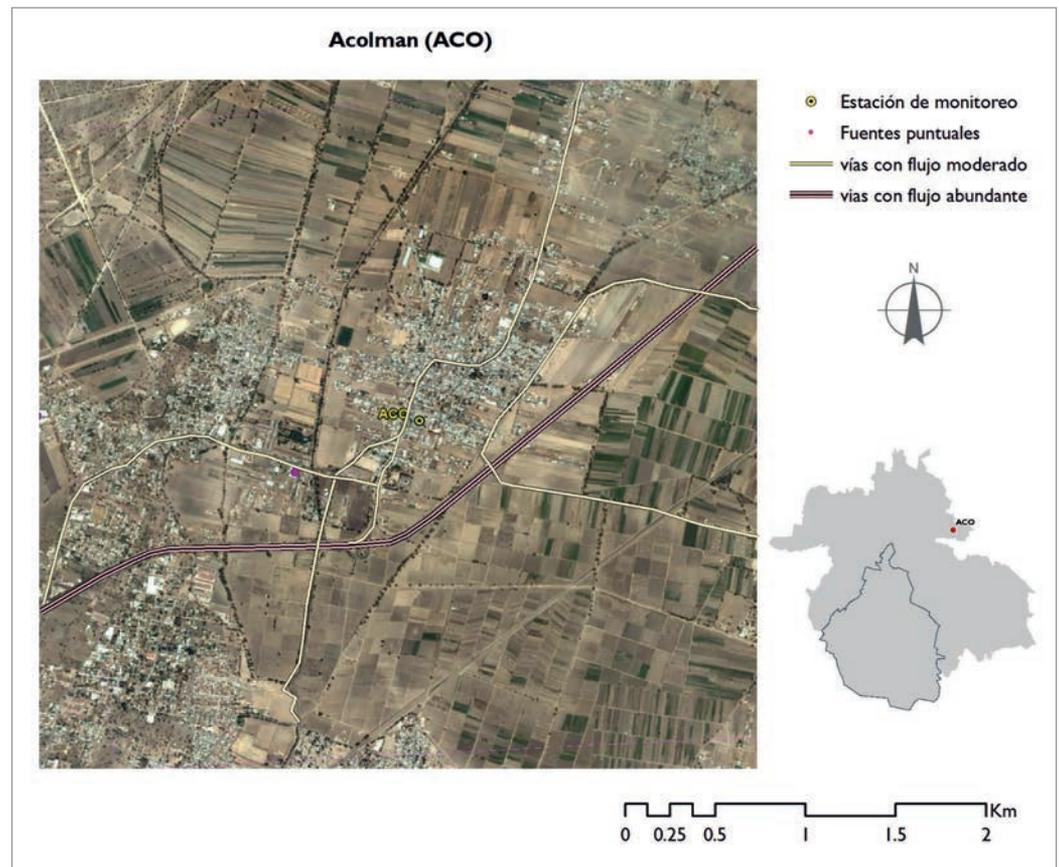


Figura 3. Ubicación de la estación Acolman (ACO).

La selección de los sitios es la tarea más importante del diseño de la red, ya que debe desembocar en la ubicación más representativa para evaluar el propósito del sitio

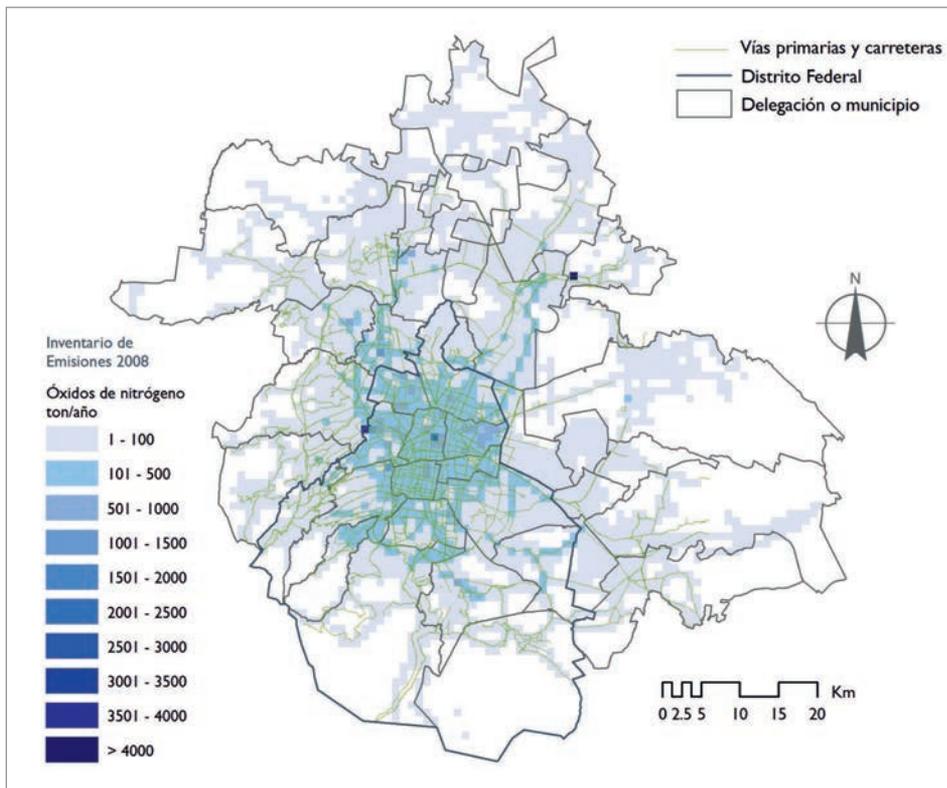
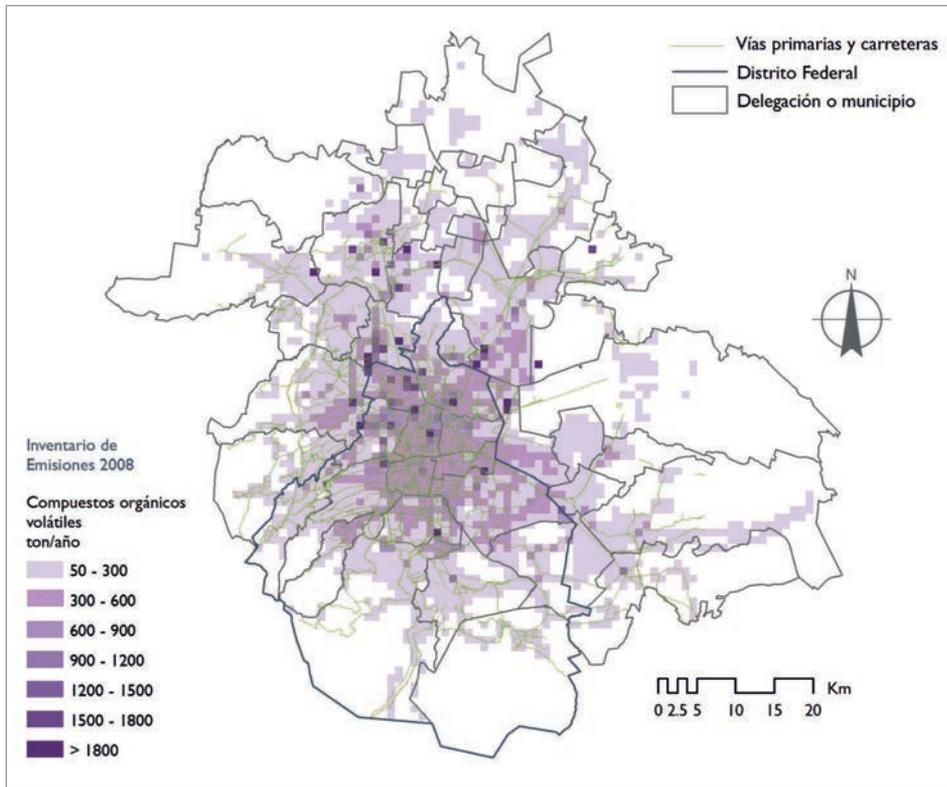


Figura 4. Distribución de emisiones según la ubicación de industria (arriba) y carreteras (debajo).

■ Selección del sitio Tipo 2

Un sitio Tipo 2 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 permita evaluar la composición del inventario de emisiones de la ciudad. Ciudad de México y su área metropolitana concentran alrededor de 5.146 industrias, lo 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 ^[17], anualmente se emiten 591.399 toneladas de compuestos orgánicos volátiles y 188.087 toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x). Las principales fuentes de los compuestos orgánicos volátiles son las de área, que aportan 241.252 toneladas, y las móviles, que contribuyen con 185.384 toneladas, mientras que la vegetación contribuye con 35.585 toneladas de estos compuestos. En cuanto a los NO_x , 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 4 para los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. En el caso de los compuestos orgánicos volátiles, las fuentes más importantes se encuentran en el norte, aunque en la región central de la zona metropolitana se identifica el grueso de las emisiones. En el caso del monóxido de carbono, la mayor cantidad de emisiones se identifica para la región central del Distrito Federal.

De acuerdo con los resultados, la estación de Merced (MER), en las condiciones actuales, se identifica como la mejor alternativa: las vialidades cercanas están a la distancia que marcan los criterios para establecer sitios de mo-

nitorización, 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 5).

■ Selección del sitio Tipo 3

El sitio está orientado a la monitorización 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 de entre 5 a 7 horas del viaje de las emisiones desde las fuentes, aunque preferentemente se sugieren localidades que se encuentren en la trayectoria del viento y que tengan emisiones bajas de óxido nítrico (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 norte y la limitación de la dispersión por la presencia de las montañas de la sierra del Ajusco, que favorecen 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 2) identifica varias estaciones en el suroeste. Sin embargo, el análisis detallado de la información disponible indica que la estación Pedregal (PED) registra una mayor frecuencia de máximos de ozono.

Las características de la estación Pedregal, su entorno y distribución de la contaminación garantizan una representatividad de escala urbana (Figura 6).

Durante la evaluación de la información se observó que algunas de las estaciones localizadas al poniente de Ciudad de México registraban con fre-

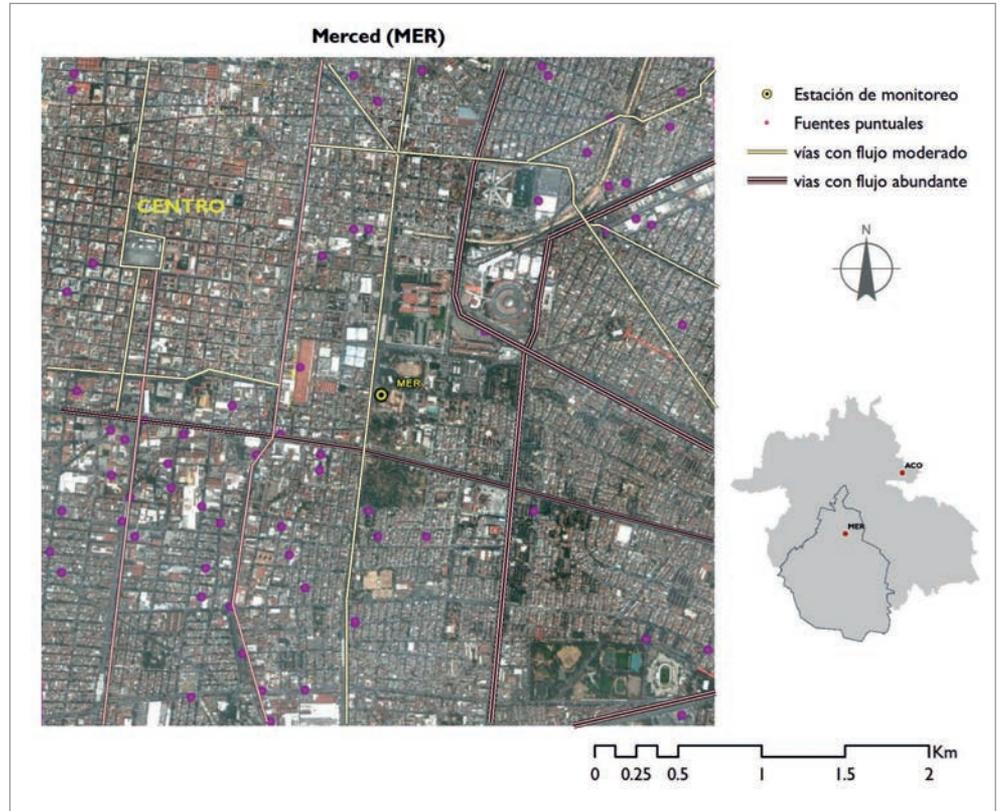


Figura 5. Situación de la estación de monitorización de Merced (MER).

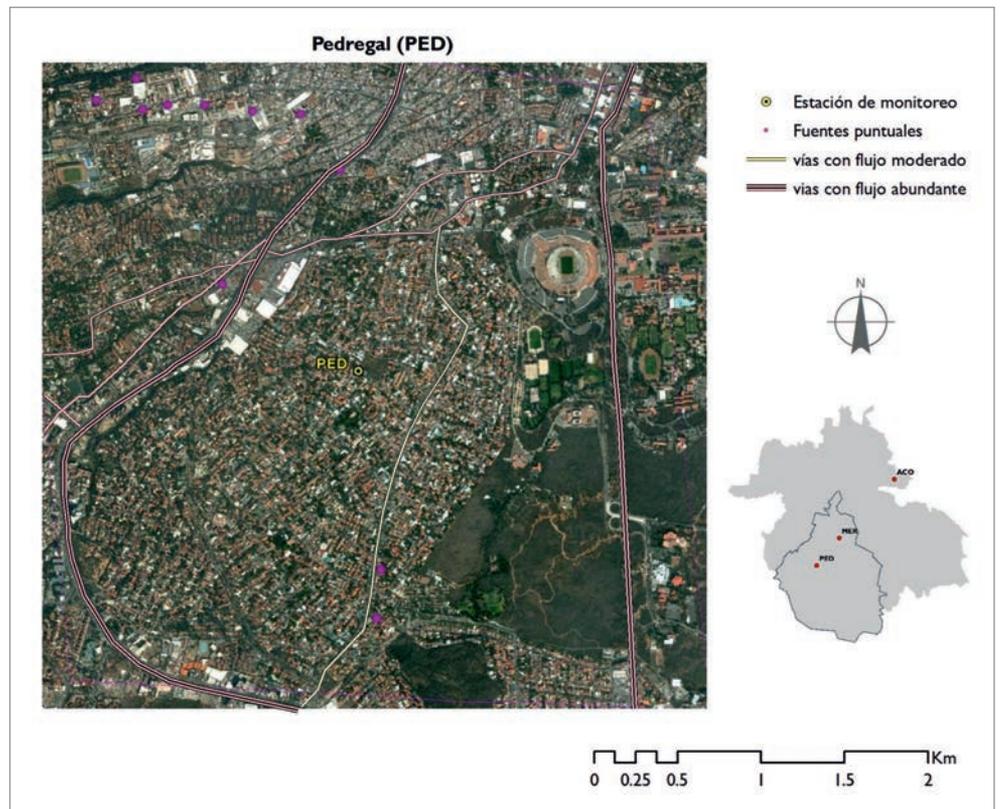


Figura 6. Ubicación de la estación Pedregal (PED).

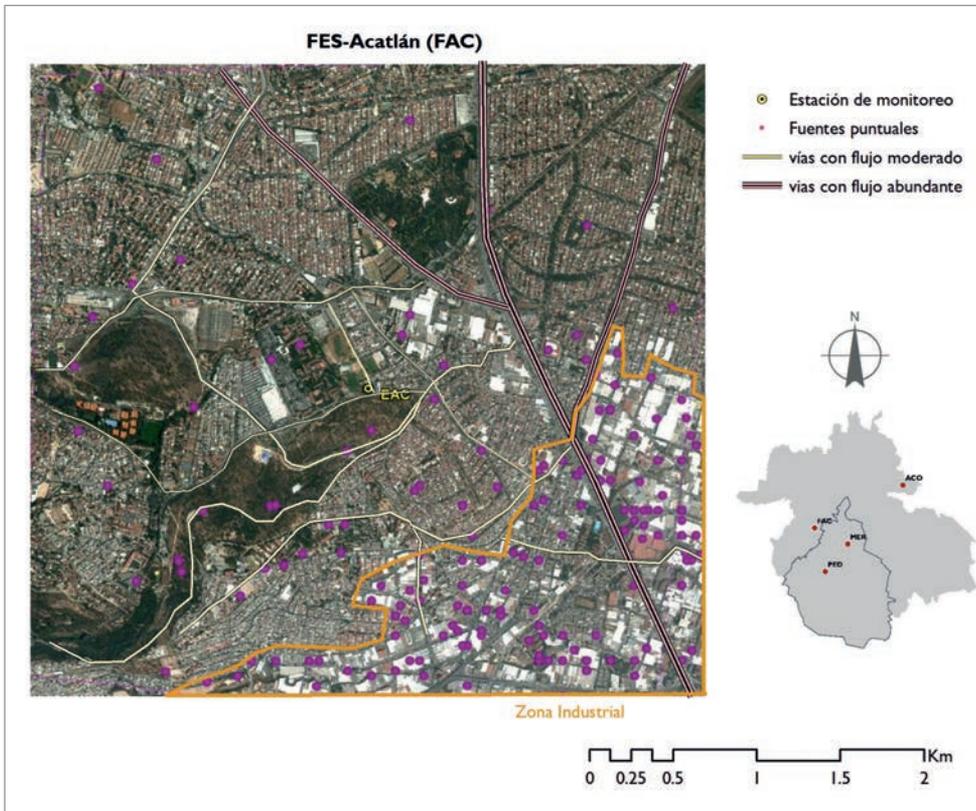


Figura 7. Localización de la estación de monitorización FES-Acatlán (FAC).

cuencia 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 las sierras del Ajusco y de las Cruces. Este proceso favorece el incremento en las concentraciones de ozono a medida que la pluma de ozono y de precursores se desplaza desde el sur hacia el norte. Cuando esto ocurre, las concentraciones en esa región son mayores que las regis-

tradas en el sureste. En otras circunstancias, 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 al noroeste de la ciudad (corredor Cuautitlán-Tula-Tepeji) y bajo ciertas condiciones al oeste de la ciudad 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 3 en la zona. La estación de monitoriza-

ción FES Acatlán (antes ENEP Acatlán) se localiza en el lugar idóneo para captar las mediciones de interés (Figura 7).

■ Selección del sitio Tipo 4

Este tipo de sitio está orientado a la evaluación del transporte del ozono y sus precursores hacia otras regiones más allá del área metropolitana, y su objetivo es estimar la contribución de la contaminación de Ciudad de México a otras áreas urbanas o rurales. Es indispensable que su ubicación se encuentre viento abajo de los sitios donde se registran las concentraciones máximas de ozono, en el camino de la trayectoria de los vientos predominantes vespertinos. Resulta 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 registrados entre las 13:00 y las 18:00 horas tienen una dirección de norte a sur (Figura 8). 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 modelación 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 el norte. En años precedentes, algunos estudios realizados por el

La red de compuestos reactivos precursores de ozono estará formada por cinco sitios representativos: un sitio para las concentraciones de fondo, un sitio orientado a las fuentes de emisión, dos sitios para la concentración máxima de ozono y un sitio para evaluar el transporte del ozono

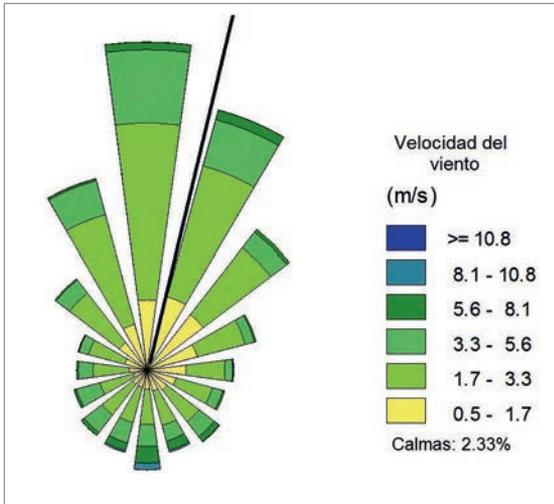


Figura 8. Vientos dominantes en la ciudad entre 13 y 18 horas.

SIMAT, en colaboración con el CENICA y el Instituto de Meteorología de la República de Cuba, demostraron la existencia de daño en los cultivos realizados en esa región. Otro estudio reciente de Ali *et al*^[18] muestra el impacto de los compuestos orgánicos volátiles hacia esta zona. Empleando esta evidencia se propone la instalación del sitio Tipo 4 en esta zona, específicamente en la localidad de Parres, en la delegación Tlalpan, en los límites con el Estado de Morelos. Esta estación será denominada con el nombre y clave de Ajusco (AJS).

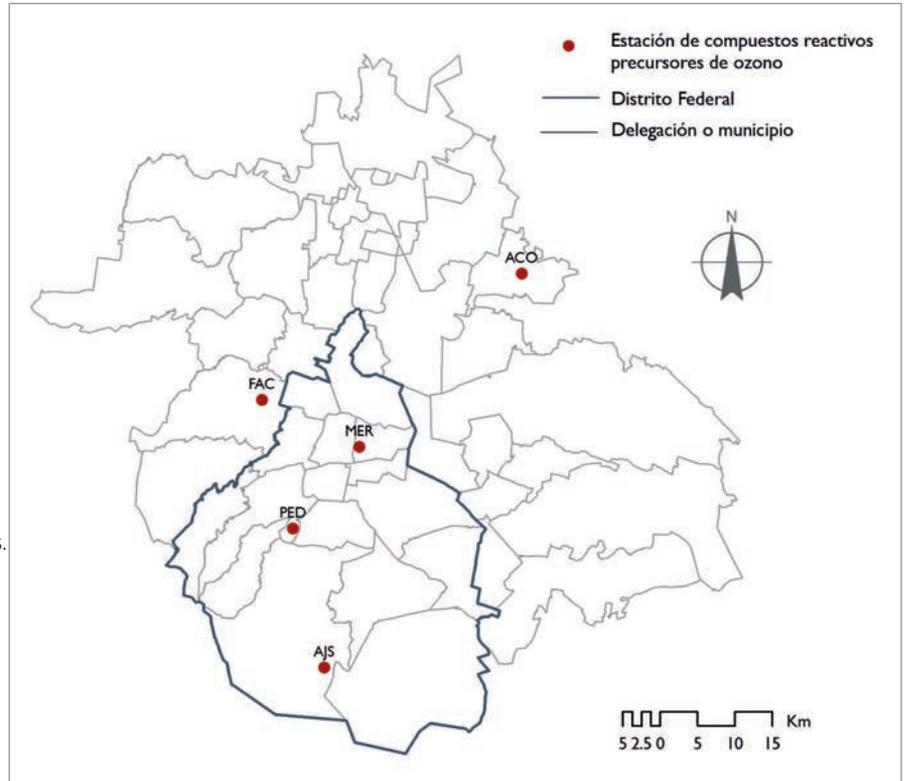


Figura 9. Red final de estaciones de monitorización resultante del análisis realizado.

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 Monit-

reo 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),

Tabla 2. Descripción de los sitios de monitorización para la red de monitorización 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 nueve 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 seis 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	Estación en fase de instalación

Pedregal (PED), FES Acatlán (FAC) y Ajusco (AJS) (Figura 9). Debido a que la monitorización 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 equipadas para la monitorización de ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles con un número de carbono comprendido entre C2 y C12 (Tabla 2);

asimismo, se sugiere implementar la monitorización de óxidos de nitrógeno reactivos (NO_y), 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 de la monitorización. El diseño de la red permitirá obtener información en promedios horarios y los datos estarán disponibles para su acceso público una vez desarrollados los procedimientos de validación de la información. ♦

AGRADECIMIENTOS

A FUNDACIÓN MAPFRE, por la beca Ignacio Hermandado de Larramendi 2010. Al personal de Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente del GDF, especialmente a Olivia Rivera Hernández y Miguel Sánchez Rodríguez. A Guadalupe Granados, por sus valiosos comentarios al documento. A Patricia Camacho y Jorge Sarmiento Rentería, por el inventario de emisiones. Se agradece de manera especial al Dr. Humberto Bravo y al Dr. Rodolfo Sosa, del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, por su asesoría para la ejecución de este proyecto.

PARA SABER MÁS

- [1] 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.
- [2] Secretaría de Salud. «Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono (O₃). Valor normado para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población». Diario Oficial de la Federación. México, D.F. Tomo DLXXXIX, 2002, no. 25. pp. 47-53.
- [3] Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SI-MAT-SMA-GDF). «Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2011». México, D.F. 2009.
- [4] Stephens S., Madronich S., Wu F., Olson J. B., Ramos R., Retama A. y Muñoz R. «Weekly patterns of Mexico City's surface concentrations of CO, NO_x, PM₁₀ and O₃ during 1986–2007», *Atmos. Chem. Phys.* 2008; 8, 5313-5325.
- [5] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del D.F. «Inventario de Emisiones de la ZMVM 2006». 1ª edición. México, D.F. 2008.
- [6] Bravo A.H., Sosa E., Perrin F.G. y Torres R.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.
- [7] Los Alamos National Laboratory and Instituto Mexicano del Petróleo. «Mexico City air quality research Initiative». Los Alamos, USA. 1994.
- [8] Instituto Mexicano del Petróleo. «Investigación sobre materia particulada y deterioro atmosférico». IMADA, Subdirección de Protección Ambiental, 1994-1998, México, 1998.
- [9] Ruiz M.E., Arriaga J.L. y García I. «Determinación de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la Ciudad de México mediante el empleo de sistemas ópticos y métodos convencionales». *Atmósfera*, 1996. 9:119-135.
- [10] 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.
- [11] Arriaga J. L., Escalona S., Cervantes A. y Ordúñez R. Simposio II de Contaminación Atmosférica: «Seguimiento de COV en el aire urbano de la ZMCM». Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México, Noviembre, 1997.
- [12] Arriaga-Colina J. L., West J. J., Sosa G., Escalona S. S., Orduñe R. M. y Cervante A. D. M. «Measurements of VOCs in Mexico City (1992–2001) and evaluation of VOCs and CO in the emissions inventory». *Atmos. Environ.* 2004: 38, 2523–2533.
- [13] Velasco E., Lamb B., Westberg H., Allwine E., Sosa G., Arriaga-Colina J. L., Jobson B. T., Alexandre M. L., Prazelle 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. y 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.
- [14] Vega E., Múgica V., Carmona R. y Valencia E. «Hydrocarbon source apportionment in México City using the chemical mass balance receptor model». *Atmospheric Environment* 2000; 34:4121-4129.
- [15] 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. 2008, 28 pp.
- [16] 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, USA, EPA-454/B-93-051, March, 1994.
- [17] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF). «Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM 2008». México, D.F. 2010.
- [18] Ali S., Chen G., Zhang H., Ying Q., Cureño I., Marin A., Bravo H. y 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.