



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Facultad de Estudios Superiores Acatlán

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de
Representación a Escala Meso- β Periodo 2001-2006

TESIS Y EXAMEN PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Matemáticas Aplicadas y Computación

PRESENTA:

Susana Carreón Sierra

ASESORA:

Dra. Telma Gloria Castro Romero

Junio de 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

“Me aterra la cuantía de las formas canónicas usadas para transmitir el agradecimiento. Al cabo de una búsqueda prolongada selecciono tres: gracias, muchas gracias, muchísimas gracias. En esta diversidad de formas se alojan mis sentimientos, los profundos y los superficiales, que hoy se me vuelven uno solo.”

Carlos Monsiváis

Al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y muy especialmente al Dr. Ángel Fierros Palacios, Director de la División de Energías Alternas, quien me ha distinguido con la Beca con la que se iniciaron los trabajos de esta tesis; a su entusiasmo, energía e incansable labor por la innovación y la productividad.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera y en especial a la Dra. Telma Castro Romero, Directora de dicho Centro y de esta tesis, por todo el apoyo recibido.

A mis sinodales, el Dr. Sergio Víctor Chapa Vergara, Mtro. Jorge Luis Suárez Madariaga, Dr. Raúl Pineda Olmedo y Dr. Carlos Couder Castañeda; por la esmerada revisión de este trabajo, por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Al Grupo de Modelación Matemática, Micro meteorología y Contaminación Atmosférica de la División de Energías Alternas del IIE: Raymundo Camerino Villegas Martínez, Gustavo Adolfo Tamayo Flores, Marco Antonio Martínez Flores, y a la Dra. Ana Teresa Celada Murillo (investigadora y madre admirable), que con su trabajo cotidiano realizan la investigación y aplicación de modelos para solucionar problemas del mundo real en materia de contaminación. Muy especialmente al Director de dicho Grupo, el Dr. Víctor Alejandro Salcido González, cuyo genio e ingenio ha inspirado este trabajo desde las primeras palabras, escritas, con dedos polvados de blanco, en la pizarra verde; desde las primeras descripciones manuales; desde las primeras voces objetivas y elocuentes.

Al Act. René Martínez, Jefe de la Unidad de Administración Escolar y a todo su equipo, por su apoyo y ágil gestión para la titulación. A la Mtra. Jeanett López García, Jefa del Programa de Matemáticas Aplicadas y Computación, por su entusiasta labor y su entrega; al Lic. Francisco Javier López Rodríguez, Secretario Técnico del Programa y a Lic. Christian Carlos Delgado Elizondo, Jefe de la Sección de Probabilidad, Estadística e Investigación de Operaciones, gracias a los tres por todo el apoyo para la ejecución de los trámites de titulación.

A todos mis profesores, los de mis primeras enseñanzas y hasta las últimas, aunque algunos rostros y nombres ya no recuerde, pero sin duda influyeron y contribuyeron en la formación de lo que he sido, lo que soy y lo que seré. Mi agradecimiento de todo corazón, porque la labor de docencia es una de las más nobles, y cuando se hace con cariño y responsabilidad se siembra y abona una semilla que sin duda traerá los mejores frutos a la sociedad y al país en todos los aspectos.

A mis padres, a mi familia, a mis hermanos, por su paciencia hacia conmigo y su solidaridad.

Y final e inicialmente, a mis hijas, Sofía y Karime, quienes no han dejado de maravillarme desde que las tuve por primera vez en mis brazos; a quienes debo los aprendizajes más entrañables, las mayores satisfacciones, alegrías y un caleidoscopio de sentimientos; a quienes quiero por sobre todo y todos, con quienes me ejercito en el amor...

Resumen

Los vientos son el mecanismo responsable del transporte y la dispersión de los contaminantes atmosféricos, y determinan, por ende, las zonas de impacto de las emisiones, tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles. El conocimiento de los vientos, en consecuencia, resulta imprescindible desde el punto de vista del estudio de la contaminación atmosférica y de la evaluación del impacto de las emisiones sobre la calidad del aire.

Aunque los vientos urbanos presentan una variabilidad muy alta, es natural esperar que presenten ciertos patrones de circulación, ya que muchas de sus forzantes poseen características de permanencia, de estacionalidad o de estatismo, y también debido a que algunos factores meteorológicos, como la radiación solar y la temperatura, presentan comportamientos periódicos gracias al ciclo diurno provocado por la rotación de la tierra.

En este trabajo se caracterizan y clasifican los eventos de circulación del viento en superficie en la Ciudad de México durante el periodo de 2001 a 2006, mediante un modelo de representación de vientos a escala meso- β . La información fuente utilizada para tal fin es la proporcionada por las estaciones de la Red Meteorológica (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del Gobierno del Distrito Federal (GDF), construyendo una base de datos de promedios horarios de velocidad y dirección del viento de la Ciudad de México para el periodo de estudio.

El modelo de representación que usamos en este trabajo considera a la Ciudad de México como una retícula de N celdas y , para cada tiempo de interés, realiza un mapeo de la complejidad espacial del campo de la velocidad del viento en N puntos de un espacio fase de cuatro dimensiones, definidas éstas por los parámetros de intensidad, dirección, divergencia y vorticidad del viento: $(v, \theta, \gamma, \omega)$. Bajo este enfoque reducimos la infinita variedad de estructuras espaciales del campo de viento en la Ciudad de México a un conjunto discreto y finito de puntos del espacio fase, determinamos las frecuencias y probabilidades de ocurrencia de los estados posibles para un periodo de tiempo dado, y realizamos una clasificación de los estados de circulación del viento y la identificación de sus patrones mediante el método jerárquico de cluster analysis.

El estudio se realizó aplicando primero los modelos de representación del viento en una y cuatro celdas para la ciudad de México. En este paso se obtuvieron dos bases de datos, cada una integrada por 52584 estados de viento $(v, \theta, \gamma, \omega)$ para cada celda. El análisis de estos estados, sin embargo, se realizó principalmente en términos de los resultados del modelo de una celda. Los resultados del modelo de cuatro celdas se usaron únicamente para apoyar el reconocimiento y la interpretación de los patrones de circulación del viento.

El análisis estadístico de los resultados se realizó, por un lado, en términos de las series de tiempo de los parámetros de estado y sus espectros de frecuencias de Fourier, y por otro, mediante las distribuciones de las frecuencias (o probabilidades) de ocurrencia de los estados de viento.

Resumen

Para la conglomeración (u organización de los estados de viento en cúmulos) se aplicó el método jerárquico de Ward con una medida de distancia euclidiana sobre el conjunto de estados de viento previamente normalizados en términos de los valores absolutos máximos que obtuvieron los parámetros de estado en el periodo de interés. El número de cúmulos seleccionado para el análisis fue de 6 para cada aplicación del algoritmo de conglomeración.

Los resultados de los procesos de caracterización y conglomeración de los vientos urbanos permitieron el reconocimiento de ocho patrones de circulación del viento para la ciudad de México. Estos se compararon contra los resultados de las observaciones y estudios de otros autores, obtenidos con metodologías de análisis diferentes. En particular, los resultados de este trabajo coincidieron de manera muy importante con los resultados reportados por E. Jáuregui y B. de Foy, y colaboradores.

Cabe resaltar que este trabajo no sólo fue capaz de reproducir de manera más fácil y práctica las observaciones de otros autores, sino que además permitió una caracterización más completa de los eventos de viento a través de los parámetros de estado extendidos, los cuales detallan, de manera cualitativa y cuantitativa, los atributos de divergencia y vorticidad de los vientos. Los métodos implementados en este trabajo para la taxonomía eólica pueden ser de gran utilidad para la identificación de escenarios importantes para la evaluación de recursos eólicos y la determinación de las principales zonas de impacto de las emisiones de contaminantes atmosféricos, entre otras aplicaciones.

Índice

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Capítulo 1.	
Introducción	1
1.1. Problemática General	2
1.2. Especificación del Problema	3
1.3. Motivación	4
1.4. Marco Teórico	5
1.5. Hipótesis	7
1.6. Objetivo General	8
1.7. Objetivos Específicos	8
1.8. Metodología	8
1.9. Descripción de los Contenidos	11
Capítulo 2.	
Condicionantes de la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México.	13
2.1. Introducción	14
2.2. La Zona Metropolitana de la Ciudad de México	16
2.3. Las Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la ZMCM	19
2.4. Estado Actual de la Calidad del Aire en la ZMCM	22
2.5. Ubicación Geográfica, Topografía y Orografía de la ZMCM	25
2.6. Características del Clima en la ZMCM	30
2.7. Características Generales de los Vientos en la Ciudad de México	32
Capítulo 3.	
Los Modelos Celulares de Representación del Viento	35
3.1. Introducción	36
3.2. Los Modelos Celulares de Representación del Viento	41
3.3. Los Estados Discretos de Circulación del Viento	45
3.4. Los Estados de Dirección del Viento	48
3.5. Las Densidades de Estados de Viento	48
3.6. Análisis de Conglomerados y Taxonomía del Viento	50

Capítulo 4.	61
Los Estados de Viento de la Ciudad de México.	61
4.1. La Evaluación de la Calidad del Aire	62
4.2. Las Fuentes de Información Meteorológica	63
4.3. La Base de Datos de Viento. Recopilación, Preparación y Valoración	68
4.4. La Obtención de los Estados de Viento de la Ciudad de México	72
Capítulo 5.	
La Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México. Resultados y Discusión	77
5.1. Introducción	78
5.2. Espectros de Frecuencias de las Series de Tiempo de los Estados de Viento de la Ciudad de México	78
5.3. Las Características de los Estados de Viento Discretos	82
5.4. Las Características de los Estados de Dirección del Viento	86
5.5. Los Patrones de Circulación del Viento de la Ciudad de México	90
5.6. Comparación con Resultados de Otros Autores	119
Capítulo 6.	
Conclusiones	125
6.1. Introducción	126
6.2. Las Principales Conclusiones	127
6.3. Validación de los Resultados	130
6.4. Proyección al Futuro	130
Bibliografía	131
Anexos. Publicaciones	139

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se describen brevemente los antecedentes, la motivación, los objetivos, los alcances, las hipótesis, y la metodología del proyecto de investigación realizado. El capítulo concluye con una descripción breve de los contenidos de los capítulos restantes de este documento.

Capítulo 1

Introducción

1.1. La Problemática General

La explosión demográfica en México, y a nivel mundial, ha provocado el rápido incremento del número de las zonas urbanas cuya tasa de crecimiento las coloca como prospectos para ser consideradas, al corto o mediano plazo, como megalópolis o megaciudades; entendidas éstas como áreas metropolitanas con una población total que supera los 10 millones de habitantes. En nuestro país, bajo la perspectiva de esta definición, solamente la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), con una población de 22.9 millones de habitantes (MH), puede ser considerada actualmente como una megaciudad, siendo la tercera más grande a nivel mundial. Otras ciudades mexicanas como Guadalajara y Monterrey, con poblaciones de 4.55 y 4.07 MH, se están acercando rápidamente a esta categoría, con los lugares 74 y 85, respectivamente, en la clasificación mundial de las aglomeraciones urbanas con poblaciones superiores al millón de habitantes.

Las zonas urbanas densamente pobladas, particularmente en los países en desarrollo, encaran problemas graves de contaminación ambiental (aire, agua y suelo) y de tráfico vehicular, entre otros no menos importantes. El congestionamiento recurrente de los vehículos que circulan por las calles urbanas produce ruido intenso, pérdidas de tiempo y dinero, alto riesgo de accidentes viales, malestar social, altos niveles de stress y deterioro de la salud en la población, entre otros males y malestares. El tráfico vehicular y su congestionamiento son los principales responsables de la contaminación atmosférica en las zonas urbanas. En la ZMCM, que a partir de 2006 está integrada por las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México, la flota vehicular registrada se estima en más de 4.2 millones de vehículos, de los cuales el 62% corresponden a unidades registradas en el Distrito Federal y el 38% restante a unidades registradas en el Estado de México. En estas cifras, los autos particulares representan un porcentaje muy importante (del 80% en 2006) de las unidades destinadas al transporte de personas, y constituyen una de las categorías más contaminantes, generando el 52% del monóxido de carbono (CO), el 33% de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el 21% del dióxido de azufre (SO₂). Los vehículos a diesel, particularmente los tractocamiones y los autobuses son otras fuentes importantes, que aportan el 28% y el 16% de las PM_{2.5}, (partículas con diámetros < 2.5 μ m), respectivamente, y en conjunto, el 21% del NO_x¹.

La complejidad y gravedad de la contaminación atmosférica urbana, sin embargo, no depende sólo de las emisiones, sino también de otros factores (no siempre remediabiles)

¹ SMA-GDF. (2008). Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México. 2006. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal. México.

como son la ubicación geográfica, la topografía, la meteorología y las propiedades del suelo urbano, así como de las posibles interacciones entre ellos.

1.2. Especificación del problema

La ubicación geográfica y la topografía de un sitio urbano son factores prácticamente estáticos, aún bajo la perspectiva de escalas de tiempo muy grandes (cientos o miles de años); los cambios en la morfología de un lugar y las características del suelo urbano pueden observarse si se consideran escalas de tiempo medianas, digamos de unos pocos años; pero las condiciones meteorológicas urbanas, y en particular los vientos, llegan a variar, por el contrario, de manera considerable en escalas de tiempo relativamente pequeñas, incluso del orden de la hora. Los vientos son el mecanismo responsable del transporte y la dispersión de los contaminantes atmosféricos, y determinan, por ende, las zonas de impacto de las emisiones, tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles. El conocimiento de los vientos, en consecuencia, resulta imprescindible desde el punto de vista del estudio de la contaminación atmosférica y de la evaluación del impacto de las emisiones sobre la calidad del aire

El comportamiento de los vientos urbanos² está determinado en cierta medida por el comportamiento de los vientos sinópticos³. Los vientos urbanos y los vientos sinópticos, sin embargo, no son lo mismo, pues la circulación en superficie es afectada de manera muy importante por la topografía del sitio y la morfología urbana, así como por las propiedades termodinámicas del suelo, y por otros factores meteorológicos como la insolación y la temperatura. Los vientos urbanos presentan una variabilidad muy alta, pero a pesar de ello, *es natural esperar que presenten ciertos patrones de circulación*, ya que muchas de sus forzantes poseen características de permanencia (como en el caso de los vientos planetarios: alisios, vientos del oeste o westerlies, etc), de estacionalidad (como en el caso de los monzones) o de estatismo (como ocurre con la orografía de la región de interés, y con la topografía y la morfología del sitio), y también debido a que algunos factores meteorológicos, como la radiación solar y la temperatura, presentan comportamientos periódicos gracias al ciclo diurno de la insolación.

Las bases teóricas de la meteorología y de los fenómenos de transporte y dispersión de contaminantes en la atmósfera radican en los principios físicos de la mecánica de fluidos plasmados en las ecuaciones de balance de masa, momento y energía, particularmente en las ecuaciones de Navier-Stokes que son la expresión del balance de momento para el caso de los fluidos viscosos newtonianos. Estos principios dan lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no-lineales y acopladas, cuya solución, incluso

² El viento urbano es un fenómeno meteorológico local que se refiere al movimiento de masas de aire que ocurre en la cercanía del suelo en la localidad de un sitio urbano.

³ En meteorología, el término *sinóptico* se usa para referirse a los fenómenos que ocurren en el lapso de días y en escalas de longitud del orden de algunos kilómetros. La meteorología sinóptica estudia estos fenómenos y está estrechamente ligada al pronóstico del tiempo pues son los sistemas sinópticos los responsables principales de los cambios del tiempo. Algunos ejemplos son los ciclones extra-tropicales, las dorsales, las vaguadas, las altas de bloqueo, las tormentas tropicales, y los frentes de latitudes medias.

numérica, constituye un problema muy complejo, que no siempre converge. Estas dificultades hacen pensar que, para la caracterización de los campos meteorológicos, así como para el reconocimiento de sus principales patrones, puede ser conveniente y más eficiente (incluso en términos monetarios y de tiempo) desarrollar y usar algunas metodologías y herramientas sencillas, pero inteligentes y creativas, antes de poner en marcha la maquinaria pesada de complejos modelos meteorológicos.

En este trabajo estamos interesados en *la caracterización y la clasificación de los vientos urbanos que ocurren en la Ciudad de México, así como en la identificación de sus patrones principales, a partir de los datos de vientos registrados y proporcionados por la red meteorológica (REDMET) del SIMAT de la SMA-DF⁴, y vistos desde la perspectiva de modelos de representación de los vientos en dominios celulares y de técnicas estadísticas como el análisis de conglomerados (Cluster Analysis).*

1.3. Motivación

El conocimiento de los eventos de circulación del viento y su posible organización en patrones, constituye un aspecto muy importante para entender de qué manera las emisiones de contaminantes atmosféricos pueden ser transportados y dispersados en un sitio urbano, así como las posibilidades de exportación de sus contaminantes hacia otras ciudades en los alrededores. En el caso de la ZMCM, por ejemplo, aunque ésta se encuentra rodeada por montañas muy altas, y llega a ocurrir que la contaminación queda atrapada ahí hasta por varios días, es muy frecuente que la altura de la capa de mezcla en la zona alcance valores de hasta 2600m (e incluso mayores) sobre el piso⁵, lo cual determina condiciones que favorecen la exportación de contaminantes hacia otros sitios como la ciudad de Cuernavaca⁶.

Por otra parte, dado que los cambios en la morfología urbana y la distribución espacial de las construcciones afectan la circulación del viento en superficie y la vialidad vehicular, y por ende la distribución espacio-temporal de las emisiones vehiculares, para los propósitos de los estudios del bioclima de una ciudad, así como para la planeación de su

⁴ Red Meteorológica (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del Gobierno del Distrito Federal (DF).

⁵ A. Salcido.; R. Sozzi & T. Castro. (2003). A Least Squares Variational Approach to the Convective Mixing Height Estimation Problem, *Environmental Modelling & Software*, 18, 10, (December 2003) 951-957, ISSN: 13648152.

⁶ Véanse: (1) T. Castro & A. Salcido. (2006). Influencia de la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en Tres Sitios Perimetrales, En: *Contaminación Atmosférica V*, Leopoldo García-Colín Scherer, Juan Rubén Varela Ham (Eds.), 119-144, El Colegio Nacional, ISBN: 970-640-303-5, México. (2) D. Salcedo, T. Castro, L.G. Ruiz-Suárez, A. García-Reynoso, R. Torres-Jardón, A. Torres-Jaramillo, B.E. Mar-Morales, A. Salcido, A.T. Celada, **S. Carreón-Sierra**, A.P. Martínez, O.A. Fentanes-Arriaga, E. Deustúa, R. Ramos-Villegas, A. Retama-Hernández, M.I. Saavedra & M. Suárez-Lastra. (2012). Study of the Regional Air Quality South of Mexico City (Morelos State), *Science of the Total Environment* 2012, Jan 1; vol. 414, pp. 417-432. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.09.041. Una copia de este artículo se ha incluido en el apéndice de Publicaciones de este documento debido a que forma parte de los trabajos en los que la autora participó durante el proceso de elaboración de su tesis.

desarrollo urbanístico, resulta importante contar con una caracterización de los vientos, confiable y de alta calidad, que permita la aplicación de las herramientas de simulación del tráfico vehicular, sus emisiones y sus impactos sobre la calidad del aire. Este es un aspecto de gran importancia en el caso de la ZMCM, pues en los últimos siete años ha cambiado de manera importante la morfología urbana, particularmente por la construcción del segundo piso del periférico y por un crecimiento explosivo del número de rascacielos y otros edificios de grandes dimensiones en esta ciudad.

El conocimiento de los eventos de circulación del viento y el reconocimiento de sus patrones son también de mucha importancia para problemas diferentes al de la contaminación atmosférica. En nuestro país, por ejemplo, se cuenta con recursos eólicos muy importantes en diferentes estados de la República Mexicana, tales como Oaxaca, Campeche y Baja California, entre otros; no obstante, estos recursos no han sido evaluados de manera suficiente, confiable y detallada en muchos casos. Para la Ventosa (Oaxaca), por ejemplo, siendo una de las zonas más importantes respecto a los recursos eólicos en México, también ha sido de las más estudiadas, pero aun así la eficiencia con la que se aprovecha su potencial eólico es muy baja, pues las tecnologías que se han utilizado, de importación, desde luego, no son adecuadas para los regímenes de viento intenso y turbulencia que ahí prevalecen la mayor parte del año. Para poder aprovechar estos recursos de una manera más eficiente es necesario contar con estudios de mucha mayor profundidad y detalle respecto a las distribuciones espacio-temporales de las variables de campo meteorológicas (velocidad, temperatura, presión, etc), pero también de las características de la turbulencia atmosférica de la zona. Entre los pocos estudios detallados del recurso eólico regional se encuentra el *Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca* publicado por D. Eliot y colaboradores en Abril de 2004⁷. Este trabajo sigue una metodología de análisis convencional que no incluye consideraciones sobre la turbulencia atmosférica.

1.4. Marco Teórico

Un bosquejo simple del problema meteorológico del diagnóstico del campo de viento puede ser como sigue: En una red de monitoreo atmosférico se miden de manera periódica y sistemática las variables meteorológicas de velocidad y dirección del viento, temperatura y presión, para un número fijo (y generalmente pequeño) de sitios distribuidos sobre una región relativamente grande y con una cierta complejidad topográfica. Entonces, para un tiempo dado t , se quiere usar los datos de la red de monitoreo para estimar la velocidad del viento $v(x,t)$ en cualquier punto x dentro del dominio espacial de interés.

Desde la posición de la dinámica de fluidos computacional, la solución del problema podría obtenerse resolviendo numéricamente las ecuaciones diferenciales de balance para encontrar el estado estacionario del sistema que es consistente con las condiciones de

⁷ D. Elliott, M. Schwartz, G. Scott, S. Haymes, D. Heimiller & R. George. (2004). *Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca*. Laboratorio Nacional de Energía Renovable. NREL/TP-500-35575, Abril 2004.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

frontera (complejidad topográfica y/o urbanística) y de comportamiento temporal asintótico (valores medidos). Existen muchos modelos de diagnóstico para hacer esto, incluyendo modelos basados en las técnicas de autómatas celulares y de gases en redes⁸, pero también puede realizarse una reconstrucción del campo de velocidad del viento a partir de los datos medidos en las estaciones de una red de monitoreo utilizando técnicas de interpolación vectorial como es el caso del método Kriging que se utiliza muy frecuentemente para estos propósitos.

En el campo de velocidad del viento $v(\mathbf{x},t)$ se encuentra toda la información detallada acerca del movimiento de las masas de aire atmosférico. No obstante, siendo la velocidad del viento $v(\mathbf{x},t)$ una variable de campo continua, existen innumerables eventos de circulación del viento, y a partir de sus estimaciones numéricas no se desprende directamente una forma de caracterización y clasificación de los eventos de viento en forma sencilla, y tampoco una manera de identificar sus patrones principales.

La forma más simple en la que puede representarse un evento de circulación del viento en un dominio dado es aquella que consiste en mapear toda la complejidad espacial de la distribución de la velocidad en su vector promedio (la velocidad media), junto con la sustitución de la evolución temporal del campo de velocidad en un periodo de tiempo dado por un objeto estadístico como la rosa de vientos. Este enfoque es utilizado muy frecuentemente en muchos estudios que sólo requieren un bajo nivel de conocimiento de la meteorología en el dominio de interés, pero no siempre es suficiente.

Una descripción de los eventos de circulación del viento ubicada entre los dos extremos antes descritos puede realizarse en términos de los modelos celulares de representación de la circulación del viento propuestos por Salcido et al.⁹, que constituyen una propuesta innovadora para la representación de la enorme complejidad espacial de la circulación del viento en términos de un concepto de estado muy simple.

El modelo de representación que usaremos en este trabajo considera la Ciudad de México como una retícula de cuatro celdas y, para cada tiempo de interés, realiza un mapeo de la complejidad espacial del campo de la velocidad del viento en cuatro puntos de un espacio fase de cuatro dimensiones, definidas éstas por los parámetros de intensidad, dirección,

⁸ A. Salcido & A.T. Celada. (2010). *A Lattice Gas Approach to the Mexico City Wind Field Estimation Problem*. En: Modelling, Simulation and Optimization, Gregorio Romero Rey & Luisa Martinez Muneta (Eds), INTECH, February 2010, pp. 385-416. ISBN: 978-953-307-048-3.

⁹ Véase: (1) A.T. Celada & A. Salcido. (2009). *The Mexico City 2006 Wind Direction States*, Proc. 20th IASTED International Conference on Modelling and Simulation, Banff, Canada, 2009, pp. 51-58. (2) A. Salcido & A.T. Celada. (2010). *A Lattice Gas Approach to the Mexico City Wind Field Estimation Problem*. En: Modelling, Simulation and Optimization, Gregorio Romero Rey & Luisa Martinez Muneta (Eds), INTECH, February 2010, pp. 385-416. ISBN: 978-953-307-048-3. (3) A. Salcido, A.T. Celada & T. Castro. (2010). *A meso- β scale description of surface wind events in Mexico City during MILAGRO 2006 campaign*, Proc. of the Second IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering, Banff, Canada, 2010, pp. 820-827. (4) A. Salcido, A. T. Celada & C. D. Salcido. (2010). *Representación a Escala Meso- β de los Eventos de Circulación del Viento en la Ciudad de México*, En: El Proceso de Innovación Radical, A. Fierros (Ed) Instituto de Investigaciones Eléctricas, Registro Público de Derecho de Autor 03-2010-061712280600-01, pp. 101-118.

divergencia y vorticidad del viento: $(v, \theta, \gamma, \omega)$. Bajo este enfoque, la infinita variedad de posibles estructuras espaciales del campo de viento en la Ciudad de México se reduce a un conjunto discreto y finito de puntos del espacio fase, y hace posible introducir el concepto de densidad de estados de circulación del viento como una forma para describir y visualizar las frecuencias de ocurrencia de los estados modelo y las poblaciones de sus patrones principales o grupos de aglomeración.

Una de las ventajas de la representación de los eventos de circulación del viento en términos de un modelo celular cuyos parámetros $(v, \theta, \gamma, \omega)$ se expresan mediante escalas discretas y finitas es que las innumerables posibilidades de la distribución espacial de la velocidad se reducen a un número finito y relativamente pequeño de estados. Esto hace posible, en consecuencia, la determinación de las frecuencias o probabilidades de ocurrencia de los estados posibles para un periodo de tiempo dado de una manera relativamente sencilla, y también la realización de una clasificación de los estados de circulación del viento y la identificación de sus posibles patrones mediante técnicas de análisis como los métodos jerárquicos del cluster analysis¹⁰.

1.5. Hipótesis

El trabajo de investigación que se resume en este documento de tesis fue realizado bajo las siguientes hipótesis:

1.5.1. Las características de la Ciudad de México, tales como su ubicación geográfica, la topografía, el tipo y uso de suelo y la morfología urbana, en conjunción con el ciclo solar y los vientos sinópticos, determinan la existencia de patrones de circulación del viento en superficie donde se reflejan los efectos de estas forzantes.

1.5.2. Los estados de circulación del viento en la Ciudad de México, que se obtienen mediante la aplicación de modelos celulares de representación del viento local a escala meso- β ¹¹, en términos de sus atributos de intensidad, dirección, divergencia y vorticidad, reflejan los efectos de las forzantes señaladas en la hipótesis anterior.

¹⁰ Véanse: (1) G. Ratto, R. Maronna & G. Berri (2010). Analysis of Wind Roses Using Hierarchical Cluster and Multidimensional Scaling Analysis at La Plata, Argentina. *Boundary-Layer Meteorol* (2010) 137:477–492. DOI 10.1007/s10546-010-9539-3. (2) B. de Foy, J.D. Fast, S.J. Paech, D. Phillips, J.T. Walters, R.L. Coulter, T.J. Martin, M.S. Pekour, W.J. Shaw, P.P. Kastendeuch, N.A. Marley, A. Retama & L.T. Molina (2008). Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2008, 1209-1224.

¹¹ Orlanski, I., (1975). *A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes*, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, Vol. 56, pp. 527-530. Orlanski propuso una clasificación de escalas meteorológicas en función de las dimensiones espaciales horizontales o de su longitud de onda característica y de la duración media de los sistemas atmosféricos. La Organización Meteorológica Mundial resume esta clasificación como sigue: (a) **Microescala**: Menos de 100 m. (Agrometeorología, evaporación). (b) **Topoescala** o **Escala Local**: de 100 m a 3 km. (Contaminación atmosférica, tornados). (c) **Mesoescala**: de 3 km a 100 km. (tormentas marinas, brizas de montaña). (d) **Gran Escala**: de 100 km a 3.000 km. (frentes, varios ciclones, conglomerados de nubes). e) **Escala Planetaria**: más de 3.000 km. (ondas superiores de la tropósfera). La **mesoescala** se divide en subclases: **meso- α** (frentes de 200-2000 km; trata fenómenos como las líneas de irregularidad, sistemas convectivos en mesoescala, ciclones tropicales al filo de la escala sinóptica), **meso- β** (20-200 km; trata

1.5.3. La aplicación de técnicas estadísticas sencillas, tales como el análisis de conglomerados (cluster analysis), el análisis de factores (factor analysis) y el análisis de componentes principales, permiten identificar los patrones de circulación del viento relacionados con las forzantes antes señaladas. Se supone, en particular, que el método jerárquico del análisis de conglomerados, con una medida de distancia entre estados de viento de tipo euclidiana, es ya suficiente para la aglomeración de estos estados en grupos o patrones meteorológicamente significativos.

1.6. Objetivo General

Caracterizar y clasificar los eventos de circulación del viento en superficie en la Ciudad de México durante el periodo de 2001 a 2006, mediante un modelo celular de representación a escala meso- β , e identificar los principales patrones de tales eventos en ese periodo, utilizando análisis de conglomerados (Cluster Analysis).

1.7. Objetivos Específicos

1.7.1. Valorar el desempeño de las estaciones de la Red Meteorológica (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del Gobierno del Distrito Federal (GDF), y construir una base de datos de velocidad y dirección del viento de la Ciudad de México para el periodo de 2001 a 2006.

1.7.2. Construir una base de datos de los estados de viento de la Ciudad de México a escala meso- β para el periodo de 2001 a 2006, usando modelos de representación del vientos en dominios celulares de una y cuatro celdas.

1.7.3. Determinar la viabilidad de la aplicación de las técnicas de análisis jerárquico de conglomerados para la identificación de patrones en los estados de viento de la Ciudad de México.

1.8. Metodología

El presente trabajo de investigación fue realizado siguiendo un proceso metodológico que se inició con una revisión de la literatura y se concluyó con una validación de la originalidad y validez de los resultados obtenidos mediante su presentación en congresos internacionales y la puesta a consideración de algunas de sus aplicaciones ante la comunidad científica a través de artículos en revistas de prestigio.

1.8.1. Revisión de la Literatura

Recopilación y lectura de los principales trabajos (definidos por el asesor) reportados en la literatura especializada sobre la circulación de los vientos en la Ciudad de México. Al

fenómenos como la brisa de mar, efecto lago de tormentas de nieve) y *meso- γ* (de 2-20 km; trata fenómenos como la convección tormentosa, flujos en terrenos complejos).

final de este trabajo, en el apartado de *Bibliografía* se presenta un listado de los principales documentos consultados.

1.8.2. Identificación de las Fuentes de Información Meteorológica

Identificación y caracterización de las estaciones de la red meteorológica (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del Gobierno del Distrito Federal (GDF). Esta red constituye actualmente la más importante de las fuentes de información meteorológica de la Ciudad de México.

1.8.3. Dominio Espacial y Extensión Temporal

La Ciudad de México fue considerada como el dominio espacial de interés. Para esta región se realizó la taxonomía de los eventos de circulación del viento que ocurrieron durante el periodo del día 1° de enero de 2001 hasta el día 31 de diciembre de 2006. El periodo de tiempo fue seleccionado considerando que a lo largo del mismo fueron realizadas, por varias instituciones, algunas campañas experimentales de mediciones meteorológicas y micrometeorológicas en la zona, iniciando con la campaña micrometeorológica realizada en 2001 por Salcido y colaboradores¹², y concluyendo con las campañas experimentales conjuntas realizadas en marzo de 2006 bajo la iniciativa internacional MILAGRO¹³. En este periodo, además, ocurrieron también cambios importantes en la morfología de la Ciudad de México, tales como un crecimiento explosivo en el número de rascacielos y otros edificios grandes y la construcción de corredores de tráfico y el segundo piso sobre el periférico, por ejemplo.

1.8.4. Base de Datos Meteorológicos

El estudio se realizó utilizando los promedios horarios de los datos de velocidad y dirección de los vientos medidos y reportados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México para el periodo de interés. Se recopilaron los datos de intensidad y dirección del viento y se realizó una valoración del desempeño de cada una de las estaciones de la red de monitoreo para el periodo de tiempo de interés.

1.8.5. Aplicación de los Modelos de Representación

El estudio se realizó utilizando los modelos celulares de representación del viento de una y cuatro celdas para la Ciudad de México. En cada caso, para cada uno de los eventos de viento definidos por los valores horarios de velocidad y dirección de viento de todas las

¹² Véanse los trabajos: A. Salcido, A.T. Celada, R. Villegas, H. Salas, R. Sozzi & T. Georgiadis, A micrometeorological database for the Mexico City Metropolitan Area, *Il Nuovo Cimento*, 26C (3), 2003, 317-355; y A. Salcido, A.T. Celada, R. Villegas, R. Sozzi & T. Georgiadis. A Micrometeorological Database for Air Pollution Modelling in the Mexico City Metropolitan Area. *Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 66, (2003) 53-64, WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3541.

¹³ Ver: L. T. Molina, S. Madronich, J. S. Gaffney, E. Apel, B. de Foy, J. Fast, R. Ferrare, S. Herndon, J. L. Jimenez, B. Lamb, A. R. Osornio-Vargas, P. Russell, J. J. Schauer, P. S. Stevens & M. Zavala. An overview of the MILAGRO 2006 campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 8697-8760, 2010.

estaciones meteorológicas del SIMAT, se asociaron a cada uno de los centros geométricos de las celdas del dominio celular modelo los promedios espaciales de la intensidad, dirección, divergencia y vorticidad del viento que se estimaron mediante la aplicación de un método de interpolación vectorial del tipo Krigging con restricciones fijas impuestas por la topografía de la zona. En la práctica, este procedimiento se realizó usando una implementación computacional de los modelos celulares de representación del viento desarrollada por el Dr. Alejandro Salcido, coordinador del grupo de Modelación Matemática, Micrometeorología y Contaminación Atmosférica de la División de Energías Alternas del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

1.8.6. Análisis Estadístico y de Conglomerados de los Estados de Viento

Para el análisis de los resultados, se determinaron y graficaron las densidades de estados de viento: parciales (anuales, estacionales, diurnas, nocturnas, etc.) y total del periodo. Luego se identificaron los principales patrones de los estados de viento mediante la aplicación de técnicas jerárquicas del análisis de conglomerados (cluster analysis).

1.8.7. Originalidad y Calidad de los Resultados

Para garantizar la originalidad y calidad científica de los resultados del trabajo de investigación realizado, se elaboraron seis artículos para la publicación de los resultados en revistas de circulación internacional y/o en memorias de congresos internacionales. Estos artículos versan sobre la presentación de los aspectos teóricos y metodológicos de los modelos utilizados para la descripción de los vientos en dominios celulares, sus formas de análisis e interpretación y algunas de sus aplicaciones para la identificación de escenarios de viento relevantes para la simulación de la dispersión de contaminantes.

Los artículos publicados o en proceso de publicación son los siguientes:

1.8.7.1. A. Salcido, A.T. Celada-Murillo, **S. Carreón-Sierra** & C.D. Salcido-Merino, Brief Analysis of the Spatial Clustering of the Mexico City Air Pollution Centroids during the MILAGRO 2006 Campaign. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Simulation, and Identification (MSI 2011). November 7-9, 2011 Pittsburgh, USA. pp 198-206. DOI: 10.2316/P.2011.755-022.

1.8.7.2. D. Salcedo, T. Castro, L.G. Ruiz-Suárez, A. García-Reynoso, R. Torres-Jardón, A. Torres-Jaramillo, B.E. Mar-Morales, A. Salcido, A.T. Celada, **S. Carreón-Sierra**, A.P. Martínez, O.A. Fentanes-Arriaga, E. Deustúa, R. Ramos-Villegas, A. Retama-Hernández, M.I. Saavedra & M. Suárez-Lastra. (2012). Study of the Regional Air Quality South of Mexico City (Morelos State), Science of the Total Environment 2012, Jan 1; vol. 414, pp. 417-432. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.09.041.

1.8.7.3. A. Salcido, **S. Carreón-Sierra** & A.T. Celada-Murillo, Paths described by the Mexico City air pollution centroids during MILAGRO campaign. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling and Simulation (MS2012). July 3-5, 2012. Baff, Canada. pp 209-215. DOI: 10.2316/P.2012.783-058 20.

1.8.7.4. O. Peralta; T. Castro; M. Durón; A. Salcido; A.T. Celada-Murillo; R. Navarro-González; C. Márquez; J. García; J. de la Rosa; R. Torres; R. Villegas-Martínez; **S. Carreón-Sierra**; M. Imaz; A. Martínez-Arroyo; I. Saavedra; M.L. Espinosa; and A. Torres-Jaramillo. "H₂S emissions from Cerro Prieto geothermal power plant and air pollutants measurements in the área". *Geothermics*, 46, 55–65, 2013.

1.8.7.5. A.T. Celada-Murillo; **S. Carreón-Sierra**; A. Salcido; T. Castro; O. Peralta; and T. Georgiadis. "Main Characteristics of Mexico City Local Wind Events during MILAGRO 2006 Campaign within a Meso- β Scale Lattice Wind Modeling Approach". *ISRN Meteorology*, 2013(2013), ID 605210, 14 pages. ISSN: 2090-7524 (Online). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/605210>.

1.8.7.6. A. Salcido, **S. Carreón-Sierra** & A.T. Celada-Murillo, A Brief Clustering Analysis of the Mexico City Local Wind States Occurred During the MILAGRO Campaign. Aceptado en: The 4th IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering (EME2014). Julio 16-18, 2014. Banff, Canada.

1.9. Descripción de los Contenidos

Aquí se describen brevemente los contenidos de los capítulos siguientes de este trabajo.

Capítulo 2. Condicionantes de la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México.

Se presenta en este capítulo una descripción general de los factores principales que determinan los niveles actuales de contaminación atmosférica en la Ciudad de México.

Capítulo 3. Los Modelos Celulares de Representación del Viento.

Aquí se presentan, formulan y discuten los modelos celulares de representación de los vientos urbanos como enfoque teórico bajo el cual se realiza el trabajo de investigación. Se introducen los conceptos de los estados de viento, las variables de estado, y de las densidades de estados de viento como herramientas de análisis estadístico inicial. Se propone y discute la aplicación de las técnicas de análisis de conglomerados (cluster analysis) como herramientas para la identificación de los patrones de los estados de viento.

Capítulo 4. Los Estados de Viento de la Ciudad de México.

Aquí se seleccionan las fuentes de información meteorológica, se definen el dominio espacial y la extensión temporal de interés, se construye la base de datos meteorológicos, y se aplican los modelos celulares de representación para la determinación del conjunto de estados de viento de la Ciudad de México.

Capítulo 5. Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México. Resultados y Discusión.

Aquí se realiza el análisis estadístico de los estados de viento de la Ciudad de México, incluyendo la aplicación del cluster analysis jerárquico para la identificación de los patrones de los estados de viento de la Ciudad de México en el periodo de interés. Se

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

presentan y discuten los resultados principales del trabajo de investigación realizado. Se efectúa también una comparación con resultados obtenidos por otros investigadores con otras metodologías.

Capítulo 6. Conclusiones

Aquí se resumen las principales conclusiones que se desprenden del trabajo realizado.

Bibliografía

Las referencias a los documentos citados en el cuerpo del texto de cada capítulo se han incluido como notas al pie de página. En esta parte del documento se incluye un listado en orden alfabético de la bibliografía consultada durante todo el proceso de realización de este trabajo.

Anexos

Derivados de este trabajo de tesis, se realizaron (en colaboración con investigadores del Instituto de Investigaciones Eléctricas y del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM) seis trabajos que ya fueron publicados o están aceptados para ello. Tres son trabajos en extenso publicados en memorias de congresos internacionales, y los otros tres son artículos de investigación publicados en revistas de prestigio a nivel internacional. En este apartado de anexos se incluyen copias completas de las publicaciones realizadas.

Capítulo 2

Condicionantes de la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México

Numerosos factores influyen, de manera directa o indirecta, en las condiciones de la calidad del aire que se viven en las zonas urbanas. Entre los principales se encuentran las emisiones derivadas de las actividades antropogénicas, la ubicación geográfica y la topografía de la región, la morfología urbana, y la meteorología local. Se presenta en este capítulo una descripción general de los factores principales que determinan los niveles actuales de contaminación atmosférica en la Ciudad de México.

Capítulo 2

Condicionantes de la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México

2.1. Introducción

Los datos del Banco Mundial¹ muestran que el crecimiento demográfico² mundial ha venido ocurriendo con tasas decrecientes en los últimos 40 años (Figura 2.1a); pero a pesar de ello, tal como se desprende del comportamiento que presenta la Figura 2.1b, esos datos muestran también que la población mundial ha venido creciendo de manera sostenida en el mismo periodo y que se incrementará en un 33% durante los próximos treinta años, superando los 9000 millones de habitantes hacia el año 2040.

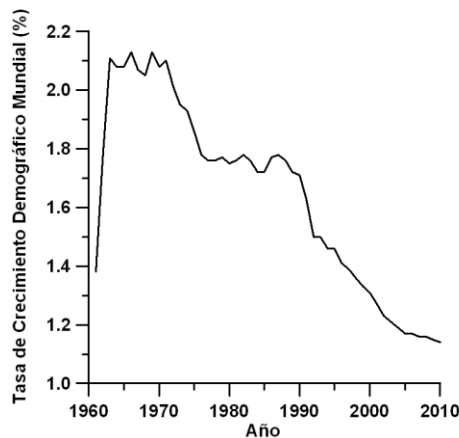


Figura 2.1a. Evolución de la tasa de crecimiento de la población mundial de 1960 a 2010.

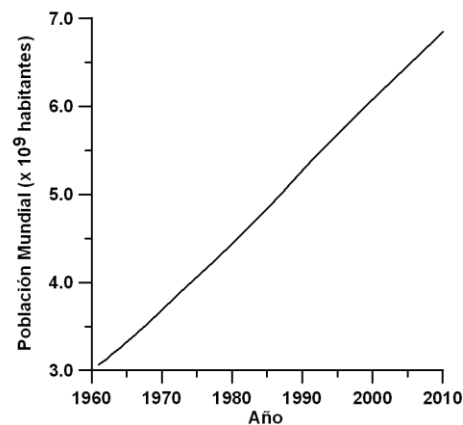


Figura 2.1b. Crecimiento de la población mundial en los últimos 50 años.

Fuente: [Banco Mundial. Indicadores del Desarrollo Mundial](#). Actualización: Diciembre 12, 2010.

Este crecimiento demográfico también exhibe una tendencia importante hacia la concentración en las zonas urbanas, provocando la expansión de éstas, tanto por sí mismas, como en colaboración con los suburbios que las circundan. Este fenómeno demográfico se ha venido reflejando en un incremento incesante en el número de megalópolis o mega-ciudades³ diseminadas por todo el mundo. En la Figura 2.2 se presentan la situación mundial relativa al número de mega-ciudades en el año 2010, y su proyección hacia el año 2025, de acuerdo con datos de las Naciones Unidas.

¹ Banco de datos del Banco Mundial. World Development Indicators (WDI). Actualización: Diciembre 12, 2010. Disponible en: <http://www.bancomundial.org/>

² La tasa anual de crecimiento de la población para el año t es la tasa exponencial del crecimiento de la población a mediados del año desde el año $t-1$ hasta t , expresado como porcentaje.

³ Las mega-ciudades (o megalópolis) son zonas metropolitanas cuya población es superior a los 10 millones de habitantes.

Condiciones de la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México

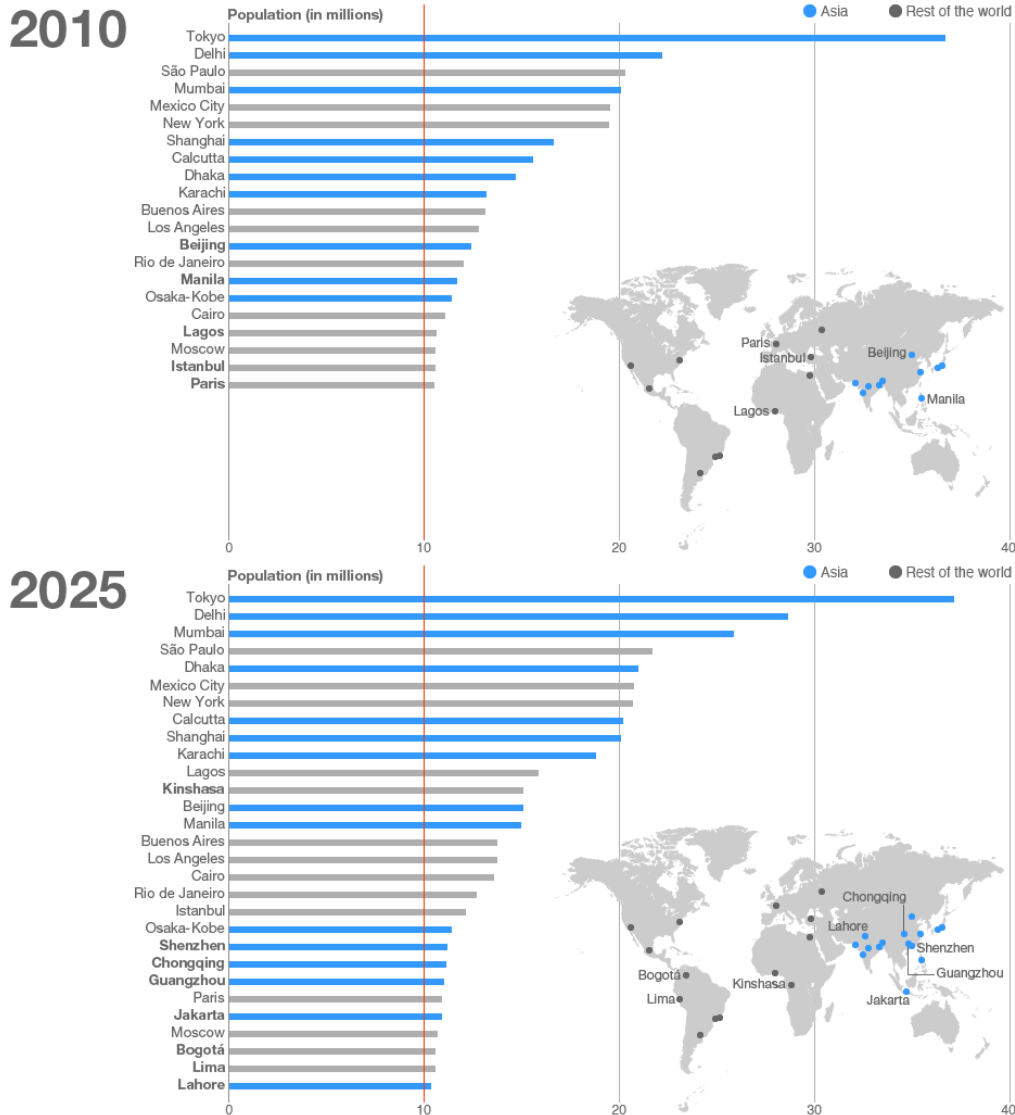


Figura 2.2. Ciudades del mundo con poblaciones superiores a los 10 millones de habitantes. En la parte superior se presenta la situación esperada para 2010, con la Ciudad de México en quinto lugar, después de haber estado en segundo lugar en 2003. En la parte inferior se muestra la proyección hacia 2025, cuando la Ciudad de México estaría ocupando el sexto lugar. Datos de las Naciones Unidas (Véase: World Urbanization Prospects. The 2009 Revision. Department of Economic and Social Affairs. ESA/P/WP/215, March 2010).

Las mega-ciudades, sin embargo, no son solamente ciudades muy grandes. Sus escalas crean una nueva dinámica, una nueva complejidad y una nueva simultaneidad de eventos y procesos, físicos, sociales y económicos⁴. En ellas ocurren interacciones intensas y complejas entre diferentes procesos demográficos, sociales, políticos, económicos y ecológicos. En tiempos de bonanza económica, las mega-ciudades generan a menudo considerables oportunidades, así como fuertes presiones para el cambio, acompañado por el deterioro ambiental. En los países en desarrollo, el crecimiento de las mega-ciudades ocurre más rápido que su infraestructura. Esta expansión urbana descontrolada fomenta

⁴ Megacities - our global urban future. The International Year of Planet Earth. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands, December 2005.

altos volúmenes de tráfico vehicular, altas concentraciones de la producción industrial, la sobrecarga ecológica, los mercados inmobiliarios y de bienes raíces no-reglamentados y disparatados, el desarrollo insuficiente de la vivienda, y situaciones de pobreza extrema que, en algunos casos, al darse en la vecindad de situaciones de alta riqueza, exacerban el malestar social. El crecimiento de la población trae consigo una demanda cada vez más grande de energía, así como la intensificación de las actividades industriales y de transporte, y se traduce, desde luego, en incrementos en las emisiones a la atmósfera de gases y partículas que deterioran la calidad del aire y afectan el clima⁵. El congestionamiento recurrente de los vehículos que circulan por las calles urbanas produce ruido intenso, pérdidas de tiempo y dinero, alto riesgo de accidentes viales, malestar social, altos niveles de estrés y deterioro de la salud en la población, entre otros males y malestares. El intenso tráfico vehicular y su congestionamiento se encuentran, de hecho, entre los principales responsables de la contaminación atmosférica en las zonas urbanas.

Varias mega-ciudades parecen haber alcanzado ya sus límites físicos y administrativos y otras lo harán más tarde o más temprano. Cuando las mega-ciudades quedan sin espacio, los precios del suelo urbano se vuelven prohibitivos, lo cual conduce a la intensificación del uso de la tierra con el desarrollo de más edificios y espacio subterráneo. Los rascacielos de las mega-ciudades del viejo y nuevo mundo demuestran que la población opera no en dos dimensiones, sino en tres. Muchas ciudades que han experimentado el crecimiento dinámico de expansión y construcción rápida de rascacielos demuestran la influencia de la cuarta dimensión (tiempo) sobre el funcionamiento de las mega-ciudades.

El desarrollo de infraestructura en superficie en las zonas urbanas requiere planificación y condiciones de base sólida. Los rascacielos, las autovías y ferrocarriles elevados, los cableados de las comunicaciones, los sistemas de distribución de la electricidad y la energía (gas y combustibles, por ejemplo), y muchos otros lugares donde las personas viven, compran, se relajan y trabajan, se construyen en superficie. Estos desarrollos concentrados reducen la calidad de vida de la población y vuelven a las áreas urbanizadas más vulnerables a los peligros naturales y artificiales; además, pueden provocar situaciones de contaminación atmosférica más severas debido a que modifican de manera importante las propiedades físicas y térmicas de los suelos, y el número, las alturas y la distribución de los edificios, influyendo así sobre la circulación de los vientos y afectando su capacidad para la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

En este capítulo se describe la situación de los principales factores condicionantes de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

2.2. La Zona Metropolitana de la Ciudad de México

En México, la explosión demográfica también ha provocado un rápido incremento en el número de las zonas urbanas cuyas tasas de crecimiento las colocan como prospectos para ser consideradas, al corto o mediano plazo, como mega-ciudades. Actualmente, sólo la

⁵ M.J. Molina & L.T. Molina, Critical Review: Megacities and atmospheric pollution, J. Air Waste Manage. Assoc., 54(6), 644-680, 2004.

ZMCM, que en 2010 sumaba una población aproximada de 20.12 millones de habitantes (MH), puede ser considerada como una mega-ciudad; siendo, además, una de las más grandes en el mundo. Otras ciudades mexicanas como Guadalajara y Monterrey, con poblaciones de 4.8 y 4.45 MH, se están acercando rápidamente a esta categoría, ocupando ya los lugares 73 y 85, respectivamente, en la clasificación mundial de las aglomeraciones urbanas con poblaciones superiores al millón de habitantes; seguidas por Puebla (2.875 MH), Toluca (1.970 MH), Tijuana (1.87 MH), León (1.72 MH), Cd. Juárez (1.47 MH), Torreón (1.290 MH), Querétaro (1.180 MH), San Luis Potosí (1.10 MH) y Mérida (1.030MH), que ocupan, respectivamente, los lugares 141, 230, 247, 268, 322, 369, 409, 439 y 466 en dicha clasificación⁶.

Desde la década de 1940, ante la creciente conurbación alrededor de la ciudad de México, se habían propuesto la definición y el establecimiento de los límites del asentamiento urbano conjunto que ahora se denomina como la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Algunas de las propuestas de aquella época serían la base para los programas de abatimiento de la contaminación ambiental de la década de 1980. Sin embargo, ninguna de esas definiciones era universal y no se había creado ninguna comisión para que los proyectos fuesen administrados de manera conjunta por las diversas entidades y municipalidades que conformaban el área metropolitana.

El 22 de diciembre del 2005, los gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México acordaron establecer una definición oficial de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Actualmente, esta mega-ciudad está integrada por las 16 delegaciones del Distrito Federal, 59 municipios del Estado de México y un municipio del Estado de Hidalgo, cubre una superficie de 7854 km² y tiene una densidad de población aproximada de 2560 habitantes por km². En la Tabla 2.1 se proporciona un listado de estas localidades con información sobre la población total en 2010.⁷ Aquí, la Delegación Iztapalapa, en el Distrito Federal, y el Municipio de Ecatepec de Morelos, en el Estado de México, fueron las localidades más pobladas en ese año.

Gran parte de la ZMCM presenta alturas que van desde los 2240 msnm (metros sobre el nivel del mar) en sus partes planas, como las delegaciones Cuauhtémoc, Iztacalco y Benito Juárez en la Ciudad de México, y los municipios de Nezahualcóyotl, Chalco, Teotihuacán de Arista, Zumpango de Ocampo y San Salvador de Atenco en el Estado de México, entre otros, hasta alturas que rebasan los 4000 msnm. Una descripción más detallada de la topografía y la orografía de la región donde se ubica la ZMCM se dará más adelante.

⁶ Véase: City Population. Sitio: <http://www.citypopulation.de/Agglomerations-htm>

⁷ INEGI (2010). [Instituto Nacional de Estadística y Geografía](#) (ed.). [Censo de población y vivienda 2010 - Estados Unidos Mexicanos](#).

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.

Tabla 2.1. Conformación de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en 2010.

Delegaciones del Distrito Federal Población Total: 8.851.080 habitantes							
Delegación	Población	Delegación	Población	Delegación	Población	Delegación	Población
Álvaro Obregón	727,034	Cuajimalpa	186,391	Iztapalapa	1,815,786	Tlalpan	650,567
Azcapotzalco	414,711	Cuauhtémoc	531,831	Magdalena Contreras	239,086	Tláhuac	360,265
Benito Juárez	385,439	Gustavo A. Madero	1,185,772	Miguel Hidalgo	372,889	Venustiano Carranza	430,978
Coyoacán	620,416	Iztacalco	384,326	Milpa Alta	130,582	Xochimilco	415,007
Municipios del Estado de México que son parte de la ZMCM Población Total: 11.168.301 habitantes							
Municipio	Población	Municipio	Población	Municipio	Población	Municipio	Población
Acolman	727,034	Chiconcuac	22,819	Nextlalpan	34,374	Tepetlaxpa	18,327
Amecameca	48,421	Chimalhuacán	614,453	Nicolás Romero	366,602	Tepotzotlán	88,559
Apaxco	27,521	Ecatepec de Morelos	1,656,107	Nopaltepec	8,895	Tequixquiac	33,907
Atenco	56,243	Ecatzingo	9,369	Otumba	34,232	Texcoco	235,151
Atizapán de Zaragoza	489,937	Huehuetoca	100,023	Ozumba	27,207	Tezoyuca	35,199
Atlautla	27,663	Hueypoxtla	39,864	Papalotla	4,147	Tlalmanalco	46,130
Axapusco	25,559	Huixquilucan	242,167	La Paz	253,845	Tlalnepantla de Baz	664,225
Ayapango	8,864	Isidro Fabela	10,308	San Martín de las Pirámides	24,851	Tultepec	91,808
Coacalco de Berriozábal	278,064	Ixtapaluca	467,361	Tecámac	364,579	Tultitlán	524,074
Cocotitlán	12,142	Ialtenco	26,328	Temamatla	11,206	Villa del Carbón	44,881
Coyotepec	39,030	Jilotzingo	17,970	Temascalapa	35,987	Zumpango	159,647
Cuautitlán	140,059	Juchitepec	23,497	Tenango del Aire	10,578	Cuautitlán Izcalli	511,675
Chalco	310,130	Melchor Ocampo	50,240	Teoloyucán	63,115	Valle de Chalco Solidaridad	357,645
Chiautla	26,191	Naucalpan de Juárez	833,779	Teotihuacán	53,010	Tonanitla	10,216
Chicoloapan	175,053	Nezahualcóyotl	1,110,565	Tepetlaoxtoc	27,944		
Municipio del Estado de Hidalgo que forma parte de la ZMCM Población Total: 97.461 Habitantes							
Municipio				Población			
Tizayuca				97,461			

2.3. Las Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la ZMCM

En los grandes asentamientos urbanos, algunos efectos de salud crónicos están asociados con exposición crónica a altas concentraciones de contaminantes atmosféricos. La exposición a partículas y gases contaminantes ha sido asociada con inflamación de las vías respiratorias, interrupción de las barreras nasales olfativas y respiratorias, inflamación sistémica, producción de mediadores de la inflamación capaz de alcanzar el cerebro y circulación sistémica de material particulado⁸. Esto es importante para los más de 20 millones de personas (incluidos 9 millones de niños) que viven en la ZMCM, la cual en 1992 fue calificada por el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas y la Organización Mundial de la Salud como una de los siete mega-ciudades con los peores problemas de contaminación del aire a nivel mundial⁹.

La contaminación atmosférica en la ZMCM es uno de los problemas derivados de su crecimiento que más atención han recibido en los últimos 20 años. En este periodo, los gobiernos y autoridades ambientales de la zona han realizado esfuerzos conjuntos importantes a través de diferentes iniciativas que han diseñado para abatir las emisiones contaminantes a la atmósfera y mejorar la calidad del aire en la región. El éxito de estas iniciativas ya se ha reflejado en el inventario de emisiones oficial, donde para los años 1990-2006 se reportaron reducciones de alrededor del 86% en las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), del 60% en monóxido de carbono (CO), del 30% en óxidos de nitrógeno (NO_x), del 50% en PM₁₀ (partículas con diámetros < 10 µm), y del 40% en los compuestos orgánicos volátiles (COV).

Aun con estas reducciones, en el Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio¹⁰ del 2008 se reportaron emisiones anuales de 1.57 megatonnes de CO, 188.09 kilotonnes de NO_x, 6.70 kilotonnes de SO₂, 24.30 kilotonnes de PM₁₀, 5.50 kilotonnes de PM_{2.5} y 591.40 kilotonnes de COV. En este inventario se menciona, además, que todas las fuentes en conjunto emiten aproximadamente 2.7 megatonnes de contaminantes por año, donde el 70% corresponde a las fuentes móviles, el 23% a las fuentes de área, el 6% a las fuentes puntuales y el 1% a la vegetación y suelos.

2.3.1. Fuentes Móviles

Las fuentes móviles de contaminación atmosférica incluyen a las diversas formas de transporte que queman algún tipo de combustible, tales como automóviles, camiones y aviones, etc. Sin embargo, la principal fuente móvil de contaminación del aire es el automóvil, pues emite gran cantidad de CO y cantidades importantes de NO_x y COV.

⁸ L. Calderón-Garcidueñas, M. Franco-Lira, R. Torres-Jardón, C. Henríquez-Roldán, G. Barragán-Mejía, G. Valencia-Salazar, A. González-Maciel, R. Reynoso-Robles, R. Villareal-Calderón & W. Reed, *Pediatric Respiratory and Systemic Effects of Chronic Air Pollution Exposure: Nose, Lung, Heart, and Brain Pathology, Toxicologic Pathology*, 35, 2007, 154-162.

⁹ UNEP (United Nations Environment Programme) & WHO (World Health Organization). (1992). *Urban Air Pollution in Megacities of the World*, Blackwell Publishers, Oxford.

¹⁰ Véase el Capítulo 3 del Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM 2008, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, Primera Edición 2010.

Los programas para el control de emisiones, como el programa de verificación vehicular y el uso de convertidores catalíticos, han reducido considerablemente la cantidad de contaminantes que se emiten al aire. Además, las normas que especifican la calidad del combustible de los automóviles y límites de emisiones de vehículos nuevos y en circulación, también han contribuido a una mayor eficiencia y menores emisiones. Por ejemplo, la transición de la gasolina con plomo a la gasolina sin plomo, ha reducido extraordinariamente la cantidad de plomo en el aire ambiental. No obstante, debido al creciente número de vehículos, los automóviles siguen siendo la principal fuente móvil de contaminación del aire.

Las fuentes móviles son responsables de la parte muy importante del gran volumen de emisiones en la ZMCM. La flota vehicular aquí registrada se estima en más de 4.5 millones de vehículos, donde el 64% corresponde a unidades registradas en el Distrito Federal y el 36% restante, a unidades registradas en el Estado de México. Respecto a los combustibles utilizados, de la flota vehicular de la ZMCM, el 95% de la utiliza gasolina, el 4% son unidades a diesel y los vehículos restantes utilizan principalmente gas licuado de petróleo y en menor cantidad gas natural comprimido.

El 81% de los vehículos son autos particulares y constituyen una de las categorías más contaminantes. En el año de 2008, produjeron el 40.68% del CO, el 32.25% del NO_x y el 24.84% del SO₂. Los vehículos a diesel, en particular los tracto-camiones y los autobuses, son otras fuentes móviles importantes que aportan el 22.15% y el 6.15% de las PM_{2.5} (partículas con diámetros < 2.5 μm), respectivamente, y el 21% de los óxidos de nitrógeno en conjunto.

2.3.2. Fuentes Puntuales

Una fuente puntual se refiere a una fuente ubicada en una posición fija en el espacio, con dimensiones pequeñas en comparación con la extensión de su área de influencia. Existen cientos de miles de fuentes fijas de contaminación del aire que se consideran puntuales, como las plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo, fábricas, etc. Según la industria o proceso específico, estas fuentes pueden emitir uno o varios contaminantes criterio del aire además de muchos otros contaminantes peligrosos.

Una de las mayores preocupaciones en todo el mundo, es la emisión de contaminantes como el bióxido de azufre y materia particulada en la generación de energía eléctrica, pues su proceso involucra la combustión de grandes cantidades de combustibles fósiles. Las industrias químicas, entre otras, son responsables por su parte de la emisión de muchos contaminantes peligrosos como los compuestos orgánicos volátiles.

La tendencia internacional para disminuir las emisiones contaminantes de las fuentes puntuales está dirigida principalmente a la adopción de tecnologías más limpias a través del uso de energías renovables como la solar y la eólica, y la implantación de medidas cada vez más efectivas para elevar la eficiencia energética de los procesos y mejorar la calidad de los combustibles. También, aunque en menor medida, se utilizan dispositivos de control y reducción de las emisiones de las chimeneas industriales, pero se ha visto que generan otros desechos contaminantes.

Para la elaboración del inventario de emisiones 2008 de la ZMVM fueron analizadas 5146 industrias (consideradas como fuentes puntuales). De ellas, poco más de la mitad (2581) se ubica en el Distrito Federal y el resto en el Estado de México (2565). En conjunto, la industria de la ZMVM emite al año alrededor de 170 kilotonnes de contaminantes criterio, siendo el 79% emisiones de Compuestos Orgánicos Totales (COT), el 12 % de NO_x, 4% de CO, 2% de SO₂ y 3% de PM₁₀. Las fuentes puntuales emiten en la ZMVM, 5 kilotonnes/año de PM₁₀ y 0.9 kilotonnes/año de PM_{2.5}, de éstas, las fuentes puntuales del Estado de México contribuyeron con el 73% (3633 ton/año) y el 83% (715 ton/año), respectivamente. Respecto a los precursores de ozono, se emiten anualmente 20 kilotonnes de NO_x y 129 kilotonnes de COV. Las industrias ubicadas en el Estado de México generan el 87% (17.6 kilotonnes/año) de NO_x, y poco más del 72% (93.45 kilotonnes/año) de COV.

2.3.3. Fuentes de Área

Una fuente de área se refiere a una serie de fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, que no pueden ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales, pero que en conjunto pueden afectar la calidad del aire en una región, por ejemplo: el uso de madera para cocinar o calentar la casa, las imprentas, las estaciones de servicio, y las tintorerías, etc. En el inventario de emisiones de la ZMCM de 2008 se reporta para estas fuentes que las emisiones anuales más abundantes en peso son de los COT, con más de 581.7 kilotonnes; siguiendo las emisiones de amoníaco con 15.2 kilotonnes, las de PM₁₀ con 14.7 kilotonnes, y de los NO_x con 12.0 kilotonnes.

En el análisis por entidad federativa, destaca el Estado de México con las emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5} de los caminos sin pavimentar. Respecto a las emisiones de COV, las del Estado de México se presentan ligeramente superiores a las del Distrito Federal, debido principalmente a la emisión de los rellenos sanitarios localizados en los municipios de La Paz y Nezahualcóyotl. Por su parte, el Distrito Federal aporta la mayor cantidad de las emisiones de NO_x y CO en fuentes de área, las cuales son generadas en su mayoría por el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

2.3.4. Fuentes Naturales

Las fuentes naturales emiten compuestos a la atmósfera generados por procesos bióticos y abióticos, dentro de ellas se pueden mencionar las emisiones biogénicas (COV de la vegetación-NO_x del suelo) y las generadas por la erosión del suelo. Estas emisiones, sin embargo, según las estimaciones realizadas para la elaboración del Inventario de 2008, representan tan sólo el 1% de las emisiones totales que se producen anualmente en la ZMCM, y aunque constituyen una fuente de radicales libres que juegan un papel en la química atmosférica como precursores del ozono, su contribución al deterioro de la calidad del aire se antoja muy pequeña dentro del contexto de una problemática de contaminación atmosférica predominantemente de tipo antropogénico cuyos factores condicionantes son más intensos, por muchos órdenes de magnitud, que las emisiones ordinarias de origen natural.

2.4. Estado Actual de la Calidad del Aire en la ZMCM¹¹

El diagnóstico de las condiciones en que se encuentran actualmente la calidad del aire y de las tendencias de las concentraciones de los contaminantes muestra que el ozono y las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} son los contaminantes críticos en esta zona, con concentraciones que rebasan los valores máximos definidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de calidad del aire. El ozono, sin embargo, sigue siendo el contaminante atmosférico más importante por su dinámica particular de producción en la atmósfera, la frecuencia de aparición de altos niveles, su persistencia y la forma en que se distribuye espacialmente¹².

Las NOM en materia de salud ambiental establecen la concentración máxima que puede alcanzar un contaminante en el aire ambiente para que los riesgos a la salud, de los grupos más sensibles de la población, se mantengan en niveles que han sido establecidos como tolerables. Los riesgos sobre la salud se definen en función del tipo de contaminante, de su concentración, del volumen de aire aspirado y de la duración de la exposición de una persona al contaminante. La exposición puede ser aguda o crónica, siendo aguda cuando ésta es de corta duración a altas concentraciones y crónica cuando se prolonga con concentraciones moderadas. Generalmente las NOM definen dos indicadores: uno de corto plazo para la exposición aguda y otro de largo plazo para la exposición crónica. Actualmente se tienen normas vigentes para los siguientes contaminantes: ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) y plomo (Pb).

2.4.1. Dióxido de azufre (SO₂)

La NOM establece que la concentración del dióxido de azufre, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo de 0.13 ppm (partes por millón), o la cantidad equivalente de 341 µg/m³, en 24 horas una vez al año, y la concentración de 0.03 ppm (79 µg/m³) en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible.¹³ En la ZMCM, los niveles de este contaminante no superan los valores de la norma oficial desde 2003. En 2008, la concentración promedio de 24 horas fue menor a

¹¹ El contenido de esta sección es un extracto del Capítulo 3 (Diagnóstico de la situación actual de la calidad del aire en la ZMVM) del PROAIRE 2011-2020: Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. Comisión Ambiental Metropolitana (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretaría de Salud).

¹² H.A. Bravo & R.J. Torres, Air Pollution levels and trends in the Mexico City metropolitan area, In: *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*, M. Fenn, L. Bauer, and T. Hernández, (Eds.), Springer-Verlag, ISBN:978-0-387-95337-3, New York, 121-159, 2002. Véase también: Evans, J., Levy, J., Hammitt, J., Santos-Burgoa, C., Castillejos, M., Caballero-Ramirez, M., Hernandez-Avila, M., Riojas-Rodriguez, H., Rojas-Bracho, L., Serrano-Trespalacios, P., 25 Spengler, J. D., and Suh, H.: Health benefits of air pollution control, in "Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment", L.T. Molina & M.J. Molina, (Eds.), Kluwer Academic Publishers, 103-136, 2002.

¹³ Secretaría de Salud. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-022-SSA1-1993.

0.130 ppm en todas las estaciones de monitoreo. En 2009, el valor máximo para el promedio de 24 horas se observó en estaciones del norte de la ZMCM.

2.4.2. Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Para el dióxido de nitrógeno, como contaminante atmosférico, la NOM establece que su concentración no debe rebasar el límite máximo de 0.21 ppm o lo que es equivalente a 395 µg/m³, en una hora una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible.¹⁴ Este contaminante se produce junto con el óxido nítrico (NO) durante los procesos de combustión, sin embargo, en condiciones normales la emisión de dióxido de nitrógeno es mucho menor que la de óxido nítrico. En la ZMCM la mayor parte del NO₂ es de origen fotoquímico, se forma de la reacción en la atmósfera del óxido nítrico con algunos compuestos oxidantes, como el ozono y el radical hidroxilo. A pesar de la intensa actividad fotoquímica en la atmósfera de la ZMCM, durante 2008 la concentración promedio horaria no rebasó el valor establecido por la NOM. En 2009 una estación registró el valor máximo de 0.211 ppm, pero como la NOM permite que el valor de 0.210 ppm se exceda sólo una vez al año, esto no se registra como un incumplimiento de la norma.

2.4.3. Monóxido de Carbono (CO)

La NOM establece que la concentración de monóxido de carbono en la atmósfera no debe rebasar el valor permisible de 11 ppm o lo que es equivalente a 12595 µg/m³ en promedio móvil de ocho horas una vez al año, como medida de protección a la salud de la población susceptible.¹⁵ El monóxido de carbono se produce durante la combustión de materiales orgánicos como el petróleo, la madera y el carbón, entre otros. De acuerdo con los registros del sistema de monitoreo atmosférico de la ZMCM, durante 2008 y 2009 no se rebasó el límite que establece la norma para el CO. Las concentraciones máximas se registraron en aquellas estaciones que se encuentran cerca de vialidades con tránsito vehicular intenso.

2.4.4. Ozono (O₃)

Para el ozono, la norma mexicana establece un límite de 0.110 ppm promedio horario y 0.080 ppm en el quinto máximo anual del promedio de 8 horas.¹⁶ El ozono es un contaminante secundario producto de la reacción fotoquímica entre los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno emitidos principalmente por los vehículos. Su concentración y distribución en la ZMCM refleja la influencia directa de las condiciones fisiográficas, de los patrones meteorológicos de la cuenca, del impacto de las emisiones generadas durante la actividad diaria de los habitantes y la capacidad oxidativa de la atmósfera¹⁷. Desde que se inició el monitoreo sistemático de la contaminación del aire en 1986 no se ha registrado un solo año que cumpla con los límites definidos por la NOM. Durante los primeros años de la década de los 90, los niveles de ozono alcanzaron

¹⁴ Secretaría de Salud. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-023-SSA1-1993.

¹⁵ Secretaría de Salud. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SSA1-1993

¹⁶ Secretaría de Salud. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-020-SSA1-1993.

¹⁷ Esto es, su capacidad para "limpiarse a sí misma" eliminando ciertos compuestos químicos.

los máximos históricos en la ZMCM, registrando concentraciones de hasta cuatro veces el valor máximo indicado por la norma.

En 2008 todas las estaciones de monitoreo superaron el valor de la norma de ozono, tanto para el indicador de 1 hora como para el indicador de 8 horas. Entre enero y diciembre de 2008 se registraron 185 días con una concentración mayor a 0.110 ppm; las estaciones localizadas en el poniente y suroeste registraron las concentraciones más altas y el mayor número de registros que excedieron la NOM. El indicador para 8 horas que corresponde a un valor de 0.080 ppm para el quinto máximo, se rebasó en todas las estaciones de monitoreo que reportan este contaminante. En 2009 las concentraciones de ozono rebasaron en el 49% de los días el valor límite horario establecido por la NOM.

2.4.5. *Partículas Suspendidas Totales (PST)*

Las partículas suspendidas son una mezcla compleja de diferentes materiales sólidos o líquidos que se encuentran suspendidos en el aire por diversos factores físicos. Dependiendo de su origen, las partículas pueden variar de tamaño, forma y composición. El tamaño determina en gran medida el tiempo en que éstas permanecen en suspensión; las más grandes como el polvo del suelo se pueden sedimentar rápidamente, mientras que las más pequeñas pueden permanecer en suspensión durante varias horas o días. Las partículas más grandes tienden a depositarse cerca de su lugar de origen, mientras que las más pequeñas pueden ser transportadas por el viento muchos kilómetros, antes de depositarse.

Las partículas con diámetros mayores a 2.5 μm están compuestas principalmente por polvo del suelo, restos de vegetales o animales, fibras y polen. Las partículas con diámetros menores a 2.5 μm están formadas en gran porcentaje por compuestos orgánicos e inorgánicos derivados de reacciones secundarias en la atmósfera y contienen una gran variedad de compuestos orgánicos en combinación con carbono elemental y diversos compuestos inorgánicos producidos durante la oxidación del azufre y del nitrógeno. En esta fracción se encuentran los aerosoles ácidos asociados con la formación de la lluvia ácida. Además de los efectos en la salud humana, las partículas con diámetros menores a 1 μm son responsables de la disminución en la visibilidad en la ZMCM, pues son capaces de dispersar la luz del sol provocando un efecto brumoso.

Para las PST, la norma oficial mexicana¹⁸ establece como límite el valor de 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas. De acuerdo con los registros del SIMAT, en 2008, las concentraciones de PST registradas en todas las estaciones de monitoreo rebasaron el límite de la norma. En 2009, ocurrió lo mismo, con excepción de las concentraciones registradas en la estación de monitoreo instalada en la UAM Iztapalapa (UIZ).

2.4.6. *Partículas con Diámetros Menores a 10 μm (PM_{10})*

Las PM_{10} son emitidas por diversas fuentes, entre las que están los vehículos, las vialidades sin pavimentar, las emisiones industriales, la fabricación y uso de materiales para la construcción, la industria de la fundición moldeada de metales, el suelo

¹⁸ Secretaría de Salud. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993.

erosionado y la generación de energía eléctrica. Para las PM_{10} , la NOM establece un límite de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas, y de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual.¹⁹

Un alto porcentaje de estas partículas corresponde a la resuspensión del polvo del suelo debido a la circulación vehicular sobre vialidades sin pavimentar y a las emisiones de los vehículos; el resto proviene de la industria, diversas fuentes de área y fuentes naturales. El cumplimiento de la norma ha sido irregular presentando mayores problemas en la zona oriente de la ZMCM, caracterizada por vialidades de intenso tráfico vehicular y una cercanía a las zonas de donde provienen fuertes polvaredas en la temporada de estiaje.

2.4.7. Partículas con Diámetros Menores a $2.5 \mu\text{m}$ ($PM_{2.5}$)

Para las partículas finas o con diámetros menores a $2.5 \mu\text{m}$, la NOM establece un límite de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual.²⁰ La presencia de $PM_{2.5}$ de origen primario está asociada con las emisiones de vehículos como tractocamiones y autobuses. Sin embargo, en la ZMCM la mayor parte de las partículas finas que se encuentran suspendidas en la atmósfera son de origen secundario, que se forman a partir de la transformación de diferentes compuestos gaseosos, sólidos y líquidos que se encuentran en ella. Debido a la complejidad de los mecanismos de formación en la atmósfera, es difícil cuantificar la contribución a la concentración de partículas a partir de las emisiones de los precursores.

En la ZMCM y durante 2008 y 2009 en ningún sitio se reportaron valores superiores al límite recomendado por la NOM para el indicador de 24 horas, de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el percentil 98. Sin embargo, en todas las estaciones se excedió el valor del promedio anual de la NOM de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.4.8. Plomo (Pb)

La NOM establece un límite de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio trimestral para el plomo.²¹ Este es un metal pesado que es emitido a la atmósfera de manera natural por las erupciones volcánicas, el aerosol marino, los incendios forestales y el polvo del suelo, o bien por actividades industriales en forma de partículas o humos. En la ZMCM se empleó el tetraetilo de plomo en las gasolinas como antidetonante hasta 1996 y era la principal fuente de este contaminante, pero desde 1997 la gasolina que se distribuye en esta zona no contiene plomo. Las concentraciones de plomo se han mantenido dentro de la norma desde hace varios años.

2.5. Ubicación Geográfica, Topografía y Orografía de la ZMCM

Desde luego, la complejidad y gravedad del problema de la contaminación atmosférica urbana en general, y de la ZMCM en particular, no depende sólo de las cantidades de contaminantes que se descargan a la atmósfera o se producen en ella, sino que tiene además otros factores condicionantes como son: la ubicación geográfica, la orografía y la

¹⁹ Secretaría de Salud. NORMA OFICIAL MEXICANA: NOM-021-SSA1-1993, 2005.

²⁰ Véase la referencia anterior.

²¹ Secretaría de Salud. NORMA OFICIAL MEXICANA: NOM-026-SSA1-1993.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

topografía, las propiedades físicas del suelo urbano y la meteorología, así como de las interacciones entre estos factores. Para comprender la influencia y la importancia de estos factores en el contexto de la contaminación atmosférica de la Ciudad de México y los municipios conurbados, a continuación se describen sus características con cierto detalle.

2.5.1. Ubicación y Topografía de la ZMCM

La ZMCM se encuentra en una región subtropical que se ubica aproximadamente entre los 19.05° a 19.90° de latitud Norte y los 98.63° a 99.52° de longitud Oeste²². La región está rodeada casi completamente por montañas muy altas definiendo una cuenca, en cuyo interior se localiza la Ciudad de México. Aquí, el terreno es prácticamente plano en un área de unos 20 Km de radio alrededor del centro histórico de la ciudad (Figura 2.3, Izquierda), con una altura media de 2240 msnm (metros sobre el nivel del mar).

Para la parte de la cuenca que corresponde a la Ciudad de México, la distribución de frecuencias de las altitudes y su estadística muestran (Figura 2.3, Derecha) que la altura del terreno varía dentro de una banda de 1800m, con valores mínimo de 2200 msnm, máximo de 4000 msnm y medio de 2625 msnm, y que el 25% de las altitudes se encuentran entre 2200 y 2250 msnm, mientras que el 50% de ellas tienen valores entre 2200 y 2500 msnm (segunda columna del histograma).

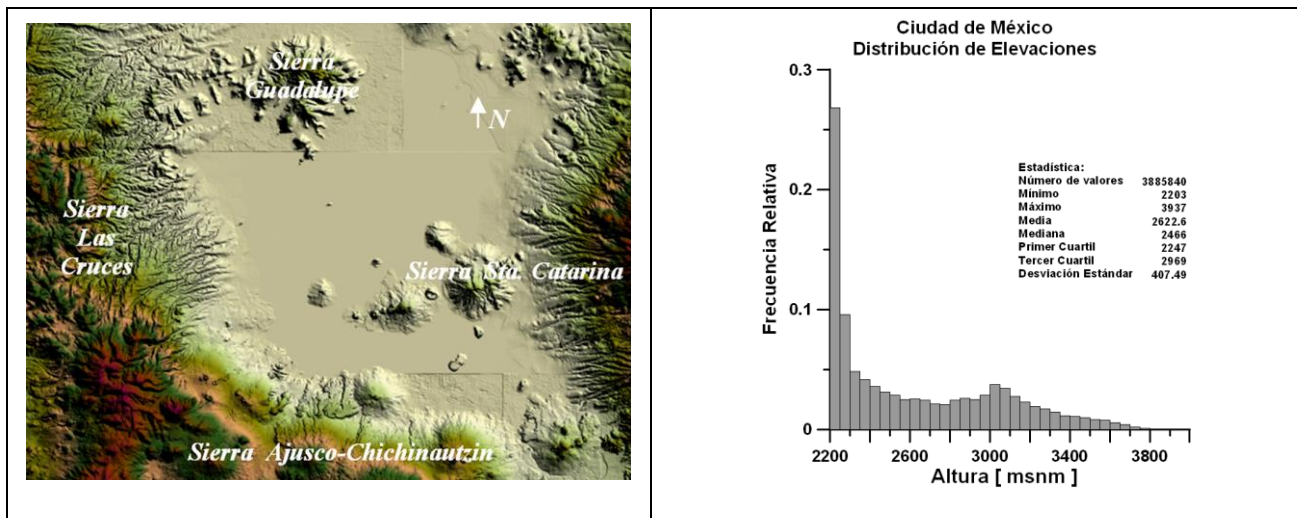


Figura 2.3. Principales características topográficas y orográficas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Reconstrucción realizada usando los modelos digitales de elevación del INEGI.

En la Figura 2.4 se muestran los perfiles topográficos del terreno a lo largo de las direcciones cardinales N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, construidos a partir de un origen conveniente ubicado en el centro histórico de la ciudad (Estación Merced de la RAMA). Cada perfil proporciona la altitud como función de la distancia, cuya medida se realiza en línea recta desde el origen hacia el punto cardinal correspondiente. En esa figura se observa que la ventilación de la Ciudad de México se da principalmente a través de los sectores de las direcciones NNW, NNE y SE, donde la altura del terreno en la frontera

²² Véase el Capítulo 2 del Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM 2008, Secretaría del Medio Ambiente el Gobierno del Distrito Federal, Primera Edición 2010.

apenas supera los 2600 msnm. Estas aperturas naturales de la cuenca, desde luego, juegan un papel importante como brechas con efectos forzantes sobre la circulación de los vientos cerca de la superficie terrestre.

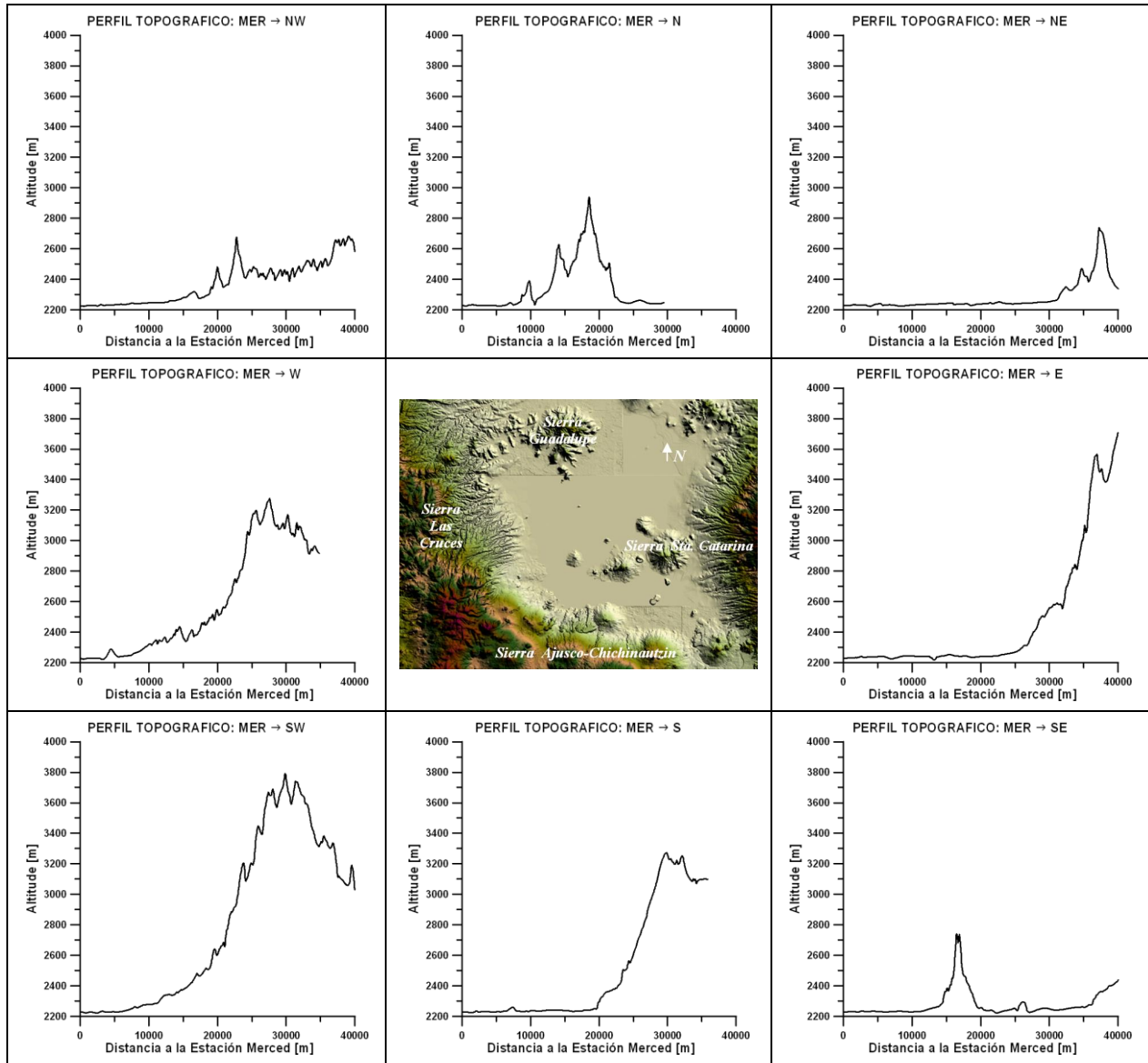


Figura 2.4. Perfiles topográficos de la Ciudad de México a lo largo de las principales direcciones cardinales respecto al centro histórico. Cada uno proporciona la altitud como función de la distancia al centro de la ciudad.

2.5.2. Orografía de la ZMCM

Las características de la orografía de la región donde se asienta la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se deben al eje Neovolcánico transversal mexicano. La ZMCM se ubica en la cuenca de México, rodeada por cinco serranías importantes: al Norte la Sierra de Guadalupe; al Oeste la Sierra de las Cruces; al Sur la Sierra del Ajusco-Chichinautzin; al Este la Sierra Nevada, de la que forman parte los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl; y extendiéndose del interior de la cuenca hacia la Sierra Nevada (al Este), la Sierra de

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Santa Catarina. Esta frontera orográfica natural de la cuenca tiene dos puertas de ventilación. Se comunica hacia la planicie mexicana y el interior árido del país por el norte, con tan sólo una barrera de 800 m sobre el nivel del suelo (la Sierra de Guadalupe); mientras que en la esquina Sureste tiene una brecha a través de las montañas, entre el volcán Popocatepetl y la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, donde la altura del terreno desciende hasta unos 2400 msnm. Por aquí corre la carretera 115 que va de Chalco (Estado de México) a Cuautla (Morelos), pasando por Tlalmanalco (Estado de México) y Amecameca (Morelos). A continuación se proporcionan algunos detalles de estas cordilleras.

Sierra de Guadalupe: Al Norte de la Ciudad de México existe una cadena montañosa de pequeña elevación que se conoce como la Sierra de Guadalupe. Esta se extiende desde el Oeste, descendiendo hacia el Este en el cerro del Tepeyac, y separando geográficamente al Distrito Federal del Estado de México²³. Se reparte entre la zona Norte de la Delegación Gustavo A. Madero del Distrito Federal, y los municipios mexiquenses de Tlalnepantla de Baz, Cuautitlán Izcalli, Tultitlán, Coacalco y Ecatepec. Las montañas que conforman la Sierra de Guadalupe son: el Pico Tres Padres, el Cerro Los Gachupines, el Cerro del Chiquihuite, el Picacho Moctezuma, el Picacho el Fraile, el Picacho El jaral, el Cerro del Tenayo, el Cerro Petlecatl, el Cerro de la Calavera, el Cerro Gordo, el Cerro Zacatenco, el Cerro del Guerrero, el Cerro de Santa Isabel y el Cerro del Tepeyac. La máxima altura alcanzada corresponde al Picacho Moctezuma con una altitud de 2900 msnm, seguida del cerro del Chiquihuite con una altitud de 2740 msnm.

Sierra de Las Cruces: Al Oeste de la ZMCM se encuentra la Sierra de Las Cruces. Esta sierra forma parte de los territorios del Distrito Federal, el Estado de México y el Estado de Morelos, delimita a los valles de México y Cuautitlán en la Cuenca de México, con el Valle y Cuenca de Toluca así como una parte de la Cuenca del Lerma. La Sierra de las Cruces se forma en base a ocho estratovolcanes traslapados, denominados (de Sur a Norte): Zempoala (3690 msnm), La Corona (3770 msnm), San Miguel (3870 msnm), Salazar (3660msnm), Chimalpa (3420 msnm), Iturbide (3,620 msnm), La Bufa (3460 msnm) y La Catedral (3780 msnm)²⁴.

Sierra del Ajusco-Chichinautzin: Al Sur de la cuenca se encuentra la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, también conocida simplemente como serranía del Ajusco o sierra de Chichinautzin. Es una cadena montañosa localizada entre las delegaciones de Tlalpan, Xochimilco y Milpa Alta en el Distrito Federal, y en los municipios de Huitzilac, Tepoztlán y Tlalnepantla en Morelos. Está conformada por más de cien conos volcánicos entre los que destacan: el volcán Tláloc (3690 msnm), Chichinautzin (3430 msnm), Xitle (3100 msnm), el Cerro Pelado (3600 msnm) y el Cuauhtzin (3510 msnm). Su máxima altura se

²³ J. Lugo-Hubp y A. Salinas-Montes, Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al Norte de la Ciudad de México) y su Relación con Peligros Naturales, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 13, núm. 2, 1996, pp. 240-251.

²⁴ A. García-Palomo, J. J. Zamorano, C. López-Miguel, A. Galván-García, V. Carlos-Valerio, R. Ortega y J.L. Macías, El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 25, núm. 1, 2008, pp 158-178.

encuentra en el pico Cruz del Marqués en el volcán Ajusco (3937 msnm), que es el punto más alto del Distrito Federal. Esta cadena es la frontera Sur del Distrito Federal, separándolo del Valle de Cuernavaca. La sierra del Ajusco forma parte de la subprovincia geológica de los Lagos y Volcanes del Anáhuac, localizada dentro del Eje Neovolcánico.

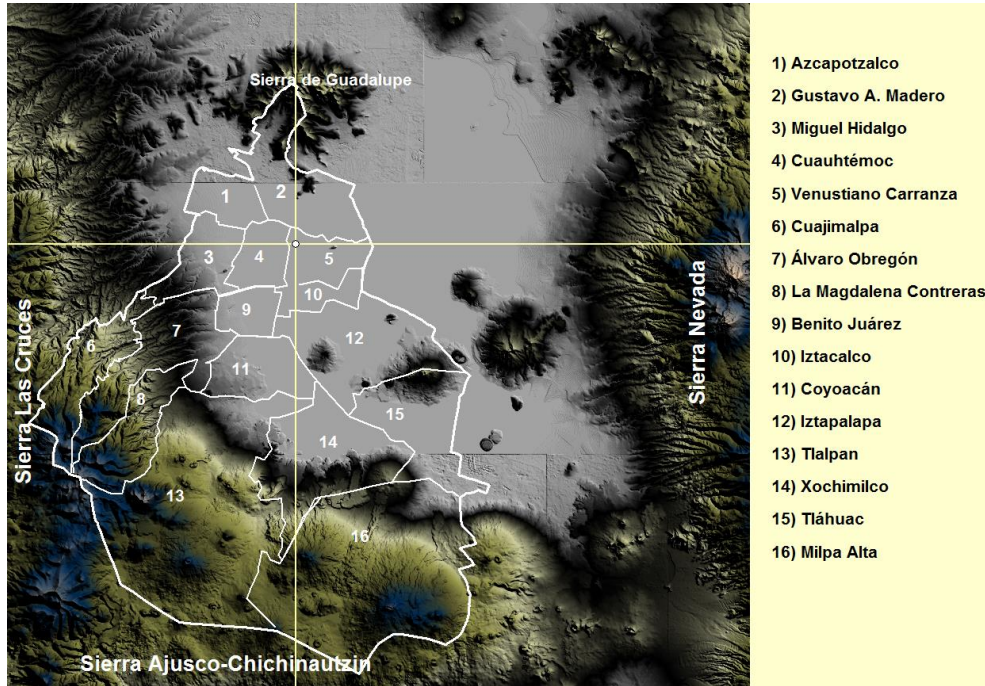


Figura 2.5. Características topográficas de la ZMVM y sus alrededores. También se muestra la división política en Delegaciones de la Ciudad de México.

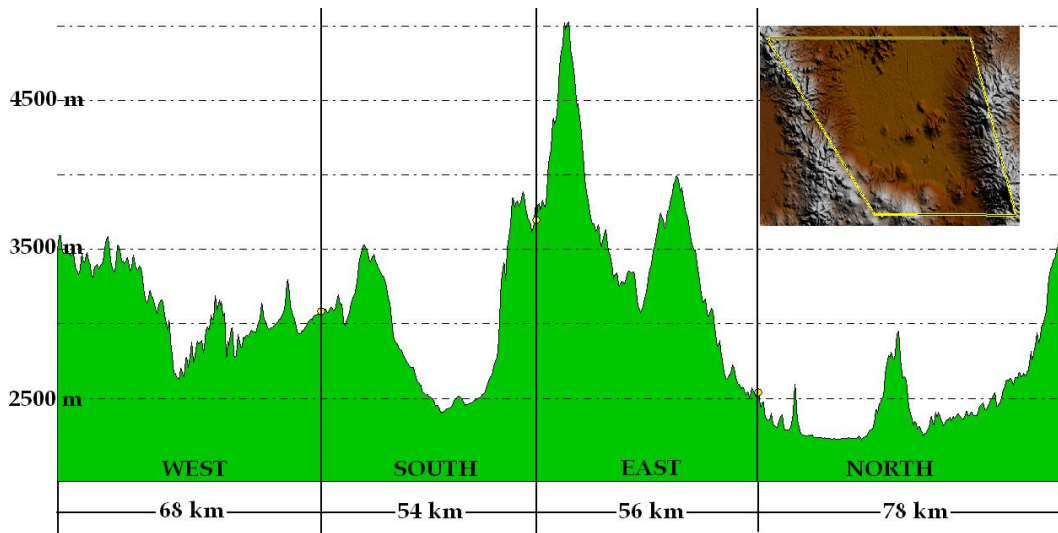


Figura 2.6. Perfil topográfico siguiendo el borde de las montañas alrededor de la Ciudad de México.

Sierra Nevada: Al Este de la cuenca de México se encuentra una cordillera de 70 km de longitud que se conoce como Sierra Nevada o Sierra de Río Frío. Esta cordillera se extiende del Popocatepetl (5465 msnm), en el Sur, hasta los lomeríos que descienden del

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.

Monte Tláloc al Norte, pasando por el volcán Iztaccíhuatl (5222 msnm). A ella pertenecen los montes Tláloc (4125 msnm), Telapón (4065 msnm), Yoloxóchitl (3900 msnm), los Potreros (3600 msnm), el Papayo (3640 msnm), el Tlamacas (3220 msnm), el Tejolota (3020 msnm), la Mesa (2800 msnm) y el Tezoyo (2660 msnm). De los dos volcanes importantes, el Iztaccíhuatl está situado 64 Km al Sureste de la Ciudad de México; por su altura, es la tercera cumbre de México y sexta elevación en Norteamérica. Es un edificio volcánico alargado de 15 Km de longitud. El parecido de su perfil con una mujer recostada ha facilitado la designación de sus cúspides más altas: la Cabeza (5146 msnm) al Norte, el Pecho (5230 msnm), y los Pies (4703 msnm) al Sur. El Popocatepetl se ubica a 57 km de la Ciudad de México rumbo Sureste. Tiene longitud de unos 15 Km y, por su altura, presenta glaciares permanentes. Este volcán es el segundo más alto de México tras el Pico de Orizaba. Se une con el volcán Iztaccíhuatl a través del Paso de Cortés.

Sierra de Santa Catarina: Al Este de la Ciudad de México, en los límites de las delegaciones Tlahuac e Iztapalapa, se localiza un conjunto de conos volcánicos alineados de Oeste a Este, interrumpiendo la planicie lacustre de la cuenca de México, que se conoce como la Sierra de Santa Catarina. La mayor parte de ella pertenece al territorio del Distrito Federal, y sólo uno de sus picos se localiza en el estado de México. La sierra está formada por los volcanes Xaltepec (2500 msnm), Tecuauhtzin o Santiago (2640 msnm), Guadalupe o El Borrego (2820 msnm) y La Caldera (2400 msnm), y los cerros Yohualixqui (2420 msnm), Tetecón (2480 msnm) y de la Estrella (2460 msnm)²⁵. La Sierra de Santa Catarina tiene una extensión de 2166 hectáreas, de las cuales el 34% son área natural protegida. Constituye uno de los rebordes montañosos más prominentes de la Cuenca de México que divide los antiguos lagos de Texcoco y Chalco.

2.6. Características del Clima en la ZMCM²⁶

El estado del tiempo se refiere a las condiciones meteorológicas que prevalecen en un lugar en un momento dado (o en un periodo de tiempo muy corto, de minutos a semanas). El estado del tiempo cambia muy rápidamente; a lo largo de un día, por ejemplo, las condiciones meteorológicas pueden ser muy diferentes de un momento a otro, podemos tener una madrugada fría, una mañana soleada y una tarde lluviosa. Hablar del clima, por el contrario, significa hablar de la estadística de las condiciones meteorológicas; es decir, del comportamiento promedio del estado del tiempo en un periodo de tiempo relativamente largo (usualmente de 30 años) y de la estadística de sus situaciones extremas. En la figura de la siguiente página se describen las diferencias principales entre el estado del tiempo y el clima.

²⁵ J. Lugo-Hubp, F. Mooser, A- Pérez-Vega y J. Zamorano-Orozco, Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina, D.F., México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 11, núm. 1, 1994, pp. 43-52.

²⁶ Esta sección ha sido elaborada en gran medida con extractos del libro **El Clima de la Ciudad de México** del Dr. Ernesto Jáuregui Ostos. (Ernesto Jáuregui Ostos, El Clima de la Ciudad de México, Temas Selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía, UNAM, Plaza y Valdés, S.A. de C.V., Primera Edición, Junio 2000. ISBN: 968-856-819-8).

	Climate	Weather
Definition	Describes the average conditions expected at a specific place at a given time. A region's climate is generated by the climate system, which has five components: atmosphere, hydrosphere, cryosphere, land surface, and biosphere .	Describes the atmospheric conditions at a specific place at a specific point in time. Weather generally refers to day-to-day temperature and precipitation activity
Components	Climate may include precipitation, temperature, humidity, sunshine, wind velocity, phenomena such as fog, frost, and hail storms over a long period of time.	Weather includes sunshine, rain, cloud cover, winds, hail, snow, sleet, freezing rain, flooding, blizzards, ice storms, thunderstorms, steady rains from a cold front or warm front, excessive heat, heat waves and more
Forecast	By aggregates of weather statistics over periods of 30 years	By collecting meteorological data, like air temperature, pressure, humidity, solar radiation, wind speeds and direction etc.
Determining factors	Aggregating weather statistics over periods of 30 years ("climate normals").	Real-time measurements of atmospheric pressure, temperature, wind speed and direction, humidity, precipitation, cloud cover, and other variables
About	Climate is defined as statistical weather information that describes the variation of weather at a given place for a specified interval.	Weather is the day-to-day state of the atmosphere, and its short-term (minutes to weeks) variation
Time period	Measured over a long period	Measured for short term
Study	Climatology	Meteorology

Figura 2.7. Tabla comparativa de las diferencias entre los conceptos de estado del tiempo y clima. Fuente: Climate vs Weather. Diffen.com. Diffen LLC, n.d. Web. 12 May 2014. http://www.diffen.com/difference/Climate_vs_Weather.

Las variaciones en el estado del tiempo (y del clima, como promedio de largo plazo) están determinadas por la ubicación geográfica y por los sistemas regionales de tiempo atmosférico que llegan de sitios lejanos (como los ciclones, las masas de aire polar o *nortes*, las tormentas tropicales), pero también por la acción del hombre, como es el caso de la alteración del clima de las ciudades por la urbanización o el calentamiento de la atmósfera debido al llamado *efecto invernadero*.

Atendiendo a su régimen de lluvia y a su altitud en el centro del país, el clima de la cuenca de México es tropical atemperado. Considerando la clasificación climática universal (Köppen), es templado en su porción centro y sur, pero seco de tipo estepa en la parte Norte y Oriente, donde las lluvias son deficitarias. Otra zona semiárida (Köppen: BS) de la cuenca se encuentra enclavada en la porción centro-oriente de la ciudad donde la lluvia anual varía entre 400 y 550 mm, mientras que la temperatura anual oscila entre 15 y 17

°C. Esta relativa aridez se explica por la *subsistencia*²⁷ del aire en el centro de la cuenca durante el día, originada por el desplazamiento del aire superficial en dirección cuesta arriba de las montañas (vientos de valle). Así durante la estación lluviosa, las *nubes convectivas* que se forman en el centro de la cuenca se ven parcialmente frenadas en su desarrollo vertical y, por tanto, un menor número de esas nubes se llega a precipitar ahí. En los años de lluvias escasas en la cuenca se acentúa la sequedad o aridez de esta parte enclavada en la ciudad, generándose entonces una mayor incidencia de las tolvaneras (Jáuregui, 1971, 1989). Las lluvias son abundantes en el piemonte por el levantamiento orográfico, aumentando a un máximo en el parteaguas de las montañas al Oeste, Sur y Sureste, donde caen entre 700 y 1200 mm de lluvia al año en promedio. En el centro de la cuenca y hacia el Noreste, las precipitaciones son deficitarias y más variables.

Para los propósitos del presente trabajo, el principal aspecto meteorológico de interés es el viento. Otros factores no menos importantes, sin embargo, como la temperatura, la humedad o la precipitación, no serán considerados aquí.

2.7. Características Generales de los Vientos en la Ciudad de México

En esta sección, se describen las características generales de los principales vientos que suelen observarse en la Ciudad de México.

La circulación del viento en un valle, como ocurre en el caso de la Ciudad de México, es principalmente la que imponen los gradientes de temperatura que se originan durante el día por el asoleamiento diferencial, principalmente²⁸, entre las laderas y la planicie, lo que resulta en vientos que van hacia el perímetro del valle (vientos de valle), mientras que por la noche el flujo del aire es opuesto, es decir, el aire frío de las partes altas de las laderas que bordean el valle baja por gravedad hacia el fondo de la planicie. Este vaivén del viento, movimiento básico y periódico que sigue el ciclo diurno, resulta perturbado por las corrientes atmosféricas de escala regional que visitan la cuenca de México: durante el periodo de secas (noviembre a abril) predominan los vientos secos del oeste, que a su paso levantan con frecuencia nubes de polvo, tanto en la cuenca como en las laderas de las montañas del sur, donde los bosques están siendo sustituidos por una caótica y creciente urbanización. En el resto del año predominan los vientos alisios húmedos que acarrean las lluvias a la cuenca. En el periodo de secas, los vientos pueden soplar tanto del norte como del este, sur y noreste, mientras que en los meses de lluvia predominan del norte y noreste en el ámbito de la ciudad. Estos vientos son de baja intensidad, excepto durante los vendavales.

²⁷ Subsistencia. Es el aire con movimiento descendente en la atmósfera, generalmente con la implicancia de que la condición valga sobre un área extensa. La subsistencia es la antítesis de la convección, que consiste en aire que asciende por calentamiento superficial o por empuje de aire frío. En los anticiclones predomina la subsistencia, es decir, el aire que desciende. Esta situación provoca un calentamiento y como consecuencia favorece la formación de una inversión térmica conocida como "la inversión de subsistencia". Esta es producida por el calentamiento adiabático de una capa de aire descendente (subsidente).

²⁸ Son determinantes también los diferenciales de calores específicos, conductividad térmica, etc., entre los diferentes tipos de suelos y sus usos.

Los vendavales o vientos arrachados de gran intensidad se presentan, en ocasiones, con la llegada de una masa de aire polar a la cuenca de México en el periodo invernal o cuando se abaten sobre la ciudad las nubes de tormenta (cumulonimbos), propias de la época de lluvias. Por lo general, las intensidades son superiores a 40 km/h (~ 11 m/s) y pueden ocurrir en cualquier época del año, aunque aparentemente los meses más ventosos son marzo, abril y mayo. La dirección preferida de estos vendavales es SW, W o NW, es decir, soplan casi siempre con una componente que proviene del oeste, que es la dirección de la corriente de vientos (westerlies) que llega a la cuenca de México con la estación seca.

La interacción de los vientos locales (de valle y de montaña) con los vientos regionales determina la dirección e intensidad de los vientos observados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, produciendo una gran variedad de tipos de circulación.

2.7.1. Los Vientos de la Tarde en Superficie

Durante las tardes (13 a 18 horas) de la estación seca predominan los vientos que se dirigen de la planicie a las montañas en el poniente de la ciudad, así como un flujo de vientos del sur en la mitad oriente de la misma, tal como se ilustra en la Figura 2.8a para el mes de enero de 1997. Ahí mismo destaca la presencia de una circulación ciclónica en la porción norte de la ciudad, ligada a la presencia de aire tibio (isla de calor) en ese rumbo de la zona urbana.

Durante la temporada de lluvias, el recorrido de los vientos de la tarde sobre la ciudad es marcadamente del norte o noreste en todo el ámbito urbano (Figura 2.8b), lo cual tiene implicaciones para el transporte atmosférico de contaminantes del norte al sur, los que se acumulan en el rincón suroeste de la ciudad, y aun más allá en la zona urbana que se extiende hacia las faldas del Ajusco.

2.7.2. Los Vientos de la Madrugada en Superficie

Durante el periodo de secas (tomando enero como representativo), se manifiesta claramente el flujo del aire nocturno fresco o frío que escurre cuesta abajo de las laderas de las montañas que circundan la ciudad por el oeste y el sur, e incluso (aunque más alejadas) por el lado este. Esta convergencia de los vientos, originada por la topografía del entorno de la ciudad, se ve reforzada por la presencia del aire tibio que esta genera y que actúa como un tiro de chimenea que atrae el aire de los suburbios hacia el interior de la urbe, como puede verse en la Figura 2.9a. Este patrón de vientos no favorece el transporte de los contaminantes atmosféricos hacia fuera de la ciudad y, aunque las emisiones disminuyen durante las horas nocturnas, no ocurre lo mismo hacia el amanecer; cuando el efecto combinado de estos fenómenos y la formación de una inversión térmica usual en esta época del año, produce situaciones críticas de contaminación atmosférica. Conviene señalar que la misma inversión térmica, que anula la dispersión de los contaminantes en la dirección vertical, se genera tanto por la confluencia del aire frío de las montañas hacia el fondo del valle, como por el enfriamiento de la capa de aire superficial por radiación hacia cielos despejados.

La circulación del aire sobre la ciudad durante la noche en un mes de la estación de lluvias es, en general, semejante al correspondiente a la estación de secas; es decir, el aire fresco

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

de las laderas de las montañas del oeste y del sur baja hacia el fondo de la cuenca, manteniéndose una corriente de norte a sur en la planicie ubicada al sur de la serranía de Guadalupe (Figura 2.9b), Conviene anotar que estos vientos del norte son característicos de las planicies ubicadas viento abajo y en los flancos este (Ecatepec) y oeste (Tlalnepantla) de dicha serranía, debido al aceleramiento que sufre el aire que llega del norte a su paso por dichos puertos o estrechamientos.

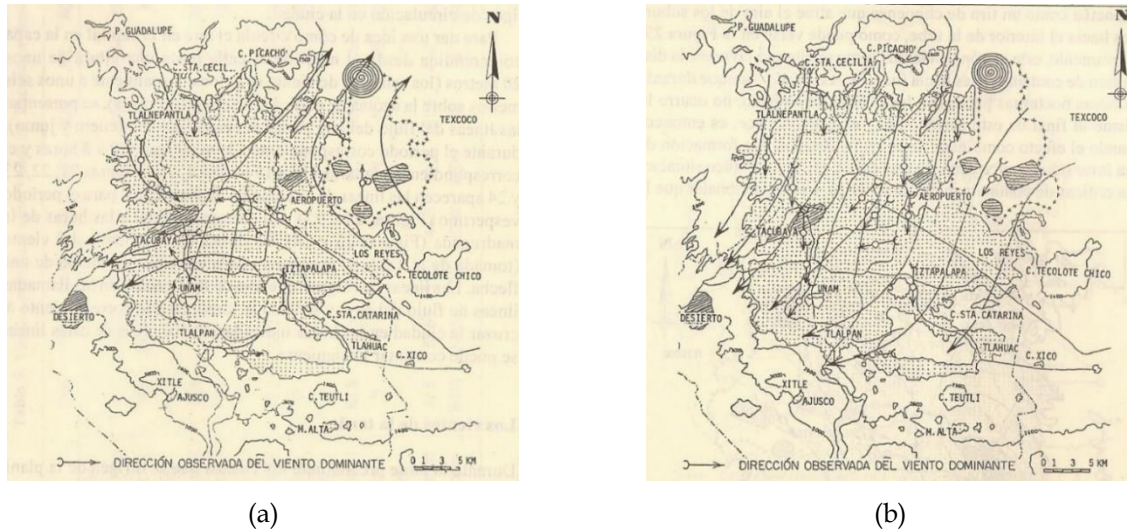


Figura 2.8. Circulación de los vientos de la tarde en superficie en la Ciudad de México. (a) Estacion seca (datos del mes de enero de 1997). (b) Temporada de lluvias. (Fuente: Ernesto Jáuregui Ostos, El Clima de la Ciudad de México, Temas Selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía, UNAM, Plaza y Valdés, S.A. de C.V., Primera Edición, Junio 2000. ISBN: 968-856-819-8.)

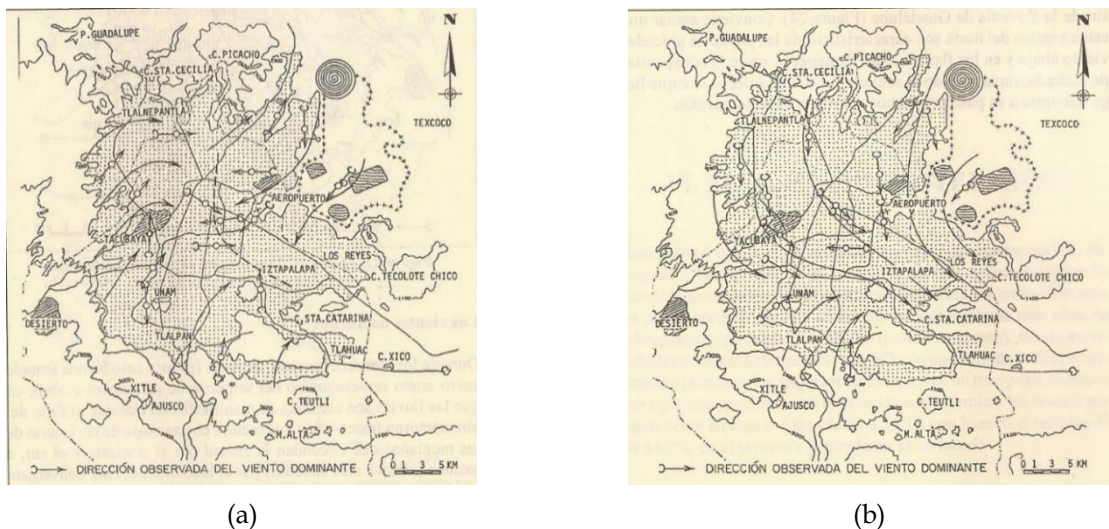


Figura 2.9. Circulación de los vientos de la madrugada en superficie en la Ciudad de México. (a) Periodo de secas (mes de enero). (b) Temporada de lluvias. (Fuente: Ernesto Jáuregui Ostos, El Clima de la Ciudad de México, Temas Selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía, UNAM, Plaza y Valdés, S.A. de C.V., Primera Edición, Junio 2000. ISBN: 968-856-819-8.)

Capítulo 3

Los Modelos Celulares de Representación del Viento

Aquí se presentan, formulan y discuten los modelos celulares de representación de los vientos urbanos como enfoque teórico bajo el cual se realiza el trabajo de investigación. Se introducen los conceptos de los estados de viento, las variables de estado, y de las densidades de estados de viento como herramientas de análisis estadístico inicial. Se propone y discute la aplicación de las técnicas de análisis de conglomerados (cluster analysis) como herramientas para la identificación de los patrones de los estados de viento.

Capítulo 3

Los Modelos Celulares de Representación del Viento

3.1. Introducción

Los cuerpos materiales y sus interacciones, así como sus comportamientos, sus procesos y los fenómenos en que participan, son entes extraordinariamente complejos, en general, y su estudio puede resultar también extraordinariamente difícil (por no decir imposible) sin la consideración de simplificaciones del algún tipo. Por ello en las ciencias, para el estudio de la naturaleza, los conocimientos se obtienen a través de teorías que se desarrollan usando modelos de los cuerpos y los fenómenos: prescindiendo de numerosos atributos y detalles de los cuerpos y de los fenómenos y sustituyendo a éstos por otros más simples y accesibles para la observación y el análisis. En física, al igual que en cualquiera otra de las ciencias (exactas o no), una de las principales etapas de la investigación consiste en la elaboración de *modelos*¹, de diferentes tipos, que de alguna manera sean susceptibles de ponerse en correspondencia con los objetos del mundo real, y capaces también de reflejar, de alguna manera, lo que ahí ocurre.

El viento, aire en movimiento, es un fenómeno meteorológico que involucra un cuerpo material, el aire, y un aspecto del comportamiento de éste, su movimiento. Ambos son entes muy complejos que requieren ser modelados para su estudio. El movimiento del aire atmosférico es un fenómeno que involucra escalas de longitud que varían de metros a miles de kilómetros. Estas escalas de longitud de los vientos son, por muchos órdenes de magnitud, bastante mayores que las escalas moleculares, tales como el *camino libre medio*², al menos en las capas baja y media de la atmósfera terrestre. Debido a esto, para un gran número de propósitos, resulta apropiado y conveniente modelar al aire como un *medio continuo*³ y describir su comportamiento en términos de sus propiedades macroscópicas, descritas éstas por variables de campo que son funciones continuas de la posición y del tiempo.

¹ Un objeto M se considera modelo de otro objeto R si ocurre que: (1) el objeto M es, en algún sentido, más simple, cómodo o accesible para el estudio que el objeto R; (2) ciertos rasgos, propiedades o particularidades de M reflejan las propiedades, particularidades o rasgos de conducta que se estudian de R; (3) en los demás sentidos M es diferente de R; (4) los conocimientos obtenidos a partir del estudio de M pueden aplicarse luego, con enmiendas mayores o menores, a R, pueden utilizarse para explicar tales o cuales particularidades de R, para predecir su conducta, etc.

² El camino libre medio es la distancia que en promedio recorre una molécula del gas entre dos colisiones sucesivas.

³ Básicamente, un medio continuo es un modelo de un cuerpo material en el que éste viene representado por un conjunto que, en todo momento, es isomorfo a una región de \mathbf{R}^3 , siendo \mathbf{R} el conjunto de los números reales.

Desde el punto de vista del modelo del continuo, el comportamiento térmico y mecánico del aire atmosférico está gobernado por los principios físicos de conservación de la masa, del momento y de la energía. Estos principios se traducen en las llamadas ecuaciones de balance de masa, de momento y de energía, se presentan a continuación⁴.

$$\text{Balance de Masa:} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{Balance de Momento:} \quad \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbb{T} \quad (3.2)$$

$$\text{Balance de Energía:} \quad \rho \frac{de}{dt} = \mathbb{T} : \mathbb{D} + \rho r - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3.3)$$

donde $\rho(\mathbf{x}, t)$ es la densidad de masa del aire, $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ es la velocidad del viento, $e(\mathbf{x}, t)$ es la energía interna específica del aire, $\mathbb{T}(\mathbf{x}, t)$ es el tensor de esfuerzos del aire, $\mathbb{D}(\mathbf{x}, t)$ es la parte simétrica del gradiente de la velocidad, $\mathbf{q}(\mathbf{x}, t)$ es el vector de flujo de calor, y $r(\mathbf{x}, t)$ es una fuente interna de calor (por unidad de masa) distribuida en la región del espacio ocupada por el fluido. Todas estas propiedades son representadas por funciones de la posición \mathbf{x} y del tiempo t .

La expresión más común de estas ecuaciones se obtiene cuando el aire es considerado como un gas ideal⁵, newtoniano, sin fuentes internas de calor ($r = 0$), y con flujo de calor por conducción. En tal caso, el tensor de esfuerzos es simétrico y sus componentes están dadas por

$$\begin{array}{l} \text{Fluido Viscoso} \\ \text{Newtoniano:} \end{array} \quad T_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})\delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \quad (3.4)$$

y el vector de flujo de calor está dado por la Ley de Fourier

$$\text{Ley de Fourier} \quad \mathbf{q} = -\kappa \nabla T \quad (3.5)$$

En estas ecuaciones, $p(\mathbf{x}, t)$ es la presión atmosférica, δ_{ij} es la delta de Kronecker, λ y μ son dos parámetros que caracterizan la viscosidad del fluido, $T(\mathbf{x}, t)$ es la temperatura absoluta (Kelvin) y κ es la conductividad térmica del aire. La cerradura del sistema de ecuaciones se consigue con las ecuaciones de estado del gas ideal:

$$\begin{array}{l} \text{Ecuación Térmica de} \\ \text{Estado del Gas Ideal:} \end{array} \quad p = k\rho T \quad (3.6)$$

$$\begin{array}{l} \text{Ecuación de Estado de la} \\ \text{Energía del Gas Ideal:} \end{array} \quad e = c_v T \quad (3.7)$$

Aquí, c_v es el calor específico a volumen constante del gas ideal, y k es la constante de gas para el aire.

⁴ Véase, por ejemplo, el capítulo 5 (General Principles) del libro: L.E. Malvern, Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium. Prentice-Hal Series in Engineering of the Physical Sciences, J.B. Reswick and W.M. Rohsenow (eds.). Prentice-Hal, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1969.

⁵ Un gas ideal es un gas teórico compuesto de un conjunto de partículas con movimiento aleatorio que no interactúan entre sí. El concepto es útil pues este gas se comporta según una ecuación de estado sencilla.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Bajo las hipótesis expresadas por las *ecuaciones constitutivas*⁶ (3.4), (3.5), (3.6) y (3.7), las ecuaciones de balance generales se reducen a las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones constituyen el soporte teórico para el estudio de la dinámica de la atmósfera.

Las ecuaciones de Navier-Stokes forman un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, no lineales y acopladas, y para resolverlas, ya sea en forma analítica o en forma numérica, se requiere especificar las condiciones iniciales y de frontera apropiadas para el problema particular en cuestión. Cabe observar, sin embargo, que el carácter tridimensional y no-lineal de estas ecuaciones, ha sido uno de los obstáculos más serios para resolverlas analíticamente, y sólo se conocen soluciones para muy pocos problemas de la dinámica de los fluidos viscosos⁷. Su aplicación para el estudio de la dinámica atmosférica se enfrenta, además, con otros obstáculos, tales como dificultades para la especificación tanto de las condiciones iniciales como de las condiciones a la frontera, las que pocas veces pueden considerarse estacionarias. Además, si la región de la atmósfera que es de interés se encuentra en la capa límite planetaria⁸, pues entonces la situación física se vuelve más compleja debido a que ahí se desarrolla y permanece confinada la turbulencia atmosférica, y las ecuaciones de Navier-Stokes no son ya de mucha utilidad, pues éstas sólo han mostrado ser válidas bajo condiciones de flujo laminar (no turbulento). De hecho, como se sabe, para los flujos con carácter turbulento no existe, hasta ahora, una teoría suficientemente satisfactoria⁹.

No obstante estas dificultades, los principios físicos básicos expresados por las ecuaciones de la dinámica de los fluidos viscosos permiten desarrollar modelos más específicos, e interpretar y predecir varios de los procesos importantes que tienen lugar en la atmósfera terrestre. Los investigadores atmosféricos, sin embargo, no pueden realizar experimentos controlados sobre la atmósfera a gran escala. La metodología científica ordinaria, aquella de observar los fenómenos, formular hipótesis, probarlas en el laboratorio, luego formular hipótesis revisadas y mejoradas, y así sucesivamente, no puede ser aplicada de manera

⁶ Las ecuaciones constitutivas de un material (o, mejor dicho, de una clase particular de materiales) son relaciones entre sus propiedades macroscópicas, cuyas expresiones analíticas específicas dependen de la constitución interna del material y, por ende, en una teoría fenomenológica, donde se ignora la estructura interna de la materia, sólo pueden ser determinadas a través del experimento.

⁷ Véase la sección 23, página 75, del libro: L.D.Landau & E.M.Lifshitz, *Fluid Mechanics*, Volume 6 of Course of Theoretical Physics, Second English Edition, Pergamon Press, New York, 1987. Véase también la sección 1.3 del libro: A.W. Date, *Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

⁸ La capa límite planetaria es aquella parte de la tropósfera que se extiende desde la superficie terrestre hasta alturas máximas de uno o dos kilómetros. Es en esta capa donde ocurren los efectos de fricción con la superficie de la tierra, desarrollando turbulencia. Su altura varía de manera importante con la localidad y la hora del día. El espesor de la capa límite planetaria crece durante el día a medida que la turbulencia se incrementa y disminuye durante la noche cuando la turbulencia se amortigua y una inversión de temperatura puede estar presente.

⁹ Véanse, por ejemplo, los comentarios presentados al final de la sección 6.3 (pp. 302-304) del libro: L.E. Malvern, *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. Prentice-Hal Series in Engineering of the Physical Sciences, J.B. Reswick and W.M. Rohsenow (eds.). Prentice-Hal, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1969.

directa. En lugar de eso, una vez que un fenómeno atmosférico es descubierto, quizá mediante la organización, clasificación y análisis de numerosos datos, se desarrollan modelos que sólo incorporan representaciones de aquellos procesos que los científicos consideran como los más importantes para la producción del fenómeno. Estos modelos actúan como atmósferas sustitutas, sobre las que pueden realizarse experimentos mentales o simulaciones numéricas. El desempeño del modelo atmosférico considerado (y por ende de la precisión y representatividad de las hipótesis utilizadas para su formulación) se determina por comparación del comportamiento modelo contra el comportamiento real (que se observa) de la atmósfera.

Para el estudio de la dinámica atmosférica se utiliza, por lo general, una serie jerarquizada de modelos. Se inicia con modelos simples que proporcionan estimaciones gruesas, y se continúa con modelos que van de la complejidad intermedia hasta los modelos de circulación general¹⁰ altamente complejos y que requieren de grandes recursos computacionales. Los modelos más simples, que con frecuencia pueden ser investigados de manera exhaustiva y analítica, proporcionan una intuición física básica que puede luego ser utilizada para la interpretación de los resultados de los modelos más complejos. Debido a su gran simplicidad, sin embargo, no puede esperarse que los modelos gruesos proporcionen resultados muy precisos sobre el comportamiento de la atmósfera.

Históricamente, el uso principal que se les ha dado a los modelos más completos ha sido para el pronóstico del tiempo, pero con el creciente desarrollo de la tecnología de las computadoras, el pronóstico climático¹¹ a largo plazo también se venido convirtiendo en un objetivo viable; los modelos usados para este propósito, sin embargo, aún no son suficientemente adecuados en algunos aspectos¹². Con frecuencia, los modelos complejos se usan también para la asimilación de datos, pues proporcionan un método dinámico y auto-consistente para la interpolación espacial y temporal entre escasos puntos de datos que provienen de varias fuentes. La asimilación de datos tiene como objetivo proporcionar una estimación precisa de la evolución temporal y en tres dimensiones del

¹⁰ La circulación general (o circulación global) se refiere a los patrones promedio de circulación atmosférica a escala muy grande que resultan de los gradientes térmicos y de presión que ocurren a esa misma escala. Estos son forzados por las grandes diferencias de radiación solar entrante y radiación terrestre saliente que existen entre el ecuador y los polos. La circulación general evoluciona significativamente de manera estacional, así ésta resulta más intensa en las latitudes medias y altas durante el invierno que en el verano, por ejemplo, en respuesta al contraste térmico más fuerte que existe de los trópicos al polo en la estación invernal.

¹¹ La diferencia entre el estado del tiempo (weather) y el clima (climate) radica en lo siguiente: El estado del tiempo describe las condiciones en que se encuentra la atmósfera en un momento dado o en un periodo de tiempo muy corto (del orden de horas o un día). El estado del tiempo puede cambiar repentinamente y las condiciones a las que se refiere pueden ser lluvia, neblina, viento, temperatura, nubosidad, insolación, etc. El clima, por su parte, describe condiciones promedio del estado del tiempo de largo plazo o sobre un área geográfica relativamente grande. Las condiciones climáticas de una región resultan del promedio del estado del tiempo sobre periodos de un año o más. El clima cambia muy lentamente, en décadas, siglos o miles de años.

¹² Véase, por ejemplo, el Capítulo 9 del libro: D. G. Andrews, *An Introduction to Atmospheric Physics*, Cambridge University Press, New York, 2010.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

estado de la atmósfera, y hoy en día es un componente indispensable en el proceso de pronóstico del tiempo.

El objetivo de este trabajo no se ubica en el pronóstico del tiempo o del clima; se trata de una meta más modesta, se pretende solamente realizar un estudio de taxonomía del viento local de la Ciudad de México en términos de la información de velocidad y dirección del viento que proporcionan las estaciones meteorológicas distribuidas en esta zona. Para ello, se quiere realizar un proceso de análisis que implica la caracterización, organización y clasificación de los eventos de circulación del viento que han ocurrido en esta zona durante los años de 2001 al 2006, para tratar de identificar, luego, la existencia de patrones típicos dentro de la variedad de modalidades de circulación del viento que ahí prevalecen.

Desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, el primer paso para conseguir el objetivo arriba planteado es la reconstrucción del campo de velocidad de manera dinámicamente auto-consistente para cada evento de circulación del viento descrito por los datos disponibles. Para ello, sin embargo, utilizaremos estrategias, metodologías y herramientas sencillas y creativas que permiten un nivel de caracterización de los campos de viento adecuado para su clasificación y reconocimiento de sus patrones principales. Estas han sido desarrolladas por A. Salcido y colaboradores¹³ en la División de Energías Alternas del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), y se han utilizado también para estudiar otros problemas como la aglomeración de los centroides de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México en respuesta a los eventos de circulación del viento¹⁴; y como una forma de análisis preliminar que proporciona información de utilidad para la identificación y definición de escenarios para estudios de calidad del aire con modelos más complejos, permitiendo la validación (cualitativa, al menos) de sus resultados¹⁵.

¹³ Véanse: (1) A.T. Celada & A. Salcido, The Mexico City 2006 Wind Direction States, Proceedings of the 20th IASTED International Conference on Modelling and Simulation (MS2009), Banff, Alberta, Canada, 2009, pp. 51-58; (2) A. Salcido & A.T. Celada, A Lattice Gas Approach to the Mexico City Wind Field Estimation Problem, En: Modelling, Simulation and Optimization, Gregorio Romero Rey & Luisa Martinez Muneta (Eds), INTECH, February 2010, pp. 385-416, ISBN: 978-953-307-048-3; y (3) A. Salcido, A.T. Celada & T. Castro, A Meso- β Scale Description of Surface Wind Events in Mexico City During MILAGRO 2006 Campaign, Proceedings of the Second IASTED International Conference Environmental Management and Engineering (EME-2010), Banff, Alberta, Canada, 2010, pp. 820-827.

¹⁴ A. Salcido, A.T. Celada-Murillo, S. Carreón-Sierra & C.D. Salcido-Merino, Brief Analysis of the Spatial Clustering of the Mexico City Air Pollution Centroids during the MILAGRO 2006 Campaign. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Simulation, and Identification (MSI 2011). November 7-9, 2011 Pittsburgh, USA. pp 198-206. DOI: 10.2316/P.2011.755-022. Una copia de este artículo se ha incluido en el apéndice de Publicaciones de este documento debido a que forma parte de los trabajos en los que la autora participó durante el proceso de elaboración de su tesis.

¹⁵ D. Salcedo, T. Castro, L.G. Ruiz-Suárez, A. García-Reynoso, R. Torres-Jardón, A. Torres-Jaramillo, B.E. Mar-Morales, A. Salcido, A.T. Celada, S. Carreón-Sierra, A.P. Martínez, O.A. Fentanes-Arriaga, E. Deustúa, R. Ramos-Villegas, A. Retama-Hernández, M.I. Saavedra & M. Suárez-Lastra, Study of the Regional Air Quality South of Mexico City (Morelos State), Science of the Total Environment. En Prensa. Disponible en línea desde el 10 de Diciembre de 2011. DOI:10.1016/j.scitotenv.2011.09.041. Una copia de este artículo se

3.2. Los Modelos Celulares de Representación del Viento

Un bosquejo simple del problema del diagnóstico o reconstrucción del campo de viento puede ser como sigue: En una red de monitoreo atmosférico se miden de manera periódica y sistemática las variables meteorológicas de velocidad y dirección del viento, temperatura y presión, para un número fijo (y generalmente pequeño) de sitios distribuidos sobre una región relativamente grande y con una cierta complejidad topográfica. Con los datos de la red de monitoreo se quiere estimar la velocidad del viento $v(x,t)$ en un punto x cualquiera dentro del dominio de interés, para un tiempo dado t .

Desde la posición de la dinámica de fluidos computacional, la solución de este problema se obtiene resolviendo de manera numérica las ecuaciones diferenciales de balance para encontrar el estado estacionario¹⁶ del sistema que es consistente con las condiciones de frontera (complejidad topográfica y/o urbanística) y de comportamiento temporal asintótico (valores medidos). En la práctica, existen muchas técnicas de diagnóstico para la reconstrucción del campo de velocidad del viento a partir de los datos medidos en las estaciones de una red de monitoreo. Estas van desde el uso de modelos complejos con asimilación de datos hasta técnicas sencillas de interpolación vectorial como es el caso del método Kriging que se utiliza muy frecuentemente para estos propósitos.

Un enfoque diferente e innovador es el de los modelos de gases en redes basados en las técnicas de autómatas celulares¹⁷. Aquí, los datos disponibles de presión, temperatura y velocidad del viento se usan para calcular las funciones de distribución de estado estacionario para un número de sitios de control en la retícula del sistema, los cuales representan las posiciones de las estaciones de la red de monitoreo. Los datos topográficos y de la urbanización se usan para definir algunos dominios de sitios de la retícula del autómata a los que no pueden acceder las partículas del gas modelo. Una vez que el sistema ha sido preparado, se le permite evolucionar durante un número de pasos temporales suficiente para que el sistema alcance su estado estacionario.

En la Figura 3.1 se muestran, como ejemplo, reconstrucciones de los campos de velocidad del viento y su divergencia en la Ciudad de México para el día 17 de Febrero de 2004 en las horas 4, 8, 12, 16, 20 y 24. Las reconstrucciones se realizaron sin considerar efectos de frontera y aplicando técnicas de interpolación del tipo Kriging a los promedios horarios de los datos de velocidad del viento registrados por las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico del SIMAT.

ha incluido en el apéndice de Publicaciones de este documento debido a que forma parte de los trabajos en los que la autora participó durante el proceso de elaboración de su tesis.

¹⁶ Un estado estacionario de un sistema es aquel para el que los valores de sus propiedades son independientes del tiempo, aunque pueden cambiar con la posición.

¹⁷ Véanse: (1) A. Salcido, A.T. Celada & T. Castro, Lattice Gas Simulation of Wind Fields in the Mexico City Metropolitan Area, Proceedings of the 19th IASTED International Conference on Modelling and Simulation (MS2008), Quebec, Canada, 2008, pp. 95-100; y (2) A. Salcido & A.T. Celada, A Lattice Gas Approach to the Mexico City Wind Field Estimation Problem, En: Modelling, Simulation and Optimization, Gregorio Romero Rey & Luisa Martinez Muneta (Eds), INTECH, February 2010, 385-416, ISBN: 978-953-307-048-3.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

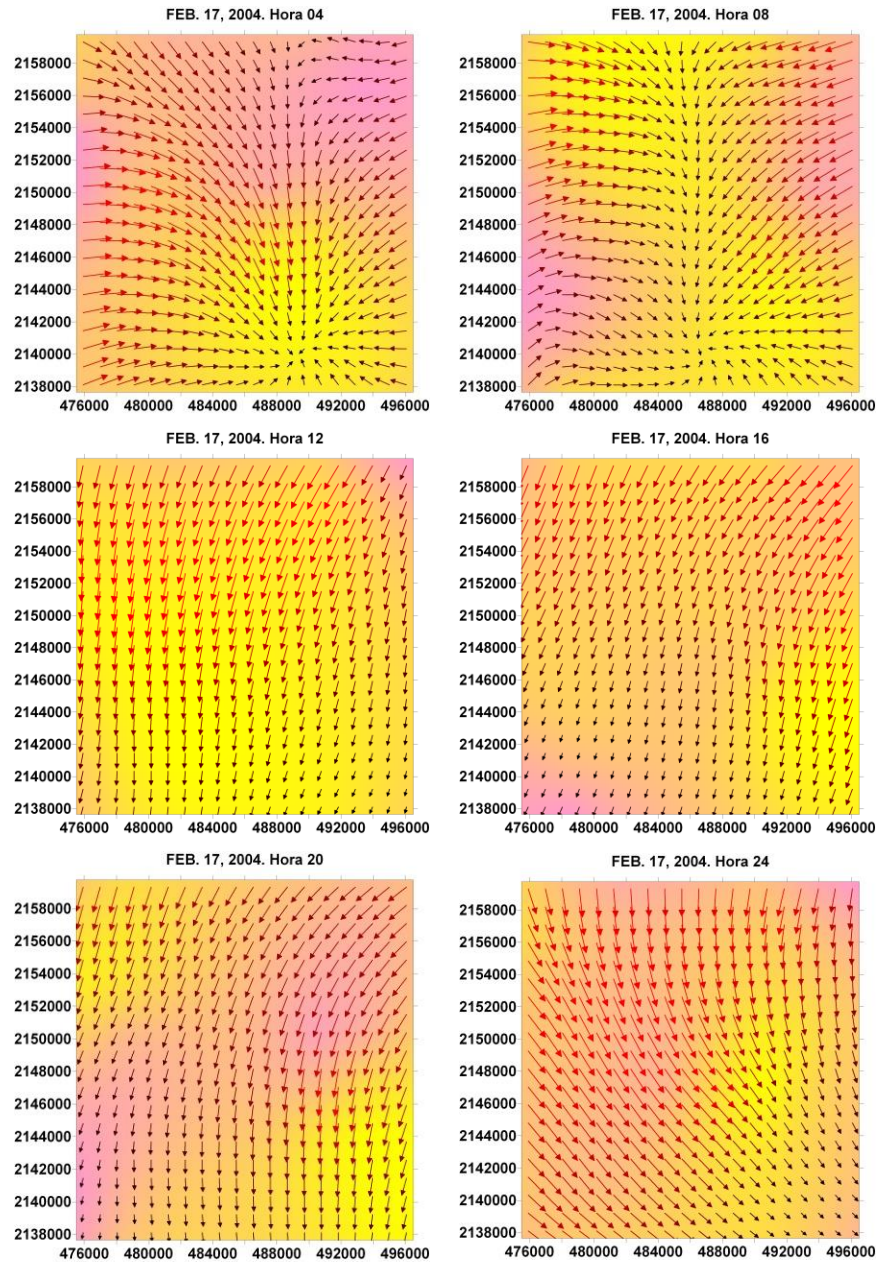


Figura 3.1. Reconstrucción de los campos de la velocidad del viento y su divergencia a nivel de superficie en la Ciudad de México, mediante técnicas de interpolación Kriging. Las coordenadas utilizadas son UTM Mercator, en metros.

En la Figura 3.2, se muestran ejemplos de los campos de viento de la Ciudad de México obtenidos por Salcido et al.¹⁸ usando modelos de gases en redes (autómatas celulares) para tres horas del día 31 de Julio de 1994.

¹⁸ A. Salcido & A.T. Celada, A Lattice Gas Approach to the Mexico City Wind Field Estimation Problem, En: Modelling, Simulation and Optimization, Gregorio Romero Rey & Luisa Martinez Muneta (Eds), INTECH, February 2010, pp. 385-416, ISBN: 978-953-307-048-3.

Los Modelos Celulares de Representación del Viento

Fecha: 31/07/1994

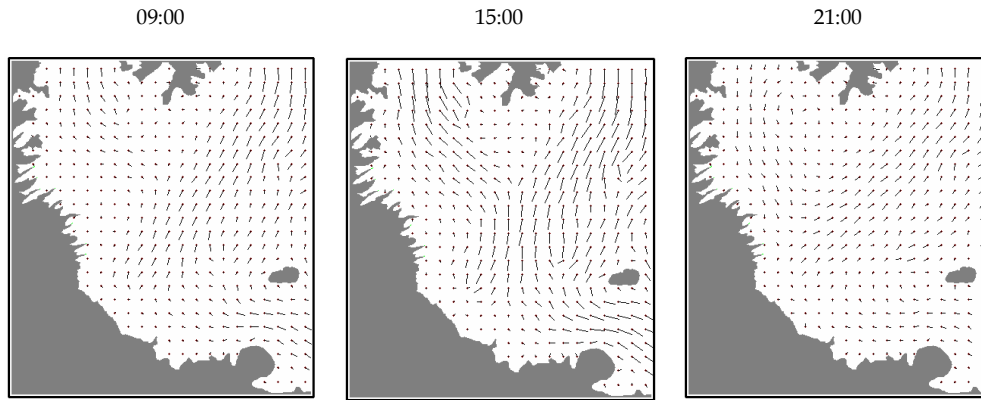


Figura 3.2. Campos de viento de la ZMCM estimados con un modelo de gas en red 2D con 9 velocidades. Los vectores de velocidad han sido representados con agujas, cada una de las cuales se extiende desde el centro de una celda de 9x9 sitios de la retícula.

Las secuencias de las Figuras 3.1 y 3.2 ilustran con cierto detalle las modificaciones que sufrieron las distribuciones espaciales de la velocidad del viento local en la Ciudad de México, a lo largo de los días indicados. Cada imagen refleja cualitativamente la enorme complejidad que, bajo la perspectiva del modelo del continuo, presenta en general la distribución espacial de la velocidad en un evento particular de circulación del viento.

En el campo de velocidad del viento $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$ se encuentra, desde luego, toda la información detallada acerca del movimiento de las masas de aire atmosférico. No obstante, siendo la velocidad del viento $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$ una variable de campo continua, existen innumerables eventos de circulación del viento, y a partir de sus estimaciones como las que se ilustran en estas figuras, no se desprende de manera sencilla y directa una forma de caracterización y clasificación de los eventos de viento, y tampoco un camino para identificar sus patrones principales. Como puede observarse en la Figura 3.1, por ejemplo, es claro que las imágenes que se muestran para las horas 16 y 20 representan situaciones de transporte que son muy similares a una cierta escala espacial, pero los campos de velocidad correspondientes, $\mathbf{v}(\mathbf{x},16)$ y $\mathbf{v}(\mathbf{x},20)$, tienen muchísimas diferencias que se incrementan a escalas cada vez más pequeñas. Algo similar ocurre con las imágenes de las horas 9 y 15 del día 31 de Julio de 1994. En ambas imágenes se observa, por ejemplo, que el viento entra a la Ciudad de México por el Norte, circundando la Sierra de Guadalupe, y sale de la ciudad por el Paso de Chalco en el Sureste; pero los campos de viento, sin embargo, son muy diferentes, particularmente en la parte central del dominio.

La forma más simple en la que se puede representar un evento de circulación del viento en un dominio dado es aquella que consiste en mapear toda la complejidad espacial de la distribución de la velocidad en su vector promedio (la velocidad media), junto con la sustitución de la evolución temporal del campo de velocidad en un periodo de tiempo dado por un objeto estadístico como la rosa de vientos. Este enfoque es utilizado muy frecuentemente en muchos estudios que sólo requieren un bajo nivel de conocimiento de la meteorología en el dominio de interés, pero no siempre es suficiente.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Una descripción de los eventos de circulación del viento ubicada entre los dos extremos antes descritos puede realizarse en términos de un modelo celular de representación de viento, tal como se describe a continuación.

Considérese como sistema una región de la capa límite planetaria que se extiende desde la superficie terrestre hasta una altura H , que es suficientemente pequeña de modo que el movimiento horizontal de las masas de aire esté bien representado por la velocidad de viento que se mide en las estaciones meteorológicas de superficie de una red de monitoreo atmosférico, como es el caso de la REDMET en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. La región atmosférica de interés se representa por un dominio reticular cartesiano de celdas (o células) idénticas distribuidas en dos dimensiones. Los números de celdas que la retícula tiene en las direcciones Oeste-Este (WE) y Sur-Norte (SN) serán denotados por N_{WE} y N_{SN} , respectivamente. La descripción del estado de circulación del viento en cualquiera de las celdas del dominio reticular se realiza en términos de los cuatro parámetros (v , θ , γ , ω) que se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros que definen el estado del viento en una celda.

<i>Parámetro</i>	<i>Significado Físico</i>
v	Magnitud del promedio espacial de la velocidad del viento en la celda.
θ	Dirección ¹⁹ del promedio espacial de la velocidad del viento en la celda.
γ	Promedio espacial de la divergencia ²⁰ del viento en la celda.
ω	Promedio espacial de la vorticidad ²¹ del viento en la celda.

De esta manera, para cada instante t , la complejidad espacial que presenta el campo de velocidad del viento en la región de interés bajo el modelo del continuo, se mapea en una matriz de estado $\xi(t)$ con $N_{WE} \times N_{SN}$ entradas del tipo $(v, \theta, \gamma, \omega)$. Esta matriz representa a la forma de circulación del viento (el estado de viento) en el dominio de interés de una manera más sencilla, aunque menos detallada, que el campo $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$. Estos conceptos y elementos constituyen lo que denominamos como *modelo celular de representación de los eventos de circulación del viento*. Así, por ejemplo, en el caso de un modelo celular de

¹⁹ Se llama dirección del viento al ángulo que indica la posición en la brújula desde la que el viento sopla, se mide en grados que se cuentan a partir del Norte ($^{\circ}N$), en la dirección del movimiento del reloj.

²⁰ La divergencia del viento es la traza de la matriz de los gradientes del campo vectorial que representa a la velocidad del viento. La divergencia de la velocidad de un fluido es una medida de la tasa de cambio del volumen del fluido, por unidad de volumen, alrededor de un punto en un momento dado. En el caso de flujo bidimensional paralelo al plano xy , la divergencia está dada por $\gamma = (\partial u / \partial x) + (\partial v / \partial y)$, donde u y v son las componentes de la velocidad a lo largo de las direcciones x e y , respectivamente.

²¹ La vorticidad del viento es el rotacional del campo vectorial que representa a la velocidad del aire: $\omega = \nabla \times \mathbf{v}$. En un punto y un instante dados, la vorticidad del fluido es el doble de la velocidad angular local de la rotación de cuerpo rígido alrededor del punto en ese momento. En el caso de flujo bidimensional paralelo al plano xy , e independiente de z , la vorticidad sólo tiene una componente, a lo largo del eje z , dada por $\omega = (\partial v / \partial x) - (\partial u / \partial y)$, donde u y v son las componentes de la velocidad a lo largo de las direcciones x e y , respectivamente.

representación de 3×3 celdas, el estado de circulación del viento en el dominio queda representado por una matriz de estado que tiene la forma,

$$\xi = \begin{array}{|c|c|c|} \hline (v, \theta, \gamma, \omega)_{11} & (v, \theta, \gamma, \omega)_{12} & (v, \theta, \gamma, \omega)_{13} \\ \hline (v, \theta, \gamma, \omega)_{21} & (v, \theta, \gamma, \omega)_{22} & (v, \theta, \gamma, \omega)_{23} \\ \hline (v, \theta, \gamma, \omega)_{31} & (v, \theta, \gamma, \omega)_{32} & (v, \theta, \gamma, \omega)_{33} \\ \hline \end{array}$$

Cabe observar que cuando N_{WE} y N_{SN} son arbitrariamente grandes ($N_{WE}, N_{SN} \rightarrow \infty$), el correspondiente modelo celular de representación no sólo no es de mucha utilidad, desde luego, sino que además está sobre-determinado, pues en tales condiciones, el conocimiento de toda la colección de los dos parámetros (v, θ) en la matriz sería equivalente a conocer el campo de velocidad, del cual podrían derivarse la divergencia y la vorticidad del viento de una manera directa. Para valores pequeños de N_{WE} y N_{SN} , sin embargo, los parámetros adicionales (γ, ω) le dan al modelo un carácter ligeramente no-local y sirven para compensar la pérdida de información derivada del proceso del promedio espacial. Así, para cada celda de la retícula, no sólo se conoce la velocidad media del viento, sino que también se sabe si la distribución local de los vectores de velocidad en el interior de la celda (distribución que ya no podemos percibir debido al filtro del promedio) presenta alguna tendencia de giro y/o convergencia, en alguna medida.

3.3. Los Estados Discretos de Circulación del Viento

En general, los cuatro parámetros $(v, \theta, \gamma, \omega)$ que definen el estado del viento en una celda son funciones de valores reales que dependen de la posición de la celda y del tiempo. Esto significa que el estado del viento en una celda puede representarse como un punto en un espacio euclídeo de 4 dimensiones, y que el conjunto de los estados posibles en principio para el viento en esa celda es infinito y no-numerable, y de hecho, isomorfo a una región de \mathbf{R}^4 . Para esto, sin embargo, conviene que los parámetros $(v, \theta, \gamma, \omega)$ sean sustituidos por $(u_x, u_y, \gamma, \omega)$, donde (u_x, u_y) son las componentes horizontales de la velocidad del viento²². En este espacio, la *distancia* entre dos estados de viento ε_1 y ε_2 es

$$d(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \sqrt{(u_{x2} - u_{x1})^2 + (u_{y2} - u_{y1})^2 + (\gamma_2 - \gamma_1)^2 + (\omega_2 - \omega_1)^2} \quad (3.8)$$

Por su parte, el estado del viento en todo el dominio reticular (la unión de todas las celdas) viene representado como un punto en un espacio euclídeo de $4N$ dimensiones, siendo $N = N_{WE} \times N_{SN}$, el número total de celdas que integran el dominio; y el conjunto de los estados posibles en principio para este dominio es isomorfo a una región de \mathbf{R}^{4N} .

Para simplificar el análisis de la estadística de los estados de circulación del viento que pueden ocurrir en una zona de interés, resulta entonces conveniente expresar los valores de los parámetros $(v, \theta, \gamma, \omega)$ en términos de escalas discretas y finitas con S_v, S_θ, S_γ y S_ω

²² Si los ejes cartesianos X y Y del sistema de referencia se extienden a lo largo de la direcciones WE y SN, entonces se tiene que $u_x = -v \sen \theta$ y que $u_y = -v \cos \theta$.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

niveles, respectivamente, permitiendo mapear las innumerables posibilidades de los eventos de viento en un conjunto de estados finito y discreto, con un total de estados por celda del dominio dado por $S=S_v \times S_{\theta} \times S_{\gamma} \times S_{\omega}$. A los estados de viento expresados de esta manera les llamaremos *estados discretos de circulación del viento*, o simplemente estados de viento cuando en el contexto sea claro que están expresados en términos de escalas discretas y finitas.

Por ejemplo, si consideramos el caso en que: (a) la magnitud de la velocidad del viento se expresa en términos de una escala como la de Beaufort, tomando, digamos, solamente sus primeros diez niveles (Tabla 3.2), (b) la dirección del viento se expresa en la escala de ocho niveles definidos por los sectores cardinales N=0, NE=1, E=2, SE=3, S=4, SW=5, W=6 y NW=7, (c) la divergencia se expresa en una escala de tres valores (-1, 0, 1), permitiendo distinguir sólo entre vientos de carácter local convergente, paralelo y divergente, respectivamente, y (d) la vorticidad se expresa también en una escala de tres valores (-1, 0, 1), permitiendo distinguir sólo entre vientos de carácter local anticiclónico, sin vorticidad y ciclónico, respectivamente, entonces el número total de estados en una celda será solamente de 720 ($=10 \times 8 \times 3 \times 3$), y de 720^N para el sistema con N celdas.

Tabla 3.2. Primeros Niveles de la Escala de Viento de Beaufort (Límites de la Rapidez del Viento a 10 m)*

<i>Fuerza</i>	<i>Nudos</i>	<i>m/s</i>	<i>Denominación</i>
0	$0 \leq v < 1$	$0 \leq v < 0.2$	Calma
1	$1 \leq v < 3$	$0.2 \leq v < 1.5$	Ventolina
2	$3 \leq v < 6$	$1.5 \leq v < 3.5$	Ligero
3	$6 \leq v < 10$	$3.5 \leq v < 5.5$	Suave
4	$10 \leq v < 16$	$5.5 \leq v < 8.0$	Moderado
5	$16 \leq v < 21$	$8.0 \leq v < 10.7$	Fresco
6	$21 \leq v < 27$	$10.7 \leq v < 13.9$	Fuerte
7	$27 \leq v < 33$	$13.9 \leq v < 17.1$	Muy fuerte
8	$33 \leq v < 40$	$17.1 \leq v < 20.8$	Ventarrón
9	$40 \leq v < 47$	$20.8 \leq v < 24.5$	Ventarrón Fuerte

* Resolución 9, International Meteorological Committee, París 1946.

En la Figura 3.3, usando para la Ciudad de México un modelo celular de representación del viento con una retícula de 2×2 , se ilustran esquemáticamente los estados del viento en los cuadrantes NE, NW, SW y SE de la ciudad, para la cuarta hora del día 17 de Febrero de 2004. Aquí, el centro del dominio celular coincide con el Zócalo capitalino. En los esquemas, el círculo pequeño con un número en su interior indica la fuerza de Beaufort del viento, el círculo grande orientado indica la vorticidad, y las dos flechas indican, en conjunto, la dirección y la divergencia del viento. En esta figura se muestran los estados (1, 1, -1, 1), (1, 7, -1, -1), (1, 6, -1, -1) y (1, 1, -1, 1) para los cuadrantes NE, NW, SW y SE de la ciudad, respectivamente. Se muestra también la matriz de estado del sistema, que corresponde a uno de los 720^4 estados posibles para todo el sistema.

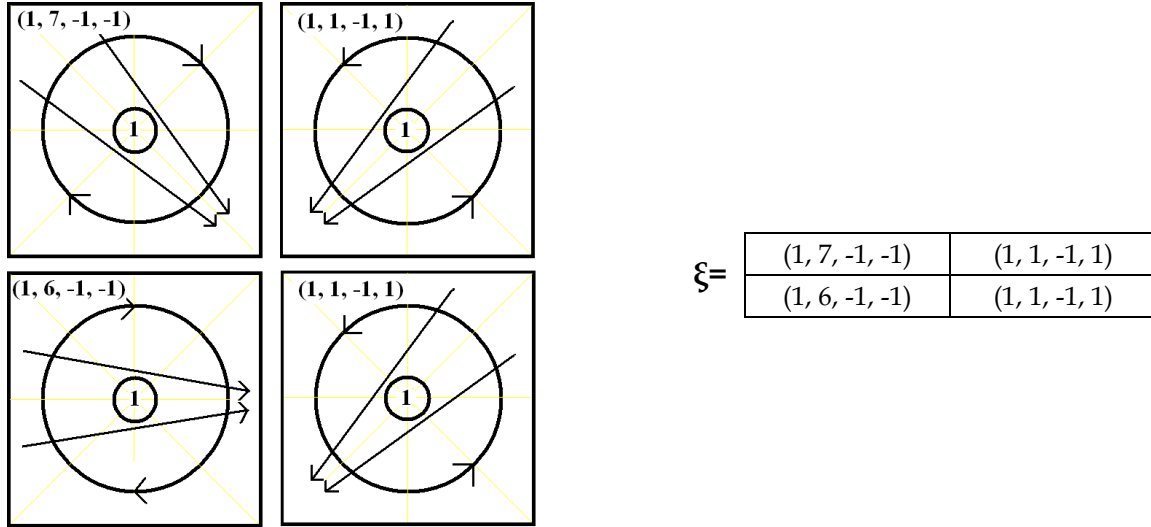


Figura 3.3. Ilustración esquemática de los estados de circulación del viento en los cuadrantes de la Ciudad de México para la hora 04 del 17 de Febrero de 2004, en términos de un modelo celular de representación con una retícula de 2x2.

Para la identificación de los estados discretos de viento puede usarse el conjunto de los cuatro parámetros $(v, \theta, \gamma, \omega)$, pero en ocasiones conviene identificar cada estado con un entero no-negativo que se le asigna de acuerdo con alguna regla preestablecida. Si los conjuntos de niveles de las escalas discretas de la divergencia y la vorticidad (las cuales incluyen valores negativos) se mapean, respectivamente, en los conjuntos de los enteros no-negativos $(0, 1, 2, \dots, S_\gamma - 1)$ y $(0, 1, 2, \dots, S_\omega - 1)$, digamos, por ejemplo, $(-1, 0, 1) \rightarrow (0, 1, 2)$, cada uno de los estados discretos puede identificarse con un número entero no-negativo ε mediante una regla como la siguiente

$$\varepsilon = \omega + S_\omega [\gamma + S_\gamma (\theta + S_\theta v)] \quad (3.9)$$

donde los parámetros $(v, \theta, \gamma, \omega)$ están expresados, respectivamente, en las siguientes escalas $(0, 1, 2, \dots, S_v - 1)$, $(0, 1, 2, \dots, S_\theta - 1)$, $(0, 1, 2, \dots, S_\gamma - 1)$ y $(0, 1, 2, \dots, S_\omega - 1)$. Usando esta notación, la matriz de estado presentada en la Figura 3.3 toma la forma siguiente:

$$\xi = \begin{array}{|c|c|} \hline 135 & 83 \\ \hline 126 & 83 \\ \hline \end{array}$$

Una de las ventajas de la representación de los eventos de circulación del viento en términos de un modelo celular cuyos parámetros $(v, \theta, \gamma, \omega)$ se expresan mediante escalas discretas y finitas es que las innumerables posibilidades de la distribución espacial de la velocidad en cada celda se reducen a un número finito y relativamente pequeño de estados. Esto hace posible la determinación de las frecuencias o probabilidades de ocurrencia de los estados posibles para un periodo de tiempo dado de una manera relativamente simple. Bajo la perspectiva de esta innovadora forma de caracterizar los eventos de circulación del viento, el proceso de clasificación de los estados de viento y la identificación de sus posibles patrones, se presenta como una tarea viable y sencilla.

3.4. Los Estados de Dirección del Viento

El *estado de dirección del viento* (EDV) es una versión reducida del concepto de estado de circulación del viento de un modelo celular. Este está definido por el conjunto de las direcciones de viento asignadas a las celdas del dominio en términos de una escala finita y discreta. Si se considera la escala de dirección del viento de ocho niveles (N=0, NE=1, E=2, SE=3, S=4, SW=5, W=6 y NW=7), entonces un estado de dirección del viento puede ser identificado por un número octal de N dígitos, siendo N el número de celdas del dominio reticular del modelo, y el número total de estos estados del sistema será 8^N . De esta manera, si consideramos un modelo celular con una retícula de 2×2 celdas, dividiendo, por ejemplo, el dominio de interés en los cuadrantes NE, NW, SW, y SE con respecto a un origen dado, los posibles estados de dirección del viento son 4096 y pueden identificarse con los números octales que van del 0000 al 7777 (o su equivalente decimal), donde cada dígito octal indica (en la escala discreta) la dirección del viento en uno de los cuadrantes, de acuerdo con alguna asignación particular convenida.

Para el ejemplo de la matriz de estado de la Figura 3.3, el estado de dirección del viento al que se reduce esta matriz es 1761, donde el dígito octal de orden mayor corresponde a la dirección del viento en cuadrante NE, siguiéndole los dígitos de orden decreciente indicando las direcciones de viento en los cuadrantes NW, SW y SE, respectivamente. En la Tabla 3.3 se muestra una representación visual de utilidad.

Tabla 3.3. Representación Visual de un Estado de Dirección del Viento de la Ciudad de México.

Fecha: 17/02/2004 Hora: 04											
Estado de Viento ($v, \theta, \gamma, \omega$)	EDV = Estado de Dirección del Viento										
	EDV OCTAL	EDV DECIMAL	EDV Representación Visual								
<table border="1"> <tr> <td>135</td> <td>83</td> </tr> <tr> <td>126</td> <td>83</td> </tr> </table>	135	83	126	83	1761	1009	<table border="1"> <tr> <td>↘</td> <td>↙</td> </tr> <tr> <td>→</td> <td>↙</td> </tr> </table>	↘	↙	→	↙
135	83										
126	83										
↘	↙										
→	↙										

3.5. Las Densidades de Estados de Viento

El uso de un modelo celular para representar los eventos de circulación del viento de una región de interés permite reducir las infinitas modalidades de la estructura de la distribución espacial del flujo del viento a un conjunto finito y discreto de estados del viento (o, en la versión más simple del modelo, de estados de dirección del viento). No todos los estados del conjunto, sin embargo, pueden ser observables, e incluso algunos podrían ser simplemente imposibles desde un punto de vista físico. La posibilidad de que un estado dado sea observable en la región de interés depende de la topografía del terreno y de otras forzantes del viento que puedan existir en esa región, tales como el comportamiento de los vientos a gran escala, las latitudes donde se ubica la región de interés (el comportamiento de los vientos en los trópicos es diferente del que se observa en zonas de latitudes altas, o cerca de los polos, por ejemplo).

Los Modelos Celulares de Representación del Viento

Las distribuciones de frecuencias de los estados de viento constituyen una forma conveniente para identificar los estados que pueden ser observados en el área de estudio, y también para obtener una estimación de sus probabilidades de ocurrencia bajo diferentes condiciones, tales como la hora del día, la presencia o ausencia de luz solar, la estación del año, las temporadas de lluvia o secas, o simplemente para ciertos periodos de tiempo específicos de utilidad para ciertos estudios. Estas distribuciones de frecuencias, expresadas de una manera normalizada, se denominan como las *densidades de estados de viento* dentro del contexto de los modelos celulares de representación.

A manera de ejemplo, en la Figura 3.4 se presenta la distribución de frecuencias de los estados de dirección del viento que ocurrieron en la Ciudad de México durante el mes de Marzo de 2006, mismo en el que se realizó la campaña MILAGRO en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)²³. En este periodo, que comprende un total de 744 eventos de viento horarios, se observaron 308 EDVs diferentes de las 4096 posibilidades. Los cinco estados con las frecuencias más altas fueron: 0 [0000], 939 [1653], 8 [0010], 2340 [4444] y 521 [1011], con frecuencias de ocurrencia de 5.0, 3.1, 3.0, 1.9 y 1.6%, respectivamente. Aquí se indica primero el identificador del estado en notación decimal, seguido por la expresión octal colocada entre paréntesis cuadrados. De estos estados, tres representan vientos que tienen una componente de flujo del Norte (0, 8 y 521); de los otros dos, uno (el 2340) representa viento del Sur, y el otro (el 939) representa vientos altamente convergentes que ocurrieron el 3.1% de las 744 horas del periodo de la campaña MILAGRO. Los vientos con componentes del Norte ocurren con frecuencia en la Ciudad de México debido, entre otros factores, a la existencia de una apertura topográfica hacia la planicie mexicana en el cuadrante NE y al paso de Chalco en el cuadrante SE, que definen un canal que puede conducir el flujo en dirección N-S.

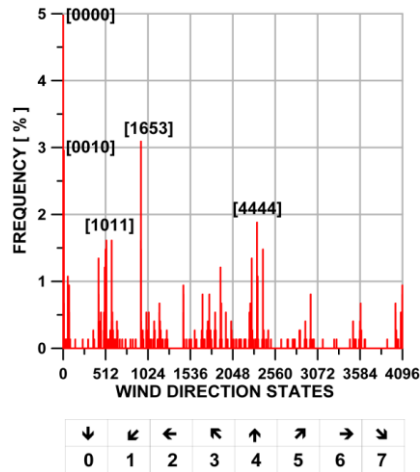


Figura 3.4. La Densidad de Estados de Dirección del Viento de la Ciudad de México correspondiente al mes de Marzo de 2006.

²³ La información que se proporciona en este ejemplo fue extraída del artículo: A. Salcido, A.T. Celada-Murillo, S. Carreón-Sierra & C.D. Salcido-Merino, Brief Analysis of the Spatial Clustering of the Mexico City Air Pollution Centroids during the MILAGRO 2006 Campaign. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Simulation, and Identification (MSI 2011). November 7-9, 2011 Pittsburgh, USA. pp 198-206. DOI: 10.2316/P.2011.755-022.

3.6. Análisis de Conglomerados y Taxonomía del Viento

Las clases, o grupos conceptualmente significativos de objetos que comparten características comunes, juegan un papel importante en cómo la gente analiza y describe el mundo. En el contexto de la comprensión de los datos, los conglomerados²⁴ son clases potenciales y el análisis de conglomerados es el estudio de las técnicas para encontrar clases de manera automática. El análisis de conglomerados²⁵ es el nombre genérico que se da al conjunto de métodos, procedimientos y algoritmos que se utilizan para crear una clasificación de manera numérica y automática. Estos procedimientos forman, empíricamente, conglomerados de objetos altamente similares de acuerdo con algún criterio dado. Más específicamente, un método de conglomeración²⁶ es un procedimiento estadístico multivariado que se inicia con un conjunto de datos que contiene información sobre una muestra dada de objetos, e intenta reorganizarlos en conglomerados relativamente homogéneos. Así, el análisis de conglomerados proporciona una abstracción de los objetos de datos individuales a los conglomerados en los que estos objetos residen.

El análisis de conglomerados agrupa objetos de datos con base únicamente en la información encontrada en los datos que describen a los objetos y sus relaciones. El objetivo es que los objetos dentro de un conglomerado sean similares (vinculados) unos a otros, o a un objeto dado que define al conglomerado, en alguna medida previamente definida, y diferentes (desvinculados) de los objetos de los otros conglomerados.

El primer paso de este proceso consiste en decidir cuáles son las características que se usaran para identificar a los objetos, es decir cuáles serán las variables de conglomeración que se usaran en el análisis. Entonces, el objetivo del análisis de conglomerados es identificar grupos de objetos que son muy parecidos con respecto a las variables seleccionadas y organizarlos en cúmulos (clusters). Después de definir cuáles serán estas variables, se requiere decidir sobre el procedimiento de conglomeración que se usará para formar los grupos de objetos. Este es un paso crucial para el análisis, pues diferentes procedimientos requieren diferentes decisiones previas al análisis; además, existen muchos procedimientos pero muy poca guía acerca de cuál usar en la práctica. Los procedimientos usados más frecuentemente son: los *métodos jerárquicos*, los *métodos particionantes (k-means)*, y la *conglomeración de dos pasos*, que es en gran medida una combinación de los dos primeros métodos. Cada uno de estos procedimientos sigue una forma diferente de agrupar los objetos más similares en un cúmulo y para determinar la membresía de cúmulo de cada objeto. Dicho de otra manera, en tanto que un objeto en un cluster dado debe ser tan similar como sea posible a los demás objetos del cluster, debe también ser tan diferente como sea posible de los objetos de otros clusters.

²⁴ Con mucha frecuencia se utilizan las palabras *conglomerado*, *aglomerado*, *cúmulo* o *grupo* como equivalentes en español al término *cluster* del inglés.

²⁵ Cluster analysis, en inglés.

²⁶ Usamos el término conglomeración (clustering, en inglés) en el sentido de formación de conglomerados y también para designar un conjunto de conglomerados.

Una conglomeración particional es simplemente una partición²⁷ del conjunto de objetos de datos. Si se permite que los conglomerados tengan subconglomerados, entonces se obtiene una conglomeración jerárquica, que es un conjunto de conglomerados anidados que están organizados como un árbol. Cada nodo (conglomerado) en el árbol (excepto por los nodos hojas) es la unión de sus hijos (subconglomerados), y la raíz del árbol es el conglomerado que contiene a todos los objetos. Con frecuencia, pero no siempre, las hojas del árbol son conglomerados *solitones*; es decir, son conglomerados que contienen solamente un objeto de datos.²⁸ Nótese que una conglomeración jerárquica puede verse como una secuencia de conglomeraciones particionales y una conglomeración particional puede obtenerse cortando el árbol jerárquico a un nivel particular.

Algunos métodos, principalmente los métodos jerárquicos, requieren la especificación acerca de en qué medida son similares o diferentes los objetos a fin de que puedan ser identificados los diferentes cúmulos. Es decir, para el análisis de conglomerados se requiere contar con una medida de distancia entre parejas de objetos.

Un problema importante en la aplicación del análisis de conglomerados es la decisión acerca de cuántos clusters deberían ser obtenidos de los datos. Sin embargo, esto es algo que usualmente no sabemos. Por un lado, contar con tan pocos clusters como sea posible los hace fácil de entender y procesar. Por el otro lado, tener muchos clusters permite identificar más patrones y diferencias más sutiles entre patrones.

En el paso final, se requiere interpretar la solución definiendo y etiquetando los cúmulos obtenidos. Esto puede realizarse examinando los valores medios de las variables de conglomeración o identificando las variables que explican el perfilamiento de los cúmulos. Este último paso requiere también una evaluación de la estabilidad y validez de la solución de conglomeración.

Existen numerosos procedimientos para la construcción de una conglomeración a partir de un conjunto de objetos de datos dado. Una discusión de estos procedimientos y sus algoritmos puede encontrarse en cualquier texto de análisis de conglomerados.²⁹

La Figura 3.5 resume los pasos principales del proceso del análisis de conglomerados. En los párrafos siguientes se proporcionan algunos detalles de cada paso, aunque orientando la presentación hacia los aspectos de relevancia para la investigación objeto de este trabajo.

²⁷ En matemáticas, una partición de un conjunto es una colección de subconjuntos de ese conjunto, tal que los subconjuntos son ajenos y la unión de ellos es el conjunto original.

²⁸ El término usado en inglés para denominar a estos conglomerados es *singleton clusters*.

²⁹ Véanse, por ejemplo: (1) M.S. Aldenderfer & R.K. Blashfield, *Cluster Analysis*, SAGE Publications. The Publishers of Professional Social Sciences. Newbury Park, CA, 1984, Quinta impresión, 1988. (2) H.C. Romesburg, *Cluster Analysis for Researchers*, Lulu Press, North Carolina, 2004. (3) B.S. Everitt, S. Landau & M. Leese, *Cluster Analysis*, Arnold, London, 2001, Fourth Edition. (4) L. Kaufman & P.J. Rousseeuw, *Finding Groups in Data. An Introduction to Cluster Analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics, Wiley-Interscience, Hoboken, N.J., 2005.

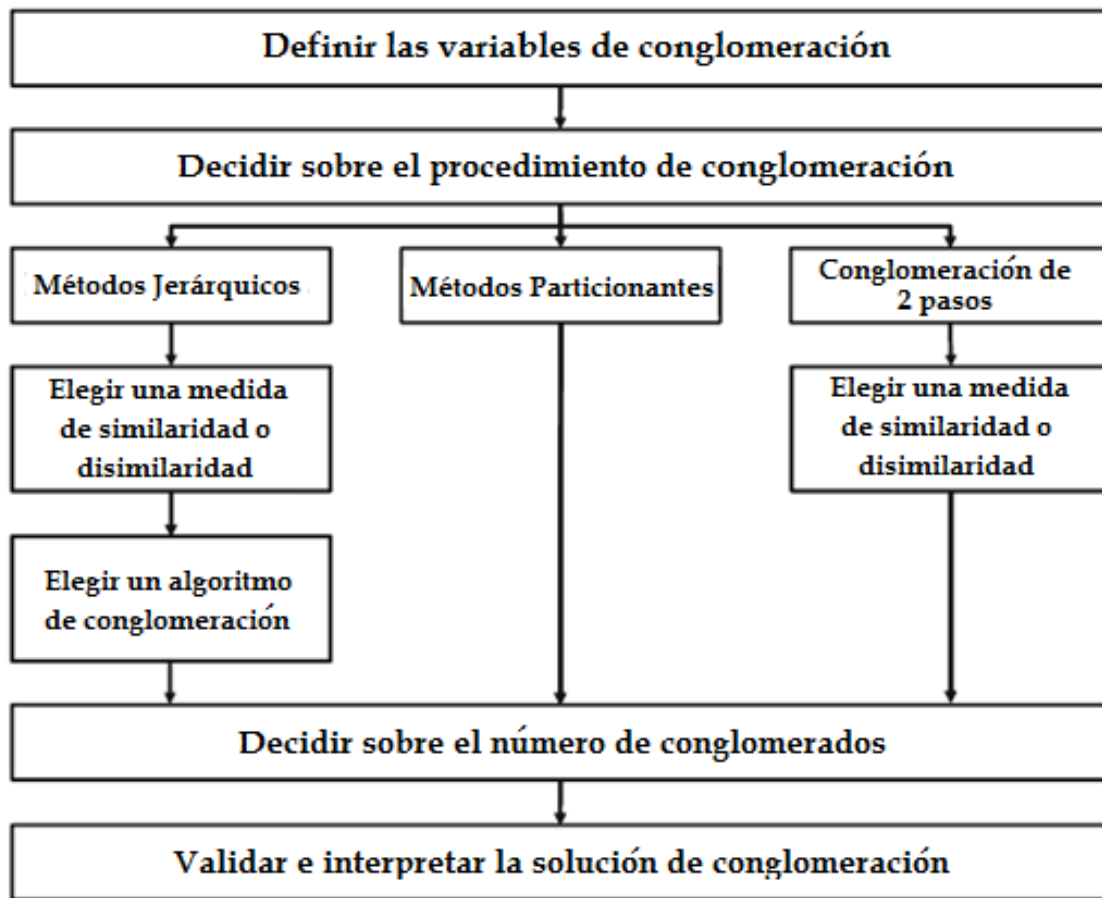


Figura 3.5: Principales pasos del análisis de conglomerados.

3.6.1. Las Variables de Conglomeración

Los objetos de interés en esta investigación son los estados de viento de una zona urbana (la Ciudad de México); es decir, los eventos de viento urbano vistos desde la perspectiva de un modelo celular de representación a escala meso- β . En el caso del modelo de una celda, cada estado de viento se describe en términos de cuatro parámetros: las componentes horizontales de la velocidad del viento, (u_x, u_y) , y la divergencia y la vorticidad de ésta, (γ, ω) . Desde el punto de vista de los modelos celulares, estos cuatro parámetros describen la condición dinámica del viento: (u_x, u_y) indican hacia dónde y con qué rapidez se traslada la masa de aire contenida en la celda, mientras que la divergencia indica si las líneas de corriente tienden a separarse o juntarse a partir del centro de la celda y en la dirección del movimiento, y la vorticidad (rotacional de la velocidad) indica si el vector de viento, descrito por (u_x, u_y) , tiende a sufrir una rotación a medida que se traslada la masa de aire. Estos parámetros presentan independencia lineal y su número es pequeño en comparación con el número de los objetos sobre los que se aplica el análisis de conglomerados, y pueden, entonces, usarse como las variables de conglomeración.

3.6.2. El Procedimiento de Conglomeración

Existen muchos procedimientos de conglomeración diferentes y también muchas formas de clasificarlos.³⁰ Una distinción práctica es la diferenciación entre los métodos jerárquicos y particionantes, los cuales se discutirán en los siguientes párrafos.

3.6.2.1. Métodos Jerárquicos

Los procedimientos de conglomeración jerárquica se caracterizan por la estructura de tipo árbol que se establece durante el análisis. La mayoría de los procedimientos jerárquicos caen en la categoría llamada *conglomeración aglomerante*. En esta categoría, los cúmulos se forman consecutivamente a partir de los objetos. Este tipo de procedimiento comienza considerando a cada objeto como un solitón (cúmulo de solo un objeto). Luego estos conglomerados se van fusionando secuencialmente de acuerdo con su grado de similitud. Primero, los dos más similares (es decir, aquellos conglomerados con la menor distancia de separación) se fusionan para formar un nuevo cúmulo en el nivel más bajo de la jerarquía. En el siguiente paso, otro par de cúmulos se fusionan y se asocian a un nivel más alto de la jerarquía, y así sucesivamente. Esto permite el establecimiento de una jerarquía de cúmulos de abajo hacia arriba. En la Figura 3.6 se muestra de que manera la conglomeración aglomerante asigna objetos adicionales a los cúmulos a medida que el tamaño del cúmulo se incrementa. El método de conglomeración de arriba hacia abajo, llamado *conglomeración divisiva*, también es considerado para ciertas aplicaciones. Este procedimiento parte del cúmulo que contiene a todos los objetos y se va dividiendo secuencialmente de acuerdo con el criterio de similitud o disimilitud.

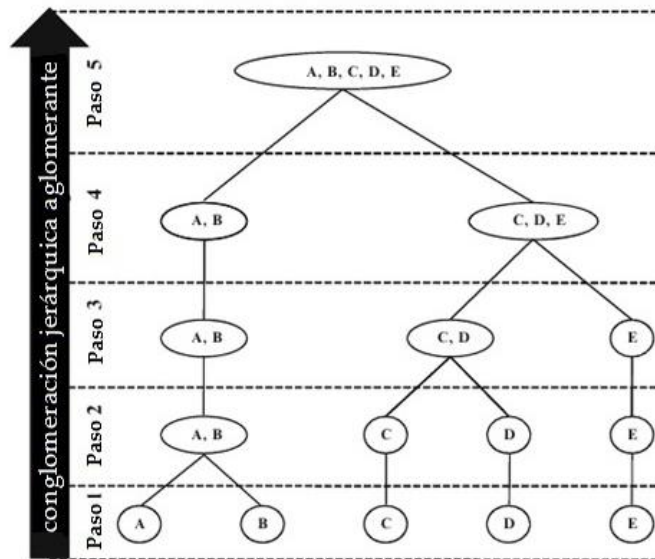


Figura 3.6. Ilustración del método de conglomeración jerárquica aglomerante.

³⁰ Para una revisión del tema, véanse: (1) Wedel M, Kamakura WA (2000) Market segmentation: conceptual and methodological foundations, 2nd edn. Kluwer, Boston, NE. (2) Dolnicar S (2003) Using cluster analysis for market segmentation –typical misconceptions, established methodological weaknesses and some recommendations for improvement. Australas J Mark Res 11(2):5–12. (3) Kaufman L, Rousseeuw PJ (2005) Finding groups in data. An introduction to cluster analysis. Wiley, Hoboken, NY

El método de conglomeración jerárquica aglomerante es el que utilizamos en este trabajo de investigación para los propósitos de identificación de los patrones de circulación del viento de la Ciudad de México.

3.6.2.2. *Las Medidas de Similaridad*

El procedimiento de conglomeración jerárquica aglomerante requiere de una definición precisa del concepto de cercanía entre conglomerados. Existen varias medidas para expresar la similaridad o disimilaridad entre dos objetos de datos. En el espacio fase definido por las variables de conglomeración³¹, cada objeto de datos está representado por un punto y existe una medida de distancia definida para cualesquiera dos objetos. Esta distancia, llamada distancia euclidiana, es la longitud de la recta que une a los dos puntos representantes de los dos objetos de datos en el espacio fase.

En el caso de nuestro estudio, los objetos de datos son los estados de vientos de la Ciudad de Mexico. La distancia entre dos de estos estados está dada por la ecuación (3.8). En términos generales, sin embargo, existen otras medidas de la cercanía entre dos objetos de datos que se usan con frecuencia en otras aplicaciones (la métrica Manhattan, que expresa la distancia entre dos objetos como la suma de los valores absolutos de las diferencias entre los valores de sus variables de conglomeración; la distancia de Chebychev, que es el máximo de las diferencias absolutas entre las variables de conglomeración de los dos objetos de datos; etc.)

3.6.2.3. *Estandarización de los Datos*

Con frecuencia, las diferentes variables de conglomeración se expresan en unidades y escalas diferentes. Por ejemplo, en el caso de los estados de viento, por un lado, dos variables son componentes de la velocidad del viento (generalmente expresadas en m/s), mientras que las otras dos variables (la divergencia y la vorticidad) son propiedades expresadas en términos de derivadas espaciales de la velocidad del viento (con unidades de 1/s); y por otro lado, en tales unidades, las dos primeras variables tienen un orden de magnitud de 10, mientras que las segundas tienen orden de magnitud de 10^{-4} . Debido a esto, el efecto de las diferencias de divergencia y vorticidad en la distancia entre dos estados de viento se verán reflejadas solamente en la cuarta o quinta cifra decimal. Esta situación puede distorsionar o enmascarar los resultados del análisis de conglomerados.

Este problema se resuelve mediante la realización de un proceso de estandarización (o normalización) de los datos, como un paso previo a la aplicación de los procedimientos de conglomeración. Varios métodos de estandarización son utilizados en la práctica, tales como la estandarización z , que realiza un re-escalamiento de cada variable de manera que tenga una media de cero y una desviación estándar de 1. En la mayoría de las situaciones,

³¹ Las variables de conglomeración son las características que definen a los objetos de datos con los que se pretende formar cúmulos. Si estas variables son reales e independientes, pueden usarse para definir un espacio euclidiano n -dimensional (donde n es el número de las variables de conglomeración) donde cada objeto de datos queda representado por un punto y la distancia entre dos puntos está definida, en general, por una generalización de la fórmula de Pitágoras. Este espacio será llamado espacio fase por analogía con el espacio fase de un sistema dinámico, donde un punto representa un estado del sistema.

sin embargo, una estandarización que re-escala cada variable para que sus valores queden restringidos entre 0 y 1, o entre -1 y 1, funcionan mejor. La estandarización de los datos se recomienda en general, aunque en algunas situaciones pueden disminuir o inflar la influencia de algunas variables en la solución de la conglomeración.

En el caso que aquí nos interesa, la estandarización de los valores de los parámetros de estado del viento se realizó mediante un proceso de normalización que los restringió entre -1 y 1. De esta manera, la distancia entre dos estados de viento, \mathbf{S}_1 y \mathbf{S}_2 , quedó expresada como sigue:

$$D(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2) = \sqrt{\Lambda^2[(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2] + \Gamma^2(\gamma_2 - \gamma_1)^2 + \Omega^2(\omega_2 - \omega_1)^2} \quad (3.10)$$

donde (u, v) son, respectivamente, las componentes Este y Norte de la velocidad del viento, (γ, ω) son la divergencia y la vorticidad, y Λ , Γ y Ω son los factores de normalización. Estos factores, en el presente estudio, fueron el valor máximo de la rapidez del viento y los máximos absolutos de la divergencia y la vorticidad, respectivamente, durante el periodo de estudio, tal como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$(u, v) \rightarrow \frac{(u, v)}{WSP_{max}}, \quad \gamma \rightarrow \frac{\gamma}{|\gamma|_{max}}, \quad \omega \rightarrow \frac{\omega}{|\omega|_{max}} \quad (3.11)$$

Estos factores de normalización permiten que los cuatro parámetros (mapeados todos en el intervalo de -1 a 1) contribuyan de manera igualmente importante en el cálculo de la distancia entre dos estados de viento.

3.6.2.4. El Algoritmo de Conglomeración

Una vez que se ha definido la distancia o medida de similitud, debe definirse el algoritmo de conglomeración que será aplicado. Existen varios procedimientos de conglomeración, los cuales se diferencian por la forma en que definen la distancia de un cúmulo recién formado a un cierto objeto, o a otros cúmulos en la solución. Los procedimientos de conglomeración aglomerativa más populares incluyen lo siguiente:

Vinculación Simple (Single Linkage): Técnica del vecino más cercano. Dados dos cúmulos A y B , la distancia entre ellos se define como la distancia entre los dos objetos vecinos, $a \in A$ y $b \in B$, más cercanos.

$$d(A, B) = \min\{d(a, b) | a \in A \text{ y } b \in B\}$$

Vinculación Completa (Complete Linkage). Técnica del vecino más lejano. Enfoque opuesto al de una sola vinculación, asume que la distancia entre dos cúmulos A y B es la mayor de las distancias entre dos objetos en los dos cúmulos, $a \in A$ y $b \in B$,

$$d(A, B) = \max\{d(a, b) | a \in A \text{ y } b \in B\}$$

Vinculación Promedio (Average linkage): La distancia entre dos cúmulos A y B se define como el promedio de las distancias entre todos los pares de objetos $a \in A$ y $b \in B$

$$d(A, B) = \text{med}\{d(a, b) | a \in A \text{ y } b \in B\}$$

Vinculación Centroide (Centroid linkage): La distancia entre dos cúmulos A y B se define como la distancia entre los centroides geométricos de los objetos de los cúmulos.

$$d(A, B) = d(C_A, C_B)$$

donde C_A y C_B son los centroides geométricos de los cúmulos A y B , respectivamente. Cada centroide representa un objeto promedio de los objetos del cúmulo; es decir, el valor de cada atributo del objeto promedio es el promedio de los valores del mismo atributo de los objetos individuales del cúmulo. El cálculo de estos centroides es sencillo cuando la distancia entre objetos es euclidiana.

El Método de Ward: En 1963, J. H. Ward³² introdujo otro tipo de método de conglomeración, donde la fusión de dos cúmulos está basada en el tamaño de un criterio de error de suma de cuadrados. El objetivo en cada etapa es minimizar el incremento en el total del *error de suma de cuadrados* interior del cúmulo, E , dado por

$$E = \sum_{m=1}^g E_m \quad (3.12)$$

donde

$$E_m = \sum_{l=1}^{n_m} \sum_{k=1}^p (x_{ml,k} - \bar{x}_{m,k})^2 \quad (3.13)$$

En lo que $\bar{x}_{m,k} = (1/n_m) \sum_{l=1}^{n_m} x_{ml,k}$ es la media de la k -ésima variable sobre los n_m objetos del m -ésimo cúmulo, siendo $x_{ml,k}$ el registro de la k -ésima variable ($k = 1, \dots, p$) del l -ésimo objeto ($l = 1, \dots, n_m$) en el m -ésimo cúmulo ($m = 1, \dots, g$).

Estos algoritmos de conglomeración tienen propiedades específicas diferentes unos de otros, y pueden, por lo tanto, producir resultados totalmente diferentes cuando se utilizan en el mismo conjunto de datos. Como el algoritmo de vinculación simple se basa en distancias mínimas, tiende a formar un cúmulo grande con los otros cúmulos que contienen sólo uno o pocos objetos cada uno. Se puede hacer uso de este "efecto en cadena" para detectar valores atípicos, ya que éstos se fusionarán con los objetos que quedan -por lo general a distancias muy grandes- en los últimos pasos del análisis. El algoritmo de vinculación simple se considera, por lo general, como el algoritmo más versátil. Por el contrario, el método de vinculación completa se ve fuertemente afectado por los valores atípicos, ya que se basa en las distancias máximas. Los cúmulos producidos por este método tienden a ser bastante compactos y estrechamente agrupados. Los algoritmos de vinculación promedio y centroide tienden a producir cúmulos con tamaños similares y una varianza baja interior del cúmulo (dada por la Ec. 3.12). Sin embargo, ambos procedimientos se ven afectados por los valores atípicos, aunque no tanto como con la vinculación completa.

³² J.H. Ward (1963). Hierarchical groupings to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, 236-244.

En el método de Ward no se realiza la combinación de los dos objetos más similares sucesivamente. En su lugar, se combinan aquellos objetos cuya fusión produce el incremento más pequeño posible en la varianza global dentro de la agrupación. Si uno espera cúmulos de tamaños similares y el conjunto de datos no incluye valores atípicos, es conveniente usar el método de Ward.

En la investigación que se reporta en este trabajo de tesis fue utilizado el método de conglomeración de Ward para la identificación de los patrones de circulación del viento en la Ciudad de México, entendiendo a estos patrones como los cúmulos de los estados de viento resultantes de un proceso de conglomeración jerárquica.

3.6.3. Sobre la Definición del Número de Conglomerados

Un aspecto importante del análisis de conglomerados es la definición del número de cúmulos o conglomerados en habrán de ser organizados los objetos de datos. Desafortunadamente, los métodos de conglomeración jerárquica sólo proporcionan una guía muy limitada para tomar esta decisión. El único indicador significativo se refiere a las distancias a las que se combinan los objetos.

Una forma habitual de visualizar el progreso del análisis de conglomerados es dibujando un dendrograma. Este es un diagrama (ver Figura 3.7) que muestra los niveles de distancia en los que ocurren las combinaciones de cúmulos.

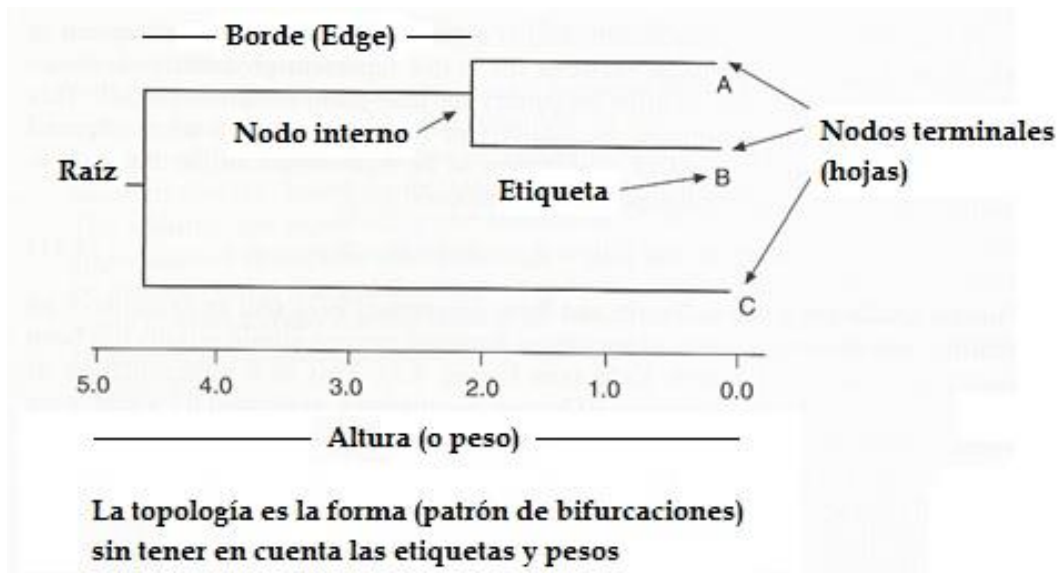


Figura 3.7. Terminología usada en la descripción de los dendrogramas.

Un dendrograma se lee partiendo de los nodos terminales (hojas) hacia la raíz (en el caso de la Figura 3.7, de derecha a izquierda). Así, en el ejemplo de la Figura 3.7, la fusión de los objetos A y B ocurre a un nivel de distancia (altura o peso) de 2.1, aproximadamente. En la Figura 3.8 se muestra un dendrograma producido con los estados de viento de la Ciudad de México del periodo de enero a marzo de 2006. La línea roja punteada muestra el nivel de distancia de Ward al que ocurre la solución de 6 cúmulos.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

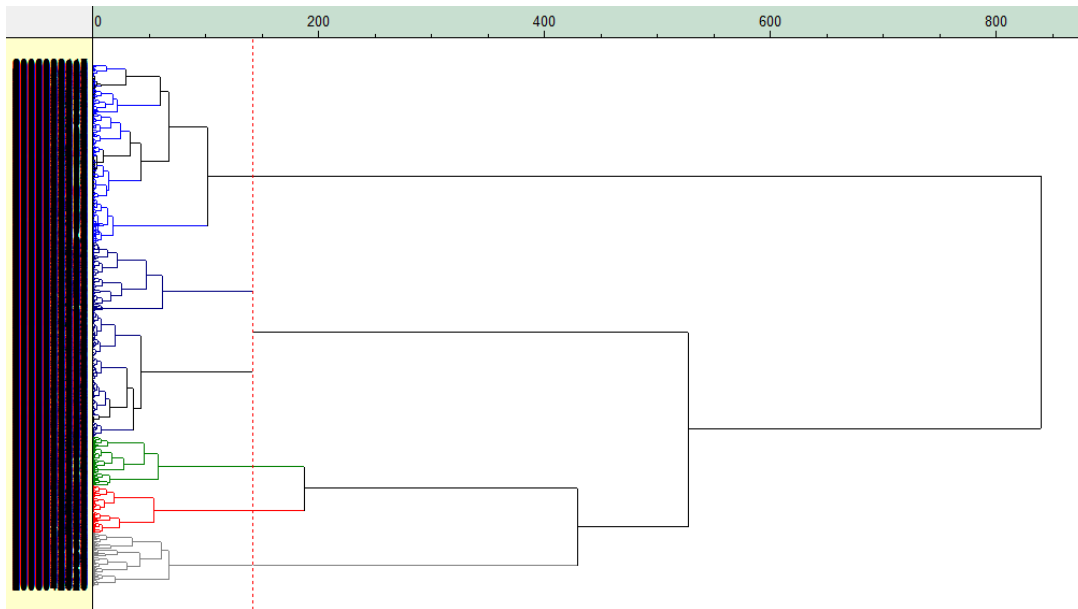


Figura 3.8. Dendrograma producido con el conjunto de los estados de viento de la Ciudad de México del periodo de enero a marzo del año 2006. Se muestra la solución de 6 cúmulos.

3.6.4. El Programa de Análisis de Conglomerados

Para los propósitos del presente trabajo de investigación, la determinación de los cúmulos correspondientes a una solución específica del análisis de conglomerados se realizó en la práctica usando una aplicación comercial (software) llamada **DataLab** (ver Figura 3.9), desarrollada por Hans Lohninger (*Software Development Lohninger & Epina Software Labs, Epina GmbH*), quien amablemente nos proporcionó este software de manera gratuita.

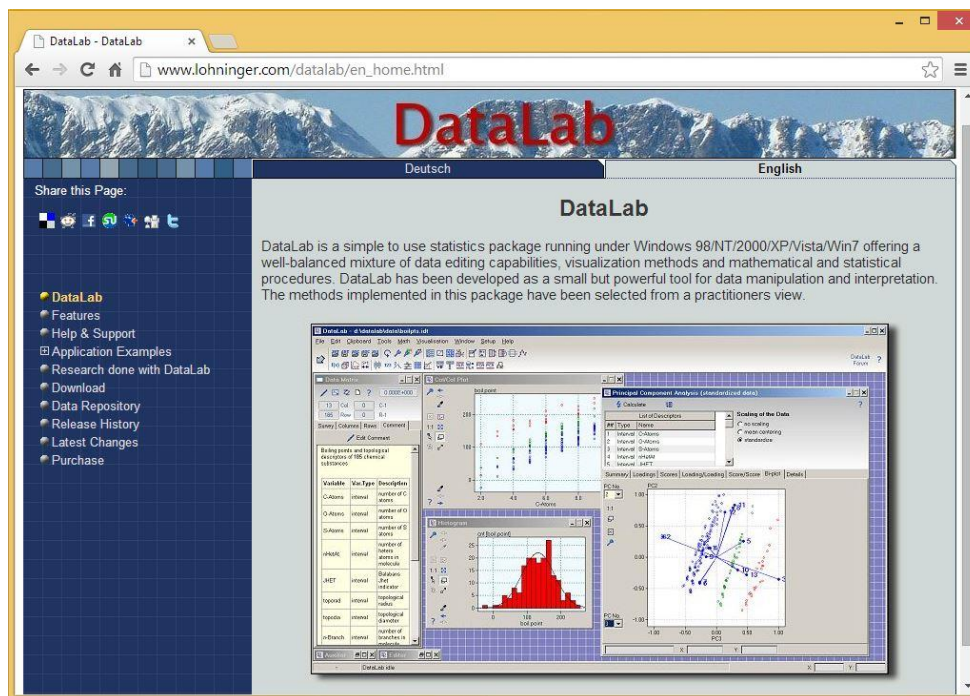


Figura 3.9. Paquete estadístico DataLab.

Los Modelos Celulares de Representación del Viento

En la Figura 3.10, se presenta una pantalla de DataLab para una corrida del análisis de conglomerados de los estados de viento de la Ciudad de Mexico. En ella se muestra la configuración elegida para el procedimiento de conglomeración. Específicamente,

- **Tipo de Vinculación:** Método de Ward.
- **Medida de Distancia:** Euclidiana.
- **Escalamiento de los Datos:** Sin escalamiento.
- **Orientación del Dendrograma:** De izquierda a derecha.

Cabe observar que en esta configuración del programa no se eligió la opción de estandarización incluida en el software, ya que los valores de los parámetros que definen los estados de viento fueron sometidos previamente a un proceso de normalización (véase la sección 6.2.3), expresando sus valores en el intervalo de -1 a 1.

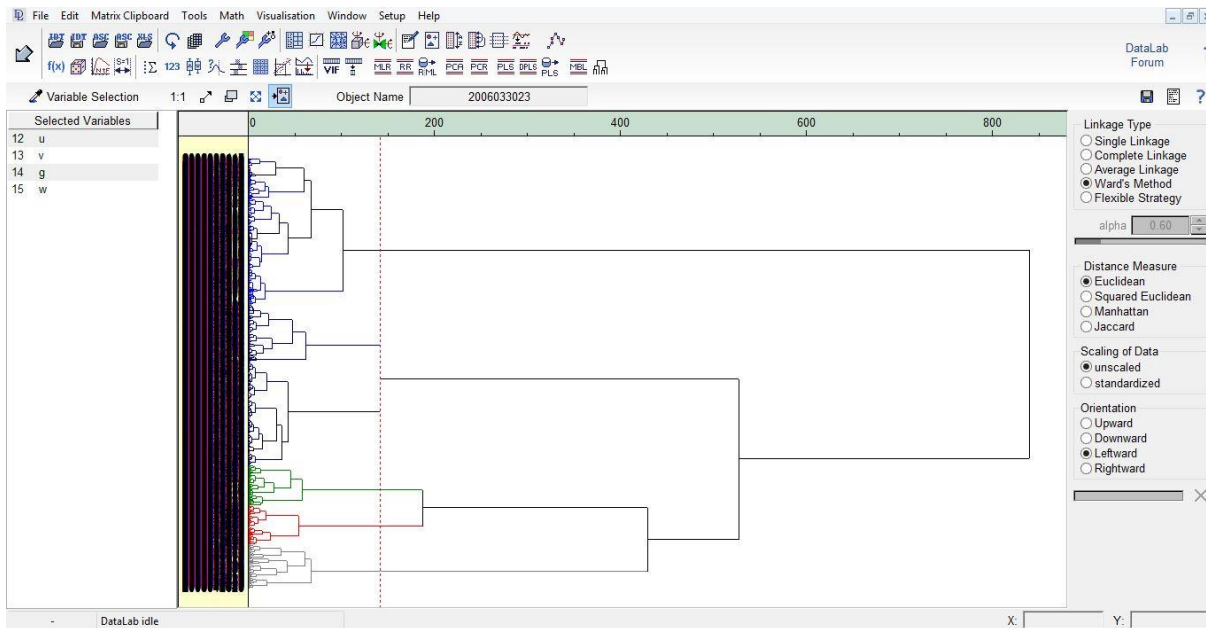


Figura 3.10. Pantalla de DataLab durante una corrida del análisis de conglomerados de los estados de viento de la Ciudad de México. Se muestra la configuración elegida de las opciones del programa.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Capítulo 4

Los Estados de Viento de la Ciudad de México

En este capítulo se seleccionan las fuentes de información meteorológica, se definen el dominio espacial y la extensión temporal de interés, se construyen las bases de datos de viento, y se aplican los modelos celulares de representación para la determinación del conjunto de estados de viento de la Ciudad de México.

Capítulo 4

Los Estados de Viento de la Ciudad de México

4.1. La Evaluación de la Calidad del Aire

En diciembre de 1952 una gran nube de hollín y humo cubrió Londres ocasionando la muerte de alrededor de 3000 personas (Ver Figura 4.1), según el Ministerio de Salud, aunque otras fuentes reportan que las muertes alcanzaron cifras de 12,000 personas en los primeros días y 8,000 más en los subsecuentes. Este hecho, cuyos antecedentes se remontan a 100 años, detonó la aprobación de la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act) en 1956 y la instalación de la primera red de monitoreo de aire del mundo en 1961, llamada National Survey, la cual monitoreaba humo negro y dióxido de azufre en 1200 sitios del Reino Unido.



Figura 4.1. Antecedentes a la instalación de la primera red de monitoreo de contaminantes en el mundo.

Calidad del aire¹ se define como las condiciones del aire relativas a los requerimientos de una o más especies vivas o para cualquier necesidad o propósito humano. Los índices de calidad del aire son números utilizados por los gobiernos para calificar de una manera sencilla la calidad del aire en una localidad específica. Conforme los índices de calidad del aire se incrementan, un gran porcentaje creciente de la población experimenta efectos adversos a la salud. La función utilizada para convertir de la concentración del contaminante a índices de la calidad del aire varía por contaminante, así como de un país a otro. Los índices de calidad del aire están divididos en rangos, cada uno de los cuales tiene asignado un descriptor y un código de color. Avisos estandarizados sobre la salud están asociados a cada índice de calidad del aire.

La medición de los atributos que caracterizan el estado que guarda el aire ambiente² se conoce como medición de la calidad del aire. Dicha medición se puede llevar a cabo por

¹ Johnson, D.L., S.H. Ambrose, T.J. Bassett, M.L. Bowen, D.E. Crummey, J.S. Isaacson, D.N. Johnson, P. Lamb, M. Saul, and A.E. Winter-Nelson. 1997. Meanings of environmental terms. *Journal of Environmental Quality* 26: 581-589.

² Atmósfera en espacio abierto de acuerdo con la NMX-AA-23 Terminología

medio del muestreo, análisis y monitoreo continuo del aire. Complementariamente, el estudio de la calidad del aire se realiza utilizando modelos que permiten la estimación de las concentraciones de los contaminantes a partir de los datos de las emisiones y de la meteorología de la zona, particularmente, de la circulación de los vientos.

En este capítulo, se realiza un proceso de clasificación de los vientos en la Ciudad de México en el período del 2001 al 2006. Este análisis proporciona una forma de identificar los principales escenarios de dispersión de los contaminantes en términos de los patrones de circulación de los vientos de mayor importancia según la frecuencia con la que ocurren. El método de clasificación (o taxonomía) de los vientos que aquí utilizamos parte del conjunto de los estados de viento que resulta de la aplicación de un modelo celular de representación de los vientos de la Ciudad de México a escala meso- β^3 , y del análisis de este conjunto de estados de viento usando el análisis de conglomerados de tipo jerárquico. La conglomeración se realiza con el criterio de similaridad de Ward bajo un concepto de distancia euclidiana que se define en términos de los parámetros (intensidad, dirección, divergencia y vorticidad) que caracterizan a los estados de viento desde el punto de vista de los modelos celulares de representación del viento.

4.2. Las Fuentes de Información Meteorológica

En México, las primeras mediciones de contaminantes se realizaron en 1958⁴, mediante el Muestreo y Análisis de Gases de la Atmósfera a través de la Dirección de Higiene Industrial de la Secretaría de Salud y Asistencia. Estas mediciones permitieron detectar la presencia del ciclo fotoquímico del ozono en la Ciudad de México.

En 1966 la misma Dirección integra la primera red de monitoreo con 4 estaciones localizadas en Tlalnepantla, el aeropuerto, el centro de la ciudad y en Tacuba, con equipos para medir dióxido de azufre, partículas suspendidas y polvo sedimentable.

En 1967 inicia la operación de la Red Panamericana de Muestreo Normalizado a nivel nacional, con el apoyo de la Organización Panamericana de la Salud. En la Ciudad de México se instalan 14 estaciones para medir dióxido de azufre, partículas suspendidas y polvo sedimentable. Esta red concluye su operación en diciembre de 1972. Estos métodos presentaron diversos problemas técnicos, como son: interferencia de gases en la medición de dióxido de azufre; falta de curvas de calibración en la medición de partículas suspendidas y ausencia de correlación con estudios de salud en el caso del polvo sedimentable.

En 1972 la Secretaría de Salubridad y Asistencia, modifica su estructura para crear la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente. Con la creación de este órgano se inicia la historia de la gestión ambiental en México.

³ Meso- β es una escala en Meteorología o mesoescala meteorológica que se refiere al estudio de sistemas del tiempo atmosférico de dimensiones horizontales generalmente de entre 20 y 200 Km. Trata fenómenos como la brisa de mar, efecto lago de tormentas de nieve.

⁴ Página web del SIMAT

<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=4&opcionrecursos tecnicos=2>

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

En 1973, el gobierno mexicano y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), inician un programa conjunto de protección ambiental, gracias al cual se instalaron 22 estaciones de monitoreo para medir partículas (con equipos de alto volumen) y dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono. La introducción de equipo automático permitió realizar mediciones continuas y en tiempo real de gases contaminantes y parámetros meteorológicos (dirección y velocidad de viento, temperatura y humedad relativa) con transmisión a un centro receptor de datos. Esta red operó hasta 1976 ya que la información registrada no fue confiable.

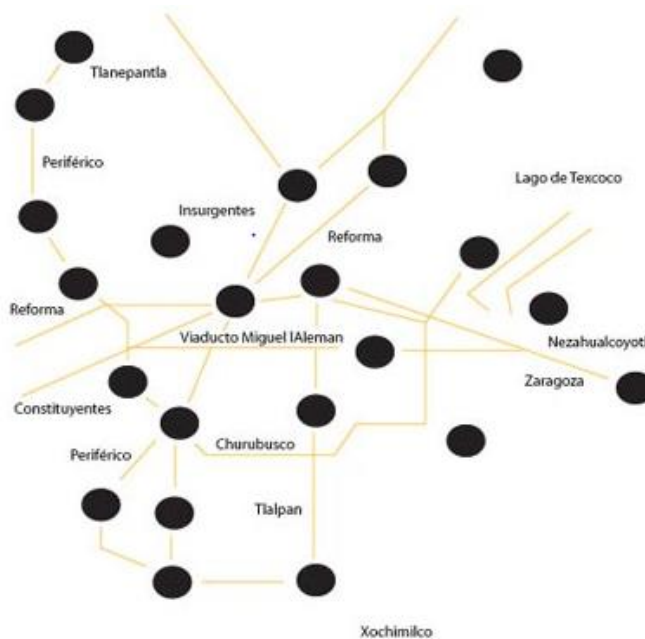


Figura 4.2. Localización de Estaciones del Programa México PNUD

En 1984 el Plan Nacional de Desarrollo establece la necesidad de contar con sistemas de monitoreo de contaminación atmosférica, por lo que ese mismo año entra en operación un sistema de monitoreo denominado Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) con 25 estaciones, 19 en el Distrito Federal y 6 en el Estado de México. Su operación era responsabilidad de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). Los contaminantes que registraba eran: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono, partículas menores a 10 micrómetros, partículas suspendidas totales y plomo. La información de la RAMA se hace pública en 1986.

En el año 2000, la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través de la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire, inicia la Integración del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), con la finalidad de realizar la medición de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos.

El SIMAT realiza, la medición de partículas menores a 2.5 micrómetros e hidrocarburos, brinda acceso a bases de datos y realiza la difusión de la información por medio de publicaciones e indicadores ambientales.

Los Estados de Viento de la Ciudad de México

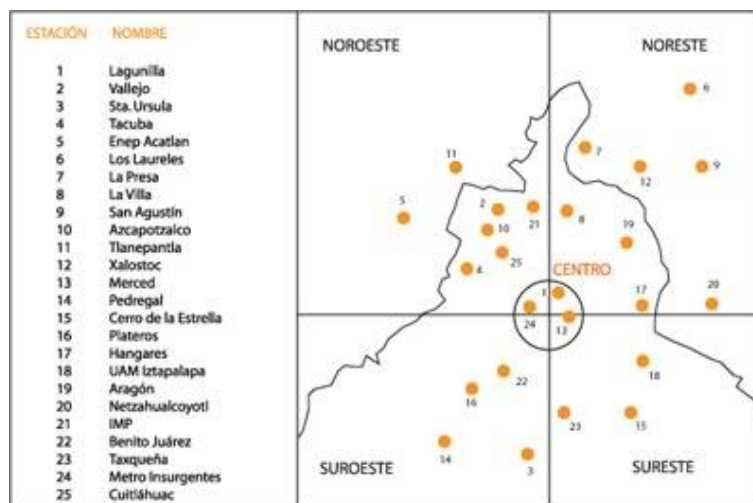


Figura 4.3. Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) instalada en 1984.

En la actualidad, el SIMAT constituye la fuente de información de calidad del aire y meteorológica más importante en la ZMCM. Los subsistemas que lo integran son los siguientes⁵:

- Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA): 34 estaciones.
- Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA): 12 estaciones.
- Red de Depósito Atmosférico (REDDA): 16 sitios de muestreo.
- Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET): 16 estaciones.
- Laboratorio Móvil de Monitoreo Atmosférico
- Laboratorio de Estándares
- Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA)
- Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA)
- Unidades Móviles de Monitoreo

4.2.1. Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) es el subsistema del SIMAT encargado de realizar mediciones continuas y permanentes de:

- ozono (O₃)
- dióxido de azufre (SO₂)
- óxidos de nitrógeno (NO_x)
- monóxido de carbono (CO)
- partículas con diámetros menores a 10 micrómetros (PM₁₀) y
- partículas con diámetros menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}).

Esta información es difundida mediante el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y permite la instrumentación inmediata del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en situaciones de riesgo para la salud de la población.

⁵ Secretaría del Medio Ambiente, <http://www.sma.df.gob.mx/organigrama/> al 9 de septiembre de 2012.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.

Actualmente cuenta con 34 estaciones de monitoreo en operación con equipo automático para la determinación continua de los contaminantes criterio⁶, estas estaciones están ubicadas en puntos estratégicos de la Ciudad de México, 21 están localizadas en el Distrito Federal y 13 en el Estado de México. Los criterios técnicos para la ubicación de las estaciones son: densidad de población, distribución de fuentes de emisión, meteorología y topografía. En la Figura 4.4 se muestran las características de una de las estaciones de esta red.



Figura 4.4. Estación de Monitoreo de San Agustín

4.2.2. Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

La Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) es el subsistema del SIMAT que tiene como función principal proporcionar información de los parámetros meteorológicos para elaborar el pronóstico meteorológico y aplicar modelos de dispersión, con la finalidad de analizar el desplazamiento de los contaminantes a través del tiempo. La información recabada es procesada y almacenada para integrar bases de datos públicas de los promedios horarios de los parámetros.

La REDMET cuenta con 15 estaciones de monitoreo ubicadas estratégicamente en la Ciudad de México, 10 están localizadas en el Distrito Federal y 5 en el Estado de México. La distribución de las estaciones se muestra en los siguientes mapas del SIMAT.

⁶ Los contaminantes del aire se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los contaminantes criterio se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos (EU), con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Actualmente el término "contaminantes criterio" ha sido adoptado en muchos países, y son: Bióxido de azufre (SO₂), Bióxido de nitrógeno (NO₂), Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), Plomo (Pb), Monóxido de carbono (CO), Ozono (O₃).

Los Estados de Viento de la Ciudad de México

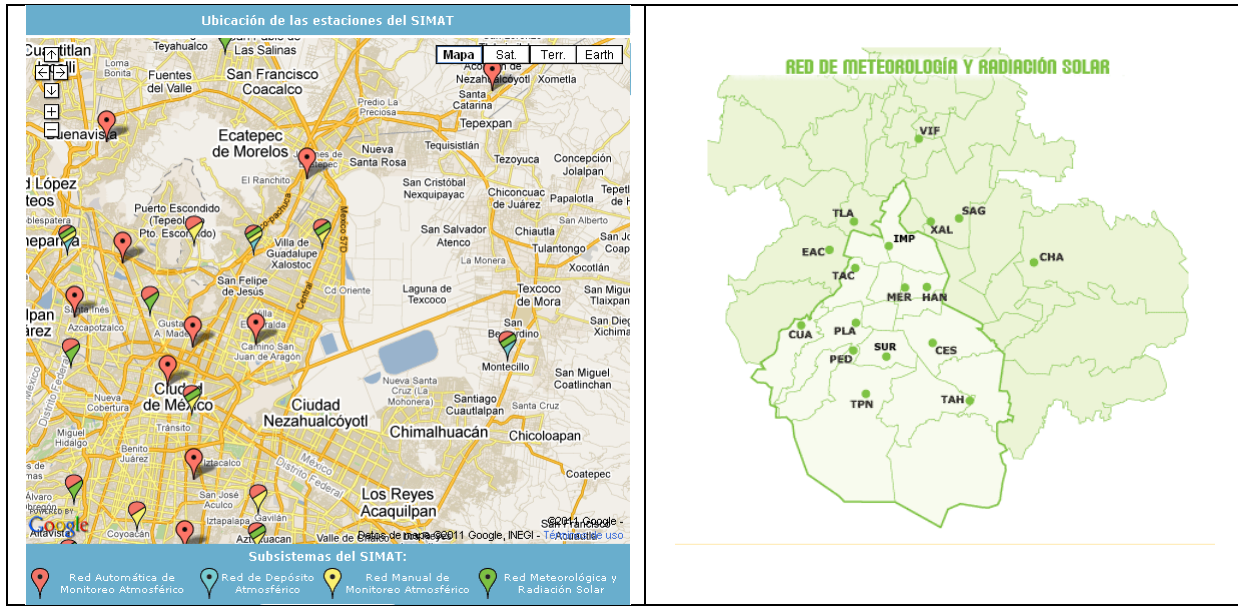


Figura 4.5. Distribución de las estaciones de la REDMET del SIMAT.

La REDMET mide, desde 1986, los parámetros de temperatura (TMP), intensidad del viento (WSP), dirección del viento (WDR) y humedad relativa (HR). Actualmente, además, ocho estaciones miden atributos de la radiación solar, tales como ultravioleta tipo A (UVA), ultravioleta tipo B (UVB,) y radiación global (RG).

La siguiente tabla muestra las coordenadas de ubicación de las estaciones así como los parámetros del viento registrados por cada una.

Tabla 4.1. Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

ID	NOMBRE	POSICIÓN		PARÁMETROS			
		LAT	LON	WSP	WDR	TEM	RH
TAC	Tacuba	19.455	-99.202	1	1	1	1
EAC	Acatlán	19.482	-99.243	1	1	1	1
SAG	San Agustín	19.532	-99.030	1	1	1	1
TLA	Tlanepantla	19.528	-99.204	1	1	1	1
XAL	Xalostoc	19.528	-99.076	1	1	1	1
MER	La Merced	19.424	-99.119	1	1	1	1
PED	Pedregal	19.325	-99.204	1	1	1	1
CES	Cerro de la Estrella	19.336	-99.075	1	1	1	1
PLA	Plateros	19.367	-99.200	1	1	1	1
HAN	Hangares	19.422	-99.084	1	1	1	1
CUA	Cuajimalpa	19.364	-99.299	1	0	0	1
TPN	Tlalpan	19.256	-99.184	1	0	0	1
CHA	Chapingo	19.460	-98.902	1	0	0	1
TAH	Tlahuac	19.246	-99.010	1	0	1	1
VIF	Villa de las Flores	19.658	-99.097	0	1	1	1

Notación: LAT = Latitud, LON = Longitud, WSP = Velocidad del Viento, WDR = Dirección del Viento, TEM = Temperatura, RH = Humedad Relativa. **Valores de los Parámetros:** 1 = medido, 0 = no medido.

4.3. La Base de Datos de Viento. Recopilación, Preparación y Valoración

Para los propósitos de este trabajo, son de interés los datos de la intensidad (rapidez) y dirección de los vientos registrados por todas las estaciones de la REDMET durante el periodo de Enero de 2001 a Diciembre de 2006. Los datos que esta fuente de información meteorológica tiene disponibles al público son los promedios horarios de los parámetros. Los archivos de esta base de datos de viento pueden obtenerse en el sitio web de la Secretaría del Medio Ambiente, en la Sección Productos, bajo el rubro Base de Datos (Ver Figura 4.6), donde se encuentra información de los siguientes parámetros meteorológicos: temperatura (TMP), humedad relativa (RH), dirección del viento (WDR) e intensidad del viento (WSP).

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) pone a tu disposición las bases de datos que genera. En esta sección encontrarás información de contaminantes atmosféricos, parámetros meteorológicos y parámetros fisicoquímicos.

SUBSISTEMA

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)	Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)	Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)	Red de Depósito Atmosférico (REDDA)
Contaminantes atmosféricos:	Parámetros Meteorológicos:	Contaminantes atmosféricos:	Parámetros Fisicoquímicos:
Ozono (O ₃)	Temperatura (TMP)	Partículas Suspensas Totales (PST)	Conductividad eléctrica (CE)
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Humedad relativa (RH)	Plomo en PST (PbPST)	pH
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Dirección del viento (WDR)	Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	Precipitación pluvial (Pp)
Dióxido de azufre (SO ₂)	Velocidad del viento (WSP)	Plomo en PM ₁₀ (PbPM ₁₀)	Cationes:
Monóxido de carbono (CO)		Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	Calcio (Ca ²⁺)
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)			Hidrógeno (H ⁺)
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})			Potasio (K ⁺)
			Magnesio (Mg ²⁺)
			Sodio (Na ⁺)
			Amonio (NH ₄ ⁺)
			Aniones:
			Cloruro (Cl ⁻)
			Carbonato (CO ₃ ²⁻)
			Nitrato (NO ₃ ⁻)
			Sulfato (SO ₄ ²⁻)

Consideraciones sobre las bases de datos:

1. Están organizadas en forma anual, por subsistema y se actualizan cada mes.
2. Se encuentran comprimidas en formato "zip".
3. Una vez descomprimidos, los archivos de cada parámetro se encuentran en formato "xls".
4. Estos archivos se pueden manipular en programas como: VisualFox, SQL, Access, Paradox, Excel, Quattro Pro, entre otros.

[Bases de Datos RAMA](#)
[Bases de Datos REDMET](#)
[Bases de Datos REDMA](#)
[Bases de Datos REDDA](#)

El portal de la *Presidencia del Consejo de Ministros* de la Secretaría del Medio Ambiente
 Agricultura N° 21, Primer Piso, Col. Escandón, Del. Miguel Hidalgo, C.R. 11000. Tel. 5278-9931 ext. 6136
 e-mail: calidadaire@sma.df.gob.mx
 2013. Derechos reservados.

Figura 4.6. Sitio web del SIMAT para la obtención de las Bases de Datos.

Los Estados de Viento de la Ciudad de México

De este sitio web se descargaron los archivos que contienen la información de la dirección (WDR) y la intensidad (WSP) del viento de todas las estaciones de la REDMET y de los años de 2001 a 2006. Los archivos descargados son anuales y contienen los valores de los promedios horarios de los parámetros. Para cada año se bajaron dos archivos, uno con los datos de la dirección del viento y el otro con los datos de la intensidad del viento.

La base de datos anual de la dirección del viento contiene un registro por hora para cada día del año, indicando, para cada estación de la REDMET, la dirección del viento en grados Norte, y registrando con -999 los casos en que no se tiene información. Una fracción de uno de los archivos de dirección del viento se muestra en la Figura 4.7.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	FECHA	HORA	TAC	EAC	SAG	TLA	XAL	MER	PED	CES	PLA	HAN	VIF	CUA	TPN	CHA	TAH	IMP	SUR
2	01-01-2001	1	208	52	90	181	358	91	253	-999	-999	335	141	-999	-999	64	116	-999	-999
3	01-01-2001	2	171	91	108	262	16	64	212	-999	-999	31	180	-999	-999	86	129	-999	-999
4	01-01-2001	3	171	108	43	339	10	204	223	-999	17	4	100	-999	-999	18	221	-999	-999
5	01-01-2001	4	347	94	15	353	359	81	243	-999	97	34	135	-999	-999	17	89	-999	-999
6	01-01-2001	5	327	100	19	-999	234	38	66	-999	158	49	87	-999	-999	110	150	-999	-999
7	01-01-2001	6	326	99	16	-999	184	78	177	-999	287	108	113	-999	-999	145	270	-999	-999
8761	31-12-2001	24	123	263	-999	166	260	-999	204	-999	45	163	-999	-999	223	156	87	-999	-999

Figura 4.7. Fracción de la base de datos de la dirección del viento (WDR).

De la misma manera, las bases de datos anuales de la intensidad del viento contienen un registro por hora para cada día del año, indicando para cada estación de la REDMET la intensidad del viento en metros por segundo, y registrando con -99.9 los casos en que no se tiene información, como se muestra en la Figura 4.8.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	FECHA	HORA	TAC	EAC	SAG	TLA	XAL	MER	PED	CES	PLA	HAN	VIF	CUA	TPN	CHA	TAH	IMP	SUR
2	01-01-2001	1	0.4	0.2	0.6	0.6	1.9	0.3	0.3	-99.9	-99.9	0.1	0.8	-99.9	-99.9	0.7	1.2	-99.9	-99.9
3	01-01-2001	2	1.2	1.6	0.8	0.6	1.4	0.4	0.4	-99.9	-99.9	0.5	1.3	-99.9	-99.9	1.5	2.8	-99.9	-99.9
4	01-01-2001	3	1.2	1.0	0.9	1.0	1.2	0.9	0.9	-99.9	0.5	0.4	0.8	-99.9	-99.9	1.5	0.8	-99.9	-99.9
5	01-01-2001	4	1.3	0.9	1.4	1.5	2.0	0.5	0.8	-99.9	0.5	0.6	1.0	-99.9	-99.9	1.2	0.2	-99.9	-99.9
6	01-01-2001	5	1.9	1.5	1.9	-99.9	1.0	1.0	0.3	-99.9	0.8	0.5	0.9	-99.9	-99.9	1.2	2.1	-99.9	-99.9
7	01-01-2001	6	1.1	1.0	1.5	-99.9	0.4	0.3	0.6	-99.9	0.0	0.6	0.4	-99.9	-99.9	0.7	2.6	-99.9	-99.9
8	01-01-2001	7	1.0	0.7	0.8	-99.9	0.8	0.3	0.7	0.4	0.8	0.5	0.9	-99.9	-99.9	1.0	2.0	-99.9	-99.9
9	01-01-2001	8	1.2	1.0	0.5	1.0	0.3	0.7	0.9	0.2	0.9	0.5	0.4	-99.9	-99.9	1.7	0.8	-99.9	-99.9
10	01-01-2001	9	1.2	0.8	0.2	0.5	0.9	0.5	0.6	0.3	0.3	0.7	0.9	-99.9	-99.9	1.4	1.7	-99.9	-99.9
8756	31-12-2001	19	2.5	4.5	-99.9	2.0	5.0	2.3	2.5	-99.9	2.2	5.4	-99.9	-99.9	10.1	6.9	8.0	-99.9	-99.9
8757	31-12-2001	20	1.8	4.1	-99.9	2.1	4.5	-99.9	1.5	-99.9	1.7	4.5	-99.9	-99.9	9.4	5.9	3.4	-99.9	-99.9
8758	31-12-2001	21	2.2	1.6	-99.9	1.9	2.9	-99.9	0.6	-99.9	0.6	2.6	-99.9	-99.9	1.9	4.5	0.5	-99.9	-99.9
8759	31-12-2001	22	1.0	2.0	-99.9	2.2	2.5	-99.9	0.4	-99.9	0.4	1.4	-99.9	-99.9	3.4	4.4	0.5	-99.9	-99.9
8760	31-12-2001	23	0.9	1.9	-99.9	1.7	1.7	-99.9	0.7	-99.9	0.7	1.2	-99.9	-99.9	1.1	3.9	0.7	-99.9	-99.9
8761	31-12-2001	24	0.9	1.1	-99.9	1.3	1.5	-99.9	0.4	-99.9	0.6	0.9	-99.9	-99.9	5.8	2.9	0.3	-99.9	-99.9

Figura 4.8. Fracción de la base de datos de la intensidad del viento (WSP).

4.3.1. Sobre la validez de los datos⁷

La operación del SIMAT ha requerido cambios en su configuración, como son: la ubicación de nuevas estaciones o la reubicación de otras, además del aumento o disminución del número de instrumentos de medición, por lo que se considera un sistema dinámico que se modifica para satisfacer las necesidades de cobertura en la medición de contaminantes y meteorología. Además es susceptible a la pérdida o invalidación de registros, debido a fallas en la operación de los instrumentos y en la transmisión de la información, contaminación de filtros, cortes en la energía eléctrica o mantenimiento de los equipos. Aunado a esto, desde el segundo semestre del 2001 el SIMAT implementó un control de calidad en la operación de los equipos de medición de O₃, NO₂, NO_x y SO₂.

Por lo anterior, el SIMAT incorpora entre sus actividades procesos de validación para asegurar que los registros de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos medidos sean confiables para su difusión al público y su uso en áreas específicas como la modelación de la calidad del aire, la vigilancia epidemiológica y la gestión de la calidad del aire. La validación se realiza en los procesos de monitoreo pasando por varios niveles que van desde la determinación de la muestra hasta la publicación del registro. En estos niveles se incluye: la verificación de las condiciones de operación y calibración de los instrumentos; de la consistencia interna y externa de los registros; y de la evaluación de estos registros dentro del contexto de su interpretación en los fenómenos de interés.

4.3.2. Suficiencia de Información⁸

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) considera que la información de una estación de monitoreo es representativa para caracterizar cualquier fenómeno si cuenta al menos con tres cuartas partes de los datos esperados. El 75% de los datos registrados en la hora en cuestión deben ser válidos para realizar el promedio. Los promedios que se publican son horarios. Así pues, define *desempeño anual* de una estación de monitoreo como el grado de representatividad para generar indicadores y, en este sentido, califica el desempeño usando una escala que contiene las siguientes categorías: BUENO, cuando registró el 75% o más de los datos esperados en el año, REGULAR, cuando registró más del 50% sin llegar al 75% y MALO cuando registró 50% o menos de los datos.

A efecto de evaluar la suficiencia de la información de las bases de datos del SIMAT para los propósitos de este trabajo, se analizaron las bases de datos con respecto a la disponibilidad de los datos de viento para el período de estudio, considerando los criterios establecidos por el SIMAT. Los resultados del análisis, que se detallan en la Tabla 4.2, fueron que las estaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y Santa Úrsula (SUR) no cuentan con información en el período; asimismo, se observa que San Agustín (SAG) tiene un desempeño malo en 2003 y en 2006; mientras que Hangares (HAN) y

⁷ <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=4&opcionrecursostecnicos=25>

⁸ Página Web del SIMAT, Productos/Información Calidad del Aire/Indicadores de la Calidad del Aire/Criterios de Suficiencia de Información
(<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=2&opcioninfoproductos=26>)

Los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tláhuac (TAH) tienen el mismo nivel de desempeño en 2006; y Tlalpan (TPN) lo tiene así del 2003 al 2005.

Tabla 4.2. Suficiencia de Información de Viento en el Período de Estudio

STN	Y2001	Y2002	Y2003	Y2004	Y2005	Y2006
TAC	93.24	97.40	96.61	95.05	97.00	90.77
EAC	89.00	94.02	86.43	96.64	95.68	97.03
SAG	85.28	81.17	41.14	53.31	97.30	35.89
TLA	67.97	97.48	96.01	94.95	92.22	97.26
XAL	95.01	91.26	95.48	96.09	95.82	87.36
MER	91.81	94.32	89.94	91.59	95.24	95.70
PED	92.39	92.97	96.08	96.47	95.48	93.83
CES	80.97	91.66	91.60	92.86	91.08	91.60
PLA	87.42	95.08	94.62	94.48	94.43	94.49
HAN	92.36	84.51	92.14	93.45	96.45	18.04
VIF	67.73	88.91	93.51	95.75	95.46	95.70
CUA	83.96	85.87	96.80	98.75	96.04	74.65
TPN	63.22	76.00	43.40	0.00	33.72	55.06
CHA	84.80	87.44	86.24	89.46	93.09	91.44
TAH	93.53	90.67	92.87	98.01	97.06	30.75
IMP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CLASIFICACIÓN POR SUFICIENCIA DE INFORMACIÓN	
CLASE	CRITERIO
Bueno	Se cuenta con al menos 75% de los datos del año
Regular	Cuando se cuenta con más del 50% y menos del 75% de los datos del año
Malo	Cuando se cuenta con menos del 50% de los datos de año

Los datos recopilados se utilizaron para preparar, para cada año del periodo 2001-2006, una base de datos integrada que incluye intensidad y dirección del viento para cada hora. En la Figura 4.9 se muestra una fracción del archivo preparado para el año 2001. En esta nueva base de datos, los valores faltantes fueron identificados con el número -9999.99.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	FECHA	HORA	TAC-WSP	TAC-WDR	EAC-WSP	EAC-WDR	SAG-WSP	SAG-WDR	TLA-WSP	TLA-WDR	XAL-WSP	XAL-WDR	MER-WSP	MER-WDR	PED-WSP	PED-WDR	CES-WSP	CES-WDR	PLA-WSP	PLA-WDR	HAN-WSP	HAN-WDR
2	01/01/2001	1	0.4	208	0.2	52	0.6	90	0.6	181	1.9	358	0.3	91	0.3	253	-9999.99	-9999.99	-9999.99	-9999.99	-9999.99	0.1
3	01/01/2001	2	1.2	171	1.6	91	0.8	108	0.6	262	1.4	16	0.4	64	0.4	212	-9999.99	-9999.99	-9999.99	-9999.99	-9999.99	0.5
4	01/01/2001	3	1.2	171	1	108	0.9	43	1	339	1.2	10	0.9	204	0.9	223	-9999.99	-9999.99	-9999.99	0.5	17	0.4
5	01/01/2001	4	1.3	347	0.9	94	1.4	15	1.5	353	2	359	0.5	81	0.8	243	-9999.99	-9999.99	-9999.99	0.5	97	0.6
6	01/01/2001	5	1.9	327	1.5	100	1.9	19	-9999.99	-9999.99	1	234	1	38	0.3	66	-9999.99	-9999.99	-9999.99	0.8	158	0.5
7	01/01/2001	6	1.1	326	1	99	1.5	16	-9999.99	-9999.99	0.4	184	0.3	78	0.6	177	-9999.99	-9999.99	-9999.99	0	287	0.6
8	01/01/2001	7	1	256	0.7	82	0.8	13	-9999.99	-9999.99	0.8	123	0.3	28	0.7	229	0.4	266	0.8	13	0.5	
9	01/01/2001	8	1.2	267	1	85	0.5	4	1	335	0.3	269	0.7	98	0.9	231	0.2	225	0.9	27	0.5	
10	01/01/2001	9	1.2	295	0.8	94	0.2	120	0.5	260	0.9	90	0.5	74	0.6	259	0.3	254	0.3	59	0.7	
11	01/01/2001	10	0.2	223	0.6	310	0.5	125	0.8	348	0.6	44	0.7	93	0.7	59	0.5	257	0.2	278	1.1	
12	01/01/2001	11	1.3	19	1.5	302	1.1	18	0.8	32	1.3	87	0.8	16	0.5	45	0.5	240	0.5	173	0.8	
13	01/01/2001	12	0.3	69	1.3	331	1.9	3	0.7	20	2.3	63	1	18	0.5	74	0.7	198	0.7	181	1	
14	01/01/2001	13	0.5	83	1.7	289	1.2	41	1.1	38	2.4	63	1	42	0.6	41	1.1	202	0.7	175	1.4	
15	01/01/2001	14	0.4	320	1.4	321	1.2	33	0.8	112	1.3	69	1.8	31	1.6	44	0.6	192	1.1	187	1	
16	01/01/2001	15	1	74	1.4	324	1.1	348	0.6	116	1.4	26	1	14	0.8	20	0.9	172	0.4	191	0.5	
17	01/01/2001	16	0.6	145	-9999.99	-9999.99	0.4	349	-9999.99	-9999.99	1	58	0.9	305	0.6	41	0.4	139	0.9	335	1	
18	01/01/2001	17	0.6	228	-9999.99	-9999.99	1.6	14	1.3	29	0.8	36	0.4	182	0.9	182	0.4	287	0.9	310	0.4	
19	01/01/2001	18	0.8	295	-9999.99	-9999.99	1.7	354	1	9	2.8	16	0.1	136	0.7	203	1.1	304	0.7	26	1.2	
20	01/01/2001	19	1.6	337	1.1	169	2	134	1.8	11	2.7	87	2	114	0.8	229	0.6	232	0.8	29	2.8	
21	01/01/2001	20	3.6	338	4	198	1.7	45	4.5	19	2.8	25	1.9	137	0.7	263	0.6	240	1.4	100	2.8	
22	01/01/2001	21	3.6	340	3	181	2.4	18	3.1	4	3.4	10	1	153	1.6	288	0.3	268	2.3	119	1.7	
23	01/01/2001	22	3.5	352	2	218	3.1	23	3.3	10	2.8	44	2.1	341	1.2	285	0.3	279	1.9	133	1.4	
24	01/01/2001	23	2.9	352	2.5	213	3.6	8	3.6	12	1.4	133	2.8	319	0.8	325	0.6	137	1.2	138	1.2	
25	01/01/2001	24	2.8	335	2	188	3.7	1	2.8	358	1.7	73	2.5	324	1.1	332	0.4	142	2	141	0.6	
26	02/01/2001	1	2.1	329	0.7	230	2.6	8	2.7	352	1	343	1.2	325	0.1	98	0.4	92	0.5	167	1.1	
27	02/01/2001	2	1.8	340	1	108	2.5	8	1.9	5	1.4	171	0.7	59	0.6	215	0.5	322	0.3	61	1.3	
28	02/01/2001	3	2	332	0.6	122	2.4	5	2.2	359	1.8	166	0.8	85	0.3	200	0.5	20	0.3	63	0.7	

Figura 4.9. Ejemplo de la base de datos anual de intensidad y dirección del viento. Incluye todas las estaciones de la REDMET.

4.4. La Obtención de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Realizar la taxonomía del viento de una zona de interés consiste en caracterizar y clasificar los eventos de viento que ahí ocurrieron en un periodo de tiempo determinado, así como en identificar sus principales patrones. En general, la caracterización de un evento de viento puede ser una tarea un tanto compleja; pues esto implica, en principio, tener conocimiento del vector de velocidad del viento en cada punto de la región de interés, lo cual es posible realmente sólo en situaciones muy simples.⁹ Para llevar a cabo esta tarea, entonces, es necesario el uso de modelos que permitan representar los eventos de viento en forma simplificada. Los modelos celulares de representación del viento desarrollados recientemente por Salcido et al¹⁰ permiten realizar una representación de los eventos de viento sobre un dominio reticular con un número pequeño de celdas. Estos modelos mapean la circulación del viento a una descripción donde cada evento queda representado por un conjunto de $4N$ parámetros, donde N es el número de celdas del dominio; siendo (u, v, γ, ω) , las componentes horizontales de la velocidad del viento, la divergencia y la vorticidad, respectivamente, los cuatro parámetros que definen la condición del viento en cada celda.

Bajo este esquema, para la caracterización de los eventos de viento de la Ciudad de México, en este estudio se aplicaron los modelos celulares más sencillos (representándose a la ciudad como un dominio reticular de pocas celdas: primero de una, y luego de cuatro) para obtener los conjuntos de estados de viento horarios ocurridos en esta zona durante el periodo del 1 de Enero de 2001 al 31 de Diciembre de 2006.

4.4.1. Preparación y Aplicación de los Modelos Celulares

Para los propósitos de aplicación de los modelos celulares, se usó como dominio espacial la región de la Ciudad de México localizada entre las latitudes de 19.30 °N a 19.57 °N y las longitudes de 99.00 °W a 99.27 °W. Esta región fue considerada bajo dos situaciones: primero como una celda única, y luego dividida en cuadrantes NE, NW, SW y SE, tal como se muestra en la Figura 4.10. Los cuadrantes son definidos por los ejes W-E y S-N del sistema de referencia cuyo origen se ubicó en el centro geométrico de las posiciones de las estaciones de la REDMET del SIMAT. Este punto (indicado en la figura por la intersección de las líneas punteadas) se encuentra a 2 km al noreste del zócalo de la Ciudad de México, muy cerca de la intersección de la avenida Circunvalación y el Eje 2 OTE. Las coordenadas geográficas de los centros geométricos de los cuadrantes fueron: (19.499 °N, 99.067 °W) para la celda NE, (19.499 °N, 99.200 °W) para la celda NW, (19.366 °N, 99.200 °W) para la celda SW y (19.366 °N, 99.067 °W) para la celda SE. Las dimensiones

⁹ Véase la segunda sección del Capítulo 3 de este trabajo.

¹⁰ Véanse: (1) A. Salcido, A.T. Celada & T. Castro, A Meso- β Scale Description of Surface Wind Events in Mexico City During MILAGRO 2006 Campaign, Proceedings of the Second IASTED International Conference Environmental Management and Engineering (EME-2010), Banff, Alberta, Canada, 2010, pp. 820-827. (2) A.T. Celada-Murillo; S. Carreón-Sierra; A. Salcido; T. Castro; O. Peralta; and T. Georgiadis. Main Characteristics of Mexico City Local Wind Events during MILAGRO 2006 Campaign within a Meso- β Scale Lattice Wind Modeling Approach. *ISRN Meteorology*, 2013(2013), ID 605210, 14 pages. ISSN: 2090-7524 (Online). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/605210>.

de las celdas fueron $L_{WE} = 14.0$ km (en la dirección W-E) y $L_{SN} = 18.5$ km (en la dirección S-N). Debido a estas dimensiones, se trata de una representación del viento de la Ciudad de México a una escala meteorológica meso- β .

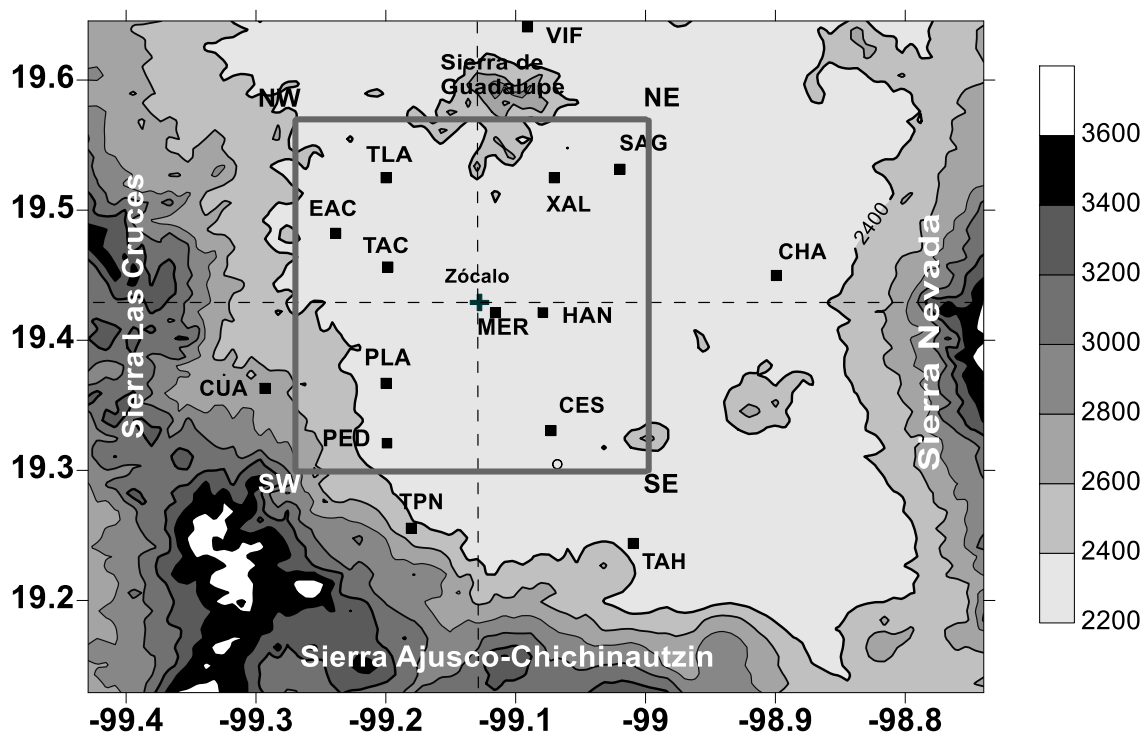


Figura 4.10. Dominios reticulares usados para determinar los estados de viento de la Ciudad de México mediante la aplicación de los modelos de representación de viento de una celda (rectángulo sólido) y cuatro celdas (rectángulo sólido dividido por líneas punteadas). Se muestran también las posiciones de las estaciones de la REDMET del SIMAT. El origen de coordenadas se ubicó en el zócalo de la ciudad (Plaza de la Constitución).

Con los datos horarios promedio de intensidad y dirección del viento proporcionados por la REDMET para el periodo de interés (ver sección 4.3), se calcularon, para los dos modelos de representación considerados, las componentes horizontales (u , v) de la velocidad del viento y los valores de la divergencia γ y la vorticidad ω del viento en los centros geométricos de las celdas. En términos generales, el procedimiento seguido fue el siguiente: para cada hora del periodo de estudio, se obtuvieron de las bases de datos de todas las estaciones de la REDMET los valores (promedio horario) disponibles de la intensidad y la dirección del viento, y éstos se usaron para estimar los valores de las componentes horizontales de la velocidad del viento para cada uno de los sitios de una retícula cuadrada de 64 sitios (definida de manera que quedase cubierto el dominio espacial de interés), usando un método de interpolación vectorial del tipo Krigging con constricciones en la frontera. Los resultados de esto se usaron para calcular los promedios espaciales de los parámetros de estado del viento (u , v , γ , ω) sobre cada una de las celdas del modelo de representación considerado. Se calcularon también, correspondientemente, los estados de viento discretos y los estados de dirección del viento de la Ciudad de México para el periodo de estudio.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

En la práctica, la determinación de los estados de viento se realizó utilizando un programa (software) llamado *Lattice Wind Modelling* (LWM) que fue desarrollado en 2011 por A. Salcido, coordinador del grupo de Modelación Matemática, Micrometeorología y Contaminación Atmosférica (M⁴CA) de la División de Energías Alternas (DEA) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). El programa se ejecuta bajo el sistema operativo Windows¹¹ (XP o superior). En la Figura 4.11 se muestra la ventana principal de esta aplicación durante la corrida de los datos del año de 2006; ahí puede observarse cuáles fueron las opciones de configuración utilizadas.

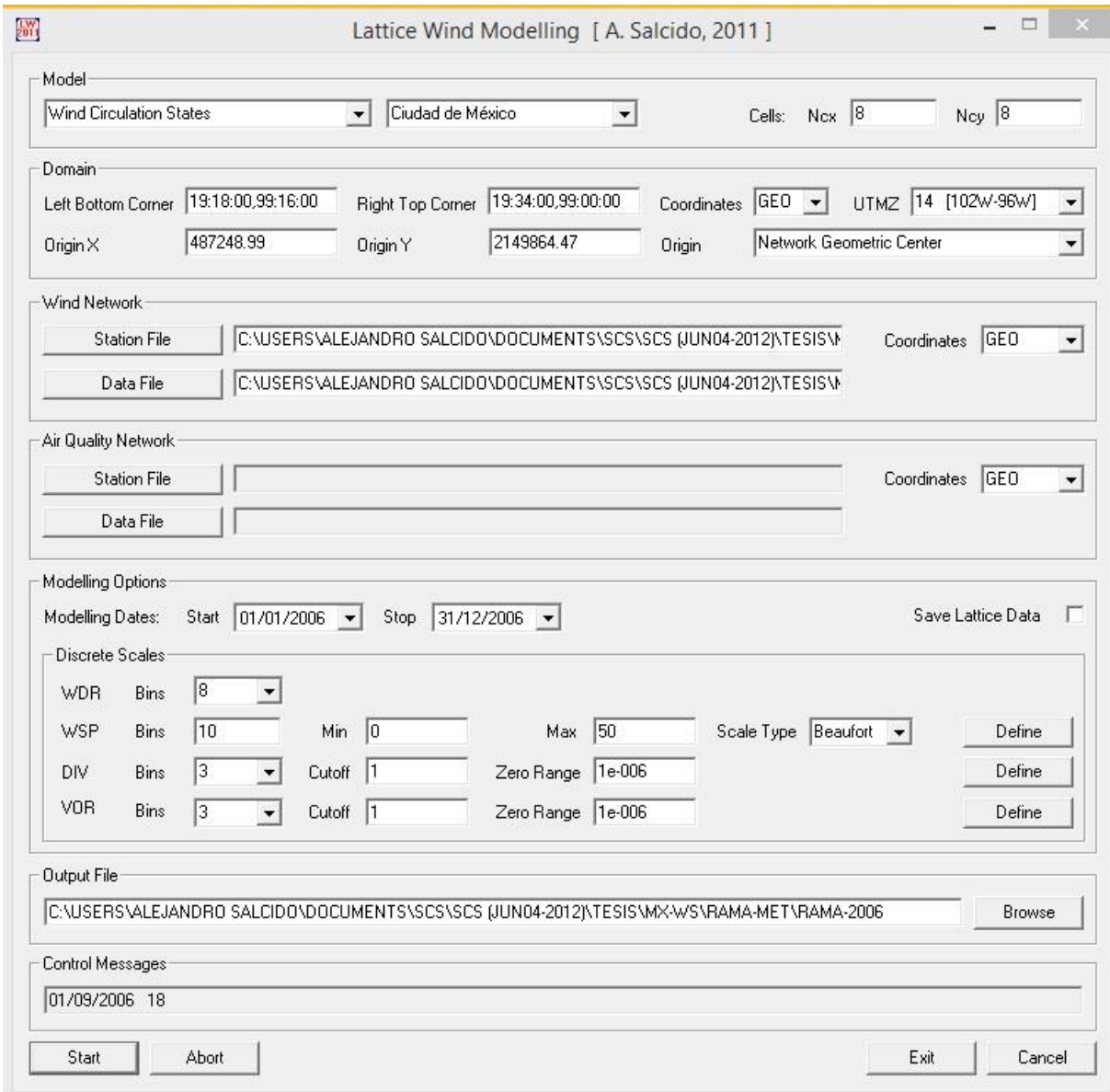


Figura 4.11. Ventana principal del programa *Lattice Wind Modelling* que fue utilizado en la práctica para la obtención de los estados de viento de la Ciudad de México. Este programa fue desarrollado en 2011 por A. Salcido del GM⁴CA del IIE.

¹¹ Windows es una marca registrada de Microsoft Corporation.

4.4.2. El Conjunto de Estados de Viento de la Ciudad de México

En la Figura 4.12 se muestra una porción del archivo de resultados producido por el programa LWM (bajo la opción del modelo de una celda) en la corrida correspondiente a los estados de viento del año de 2006. Las primeras tres columnas incluyen la información de la fecha y la hora del evento de viento, las siguientes dos columnas (D y E) contienen los valores de las componentes horizontales, V(W-E) y V(S-N), del viento, luego en las columnas F y G se encuentran la divergencia (DIV) y la vorticidad (VOR) del viento. En la última columna se reporta el correspondiente estado de viento discreto (DWS)¹².

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	DATETIME	Date	Hour	V(W-E)	V(S-N)	DIV	VOR	DWS	
2	2006010101	20060101	01	0.281	0.0201	-0.00013143	-2.5992E-05	[1:6:0:0]	
3	2006010102	20060101	02	0.1509	0.296	-0.00011296	-1.7609E-05	[1:5:0:0]	
4	2006010103	20060101	03	0.3223	0.4139	-9.4951E-05	-1.1488E-05	[1:5:0:0]	
5	2006010104	20060101	04	0.2905	0.2907	-0.00013658	1.7444E-06	[1:5:0:2]	
6	2006010105	20060101	05	0.2119	0.0862	-0.00012962	-4.649E-05	[1:6:0:0]	
7	2006010106	20060101	06	0.3177	0.0392	-0.00010595	-1.9448E-05	[1:6:0:0]	
8	2006010107	20060101	07	0.4009	0.1279	-7.0716E-05	-3.4529E-05	[1:6:0:0]	
9	2006010108	20060101	08	-0.0566	0.1134	-9.4441E-05	7.9748E-06	[1:3:0:2]	
10	2006010109	20060101	09	0.0022	-0.0825	-3.7498E-05	2.7549E-06	[0:0:0:2]	
11	2006010110	20060101	10	-0.0384	-0.3096	1.984E-05	-4.2965E-05	[1:0:2:0]	
12	2006010111	20060101	11	-0.4259	-0.1466	8.6055E-05	-2.7646E-06	[1:2:2:0]	
13	2006010112	20060101	12	-0.4589	-0.3541	5.679E-05	-3.6036E-06	[1:1:2:0]	
14	2006010113	20060101	13	-0.3669	-0.4907	4.7017E-05	-1.381E-05	[1:1:2:0]	
15	2006010114	20060101	14	-0.1458	-0.421	2.4823E-05	-5.1765E-05	[1:0:2:0]	
16	2006010115	20060101	15	-0.4495	-0.5003	1.827E-05	-2.2103E-05	[1:1:2:0]	
17	2006010116	20060101	16	-0.2243	-0.737	-1.5123E-05	-4.1843E-05	[1:0:0:0]	
18	2006010117	20060101	17	-0.2256	-0.772	-2.4606E-05	-1.3129E-05	[1:0:0:0]	
19	2006010118	20060101	18	-0.6081	-0.2623	-0.00016225	6.5274E-05	[1:1:0:2]	
20	2006010119	20060101	19	-0.7188	0.8727	-0.00019602	0.00017066	[2:3:0:2]	
21	2006010120	20060101	20	-0.2047	0.6088	-0.00010149	0.00010623	[1:4:0:2]	
22	2006010121	20060101	21	0.1168	0.1289	-9.8746E-05	2.0313E-05	[1:5:0:2]	
23	2006010122	20060101	22	0.3942	0.1231	-0.00011169	-2.4556E-05	[1:6:0:0]	
24	2006010123	20060101	23	0.6598	0.1929	-0.00010049	-1.9223E-06	[1:6:0:0]	
25	2006010124	20060101	24	0.448	0.1832	-7.9564E-05	2.2181E-05	[1:6:0:2]	
26	2006010201	20060102	01	0.4641	0.1716	-0.00011649	-1.1365E-05	[1:6:0:0]	
27	2006010202	20060102	02	0.3362	0.241	-0.00011966	-1.1957E-05	[1:5:0:0]	
28	2006010203	20060102	03	0.2799	0.2184	-0.00012674	-3.0459E-05	[1:5:0:0]	

Figura 4.12. Ejemplo del archivo de resultados para el caso del modelo de una celda.

Los archivos de resultados que se obtienen bajo la opción del modelo de cuatro celdas del software LWM contienen este tipo de información para cada una de las celdas del dominio espacial, además de las coordenadas de los centros de las celdas.

¹² La notación utilizada en el programa LWM para los estados de viento discretos (DWS: Discrete Wind States) es la siguiente: $[v:\theta:\gamma:\omega]$, donde los parámetros $v, \theta, \gamma, \omega$ son enteros positivos que representan a los valores de la intensidad, la dirección, la divergencia y la vorticidad del viento, expresados en escalas discretas. Véase la sección 3.3 del capítulo 3 de este trabajo.

4.4.3. Las Series de Tiempo de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Desde el punto de vista del modelo de una celda, el comportamiento del viento en la Ciudad de México durante el periodo de estudio puede visualizarse (Figura 4.13) en términos de las series de tiempo de los cuatro parámetros de estado: (u , v , γ , ω).

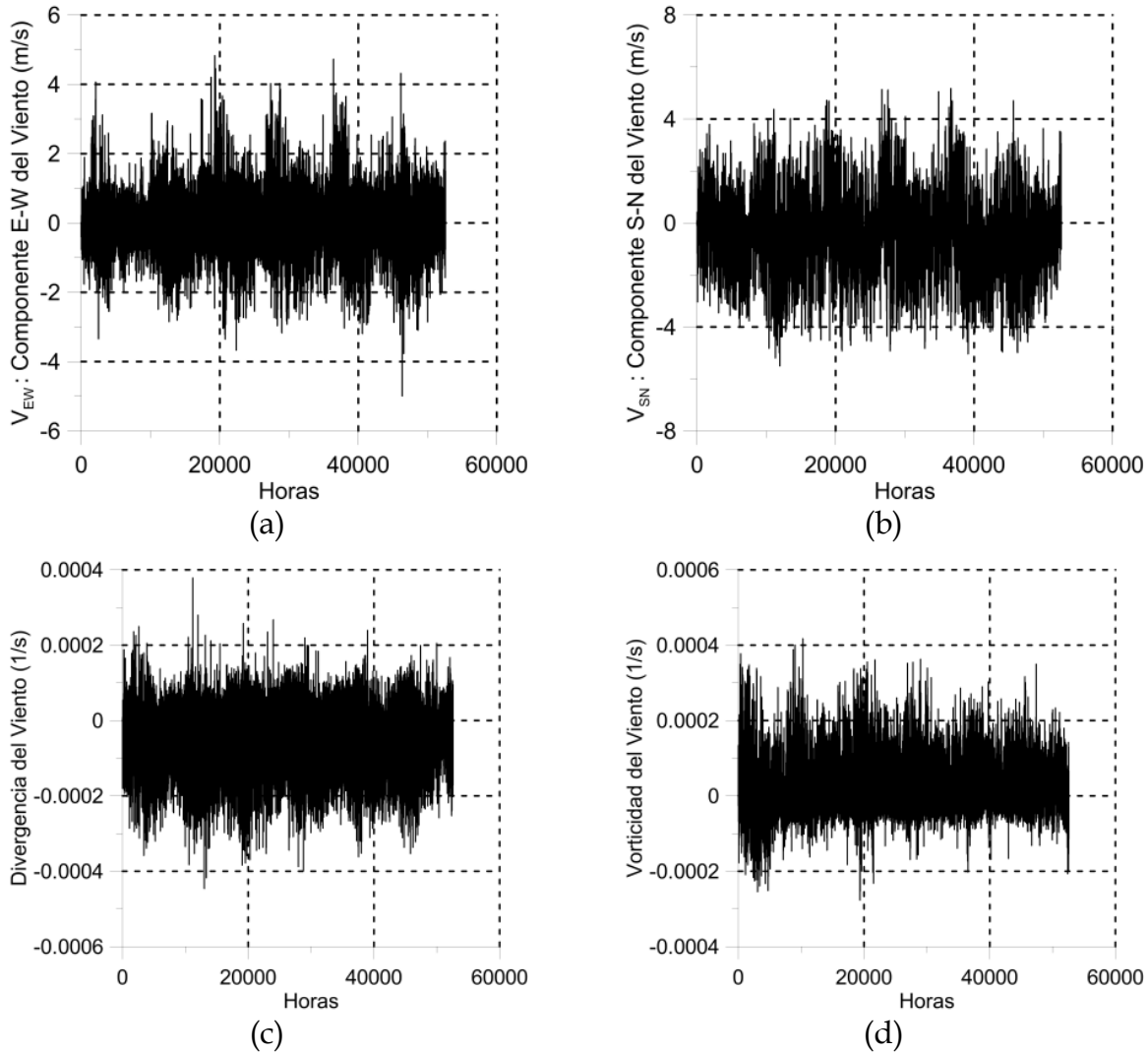


Figura 4.13. Series de tiempo de los parámetros de estado del viento. Las gráficas del primer renglón, es decir, (a) y (b), corresponden a las componentes horizontales del viento, Mientras que las del segundo renglón (c) y (d) corresponden a la divergencia y a la vorticidad del viento, respectivamente.

La información contenida en estas gráficas es exactamente la misma que contienen las columnas $V(W-E)$, $V(S-N)$, DIV y VOR de los archivos producidos por el modelo para todo el periodo de estudio. Aquí, cualitativamente se observa que durante el periodo de estudio las componentes horizontales de la velocidad del viento tuvieron valores que oscilaron entre -4 y 4 m/s, cada una con valor promedio cerca de cero. La divergencia tuvo valores entre -0.0004 y 0.0002 s^{-1} , reflejando un promedio negativo, y la vorticidad obtuvo valores entre -0.0002 y 0.0004 s^{-1} , con un promedio positivo. Esto muestra de manera cualitativa que en el periodo de 2001 a 2006 dominaron los vientos convergentes con vorticidad ciclónica (es decir, con tendencia a rotar en el sentido levógiro).

Capítulo 5

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

En este capítulo se realiza el análisis estadístico de los estados de viento de la Ciudad de México, incluyendo la aplicación del análisis de conglomerados jerárquico para la identificación de sus patrones en el periodo de estudio.

Capítulo 5

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

5.1. Introducción

En el capítulo anterior se describió el proceso usado para obtener los conjuntos de estados de viento de la Ciudad de México bajo los modelos de representación de una y cuatro celdas. Para cada una de estas representaciones se obtuvo una base de datos con 52584 registros horarios, donde cada registro representa un evento de circulación del viento.

En el caso del modelo de una celda, la historia de la circulación del viento en la Ciudad de México durante el periodo de estudio se pone de manifiesto a través de las cuatro series de tiempo, $u(t)$, $v(t)$, $\gamma(t)$ y $\omega(t)$, cada una con resolución temporal de una hora. En el modelo de cuatro celdas, la historia del viento tiene la misma resolución temporal, pero ahora contiene información sobre la distribución espacial del viento, proporcionando cuatro series de tiempo para cada cuadrante del dominio que representa a la ciudad, es decir, un total de 16 series de tiempo con 52584 puntos cada una.

El análisis de esta información, en este trabajo, se concentra principalmente sobre los resultados obtenidos con el modelo de una celda, realizándose el escrutinio de la información desde varios puntos de vista:

- en términos de las series de tiempo de los parámetros de los estados de viento y sus transformadas de Fourier,
- a través de las frecuencias de ocurrencia de los estados de viento discretos, y
- mediante el análisis de conglomerados jerárquico.

No obstante su potencial relevancia, la información de los estados de viento obtenidos con el modelo de cuatro celdas se utilizó en este trabajo solamente para apoyar la interpretación de los patrones de viento de la Ciudad de México producidos por el análisis de conglomerados.

5.2. Espectros de Frecuencias de las Series de Tiempo de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Las principales propiedades termodinámicas de un gas, tales como la densidad de masa, la presión y la temperatura, están relacionadas a través de la llamada ecuación térmica de estado. En el caso de un gas ideal¹, se trata de una ecuación de la forma

$$p = k\rho T$$

donde k es una constante cuyo valor depende del tipo de gas específico que se está considerando.

¹ Ver capítulo 3, sección 3.1.

De acuerdo con la relación anterior, el gradiente de la presión depende de los gradientes de la temperatura y la densidad, como sigue:

$$\nabla p = k\rho\nabla T + kT\nabla\rho$$

Entonces, distribución espacial de la presión en la atmósfera se encuentra estrechamente vinculada a las distribuciones espaciales de temperatura y densidad. Entre otras cosas, la distribución de la temperatura en la tierra depende fuertemente de la insolación², la cual puede ser diferente de un lugar a otro (debido a la nubosidad, por ejemplo) y varía con el tiempo siguiendo el ciclo de la sucesión del día y la noche producido por la rotación de la tierra. Esta periodicidad, desde luego, debe reflejarse también en la distribución espacial de la presión atmosférica a través de la temperatura. Esta situación, consecuentemente debe reflejarse también en la circulación del viento, pues ésta, en gran medida, está determinada por los gradientes de presión³. En la Ciudad de México, adicionalmente, la orografía de la zona define claramente un sistema valle-montaña con diferenciales importantes de temperatura y densidad entre la superficie del valle y la cima de las montañas que también dependen del ciclo diario de la insolación, y producen la sucesión de los vientos de ladera que bajan de las montañas durante las horas de la noche (vientos catabáticos) y ascienden a ellas durante las horas de sol (vientos anabáticos).

Estas observaciones se vuelven importantes cuando se buscan patrones en la circulación de los vientos, pues hablan de efectos periódicos que deben estar presentes en las series de tiempo de los parámetros característicos de los eventos de viento. La identificación de las componentes periódicas de una serie de tiempo se realiza, generalmente, a través de la transformada de Fourier⁴ de la serie temporal.

En la Figura 5.1 se muestran los espectros de frecuencias de las series de tiempo de los estados de viento (modelo: 1 celda) de la Ciudad de México para el periodo de estudio.

² La insolación es la cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un lugar de la Tierra en un momento dado.

³ De acuerdo con la ecuación de balance del momento lineal, la aceleración de un fluido está determinada, principalmente, por el negativo del gradiente de la presión. Ver capítulo 3, sección 3.1, ecuación 3.2.

⁴ La *transformada de Fourier* es una función que convierte una señal del dominio temporal al dominio de las frecuencias. Si una función $f(t)$ cumple con la propiedad de que

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$$

Entonces su transformada de Fourier $g(\omega)$ se define como

$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

En procesamiento de señales la transformada de Fourier suele considerarse como la descomposición de una señal en componentes de frecuencias diferentes, es decir, $g(\omega)$ corresponde al *espectro de frecuencias* de la señal $f(t)$. Si la serie de tiempo está expresada como una secuencia discreta de duración finita, el cálculo de la transformada de Fourier se realiza usando un algoritmo conocido como *Transformada Rápida de Fourier* o FFT (Fast Fourier Transform).

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

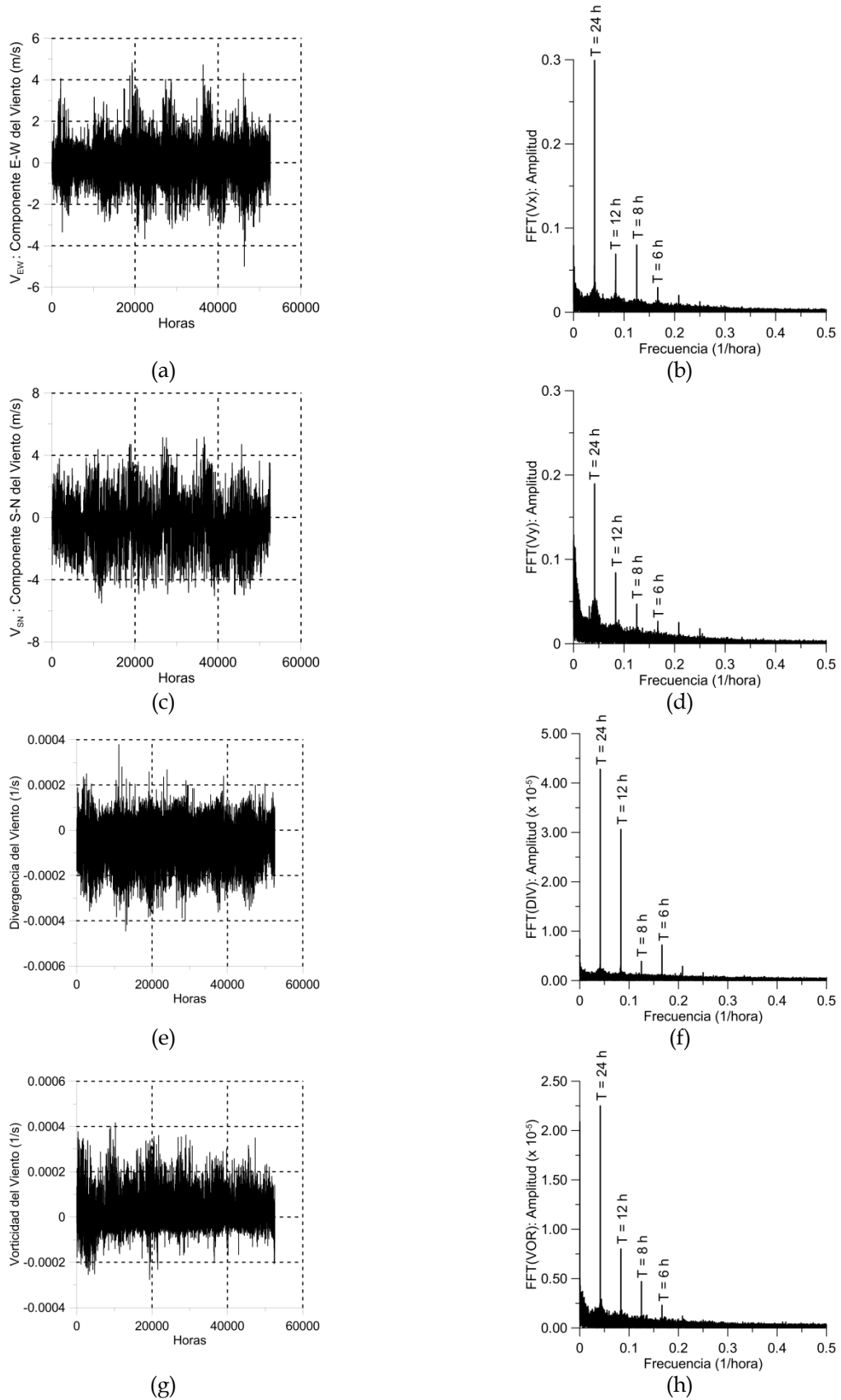


Figura 5.1. Series de tiempo de los estados de viento y sus Espectros de Frecuencias.

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

En estas gráficas se puede observar que, en promedio, durante el periodo de los años de 2001 a 2006, las características de los vientos en la Ciudad de México fueron las siguientes en términos cualitativos: vientos del norte ligeramente dominantes, de baja intensidad, convergentes y ciclónicos. Algunos detalles del comportamiento de los vientos en este periodo son los siguientes:

- a) La componente W-E de la velocidad del viento (V_{WE} , en las gráficas) osciló entre un valor mínimo de -4.99 m/s y un máximo de 4.82 m/s, con un valor medio de 0.03 m/s, reflejando un equilibrio notable entre las componentes Oeste y Este del viento.
- b) La componente S-N de la velocidad del viento (V_{SN} , en las gráficas) tuvo un mínimo de -5.50 m/s, un máximo de 5.17 m/s, y un valor medio de 0.43 m/s. Se observa aquí un predominio ligero de los vientos con componente del Norte.
- c) La intensidad de viento (WSP) fue baja, con un valor medio de 1.11 m/s y un máximo de 5.89 m/s. En promedio se trató de ventolinás, es decir, fueron vientos en la categoría 1 de la escala de Beaufort.
- d) La divergencia del viento (DIV) presentó un valor mínimo de $-4.46 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, un máximo de $3.78 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ y una media de $-0.55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Se observa, en primer lugar, que el orden de magnitud de la divergencia del viento (10^{-4}) es consistente con la estimación realizada por Jauregui⁵ en 1988. Se observa también que los valores negativos de este parámetro (vientos convergentes) predominaron durante el 78% de las horas del periodo de estudio, indicando que las condiciones de viento convergente prevalecieron no solamente durante las horas de la noche, sino también durante el 50% de las horas de sol, cuando se esperaría que el mezclado derivado de la turbulencia atmosférica tendiera a debilitar el flujo inducido por efecto de isla de calor.⁶
- e) La vorticidad del viento (VOR) obtuvo un valor mínimo de $-2.77 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, un máximo de $4.17 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ y un promedio de $0.21 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. La vorticidad del viento fue positiva durante el 61% de las horas del periodo de estudio, mostrando un predominio de los vientos de carácter ciclónico (es decir, con tendencia a una rotación levógira). Este hecho, debido a los rasgos orográficos de la zona⁷, pudiera estar correlacionado, al menos parcialmente, con el predominio de los vientos con componente del norte (66%); sin embargo, no se puede ser contundente sin tomar en cuenta el resto de las forzantes del viento que tuvieron lugar en este periodo.

En la Tabla 5.1 se resumen los valores mínimos, máximos y medios de los parámetros de estado del viento de la Ciudad de México para el periodo considerado.

Tabla 5.1. Valores mínimos, máximos y medios de los parámetros de estado en el periodo de 2001 a 2006.

	V_{WE} (m/s)	V_{SN} (m/s)	WSP (m/s)	DIV ($\times 10^{-4}$ 1/s)	VOR ($\times 10^{-4}$ 1/s)
Media	0.03	-0.43	1.11	-0.55	0.21
Mínimo	-4.99	-5.50	0.00	-4.46	-2.77
Máximo	4.82	5.17	5.89	3.78	4.17

⁵ E. Jáuregui. Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin. *Atmósfera*, 1, 131-140, 1988.

⁶ Véase el trabajo de Jauregui de la cita previa.

⁷ Véase el capítulo 2, sección 2.5, de este documento.

- f) Los cuatro parámetros que caracterizan a los estados de viento de la Ciudad de México tuvieron comportamientos cuyas series de tiempo tuvieron componentes de Fourier importantes con periodos de 24, 12, 8 y 6 horas. Esto se observa claramente en los espectros de frecuencias que se muestran en la columna derecha de las gráficas de la Figura 5.1. De estas, la componente dominante en todos los parámetros fue la del periodo de 24h, reflejando el efecto del ciclo diurno de la insolación sobre los vientos de esta zona en este periodo. La componente con periodo de 12h en el caso de la divergencia del viento tuvo una amplitud de casi tres cuartas partes de la amplitud de la componente de 24h, mientras que para los otros parámetros esta relación fue considerablemente menor. Esta importancia de la componente de 12h en la serie de tiempo de la divergencia del viento indica la presencia de un efecto que provoca una inversión de convergente a divergente en los vientos cada 6 horas aproximadamente. Aventurando una posible explicación, pudiera ser que este comportamiento estuviese relacionado con el efecto de isla de calor urbana.

5.3. Las Características de los Estados de Viento Discretos

En la Figura 5.2 se muestra la distribución de frecuencias de ocurrencia de los estados de viento discretos que se registraron en la Ciudad de México en el periodo de 2001 a 2006. Los únicos estados que ocurrieron en este periodo fueron los que corresponden a identificadores entre 0 y 215.⁸ Ningún estado con identificador superior a 215 tuvo lugar en esta zona durante el periodo de estudio. Tales estados corresponden a vientos con intensidades que se encuentran en una categoría igual o superior a 3 en la escala de Beaufort. En otras palabras, durante el periodo de estudio, no se registraron vientos con intensidades superiores a 3.5 m/s en la Ciudad de México.

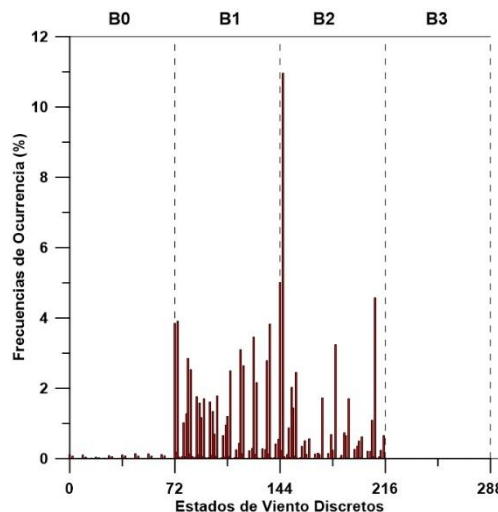


Figura 5.2. Distribución de frecuencias de ocurrencia de los estados de viento discretos ocurridos en la Ciudad de México durante el periodo de 2001 a 2006.

⁸ El identificador de un estado de viento discreto es un entero no negativo definido por la fórmula (3.9) del capítulo 3 de este documento. Esta fórmula asocia, de manera inyectiva, un identificador a cada estado discreto definido por los valores de los parámetros $(v, \theta, \gamma, \omega)$ expresados en escalas discretas.

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

En la Tabla 5.2 se presentan los 17 estados de viento discretos que ocurrieron con las frecuencias más altas durante el periodo de 2001 a 2006. En conjunto, estos estados corresponden a 32549 eventos del total de 52584, es decir, totalizan el 62% de los eventos de viento que ocurrieron en la Ciudad de México en este periodo. Cabe observar que en el periodo de estudio se observó que el 78% de los eventos fueron vientos convergentes y que el 61% fueron eventos de vientos ciclónicos. En orden descendente, las frecuencias de las direcciones de viento fueron: N (30%), NW (15%), NE (14%), SW (10%), S (9%), W (8%), E (7%) y SE (7%). Respecto a la intensidad del viento, el 55% de los eventos se ubicaron en la categoría 1 de la escala de Beaufort (Ventolina: $0.25 < v < 1.5$ m/s), el 44% fueron eventos con intensidad en la categoría 2 de esta escala (Ligero: $1.5 < v < 3.5$ m/s), y sólo el 2% correspondió a vientos con intensidad en la categoría 0 (Calma: $0 < v < 0.25$ m/s).

Tabla 5.2. Estados de viento discretos con las frecuencias de ocurrencia más altas.							
ID	$(v, \theta, \gamma, \omega)$	DOS (n)	DOS (%)	WSP (m/s)	WDR	DIV	VOR
146	(2, 0, 0, 2)	5765	10.9634	$1.5 < v < 3.5$	N	Convergente	Ciclónico
144	(2, 0, 0, 0)	2635	5.0110	$1.5 < v < 3.5$	N	Convergente	Anticiclónico
209	(2, 7, 0, 2)	2405	4.5736	$1.5 < v < 3.5$	NW	Convergente	Ciclónico
74	(1, 0, 0, 2)	2055	3.9080	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergente	Ciclónico
72	(1, 0, 0, 0)	2024	3.8491	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergente	Anticiclónico
137	(1, 7, 0, 2)	2013	3.8282	$0.25 < v < 1.5$	NW	Convergente	Ciclónico
126	(1, 6, 0, 0)	1820	3.4611	$0.25 < v < 1.5$	W	Convergente	Anticiclónico
182	(2, 4, 0, 2)	1706	3.2443	$1.5 < v < 3.5$	S	Convergente	Ciclónico
117	(1, 5, 0, 0)	1631	3.1017	$0.25 < v < 1.5$	SW	Convergente	Anticiclónico
81	(1, 1, 0, 0)	1499	2.8507	$0.25 < v < 1.5$	NE	Convergente	Anticiclónico
135	(1, 7, 0, 0)	1466	2.7879	$0.25 < v < 1.5$	NW	Convergente	Anticiclónico
119	(1, 5, 0, 2)	1389	2.6415	$0.25 < v < 1.5$	SW	Convergente	Ciclónico
83	(1, 1, 0, 2)	1332	2.5331	$0.25 < v < 1.5$	NE	Convergente	Ciclónico
110	(1, 4, 0, 2)	1312	2.4951	$0.25 < v < 1.5$	S	Convergente	Ciclónico
155	(2, 1, 0, 2)	1290	2.4532	$1.5 < v < 3.5$	NE	Convergente	Ciclónico
128	(1, 6, 0, 2)	1139	2.1661	$0.25 < v < 1.5$	W	Convergente	Ciclónico
152	(2, 0, 2, 2)	1068	2.0310	$1.5 < v < 3.5$	N	Divergente	Ciclónico

Los estados de viento discretos descritos en la Tabla 5.2 muestran, claramente, las características de los vientos de la ciudad de México observadas en todo el periodo de estudio: Se trata principalmente de ventolinas (11/17) que provienen de los sectores del norte (11/17), de carácter convergente (16/17) y ciclónico (11/17).

Es interesante observar que el porcentaje de eventos convergentes es considerablemente mayor al 50%, lo cual no puede explicarse solamente en términos del ciclo diurno de los vientos catabáticos producidos por el sistema valle-montañas de la Ciudad de México. Tal cantidad de eventos convergentes indica la presencia de éstos durante las horas de luz del día, cosa que ocurre, por ejemplo, bajo los efectos de la isla de calor urbana.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

En la Figura 5.3 se muestran las densidades parciales de estados de viento discretos para los periodos de 00-07 horas (mañana), de 08-15 horas (mañana y tarde temprana) y de 16-23 horas (tarde tardía y noche). Cada identificador de hora (00, 01, 02, ..., 23) denota el inicio del periodo de una hora que se consideró para el promedio temporal. Las frecuencias de los estados de viento en cada grafica son absolutas, es decir corresponden a todo el periodo de estudio. En cada una de las Tablas 5.3, 5.4 y 5.5 se presentan los primeros 15 estados de viento con las frecuencias de ocurrencia más altas en el intervalo de tiempo correspondiente.

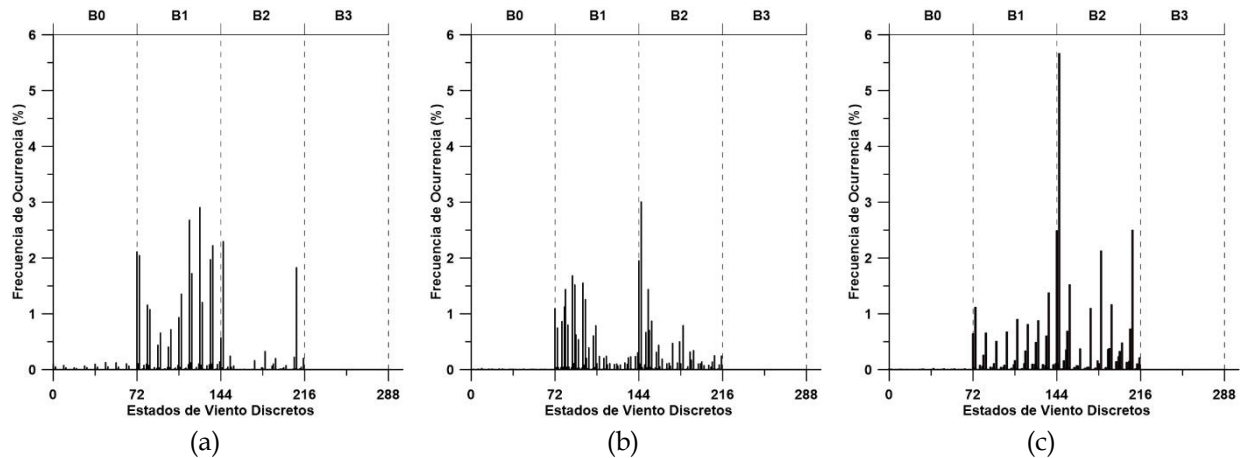


Figura 5.3. Distribuciones de frecuencias de los estados de viento discretos de la Ciudad de México. (a) Horas: 00-07. (b) Horas: 08-15. (c) Horas: 16-23.

Tabla 5.3. Estados de viento con las frecuencias más altas en el intervalo 00-07 h						
ID	$(v, \theta, \gamma, \omega)$	DOS (00-07)	WSP	WDR	DIV	VOR
126	(1, 6, 0, 0)	2.9077	$0.25 < v < 1.5$	W	Convergente	Anticiclónico
117	(1, 5, 0, 0)	2.6776	$0.25 < v < 1.5$	SW	Convergente	Anticiclónico
146	(2, 0, 0, 2)	2.2954	$1.5 < v < 3.5$	N	Convergente	Ciclónico
137	(1, 7, 0, 2)	2.2231	$0.25 < v < 1.5$	NW	Convergente	Ciclónico
72	(1, 0, 0, 0)	2.1109	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergente	Anticiclónico
74	(1, 0, 0, 2)	2.0462	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergente	Ciclónico
135	(1, 7, 0, 0)	1.9721	$0.25 < v < 1.5$	NW	Convergente	Anticiclónico
209	(2, 7, 0, 2)	1.8276	$1.5 < v < 3.5$	NW	Convergente	Ciclónico
119	(1, 5, 0, 2)	1.7230	$0.25 < v < 1.5$	SW	Convergente	Ciclónico
110	(1, 4, 0, 2)	1.3559	$0.25 < v < 1.5$	S	Convergente	Ciclónico
128	(1, 6, 0, 2)	1.2057	$0.25 < v < 1.5$	W	Convergente	Ciclónico
81	(1, 1, 0, 0)	1.1562	$0.25 < v < 1.5$	NE	Convergente	Anticiclónico
83	(1, 1, 0, 2)	1.0783	$0.25 < v < 1.5$	NE	Convergente	Ciclónico
108	(1, 4, 0, 0)	0.9337	$0.25 < v < 1.5$	S	Convergente	Anticiclónico
101	(1, 3, 0, 2)	0.7169	$0.25 < v < 1.5$	SE	Convergente	Ciclónico

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tabla 5.4. Estados de viento con las frecuencias más altas en el intervalo 08-15 h

ID	$(v, \theta, \gamma, \omega)$	DOS (08-15)	WSP	WDR	DIV	VOR
146	(2, 0, 0, 2)	3.0066	$1.5 < v < 3.5$	N	Convergente	Ciclónico
144	(2, 0, 0, 0)	1.9512	$1.5 < v < 3.5$	N	Convergente	Anticiclónico
87	(1, 1, 2, 0)	1.6811	$0.25 < v < 1.5$	NE	Divergente	Anticiclónico
96	(1, 2, 2, 0)	1.5518	$0.25 < v < 1.5$	E	Divergente	Anticiclónico
89	(1, 1, 2, 2)	1.5195	$0.25 < v < 1.5$	NE	Divergente	Ciclónico
81	(1, 1, 0, 0)	1.4358	$0.25 < v < 1.5$	NE	Convergente	Anticiclónico
152	(2, 0, 2, 2)	1.4358	$1.5 < v < 3.5$	N	Divergente	Ciclónico
98	(1, 2, 2, 2)	1.2589	$0.25 < v < 1.5$	E	Divergente	Ciclónico
80	(1, 0, 2, 2)	1.1239	$0.25 < v < 1.5$	N	Divergente	Ciclónico
72	(1, 0, 0, 0)	1.0954	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergente	Anticiclónico
155	(2, 1, 0, 2)	0.8691	$1.5 < v < 3.5$	NE	Convergente	Ciclónico
78	(1, 0, 2, 0)	0.8634	$0.25 < v < 1.5$	N	Divergente	Anticiclónico
83	(1, 1, 0, 2)	0.8006	$0.25 < v < 1.5$	NE	Convergente	Ciclónico
182	(2, 4, 0, 2)	0.7911	$1.5 < v < 3.5$	S	Convergente	Ciclónico
107	(1, 3, 2, 2)	0.7892	$0.25 < v < 1.5$	SE	Divergente	Ciclónico

Tabla 5.5. Estados de viento con las frecuencias más altas en el intervalo 16-23 h

ID	$(v, \theta, \gamma, \omega)$	DOS (16-23)	WSP	WDR	DIV	VOR
146	(2, 0, 0, 2)	5.6614	$1.5 < v < 3.5$	N	Convergente	Ciclónico
209	(2, 7, 0, 2)	2.4970	$1.5 < v < 3.5$	NW	Convergente	Ciclónico
144	(2, 0, 0, 0)	2.4874	$1.5 < v < 3.5$	N	Convergente	Anticiclónico
182	(2, 4, 0, 2)	2.1261	$1.5 < v < 3.5$	S	Convergente	Ciclónico
155	(2, 1, 0, 2)	1.5195	$1.5 < v < 3.5$	NE	Convergente	Ciclónico
137	(1, 7, 0, 2)	1.3730	$0.25 < v < 1.5$	NW	Convergente	Ciclónico
191	(2, 5, 0, 2)	1.1639	$1.5 < v < 3.5$	SW	Convergente	Ciclónico
74	(1, 0, 0, 2)	1.1144	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergente	Ciclónico
173	(2, 3, 0, 2)	1.0954	$1.5 < v < 3.5$	SE	Convergente	Ciclónico
110	(1, 4, 0, 2)	0.8995	$0.25 < v < 1.5$	S	Convergente	Ciclónico
128	(1, 6, 0, 2)	0.8748	$0.25 < v < 1.5$	W	Convergente	Ciclónico
119	(1, 5, 0, 2)	0.8082	$0.25 < v < 1.5$	SW	Convergente	Ciclónico
207	(2, 7, 0, 0)	0.7284	$1.5 < v < 3.5$	NW	Convergente	Anticiclónico
153	(2, 1, 0, 0)	0.6865	$1.5 < v < 3.5$	NE	Convergente	Anticiclónico
101	(1, 3, 0, 2)	0.6751	$0.25 < v < 1.5$	SE	Convergente	Ciclónico

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

En la Tabla 5.6, para cada periodo de 8 horas del día, se presentan las fracciones de ocurrencia de los estados discretos de acuerdo a las características convergentes, ciclónicas, categoría en la escala de Beaufort y dirección del viento. Aquí se observa que durante el periodo de la madrugada (00-07) predominan vientos con carácter de ventolinas (25.4%), convergentes (31.5%), ligeramente ciclónicos (18.0%), y que provienen de los sectores N (7.8%) y NW (7.1%), principalmente, pero también, aunque en menor grado, del SW (5.2%) y W (4.7%). En el segundo periodo (08-15), que abarca la mañana y parte de la tarde, de nuevo predominan ventolinas (18.5%) y vientos ligeros (14.5%), ciclónicos (18.5%) que llegan a la ciudad desde los sectores N (11.4%), NE (8.2%) y E (4.7%); en este caso, sin embargo, existe un balance equilibrado entre las características de convergencia (17%) y divergencia (16.3%). Al final de la tarde y hasta medianoche (periodo 16-23), ocurren vientos ligeros (22.3%) predominantemente convergentes (29.9%) y ciclónicos (24.4%) que provienen principalmente de los sectores N (10.8%) y NW (5.8%), y en menor grado del S (3.9%) y NE (3.4%).

Tabla 5.6. Fracciones (% absoluto) de los estados de viento discretos con carácter convergente, ciclónico, de pertenencia a los primeros niveles de la escala de Beaufort, y de dirección del viento, para cada intervalo de 8 horas del día. Nótese que, debido a que el total de los eventos fue dividido en tres grupos (00-07, 08-15, 16-23), la frecuencia absoluta máxima que pudiera haber alcanzado cada parámetro sería del 33.33%.

Periodo	Estados Convergentes	Estados Ciclónicos	Categoría en la Escala de Beaufort				Dirección del Viento							
			0	1	2	3	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
00-07	31.5	18.0	1.1	25.4	6.8	0	7.8	2.6	1.3	1.6	3.0	5.2	4.7	7.1
08-15	17.0	18.5	0.3	18.5	14.5	0	11.4	8.2	4.7	3.3	2.1	1.2	0.8	1.8
16-23	29.9	24.4	0.2	10.9	22.3	0	10.8	3.4	1.2	2.2	3.9	3.3	2.7	5.8
Total	78.4	60.9	1.6	54.8	43.6	0	30.0	14.2	7.2	7.1	9	9.7	8.2	14.7

5.4. Las Características de los Estados de Dirección del Viento

El *estado de dirección del viento* (EDV) es una versión reducida del concepto de estado de viento discreto del modelo de representación del viento de cuatro celdas⁹. El EDV se define con las direcciones del viento¹⁰ en las celdas (cuadrantes) NE, NW, SW y SE del dominio reticular, y proporciona una representación pictórica sencilla de la circulación del viento en el dominio, la cual hace fácil una identificación cualitativa de los atributos de dirección de flujo, divergencia y vorticidad del viento. Cada estado de dirección del viento se denota por un número octal de cuatro dígitos (o por su equivalente decimal). De izquierda a derecha, los dígitos octales representan las direcciones del viento en los cuadrantes NE, NW, SW y SE, respectivamente.

En la Figura 5.4 se muestran las frecuencias de ocurrencia absolutas de los estados de dirección del viento de la Ciudad de México para el periodo de los años de 2001 a 2006.

⁹ Véase el capítulo 3, sección 3.4.

¹⁰ Las direcciones del viento deben estar expresadas en la escala discreta de ocho categorías: N, NE, E, SE, S, SW, W, y NW.

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Por su parte, en la Tabla 5.7 se enlistan los primeros 15 estados de dirección del viento que obtuvieron las frecuencias más altas. Estos estados, en conjunto, ocurrieron durante el 23% de los eventos de viento del periodo de estudio.

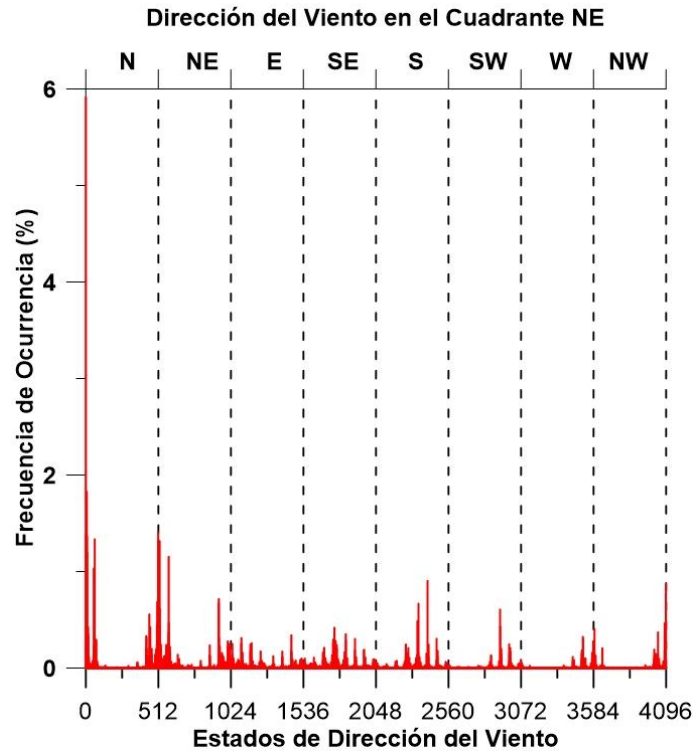


Figura 5.4. Frecuencias de ocurrencia de los estados de dirección del viento de la Ciudad de México en el periodo de 2001 a 2006.

Tabla 5.7. Estados de dirección del viento de la Ciudad de México con las frecuencias más altas.																																
EDV(D)	EDV(O)	FREC (n)	FREC (%)	Significado de los dígitos octales																												
0	0000	3111	5.91624829	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>0</td><td>N</td><td>↓</td></tr> <tr><td>1</td><td>NE</td><td>↙</td></tr> <tr><td>2</td><td>E</td><td>←</td></tr> <tr><td>3</td><td>SE</td><td>↘</td></tr> <tr><td>4</td><td>S</td><td>↑</td></tr> <tr><td>5</td><td>SW</td><td>↖</td></tr> <tr><td>6</td><td>W</td><td>→</td></tr> <tr><td>7</td><td>NW</td><td>↗</td></tr> </table> 1653 = <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>→</td><td>↙</td></tr> <tr><td>↖</td><td>↘</td></tr> </table>	0	N	↓	1	NE	↙	2	E	←	3	SE	↘	4	S	↑	5	SW	↖	6	W	→	7	NW	↗	→	↙	↖	↘
0	N	↓																														
1	NE	↙																														
2	E	←																														
3	SE	↘																														
4	S	↑																														
5	SW	↖																														
6	W	→																														
7	NW	↗																														
→	↙																															
↖	↘																															
7	0007	961	1.82755211																													
511	0777	740	1.40727217																													
1	0001	726	1.38064811																													
8	0010	718	1.36543435																													
63	0077	702	1.33500685																													
513	1001	695	1.32169481																													
521	1011	692	1.31598965																													
512	1000	640	1.21710026																													
9	0011	629	1.19618135																													
585	1111	607	1.15434353																													
56	0070	543	1.0326335																													
2412	4554	475	0.9033166																													
4095	7777	459	0.87288909																													
4094	7776	403	0.76639282																													

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.

En la última columna de la Tabla 5.7 se incluyó la información necesaria para la interpretación física (visual) de la expresión octal de los estados de dirección del viento, así como un ejemplo de esto. La Figura 5.4 y la Tabla 5.7, conjuntamente, permiten observar algunas de las características de la circulación de los vientos en la Ciudad de México durante el periodo de estudio. Se observa que de los 15 estados de mayor frecuencia que se presentan en la tabla, catorce de ellos representan vientos en los que, al menos en tres de los cuadrantes, los vientos soplan desde el NW, el N y el NE, siendo el estado 0 (octal: 0000), que corresponde a viento del norte en todos los cuadrantes, el que tiene la frecuencia más grande en absoluto (5.92%), con un valor más de tres veces mayor que el valor del estado 7 (octal: 0007) que le sigue en importancia con una frecuencia de (1.83%). El estado que hace la excepción es el 2412 (octal: 4554), que corresponde a una circulación del viento con flujo convergente y anticiclónico de sur a norte, tal como se muestra en la figura siguiente:

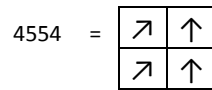


Figura 5.5. Estado 4554

En las gráficas de la Figura 5.6 se muestran las distribuciones de frecuencias de ocurrencia absolutas de los estados de dirección del viento ocurridos durante los intervalos de tiempo de 00-07 horas, 08-15 horas y 16-23 horas del día. Aquí se observa de inmediato que los vientos del norte, representados por el estado 0 (octal: 0000), ocurrieron principalmente después de la madrugada, es decir, durante los intervalos de 08-15 horas (2.6%) y 16-23 horas (2.4%), aunque en el periodo de la madrugada también fue este estado el de mayor frecuencia (0.9%).

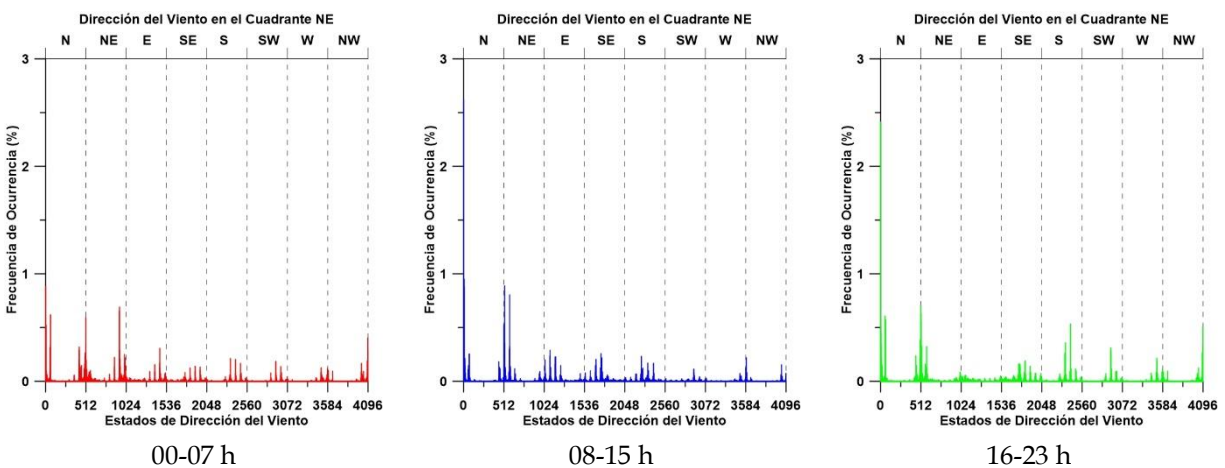


Figura 5.6. Frecuencias de ocurrencia absolutas de los estados de dirección del viento de la ciudad de México en el periodo de 2001-2006 para los intervalos de 00-07 h, 08-15 h y 16-23 h.

Los detalles de los estados de mayor frecuencia de cada intervalo temporal se muestran en las Tablas 5.8, 5.9 y 5.10. En cada tabla se incluyen los primeros quince estados de dirección del viento que ocurrieron con las frecuencias absolutas más altas en el periodo correspondiente.

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tabla 5.8. 00-07 h			Tabla 5.9. 08-15 h			Tabla 5.10. 16-23 h		
EDV (D)	EDV (O)	FREC (%)	EDV (D)	EDV (O)	FREC (%)	EDV (D)	EDV (O)	FREC (%)
0	0000	0.8824	0	0000	2.6206	0	0000	2.4133
939	1653	0.6903	8	0010	0.9490	511	0777	0.7055
938	1652	0.6504	521	1011	0.8881	513	1001	0.6276
63	0077	0.6181	9	0011	0.8805	56	0070	0.6066
511	0777	0.5933	7	0007	0.8539	63	0077	0.5705
7	0007	0.5230	585	1111	0.8044	512	1000	0.5553
4094	7776	0.4032	1	0001	0.5762	2412	4554	0.5325
510	0776	0.3537	512	1000	0.5268	1	0001	0.5287
62	0076	0.3442	513	1001	0.4906	4095	7777	0.5059
427	0653	0.3195	522	1012	0.3537	7	0007	0.4507
56	0070	0.3157	520	1010	0.3423	504	0770	0.3841
1451	2653	0.3081	586	1112	0.3233	2348	4454	0.3575
4095	7777	0.2929	584	1110	0.2967	8	0010	0.3385
428	0654	0.2872	1098	2112	0.2891	521	1011	0.3271
940	1654	0.2872	1746	3322	0.2567	585	1111	0.3233

En estas tablas se presentan los primeros quince estados de dirección del viento que obtuvieron las frecuencias más altas en cada uno de los intervalos de tiempo de 00-07 h, 08-15 h y 16-23 h en la Ciudad de México durante el periodo de 2001-2006.

Como ya era de esperarse gracias a los resultados anteriores, en estas tablas se observan numerosos estados que representan vientos que soplan del norte o que tienen una componente de flujo del norte.

En el intervalo de la madrugada (00-07h) se pueden identificar nueve estados que representan vientos del N y NW, pero se encuentran también seis estados (Octal: 1653, 1652, 0653, 2653, 0654 y 1654) que corresponden a vientos que fluyen de manera altamente convergente hacia el centro del dominio. Estos estados representan vientos que bajan (por gravedad) de las montañas (que rodean a la ciudad) hacia el valle (vientos catabáticos).

Para el periodo de la mañana y primeras horas de la tarde (08-15h) se encuentran principalmente estados que representan vientos del N y NE, lo cual probablemente es consecuencia del efecto vientos alisios¹¹ a escala sinóptica sobre la circulación en superficie.

En el periodo de la tarde hasta medianoche (16-23h) se encuentra que los estados de mayor frecuencia representan vientos que soplan principalmente del N, NE y NW; sin embargo, se pueden identificar también dos estados (Octal: 4554 y 4454) que representan vientos que soplan del S y SW.

¹¹ Los vientos alisios soplan de manera relativamente constante en verano (hemisferio norte) y menos en invierno. Circulan entre los trópicos, desde los 30-35° de latitud hacia el ecuador. Se dirigen desde las altas presiones subtropicales, hacia las bajas presiones ecuatoriales. El movimiento de rotación de la Tierra desvía a los alisios hacia el oeste, y por ello soplan del noreste al suroeste en el hemisferio norte y del sureste hacia el noroeste en el hemisferio sur. Véase: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Trade_winds

5.5. Los Patrones de Circulación del Viento de la Ciudad de México

En esta sección se resumen los resultados de la aplicación del método jerárquico del análisis de conglomerados al conjunto de los estados de viento que se registraron en la Ciudad de México en el periodo de 2001 al 2006. El objetivo de este análisis es la identificación de los principales patrones de la circulación de los vientos en esta zona. Las características generales del proceso de análisis fueron las siguientes.

La Base de Datos. El conjunto de objetos de datos sobre los que se aplicó el análisis de conglomerados estuvo constituido por los 52584 estados de viento horarios definidos por las tétradas (u, v, γ, ω) obtenidas con el modelo de representación del viento en una celda, aplicado a la Ciudad de México en el periodo de 2001-2006¹², siendo u y v las componentes horizontales del viento, y γ y ω la divergencia y la vorticidad del mismo. El análisis, sin embargo, se realizó considerando cada año de datos por separado y dividido en cuatro periodos que coinciden básicamente con las estaciones del año: Enero a Marzo (invierno), Abril a Junio (primavera), Julio a Septiembre (verano) y Octubre a Diciembre (otoño).

La Normalización de los Datos. Como paso previo a la aplicación del algoritmo de conglomeración se realizó un proceso de normalización de los objetos de datos. Este proceso se realizó mediante las transformaciones¹³

$$(u, v) \rightarrow \frac{(u, v)}{WSP_{max}}, \quad \gamma \rightarrow \frac{\gamma}{|\gamma|_{max}}, \quad \omega \rightarrow \frac{\omega}{|\omega|_{max}}$$

donde WSP_{max} , $|\gamma|_{max}$ y $|\omega|_{max}$ son el valor máximo de la rapidez del viento y los máximos absolutos de la divergencia y la vorticidad del viento, respectivamente, que se registraron durante el periodo de estudio. Estos factores de normalización permiten que los cuatro parámetros (mapeados todos en el intervalo de -1 a 1) contribuyan de manera igualmente importante en el cálculo de la distancia entre dos estados de viento.

El Algoritmo de Conglomeración. El algoritmo seleccionado para realizar el proceso de conglomeración fue el método jerárquico de Ward¹⁴ con una medida de distancia euclidiana.

El Programa de Análisis de Conglomerados. En la práctica, la determinación de los cúmulos o conglomerados se realizó usando el software *DataLab*¹⁵. Para el análisis realizado en este trabajo se escogió la situación correspondiente a seis cúmulos. A priori, sin embargo, no existe un criterio preferido que permita decidir cuál es el número de cúmulos que podrían esperarse en un conjunto dado de objetos. No obstante, aunque aquí no se hace, podría argumentarse la posibilidad de encontrar seis cúmulos en los datos de los eventos de viento en base a los cambios que sufre la temperatura durante el ciclo diurno de la insolación.

¹² Véase el capítulo 4, sección 4.4.

¹³ Véase el capítulo 3, sección 3.6.2.3.

¹⁴ Véase el capítulo 3, sección 3.6.2.4.

¹⁵ DataLab fue desarrollado por Hans Lohninger (*Software Development Lohninger & Epina Software Labs, Epina GmbH*). Véase el capítulo 3, sección 3.6.4.

5.5.1. Los Dendrogramas

En las Figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 se muestran los dendrogramas obtenidos con *DataLab* para los periodos ENERO-MARZO, ABRIL-JUNIO, JULIO-SEPTIEMBRE, y OCTUBRE-DICIEMBRE, respectivamente, de los seis años considerados. En estos dendrogramas se observa, en general, que el intervalo de valores del parámetro de distancia de Ward para el que existe la conglomeración de seis cúmulos es pequeño en comparación con los intervalos para los que permanecen las conglomeraciones con un número menor de cúmulos. En este sentido, partiendo de los nodos terminales hacia la raíz de cada dendrograma, la conglomeración de seis cúmulos marca el inicio de la formación de conglomeraciones más estables hasta llegar al caso de la conglomeración más grande que contiene a todos los estados de viento.

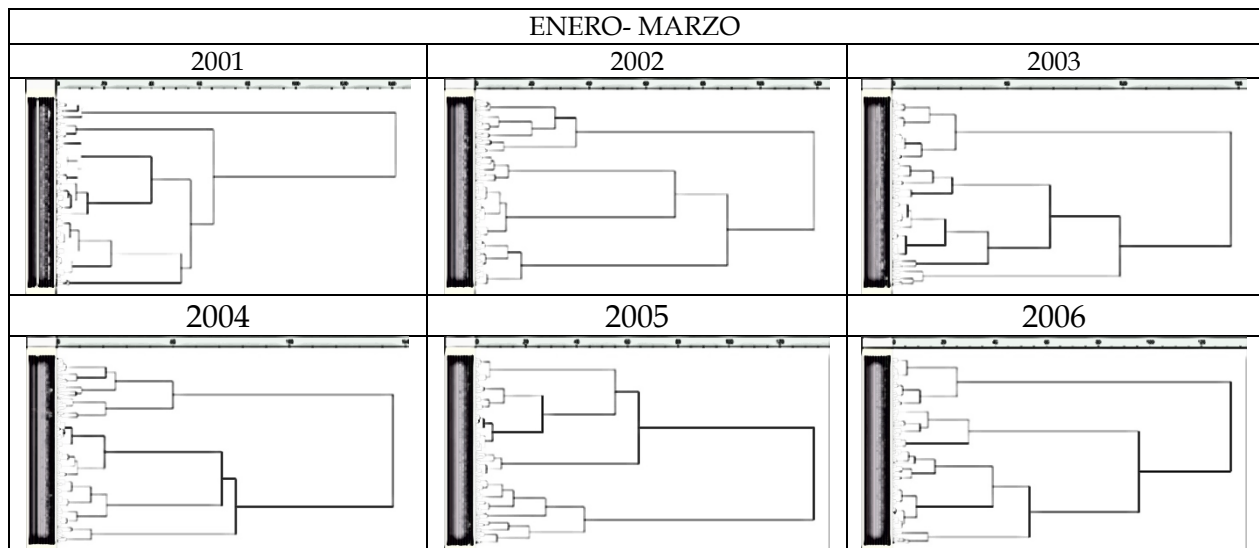


Figura 5.7. Dendrogramas de las conglomeraciones de los estados de viento de la Ciudad de Mexico para los periodos Enero-Marzo de los años 2001 a 2006.

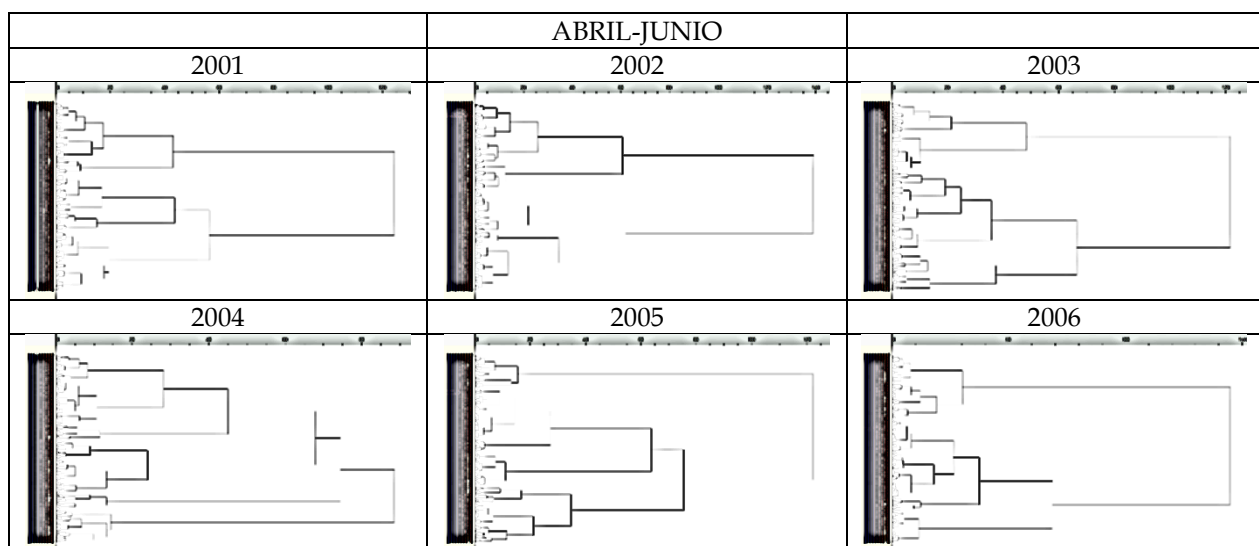
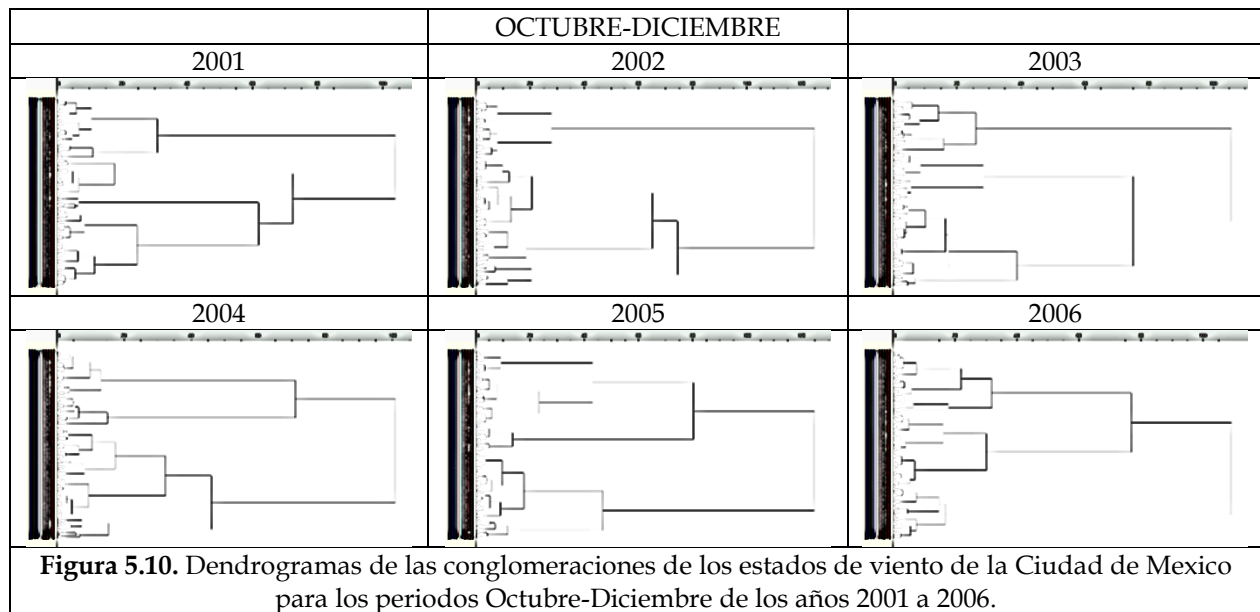
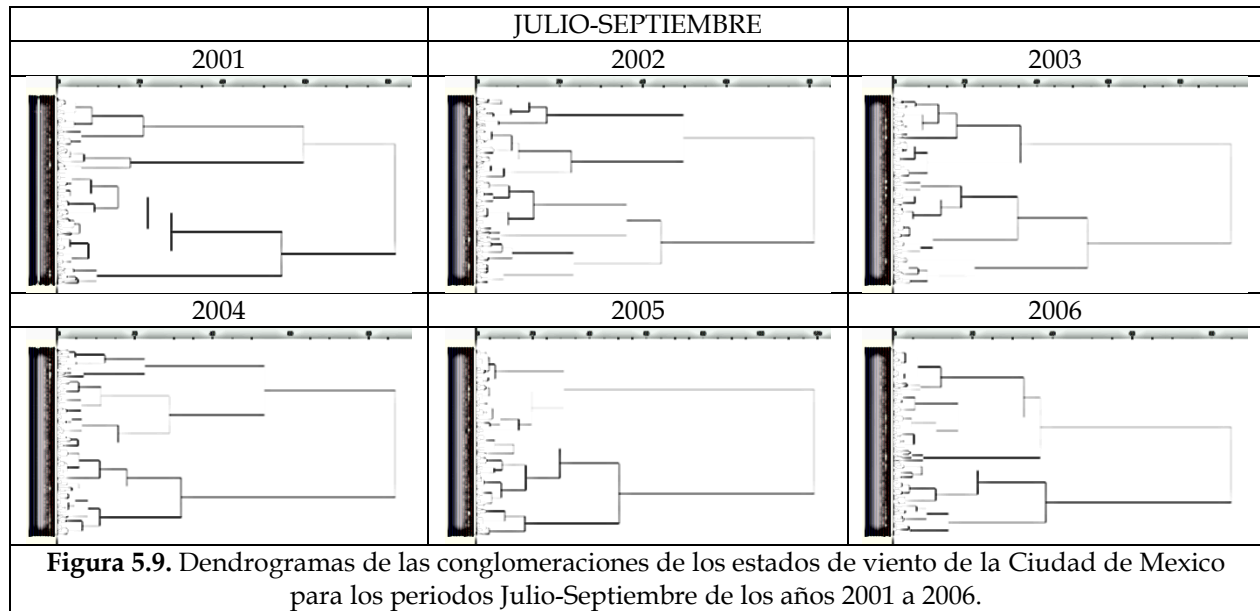


Figura 5.8. Dendrogramas de las conglomeraciones de los estados de viento de la Ciudad de Mexico para los periodos Abril-Junio de los años 2001 a 2006.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.



5.5.2. Los Cúmulos de los Periodos Estacionales

En las Figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 se muestran, para cada uno de los periodos estacionales, las gráficas de las distribuciones de población horaria de los cúmulos obtenidos para cada año del periodo de estudio. El eje vertical de cada una de estas graficas (titulado Fracción Poblacional) indica, para cada cúmulo graficado, el porcentaje de los estados de viento de ese cúmulo que ocurrieron en cada hora del día en el periodo estacional. Este porcentaje es relativo al número total de los estados de viento del periodo estacional considerado. Esto es, si G_{Ei} es el i -ésimo cúmulo obtenido para el periodo estacional E de un año dado, entonces la fracción poblacional de ese cúmulo a la hora h , $FP(G_{Ei}, h)$, se define como

$$FP(G_{Ei}, h) = 100 \left(\frac{\text{Numero de estados de viento del cumulo } G_{Ei} \text{ que ocurrieron a la hora } h}{\text{Numero total de los estados de viento ocurridos durante el periodo estacional } E} \right)$$

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

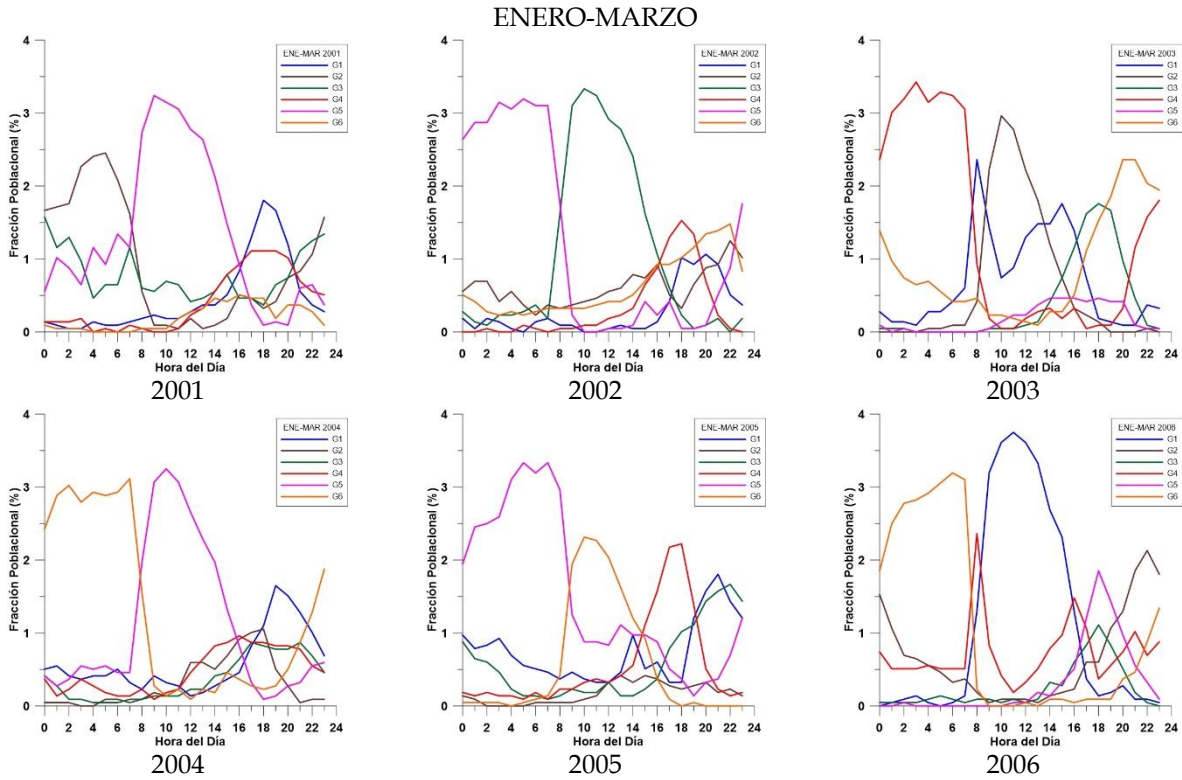


Figura 5.11. Fracciones poblacionales de los cúmulos de estados de viento de la Ciudad de México del periodo estacional Enero-Marzo (Invierno) para los años de 2001 a 2006.

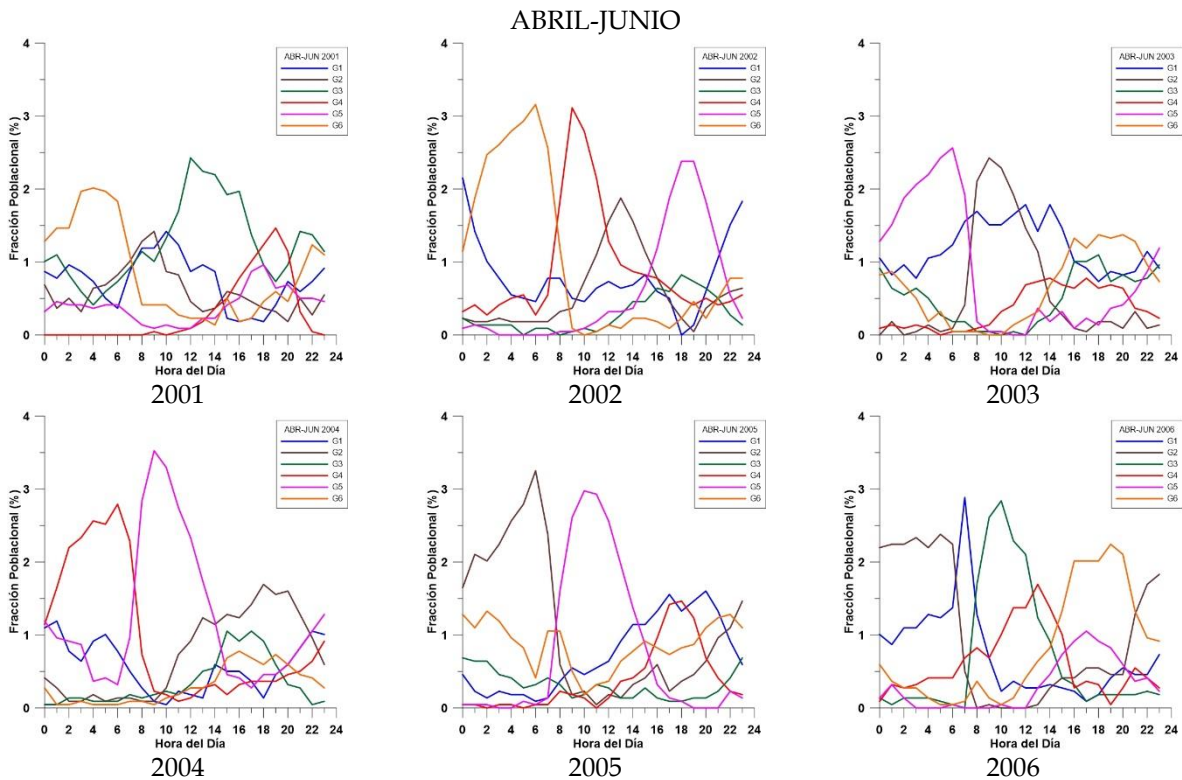


Figura 5.12. Fracciones poblacionales de los cúmulos de estados de viento de la Ciudad de México del periodo estacional Abril-Junio (Primavera) para los años de 2001 a 2006.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

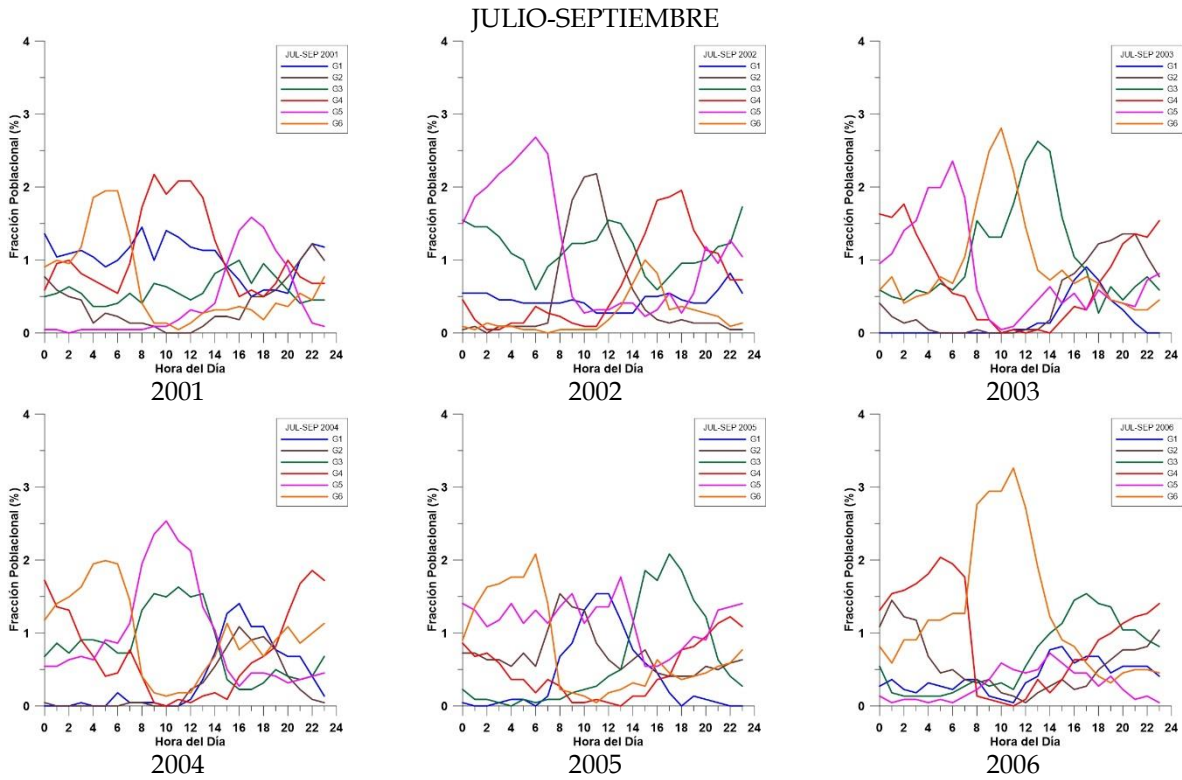


Figura 5.13. Fracciones poblacionales de los cúmulos de estados de viento de la Ciudad de México del periodo estacional Julio-Septiembre (Verano) para los años de 2001 a 2006.

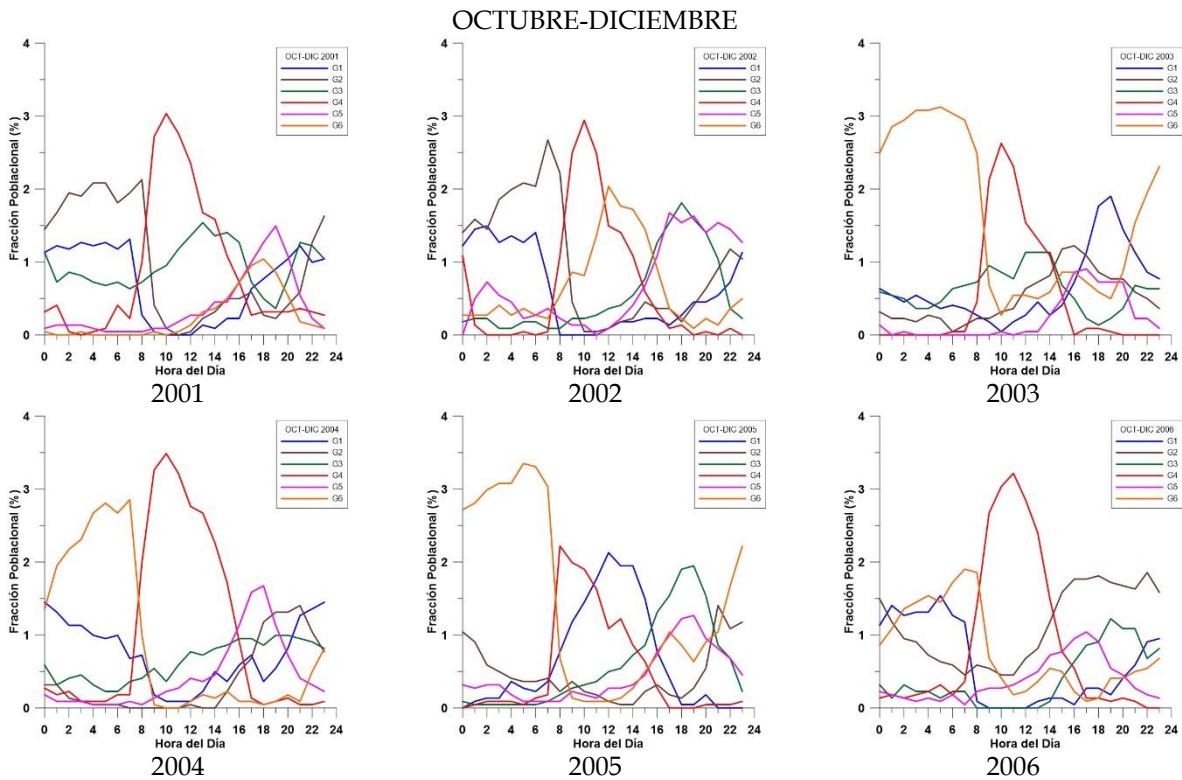


Figura 5.14. Fracciones poblacionales de los cúmulos de estados de viento de la Ciudad de México del periodo estacional Octubre-Diciembre (Otoño) para los años de 2001 a 2006.

En estas gráficas y en las tablas siguientes, los seis cúmulos se identifican como G1, G2, G3, G4, G5 y G6. Nótese, sin embargo, que esta identificación tiene un carácter puramente local; es decir, no necesariamente existe una correspondencia entre los cúmulos con la misma etiqueta que pertenecen a diferentes años o periodos estacionales.

Como puede observarse, no sólo entre las gráficas de los diferentes años del mismo periodo estacional existen muchas similitudes, sino que esto se ve incluso entre las gráficas de los diferentes periodos estacionales, sugiriendo claramente la existencia de patrones. Por ejemplo, en las horas de la madrugada, después de medianoche, se observa siempre, es decir, en todas las gráficas, un cúmulo relativamente más poblado que los demás, cuyo gráfico decrece muy rápidamente alrededor de la hora 8, justo cuando otro cúmulo crece por encima de los demás, alcanzando un máximo alrededor de mediodía, para luego decrecer hasta morir alrededor de la hora 16. Se observa también, en todas las gráficas de estas figuras, que durante las horas de la tarde e inicio de la noche se desarrollan estados de viento que forman cúmulos cuyos gráficos presentan máximos de población alrededor de las horas 18 o 19. Esto se explora y discute con detalle más adelante en este capítulo.

En las Tablas 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 se muestran, para cada periodo estacional, las características estadísticas de los cúmulos de estados de viento obtenidos para cada año del periodo de estudio. En estas tablas, para cada cúmulo los valores de los parámetros son los porcentajes de estados de viento que poseen el atributo indicado, relativos al número total de estados que el cúmulo considerado contiene. La intensidad del viento (WSP) está expresada en términos del significado cualitativo que se da a cada categoría de la escala de Beaufort y la dirección del viento (WDR) está expresada en términos de los principales ocho sectores de proveniencia del viento (N, NE, E, ..., NW). Para la divergencia (WDIV) y la vorticidad (WVOR) del viento se indican los porcentajes de estados de viento convergentes ($\gamma < 0$) y los porcentajes de estados anticlónicos ($\omega < 0$), respectivamente. Los complementos a 100 de estos dos parámetros son los porcentajes de estados divergentes y de estados ciclónicos.

Es interesante observar en estas tablas que, prácticamente, en todos los periodos estacionales de todos los años considerados, en cinco de los seis cúmulos existe un predominio fuerte de los estados de viento con carácter convergente; mientras que, con respecto a la vorticidad, se observa que, en promedio, los estados de viento ciclónicos predominan en cuatro de los seis cúmulos, aunque no de manera muy fuerte. Por otra parte, respecto a la intensidad del viento, se aprecia que en la mayoría de los cúmulos predominan estados que representan ventolinillas o brisas muy débiles, es decir, que en general la rapidez del viento se encuentra entre 0.5 y 3.5 m/s.

De manera complementaria, para obtener una visión más ilustrativa de la circulación de los vientos en la Ciudad de México, utilizando los resultados de la aplicación del modelo de cuatro celdas a los datos de viento proporcionados por la REDMET del SIMAT, para cada cúmulo obtenido se calculó, en cada celda del dominio reticular (es decir, para cada cuadrante de la ciudad), la dirección del viento promedio de los estados contenidos en ese cúmulo. Los resultados se resumen en las Tablas 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Tabla 5.11a. Características estadísticas de los cúmulos de estados de viento del periodo estacional Enero-Marzo. Para cada cúmulo, los valores de los parámetros son porcentajes relativos al total de eventos que forman el cúmulo.

2001		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	1	19	12	0	15	0
	Ventolina	23	75	78	28	81	4
	Brisa Muy Debil	75	5	10	72	4	92
	Brisa Debil	1	0	0	0	0	4
WDR	N	0	34	8	70	23	0
	NE	0	23	8	11	25	0
	E	0	9	9	0	21	0
	SE	26	2	21	0	12	0
	S	66	1	21	0	5	1
	SW	8	4	13	0	2	58
	W	0	7	11	1	2	41
NW	0	21	9	18	10	0	
WDIV	$\gamma < 0$	57	100	77	96	63	12
WVOR	$\omega < 0$	0	27	0	99	69	39
2002		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	6	7	12	0	35	0
	Ventolina	80	59	82	9	65	16
	Brisa Muy Debil	14	34	6	87	0	79
	Brisa Debil	0	0	0	4	0	5
WDR	N	19	1	21	0	17	80
	NE	23	0	21	1	11	4
	E	18	1	21	0	9	0
	SE	3	20	20	19	5	0
	S	12	36	8	73	9	0
	SW	8	26	4	6	16	0
	W	9	12	1	1	14	0
NW	7	3	3	0	18	15	
WDIV	$\gamma < 0$	100	81	36	91	100	93
WVOR	$\omega < 0$	1	16	71	0	44	61
2003		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	10	3	0	13	0	1
	Ventolina	65	86	9	78	3	43
	Brisa Muy Debil	25	12	78	8	61	54
	Brisa Debil	0	0	13	0	34	3
WDR	N	41	8	0	3	0	37
	NE	25	26	0	3	0	6
	E	9	33	0	2	0	2
	SE	8	19	12	2	0	1
	S	3	10	72	13	0	1
	SW	2	3	16	45	58	2
	W	4	0	0	27	42	9
NW	8	1	0	5	0	42	
WDIV	$\gamma < 0$	65	8	99	99	96	95
WVOR	$\omega < 0$	56	64	0	52	46	15

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tabla 5.11b. Características estadísticas de los cúmulos de estados de viento del periodo estacional Enero-Marzo. Para cada cúmulo, los valores de los parámetros son porcentajes relativos al total de eventos que forman el cúmulo.

2004		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	1	0	0	0	7	18
	Ventolina	59	1	1	14	73	76
	Brisa Muy Debil	40	84	72	61	20	7
	Brisa Debil	0	15	27	24	0	0
WDR	N	5	0	66	0	19	13
	NE	4	0	15	0	21	10
	E	6	0	0	0	19	5
	SE	13	23	0	0	17	2
	S	53	60	0	20	9	7
	SW	17	17	0	68	5	21
	W	1	0	0	12	3	23
WDIV	$\gamma < 0$	98	81	88	92	28	100
WVOR	$\omega < 0$	0	0	7	46	30	53
2005		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	3	0	0	1	23	5
	Ventolina	67	4	26	7	72	93
	Brisa Muy Debil	29	82	73	74	4	2
	Brisa Debil	0	13	1	18	0	0
WDR	N	2	0	44	0	22	7
	NE	1	0	2	0	18	31
	E	3	0	0	1	5	40
	SE	15	0	0	14	2	16
	S	36	0	0	58	4	3
	SW	37	61	0	24	16	1
	W	4	39	1	1	22	1
WDIV	$\gamma < 0$	84	78	95	92	89	5
WVOR	$\omega < 0$	16	77	15	5	70	44
2006		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	4	0	0	12	7	20
	Ventolina	76	39	0	68	41	79
	Brisa Muy Debil	21	61	74	21	47	1
	Brisa Debil	0	0	26	0	5	0
WDR	N	30	35	90	6	7	5
	NE	39	3	9	8	11	1
	E	21	0	0	13	5	0
	SE	5	0	0	17	15	2
	S	1	0	0	36	34	6
	SW	1	0	0	14	18	40
	W	0	7	0	4	5	38
WDIV	$\gamma < 0$	18	98	94	80	100	100
WVOR	$\omega < 0$	59	8	39	27	1	82

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Tabla 5.12a. Características estadísticas de los cúmulos de estados de viento del periodo estacional Abril-Junio. Para cada cúmulo, los valores de los parámetros son porcentajes relativos al total de eventos que forman el cúmulo.

2001		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	23	7	2	0	12	13
	Ventolina	77	77	68	6	48	67
	Brisa Muy Debil	1	16	30	91	40	20
	Brisa Debil	0	0	0	3	0	0
WDR	N	20	2	58	24	5	37
	NE	15	14	23	73	7	17
	E	6	31	5	3	17	8
	SE	9	15	1	0	35	5
	S	8	13	0	0	30	5
	SW	10	15	1	0	6	3
	W	13	8	1	0	1	6
WDIV	$\gamma < 0$	41	62	94	100	90	98
WVOR	$\omega < 0$	79	21	98	70	0	26
2002		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	0	0	5	5	0	31
	Ventolina	43	12	52	78	0	68
	Brisa Muy Debil	57	88	43	15	68	1
	Brisa Debil	0	0	0	1	32	0
WDR	N	50	85	9	21	73	16
	NE	11	6	23	19	26	17
	E	0	0	13	12	0	8
	SE	0	0	21	16	0	8
	S	0	0	21	14	0	15
	SW	0	0	6	8	0	15
	W	4	0	2	4	0	9
WDIV	$\gamma < 0$	95	46	97	32	98	98
WVOR	$\omega < 0$	45	35	3	37	36	73
2003		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	1	7	1	0	15	1
	Ventolina	48	85	32	1	82	44
	Brisa Muy Debil	51	8	64	74	2	53
	Brisa Debil	0	0	3	25	0	2
WDR	N	40	11	53	75	6	0
	NE	10	32	17	25	3	0
	E	0	24	3	0	1	6
	SE	0	19	0	0	2	10
	S	0	8	0	0	10	42
	SW	4	1	0	0	28	36
	W	12	3	2	0	35	5
WDIV	$\gamma < 0$	72	31	100	67	100	91
WVOR	$\omega < 0$	42	63	13	23	50	2

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tabla 5.12b. Características estadísticas de los cúmulos de estados de viento del periodo estacional Abril-Junio. Para cada cúmulo, los valores de los parámetros son porcentajes relativos al total de eventos que forman el cúmulo.

2004		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	8	0	2	21	4	0
	Ventolina	77	17	20	75	76	7
	Brisa Muy Debil	15	77	72	4	20	74
	Brisa Debil	0	6	7	0	0	19
WDR	N	2	62	1	18	25	0
	NE	3	25	3	12	20	0
	E	6	3	3	5	11	0
	SE	13	1	49	3	8	0
	S	29	0	36	4	5	2
	SW	33	0	6	11	5	63
	W	9	0	2	23	8	33
NW	5	9	1	24	18	2	
WDIV	$\gamma < 0$	100	93	70	100	41	72
WVOR	$\omega < 0$	6	15	0	75	25	67
2005		G1	G2	G3	G4	G5	G6
	Ventolina	1	78	27	28	79	64
	Brisa Muy Debil	82	4	73	67	18	26
	Brisa Debil	17	0	0	4	0	5
WDR	N	78	27	35	0	34	1
	NE	19	11	0	2	43	1
	E	0	4	0	21	17	5
	SE	0	2	0	26	4	9
	S	0	4	0	40	0	21
	SW	0	13	0	9	0	42
	W	0	17	2	2	0	19
NW	3	22	62	2	2	2	
WDIV	$\gamma < 0$	97	100	90	85	21	77
WVOR	$\omega < 0$	11	73	25	0	39	24
2006		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	19	14	3	0	1	0
	Ventolina	77	71	84	22	28	0
	Brisa Muy Debil	3	15	13	78	70	79
	Brisa Debil	0	0	0	0	2	20
WDR	N	25	12	15	70	1	71
	NE	17	2	43	26	1	24
	E	9	0	24	1	5	0
	SE	6	2	9	0	22	0
	S	4	8	5	0	28	0
	SW	5	26	3	0	37	0
	W	12	22	0	0	6	0
NW	22	28	1	3	1	5	
WDIV	$\gamma < 0$	90	100	17	94	79	99
WVOR	$\omega < 0$	52	49	44	48	16	38

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Tabla 5.13a. Características estadísticas de los cúmulos de estados de viento del periodo estacional Julio-Septiembre. Para cada cúmulo, los valores de los parámetros son porcentajes relativos al total de eventos que forman el cúmulo.

JUL-SEP 2001		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	1	3	8	13	0	18
	Ventolina	62	54	66	79	4	82
	Brisa Muy Debil	37	43	26	9	92	0
	Brisa Debil	0	0	0	0	4	0
WDR	N	73	58	0	42	82	40
	NE	13	21	2	18	16	26
	E	0	3	17	5	0	9
	SE	0	1	41	2	0	2
	S	0	0	29	2	0	2
	SW	0	0	9	4	0	6
	W	0	1	2	8	0	4
	NW	13	15	0	18	2	12
WDIV	$\gamma < 0$	90	100	68	56	100	100
WVOR	$\omega < 0$	38	2	8	90	53	64
JUL-SEP 2002		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	12	4	2	0	19	2
	Ventolina	59	87	38	26	80	44
	Brisa Muy Debil	29	9	60	69	1	52
	Brisa Debil	0	0	0	4	0	2
WDR	N	2	24	60	47	29	1
	NE	1	51	3	39	17	2
	E	4	16	0	5	9	13
	SE	19	4	0	0	7	48
	S	23	0	0	0	6	30
	SW	27	0	1	0	5	2
	W	20	0	4	0	7	2
	NW	5	5	31	7	20	2
WDIV	$\gamma < 0$	52	37	70	100	98	100
WVOR	$\omega < 0$	22	60	15	31	41	5
JUL-SEP 2003		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	0	2	0	0	17	11
	Ventolina	0	33	35	56	78	73
	Brisa Muy Debil	69	66	64	44	5	16
	Brisa Debil	31	0	1	0	0	0
WDR	N	74	53	62	17	25	14
	NE	26	20	28	0	16	22
	E	0	4	4	0	9	14
	SE	0	4	0	0	6	13
	S	0	0	0	0	10	7
	SW	0	1	0	0	12	9
	W	0	1	0	14	10	12
	NW	0	17	6	69	12	9
WDIV	$\gamma < 0$	100	100	71	91	100	35
WVOR	$\omega < 0$	15	2	12	6	30	45

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tabla 5.13b. Características estadísticas de los cúmulos de estados de viento del periodo estacional Julio-Septiembre. Para cada cúmulo, los valores de los parámetros son porcentajes relativos al total de eventos que forman el cúmulo.

2004		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	1	0	0	0	7	19
	Ventolina	41	0	36	51	82	68
	Brisa Muy Debil	59	85	64	49	10	13
	Brisa Debil	0	15	0	0	0	0
WDR	N	41	83	73	28	26	16
	NE	36	16	0	0	32	7
	E	8	0	0	0	10	8
	SE	3	0	0	0	4	14
	S	2	0	0	1	4	8
	SW	2	0	0	0	6	10
	W	0	0	3	6	5	18
NW	9	1	24	64	13	19	
WDIV	$\gamma < 0$	100	98	60	100	63	96
WVOR	$\omega < 0$	32	38	11	17	50	45
2005		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	0	12	0	1	0	23
	Ventolina	77	69	1	12	47	73
	Brisa Muy Debil	23	18	87	87	53	4
	Brisa Debil	0	0	12	0	0	0
WDR	N	29	7	70	49	63	29
	NE	64	10	29	2	5	13
	E	7	17	1	5	1	4
	SE	0	26	0	1	0	5
	S	0	10	0	0	0	3
	SW	0	7	0	0	1	11
	W	0	9	0	1	1	15
NW	0	15	0	41	29	21	
WDIV	$\gamma < 0$	66	44	100	100	93	100
WVOR	$\omega < 0$	44	42	24	0	24	53
2006		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	14	0	0	18	0	10
	Ventolina	75	56	4	71	47	78
	Brisa Muy Debil	11	44	90	11	50	12
	Brisa Debil	0	0	6	0	3	0
WDR	N	18	47	74	18	1	39
	NE	27	3	16	4	2	23
	E	13	1	0	3	18	8
	SE	8	0	0	4	53	5
	S	7	0	0	7	26	3
	SW	6	0	0	15	1	2
	W	9	2	0	19	0	5
NW	12	47	10	30	1	17	
WDIV	$\gamma < 0$	100	96	95	97	35	60
WVOR	$\omega < 0$	4	1	28	65	14	35

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Tabla 5.14a. Características estadísticas de los cúmulos de estados de viento del periodo estacional Octubre-Diciembre. Para cada cúmulo, los valores de los parámetros son porcentajes relativos al total de eventos que forman el cúmulo.

2001		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	33	27	1	8	0	0
	Ventolina	62	70	52	85	5	28
	Brisa Muy Debil	5	2	46	7	92	70
	Brisa Debil	0	0	0	0	3	2
WDR	N	23	29	69	6	96	0
	NE	10	23	11	21	2	0
	E	10	7	0	21	0	4
	SE	13	6	0	22	0	39
	S	10	4	0	18	0	54
	SW	9	5	0	7	0	3
	W	14	6	0	2	0	0
WDIV	$\gamma < 0$	100	100	73	26	100	93
WVOR	$\omega < 0$	5	59	77	59	80	0
2002		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	16	31	1	2	1	0
	Ventolina	73	68	43	95	43	56
	Brisa Muy Debil	11	0	54	3	51	43
	Brisa Debil	1	0	1	0	5	1
WDR	N	4	7	6	13	63	68
	NE	1	12	4	39	10	20
	E	0	8	7	31	1	0
	SE	1	9	30	9	0	0
	S	13	22	41	1	0	0
	SW	45	17	4	1	0	0
	W	29	13	2	1	2	1
WDIV	$\gamma < 0$	98	98	97	24	99	52
WVOR	$\omega < 0$	73	40	0	65	15	35
2003		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	1	0	1	10	2	28
	Ventolina	50	6	75	85	38	68
	Brisa Muy Debil	50	80	24	5	59	3
	Brisa Debil	0	14	0	0	0	0
WDR	N	51	93	47	12	0	8
	NE	13	7	4	31	1	11
	E	1	0	0	31	4	8
	SE	0	0	0	19	41	10
	S	0	0	0	3	33	17
	SW	0	0	0	1	8	24
	W	1	0	9	0	8	15
WDIV	$\gamma < 0$	98	82	46	1	93	93
WVOR	$\omega < 0$	12	13	20	29	0	61

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tabla 5.14b. Características estadísticas de los cúmulos de estados de viento del periodo estacional Octubre-Diciembre. Para cada cúmulo, los valores de los parámetros son porcentajes relativos al total de eventos que forman el cúmulo.

2004		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	8	6	0	5	0	41
	Ventolina	89	52	5	87	47	59
	Brisa Muy Debil	3	42	86	8	50	0
	Brisa Debil	0	0	9	0	3	0
WDR	N	22	26	76	25	0	11
	NE	9	7	1	34	2	4
	E	5	2	0	23	12	4
	SE	2	0	0	8	33	2
	S	10	2	0	1	31	7
	SW	11	2	0	0	13	19
	W	15	6	0	1	8	32
WDIV	$\gamma < 0$	99	100	81	24	84	99
WVOR	$\omega < 0$	21	23	14	43	12	95
2005		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	2	0	0	11	2	26
	Ventolina	60	32	0	87	58	71
	Brisa Muy Debil	39	68	88	2	40	4
	Brisa Debil	0	0	12	0	0	0
WDR	N	68	39	89	10	0	19
	NE	25	0	5	36	0	6
	E	1	0	0	30	4	2
	SE	0	0	0	11	15	2
	S	0	0	0	5	50	4
	SW	0	0	0	2	24	24
	W	0	2	0	4	6	22
WDIV	$\gamma < 0$	62	96	100	26	96	99
WVOR	$\omega < 0$	48	13	16	72	0	65
2006		G1	G2	G3	G4	G5	G6
WSP	Calma	19	1	11	4	0	27
	Ventolina	77	47	81	91	36	73
	Brisa Muy Debil	3	52	8	5	62	0
	Brisa Debil	0	0	0	0	3	0
WDR	N	2	47	10	22	0	11
	NE	1	4	4	29	0	7
	E	2	0	5	25	4	8
	SE	2	0	5	13	48	8
	S	17	0	18	2	38	10
	SW	42	0	15	0	10	24
	W	29	5	16	0	1	19
WDIV	$\gamma < 0$	100	83	100	11	81	82
WVOR	$\omega < 0$	100	4	29	31	53	57

5.5.3. Los Estados de Dirección del Viento Medio de los Cúmulos

Cada cúmulo obtenido mediante el proceso de conglomeración realizado contiene un número de estados de viento con características similares que, en promedio, representan una forma específica de circulación del viento en la Ciudad de México. En este sentido, cada cúmulo representa, estadísticamente, un caso de un patrón de la circulación del viento en esta zona.

Se puede obtener una visión ilustrativa de la circulación del viento que cada cúmulo representa utilizando los resultados de la aplicación del modelo de cuatro celdas a los datos de viento proporcionados por la REDMET del SIMAT. Para cada evento horario del viento, esta aplicación proporciona una tétrada (u, v, γ, ω) para cada una de las cuatro celdas (o cuadrantes: *NE, NW, SW, SE*) de la ciudad. Entonces, si el cúmulo G_i contiene N_i estados de viento (identificados con el índice $j = 1, 2, 3, \dots, N$), las componentes de la velocidad media en la celda C_k ($k = NE, NW, SW, SE$), están dadas por

$$u_{ki} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} u_{kij}$$

$$v_{ki} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} v_{kij}$$

Aquí, (u_{ki}, v_{ki}) son las componentes de la velocidad media del viento en la celda C_k del dominio reticular, en el cúmulo G_i ; mientras que (u_{kij}, v_{kij}) son las componentes de la velocidad del viento en la celda C_k correspondientes al j -ésimo estado de viento del cúmulo G_i . La dirección del viento medio en la celda C_k en el cúmulo G_i está dada por

$$\theta_{ki} = 180 \left[1 + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{u_{ki}}{v_{ki}} \right) \right]$$

Las direcciones θ_{NEi} , θ_{NW_i} , θ_{SW_i} y θ_{SEi} del viento medio en las celdas *NE, NW, SW* y *SE* del dominio reticular, expresadas en la escala discreta de ocho sectores cardinales (*N, NE, E, SE, S, SW, W* y *NW*) definen el estado de dirección del viento medio para el cúmulo G_i . Por ejemplo, si $\theta_{NEi} = N$, $\theta_{NW_i} = W$, $\theta_{SW_i} = S$ y $\theta_{SEi} = E$, entonces el estado de dirección del viento (*N, W, S, E*) se denota con el número octal 0642 y se representa pictóricamente como sigue:

→	↓
↑	←

Siguiendo este procedimiento, para cada periodo estacional, se obtuvieron los estados de dirección del viento medio para cada uno de los seis cúmulos de cada año del periodo de estudio. Los resultados se resumen en las Tablas 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18. Cada tabla incluye, para cada cúmulo, las componentes (u, v) del viento medio y la dirección de viento asociada θ para cada cuadrante de la ciudad, así como la correspondiente representación pictórica.

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tabla 5.15. Estados de dirección del viento medio de los cúmulos del periodo estacional Enero-Marzo.

2001	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
	Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v
NE	-1.17	3.20	159.96	-0.35	-0.87	22.06	-0.45	0.58	142.29	0.12	-3.13	357.84	-0.38	-0.53	35.92	2.93	2.42	230.53
NW	0.00	1.15	179.88	0.28	-0.71	338.61	0.05	0.01	263.54	0.55	-1.83	343.26	-0.01	-0.37	1.92	2.42	1.11	245.23
SW	0.50	0.03	267.12	0.26	-0.11	292.71	0.28	-0.14	296.17	-0.50	-0.09	80.27	-0.19	0.03	99.00	0.90	-0.34	290.86
SE	0.09	2.19	182.28	-0.17	0.20	139.76	-0.07	0.70	174.70	-0.11	-0.77	7.99	-0.09	-0.07	54.13	1.62	0.77	244.57
		↑	↑		↓	↓		→	↖		↓	↓		↓	↙		↗	↗
		→	↑		↘	↖		↘	↑		←	↓		←	↙		→	↗
2002	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	-0.87	-0.33	69.26	0.30	1.21	193.87	-0.33	-0.10	73.56	-0.94	2.93	162.31	-0.33	-0.39	40.38	-0.24	-2.56	5.34
NW	0.45	-1.29	340.94	0.41	0.71	209.91	0.02	-0.20	354.09	-0.10	1.67	176.70	0.47	-0.28	301.00	0.86	-2.47	340.76
SW	0.46	-0.14	286.57	0.47	0.19	248.21	-0.31	-0.19	58.20	0.62	0.76	219.30	0.39	0.22	240.68	0.02	-1.32	359.05
SE	-0.40	0.89	155.80	0.01	1.00	180.59	-0.34	-0.16	63.98	-0.22	2.66	175.36	-0.21	0.15	126.30	0.02	-1.27	359.07
		↓	←		↗	↑		↓	←		↑	↑		↘	↙		↓	↓
		→	↖		→	↑		↙	↙		↗	↑		↗	↖		↓	↓
2003	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	-0.25	-0.70	19.42	-0.16	0.42	158.78	-1.03	2.82	159.93	-0.08	0.05	122.04	3.01	1.40	244.99	-0.10	-1.60	3.70
NW	-0.01	-1.01	0.49	-0.48	0.22	114.60	0.87	1.45	211.02	0.85	0.12	261.94	4.14	1.31	252.40	0.71	-2.13	341.43
SW	-0.25	-0.61	22.35	-0.73	-0.29	68.78	1.39	1.40	224.79	0.95	0.49	242.66	2.92	0.78	255.10	0.74	-0.95	322.12
SE	-0.23	-0.35	32.61	-0.43	0.09	101.34	-0.35	3.20	173.69	-0.14	0.55	165.80	1.20	1.98	211.23	0.36	-0.40	317.98
		↓	↓		↖	↑		↗	↑		→	↖		→	↗		↓	↓
		↓	↙		←	←		↗	↑		↗	↑		→	↗		↘	↘
2004	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	-0.66	1.13	149.66	-0.63	3.40	169.56	-1.19	-3.03	21.41	1.72	1.93	221.70	-0.17	0.03	100.67	-0.21	-0.31	33.76
NW	0.32	0.19	239.89	0.15	2.06	184.15	0.00	-3.50	0.02	2.54	1.75	235.43	-0.26	-0.36	35.82	0.61	-0.51	309.98
SW	0.73	0.23	252.67	0.57	1.32	203.49	0.30	-2.32	352.66	1.78	1.29	234.09	-0.34	-0.45	36.50	0.56	0.01	268.98
SE	-0.56	1.46	159.07	-0.41	3.21	172.66	0.21	-2.17	354.35	0.46	2.45	190.73	-0.23	-0.15	57.02	-0.16	0.15	132.68
		↗	↖		↑	↑		↓	↓		↗	↗		↙	←		↘	↙
		→	↑		↗	↑		↓	↓		↗	↑		↙	↙		→	↖
2005	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	-0.03	0.93	178.20	2.51	1.34	241.95	0.19	-1.83	354.16	-0.31	2.87	173.85	-0.20	-0.43	25.35	-0.27	0.13	115.64
NW	0.58	0.52	227.86	3.24	1.27	248.64	0.87	-2.36	339.82	1.06	1.66	212.47	0.38	-0.41	316.72	-0.58	0.04	93.68
SW	0.68	0.40	239.28	2.18	0.50	257.23	0.66	-1.42	335.11	0.91	1.38	213.36	0.27	-0.08	286.09	-0.64	-0.39	58.92
SE	-0.31	1.16	165.08	0.99	1.16	220.36	0.42	-0.80	332.58	-0.32	3.26	174.35	-0.23	-0.07	74.12	-0.43	-0.14	72.09
		↗	↑		→	↗		↓	↓		↗	↑		↘	↙		←	↖
		↗	↑		→	↗		↘	↘		↗	↑		→	←		↙	←
2006	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	-0.26	-0.50	27.21	0.06	-1.52	357.82	-0.70	-3.49	11.29	-0.24	0.63	158.87	-0.96	1.34	144.27	-0.11	-0.28	21.19
NW	-0.41	-0.75	28.54	0.82	-1.93	337.12	-0.23	-3.53	3.75	0.01	0.37	182.33	0.52	-0.06	277.07	0.73	-0.10	277.86
SW	-0.70	-0.77	42.31	0.81	-0.97	320.30	-0.32	-2.58	7.08	0.15	0.41	200.53	1.01	0.82	231.01	0.75	0.51	235.50
SE	-0.23	-0.53	23.62	0.56	-0.50	311.91	-0.19	-2.40	4.46	-0.30	0.70	156.67	-0.41	2.05	168.69	-0.10	0.19	151.54
		↙	↙		↘	↓		↓	↓		↑	↑		→	↖		→	↓
		↙	↙		↘	↘		↓	↓		↑	↖		↗	↑		↗	↖

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.

Tabla 5.16. Estados de dirección del viento medio de los cúmulos del periodo estacional Abril-Junio.

2001	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	0.27	-0.34	322.19	-0.25	0.45	150.96	-0.05	-2.09	1.35	-1.86	-3.71	26.58	-1.28	1.27	134.68	-0.30	-1.17	14.28
NW	0.15	-0.04	285.43	-0.21	0.11	118.14	0.54	-0.94	330.30	-0.44	-2.58	9.58	-0.50	0.31	122.00	0.11	-0.89	352.86
SW	-0.19	-0.01	85.47	0.04	0.00	272.73	-0.41	-0.08	78.40	-0.90	-0.14	80.92	0.44	0.14	252.15	0.18	-0.08	293.46
SE	0.13	-0.05	292.27	0.04	0.40	185.02	-0.37	-0.54	34.31	-1.52	-0.93	58.46	-0.22	1.41	171.23	-0.12	0.15	141.36
		→	↘		↖	↖		↘	↓		↓	↙		↖	↖		↓	↓
		←	→		→	↑		←	↙		←	↙		→	↑		↘	↖
2002	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	0.01	-1.52	359.66	0.05	-2.26	358.69	-1.36	0.55	112.22	-0.08	0.31	165.94	-1.36	-3.64	20.47	-0.39	-0.35	48.70
NW	0.59	-1.61	339.99	0.24	-2.41	354.39	0.00	-0.62	359.68	0.01	0.12	184.74	-0.05	-3.71	0.70	0.32	-0.21	302.66
SW	0.32	-0.92	340.91	-0.16	-1.77	5.26	0.25	0.08	253.24	-0.14	-0.15	42.16	-0.33	-2.42	7.85	0.41	0.29	234.42
SE	0.28	-0.62	336.07	0.34	-1.56	347.66	-0.86	1.36	147.72	-0.06	0.20	162.42	-0.92	-2.26	22.11	-0.27	0.13	115.88
		↓	↓		↓	↓		↓	←		↑	↑		↓	↓		↘	↙
		↓	↘		↓	↓		→	↖		↙	↑		↓	↓		↗	↖
2003	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	0.36	-1.02	340.42	-0.34	0.04	96.56	-0.96	-1.83	27.81	-1.20	-2.99	21.91	-0.15	-0.30	26.11	-0.44	1.38	162.32
NW	0.62	-1.37	335.65	-0.42	-0.16	69.74	0.31	-2.34	352.54	-0.88	-3.27	15.13	0.73	-0.20	285.10	0.32	0.63	206.81
SW	0.37	-0.82	335.64	-0.61	-0.36	59.70	0.67	-0.96	325.27	-0.70	-2.19	17.79	0.95	0.38	248.37	1.07	0.85	231.51
SE	0.53	-0.43	309.30	-0.49	-0.10	78.37	-0.05	-0.34	8.54	-0.31	-2.25	7.84	-0.05	0.37	172.42	-0.07	1.88	178.01
		↘	↓		←	←		↓	↙		↓	↓		→	↙		↗	↑
		↘	↘		↙	←		↘	↓		↓	↓		→	↑		↗	↑
2004	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	-0.25	0.44	150.59	-1.09	-2.10	27.52	-1.21	2.38	153.11	-0.16	-0.49	17.49	-0.02	-0.27	4.64	2.22	0.87	248.68
NW	0.37	0.07	259.55	-0.21	-2.63	4.52	-0.83	1.03	141.27	0.63	-0.52	309.61	0.04	-0.72	357.11	2.37	1.20	243.10
SW	0.65	0.43	236.43	-0.03	-1.51	1.03	-0.05	0.91	176.95	0.56	0.07	262.66	-0.08	-0.58	8.09	2.00	0.91	245.56
SE	-0.22	1.05	168.31	-0.45	-0.97	24.80	-0.58	2.42	166.60	-0.18	0.10	119.00	0.00	-0.16	359.48	1.19	1.43	219.86
		→	↖		↓	↙		↖	↖		↘	↓		↓	↓		↗	→
		↗	↑		↓	↙		↑	↑		→	↖		↓	↓		↗	↗
2005	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	-0.79	-2.82	15.63	-0.23	-0.61	20.80	0.46	-1.36	341.16	-1.13	1.50	143.13	-0.30	-0.63	25.51	0.49	0.75	213.12
NW	-0.22	-3.10	4.03	0.55	-0.60	317.81	0.90	-1.66	331.68	-0.36	0.57	147.74	-0.47	-0.75	32.11	0.81	0.48	239.07
SW	-0.04	-2.17	1.14	0.47	0.04	264.96	0.61	-1.15	331.97	0.39	0.84	204.83	-0.58	-0.80	36.16	0.90	0.48	242.01
SE	-0.46	-1.76	14.76	-0.21	0.07	108.10	0.64	-0.71	318.14	-0.55	2.23	166.16	-0.30	-0.59	26.74	0.30	0.98	197.20
		↓	↓		↘	↓		↘	↓		↖	↖		↙	↙		↗	↗
		↓	↓		→	←		↘	↘		↗	↑		↙	↙		↗	↑
2006	G1			G2			G3			G4			G5			G6		
Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
NE	-0.11	-0.30	19.55	0.07	-0.54	352.83	-0.38	-0.20	62.62	-0.51	-1.84	15.54	-0.11	1.43	175.54	-0.94	-3.18	16.47
NW	0.31	-0.52	329.15	0.81	-0.55	303.89	-0.50	-0.40	51.56	-0.15	-1.96	4.30	0.18	0.76	193.14	-0.20	-3.16	3.63
SW	0.18	-0.20	318.13	0.86	0.13	261.41	-0.68	-0.54	51.68	-0.32	-1.27	14.06	0.65	1.00	212.89	-0.14	-2.10	3.79
SE	-0.14	0.01	95.19	0.06	0.15	200.85	-0.43	-0.21	64.33	-0.51	-0.96	27.76	0.07	1.87	182.01	-0.71	-1.85	21.07
		↘	↓		↘	↓		↙	↙		↓	↓		↑	↑		↓	↓
		↘	←		→	↑		↙	↙		↓	↙		↗	↑		↓	↓

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

Tabla 5.17. Estados de dirección del viento medio de los cúmulos del periodo estacional Julio-Septiembre.

2001	G1			G2			G3			G4			G5			G6			
	Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
	NE	0.09	-1.66	356.89	-0.40	-1.70	13.22	-0.71	1.16	148.70	0.21	-0.89	346.85	-0.80	-3.88	11.72	-0.19	-0.80	13.22
	NW	0.09	-1.70	357.12	0.12	-1.93	356.44	-0.20	0.45	156.29	0.29	-0.53	331.15	0.16	-3.11	357.01	0.21	-0.64	341.57
	SW	-0.01	-0.51	0.74	0.24	-0.30	322.09	0.03	0.22	188.43	-0.26	-0.15	59.05	0.08	-0.72	353.82	0.05	0.09	209.07
	SE	0.06	-0.58	354.10	-0.18	-0.11	58.96	-0.47	0.84	150.86	-0.12	-0.45	14.34	-0.56	-1.59	19.53	-0.30	0.01	91.45
			↓	↓		↓	↓		↖	↖		↘	↓		↓	↓		↓	↓
			↓	↓		↘	↙		↑	↖		↙	↓		↓	↓		↗	←
2002	G1			G2			G3			G4			G5			G6			
	Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
	NE	0.37	0.84	203.79	-0.40	-0.42	43.32	0.12	-1.45	355.35	-1.05	-2.11	26.43	-0.27	-0.50	27.95	-1.47	1.33	132.21
	NW	0.16	0.48	198.85	-0.16	-0.61	14.81	0.18	-1.86	354.63	-0.18	-2.39	4.22	0.21	-0.61	341.00	-0.26	0.24	132.61
	SW	0.32	0.20	237.17	-0.59	-0.65	42.14	0.19	-1.13	350.50	-0.02	-1.16	0.80	0.24	-0.11	293.92	0.06	0.96	183.38
	SE	0.29	0.64	204.56	-0.54	-0.31	60.26	0.60	-0.71	319.57	-0.81	-0.64	51.73	-0.14	0.08	120.37	-1.23	1.90	147.11
			↑	↗		↓	↙		↓	↓		↓	↙		↓	↙		↖	↖
			↗	↗		↙	↙		↓	↘		↓	↙		↘	↖		↑	↖
2003	G1			G2			G3			G4			G5			G6			
	Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
	NE	-1.93	-3.46	29.09	-1.41	-1.56	42.01	-0.69	-1.44	25.77	0.14	-0.85	350.49	-0.44	-0.21	64.07	-0.09	0.24	159.91
	NW	-0.69	-3.62	10.85	0.24	-2.50	354.61	-0.19	-1.89	5.88	0.95	-1.47	327.28	0.35	-0.49	324.20	-0.10	0.00	90.35
	SW	-0.26	-2.45	5.97	0.75	-1.04	324.11	-0.17	-1.21	7.78	0.94	-0.84	311.90	0.34	-0.07	281.81	-0.22	-0.19	48.40
	SE	-0.72	-2.72	14.74	-0.17	-0.18	42.89	-0.17	-0.87	11.13	0.89	-0.27	286.79	-0.33	0.29	131.41	-0.22	0.16	125.53
			↓	↙		↓	↙		↓	↙		↘	↓		↘	↙		←	↑
			↓	↓		↘	↙		↓	↓		↘	→		→	↖		↙	↖
2004	G1			G2			G3			G4			G5			G6			
	Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
	NE	-0.94	-1.58	30.69	-0.66	-3.16	11.77	0.22	-1.52	351.89	0.20	-1.27	350.93	-0.17	-0.41	22.52	-0.28	-0.18	57.86
	NW	0.05	-2.26	358.74	-0.34	-3.44	5.60	0.26	-1.93	352.25	0.90	-1.84	333.86	-0.06	-0.56	6.06	0.41	-0.25	301.31
	SW	0.19	-0.52	339.40	-0.05	-2.14	1.30	0.23	-1.20	349.29	0.90	-0.78	311.14	-0.27	-0.39	34.54	0.39	0.23	239.73
	SE	-1.00	0.19	100.90	-0.54	-1.98	15.40	0.53	-0.81	327.05	0.64	-0.19	286.19	-0.26	-0.09	71.06	-0.25	0.44	150.38
			↓	↙		↓	↓		↓	↓		↘	↓		↓	↙		↘	↙
			↓	←		↓	↓		↓	↘		↘	→		↙	←		↗	↖
2005	G1			G2			G3			G4			G5			G6			
	Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
	NE	-0.59	-0.92	32.69	-0.18	0.37	153.59	-1.13	-3.04	20.42	-0.31	-1.84	9.48	-0.06	-1.44	2.22	-0.26	-0.44	30.96
	NW	-0.48	-1.04	24.71	-0.09	0.17	152.68	-0.37	-3.13	6.81	0.71	-2.47	344.07	0.45	-1.65	344.56	0.42	-0.50	319.97
	SW	-0.62	-0.79	37.93	-0.14	-0.01	87.28	-0.16	-2.10	4.33	0.92	-1.40	326.74	0.39	-0.99	338.37	0.37	0.08	257.75
	SE	-0.65	-0.47	54.20	-0.22	0.29	142.25	-0.91	-1.73	27.66	0.33	-0.31	313.13	0.08	-0.51	350.98	-0.19	0.15	128.84
			↙	↙		↖	↖		↓	↓		↓	↓		↓	↓		↘	↙
			↙	↙		←	↖		↓	↙		↘	↘		↓	↓		→	↖
2006	G1			G2			G3			G4			G5			G6			
	Celda	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ	u	v	θ
	NE	-0.69	-0.43	58.29	0.21	-0.71	343.66	-0.50	-2.45	11.57	0.14	-0.29	334.22	-0.90	1.37	146.67	-0.02	-0.37	2.80
	NW	-0.05	-1.12	2.58	0.63	-2.05	342.79	-0.03	-2.84	0.63	0.68	-0.40	300.27	-0.93	1.06	138.65	0.07	-0.93	355.47
	SW	0.17	-0.05	287.44	0.55	-1.21	335.40	0.04	-1.72	358.76	0.56	-0.01	271.53	-0.48	0.51	136.58	-0.15	-0.66	12.51
	SE	-0.54	0.49	132.13	0.28	-0.28	315.06	-0.40	-1.22	18.36	-0.03	0.10	162.98	-0.79	1.12	144.67	-0.21	-0.25	40.88
			↓	↙		↓	↓		↓	↓		↘	↘		↖	↖		↓	↓
			→	↖		↘	↘		↓	↓		→	↑		↖	↖		↓	↙

5.5.4. Los Patrones de Circulación del Viento en la Ciudad de México

El método de Ward de conglomeración jerárquica fue aplicado al conjunto de los estados de viento de la Ciudad de México ocurridos durante los periodos estacionales de invierno (Enero-Marzo), primavera (Abril-Junio), verano (Julio-Septiembre) y otoño (Octubre-Diciembre) de los años de 2001 a 2006. De esta manera, los 52584 estados de viento horarios fueron organizados en 144 cúmulos, seis para cada periodo estacional de cada año considerado. En las Figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 se presentaron ya las gráficas que proporcionan, para cada cúmulo, la población horaria estacional, es decir, el número de estados que ocurrieron en cada hora del día durante el periodo estacional considerado. La comparación de estas figuras entre ellas permitió reconocer similitudes o regularidades entre los cúmulos de diferentes años y periodos estacionales, así como su abstracción en patrones de circulación del viento.

En la Figuras 5.15 a 5.23, para cada periodo estacional se presentan los arreglos de los cúmulos de estados de viento organizados de acuerdo con sus similitudes respecto a la distribución horaria de sus poblaciones y los estados de dirección del viento medio asociados.

Cada figura incluye los cuatro periodos estacionales en una matriz de 2×2. En el renglón superior se muestran, de izquierda a derecha, las gráficas de los periodos de Enero a Marzo y de Abril a Junio, mientras que en el renglón inferior se muestran, en el mismo orden, los periodos de Julio a Septiembre y de Octubre a Diciembre. En cada periodo estacional se incluye un máximo de seis gráficas que corresponden a los cúmulos del mismo tipo (o patrón) de los seis años del periodo de estudio. A lado izquierdo de cada gráfica se muestran los estados de dirección del viento medio de los cúmulos presentados. Cada cúmulo está identificado usando a notación siguiente $G_n(aaaa)$, donde n es el número del cúmulo ($n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), tal como fue asignado por el programa *DataLab*, y $aaaa$ es el año en que ocurrieron los estados de viento que lo componen. Así, $G_2(2001)$ es el cúmulo (o grupo) número 2 del año 2001, para el periodo estacional considerado. Los estados de dirección del viento medio se muestran pictóricamente, en cada caso, se muestra una pequeña retícula de 2×2 que representa en conjunto a la Ciudad de México dividida en los cuadrantes NE, NW, SW y SE, respecto al zócalo de la ciudad. En cada celda de la pequeña retícula se muestra una flecha que indica la dirección de donde proviene el viento medio. Estas cuatro direcciones de viento (flechas en las celdas) dan, esquemáticamente, una buena idea de la circulación del viento en la zona, la cual permite reconocer cualitativamente, pero con suficiente claridad, las condiciones de divergencia y vorticidad del viento en la ciudad.

Los principales patrones de circulación que pudieron identificarse en el periodo de estudio fueron los siguientes: vientos catabáticos de la madrugada, vientos catábaticos de medianoche, vientos matutinos del E y NE (probablemente alisios), vientos vespertinos del sur, vientos vespertinos del norte, vientos matutinos del norte, vientos del oeste (posiblemente westerlies), y vientos vespertinos altamente convergentes (posiblemente por efecto de isla de calor).

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.

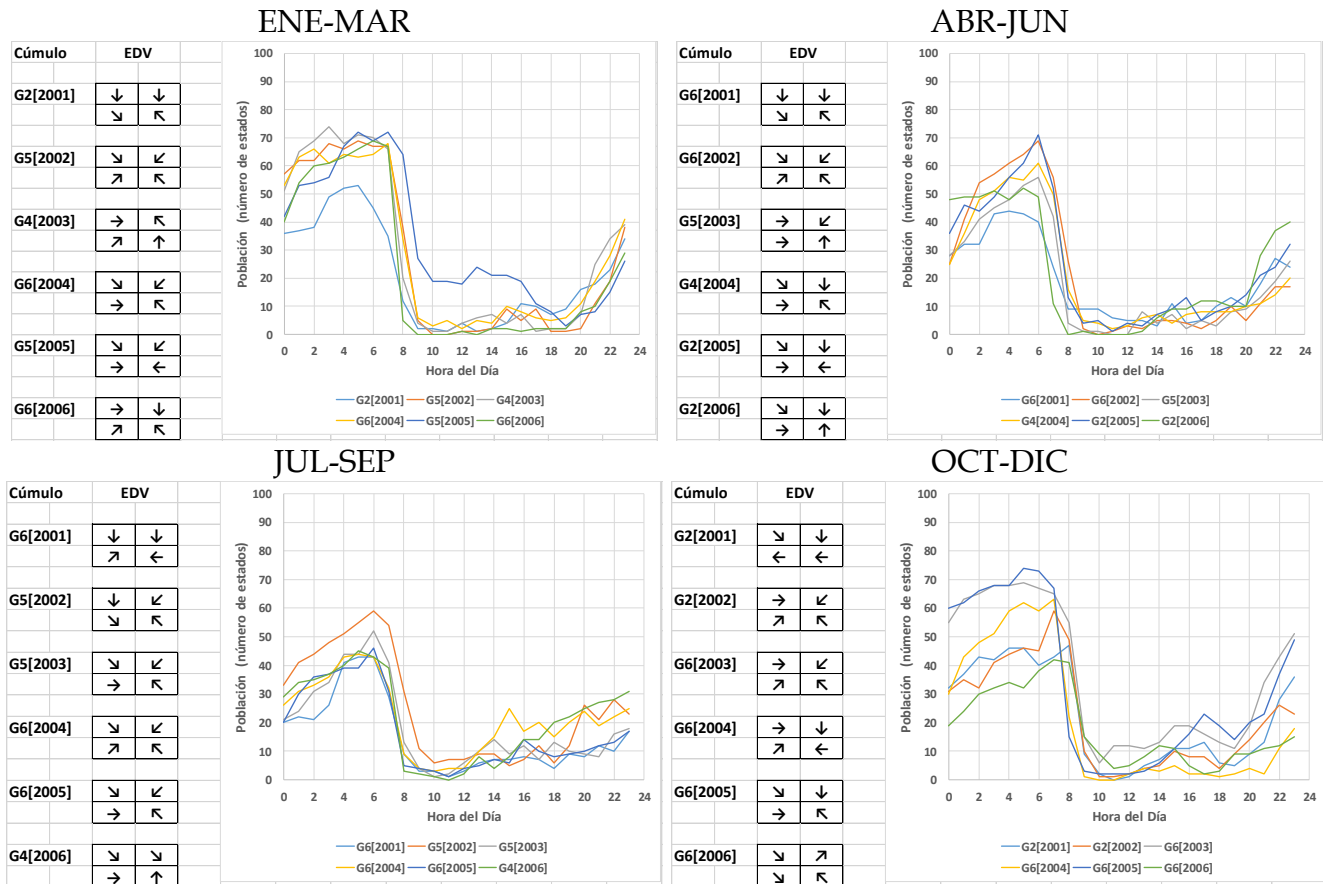


Figure 5.15. Patrón No. 1. Vientos catabáticos de la madrugada.

Patrón No. 1: Vientos Catabáticos de la Madrugada. Los estados que pertenecen a este patrón de circulación representan vientos que bajan de las montañas circundantes hacia el valle de la Ciudad de México por efecto gravitacional, presentando una convergencia muy alta. La población de los cúmulos comienza a crecer con la puesta del sol (alrededor de la hora 19 o 20), adquiriendo y manteniendo sus valores más altos en el intervalo de la medianoche hasta la hora 07, decayendo rápida y repentinamente hasta casi anularse en el amanecer, entre las horas 07 y 08. Este patrón se manifestó sistemáticamente en todos los intervalos estacionales durante el periodo de estudio, aunque de manera más marcada durante el primer semestre del año, es decir, durante el invierno y la primavera. Las principales direcciones del viento fueron: en el cuadrante NW, de NW y N; en el cuadrante SW, de W y SW; en el cuadrante SE, de SE y S; y en el cuadrante NE, de NE y N.

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

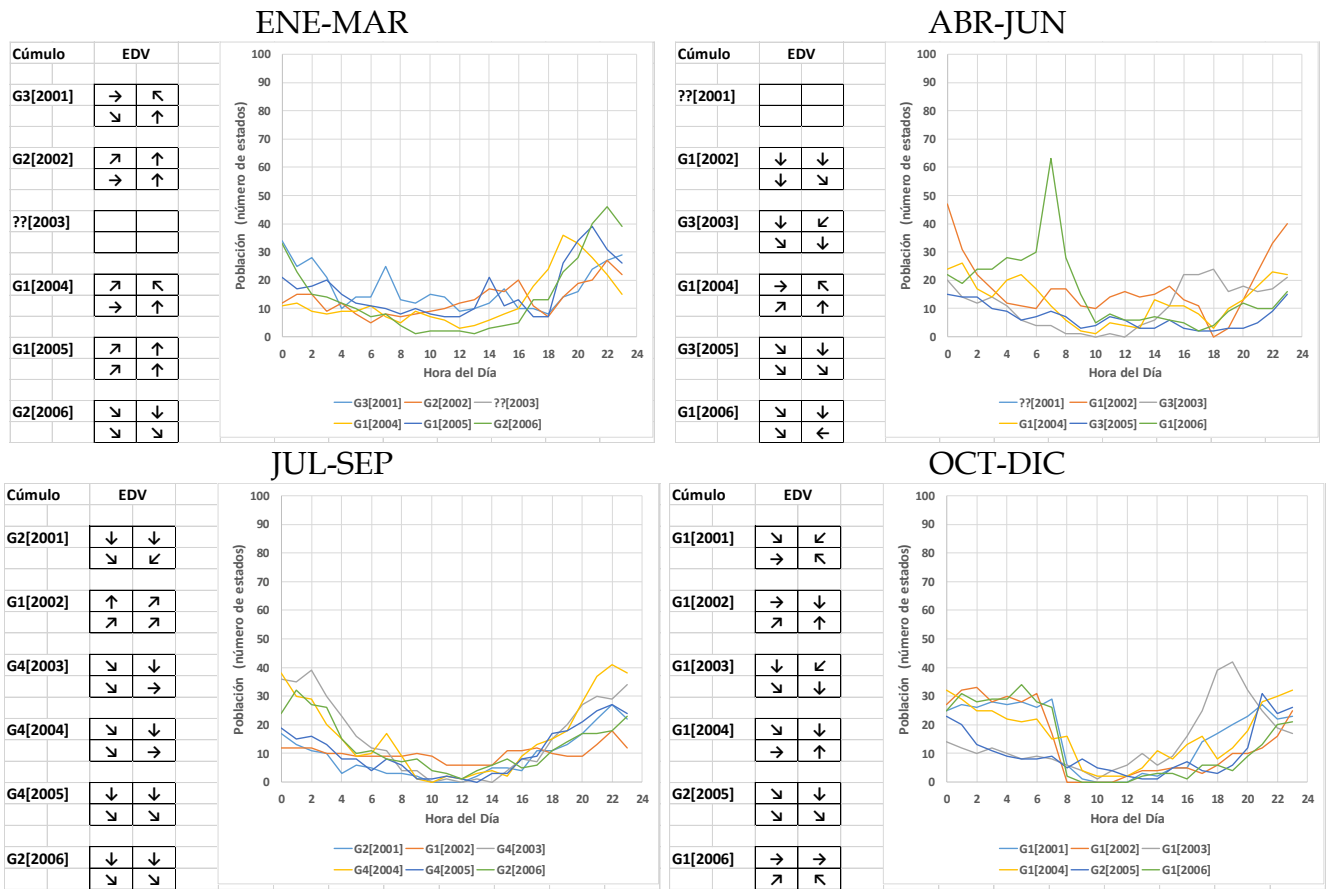


Figure 5.16. Patrón No. 2. Vientos catabáticos de media noche.

Patrón No. 2: Vientos Catabáticos de Medianoche. Este patrón de circulación se manifiesta básicamente alrededor de medianoche, entre el anochecer y el amanecer, durante todo el año. En los cúmulos de este patrón, el número de estados de viento comienza a crecer hacia al anochecer, alcanza sus valores más altos alrededor de la medianoche, disminuyendo hasta anularse durante las primeras horas de la madrugada. Los estados que lo componen representan vientos catabáticos en los cuadrantes del oeste (NW y SW) de la ciudad, bajando por gravedad de la Sierra de las Cruces (al oeste) y de la Sierra del Ajusco-Chichinautzin (al suroeste y sur) hacia el valle; mientras que en los cuadrantes del este (NE y SE) se manifiesta la presencia de vientos catabáticos que bajan de la Sierra Nevada superpuestos a los vientos vespertinos tardíos que fluyen a lo largo del canal de viento que se establece en esa región por efecto de las dos puertas de ventilación¹⁶ que existen al sur del valle, entre el Ajusco y el Popocatepetl, y al norte del mismo, al este de la sierra de Guadalupe.

¹⁶ Véase el capítulo 2, sección 2.5.2.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.

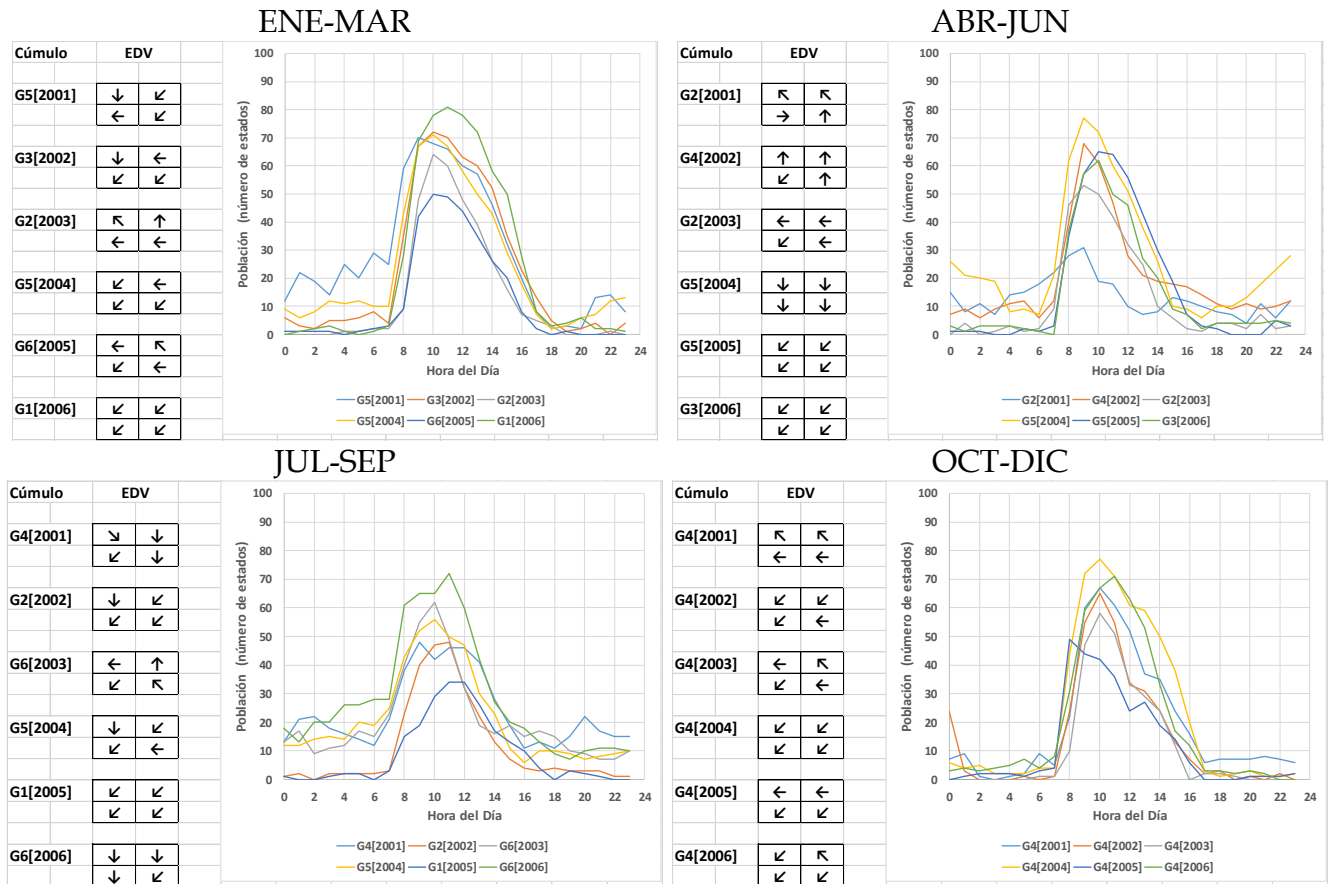


Figure 5.17. Patrón No. 3. Vientos matutinos del E y NE (Alisios)

Patrón No. 3: Vientos Matutinos del E y NE. Los estados de viento que pertenecen a este patrón se manifiestan principalmente durante las horas de la mañana, los cúmulos de estados de este tipo se desarrolla a partir del amanecer, sus poblaciones alcanzan sus valores máximos poco antes del mediodía, y disminuyen hasta anularse hacia las horas 16 o 17. Los estados de este patrón representan vientos divergentes que soplan predominantemente del NE y E, en casi todos los cuadrantes de la ciudad. Estos vientos, muy probablemente, son consecuencia de los vientos alisios que soplan de las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales, desviándose hacia el oeste por efecto de la rotación de la tierra¹⁷.

¹⁷ Los vientos alisios soplan del noreste hacia el suroeste en el hemisferio norte, y del sureste hacia el noroeste en el hemisferio sur.

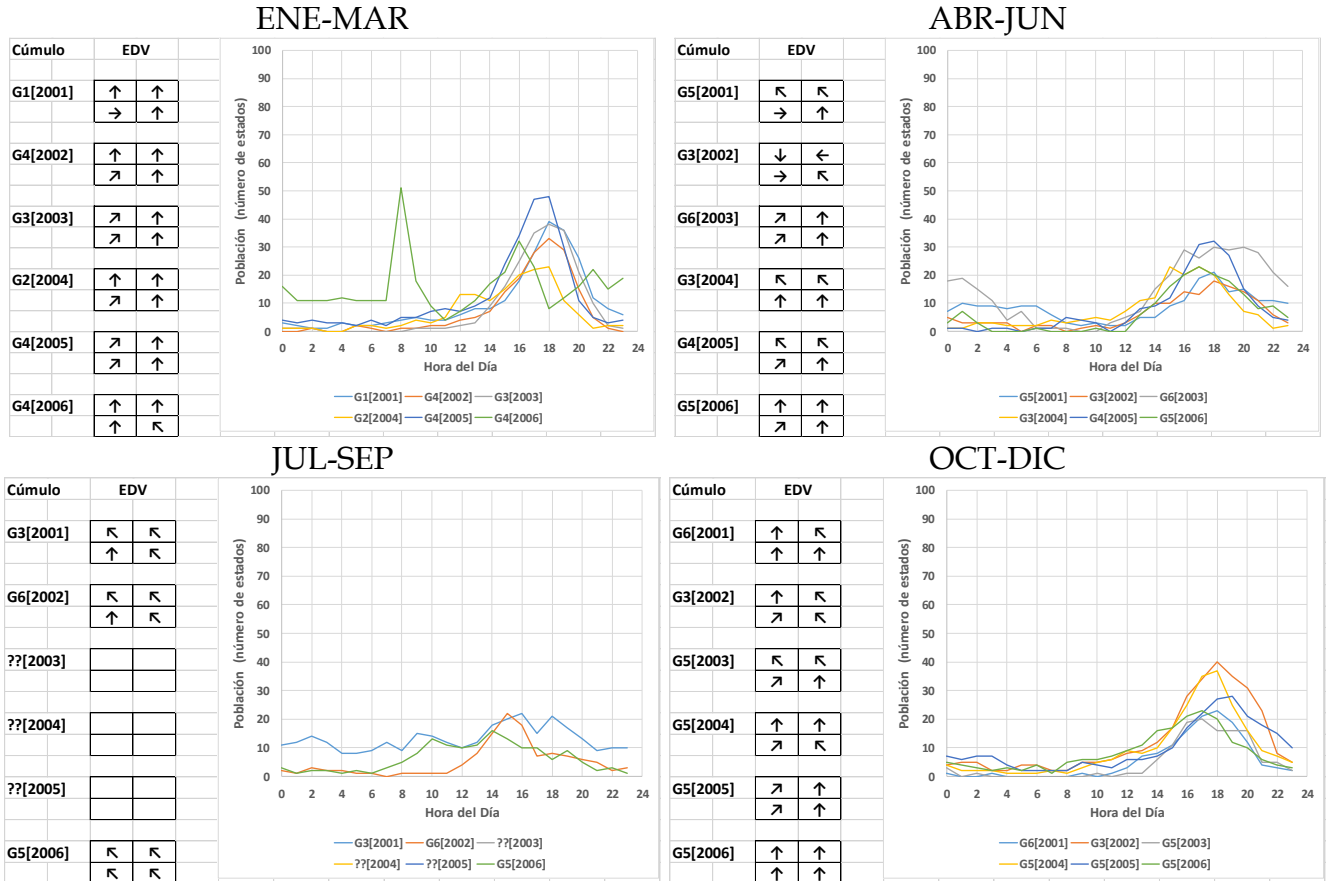


Figure 5.18. Patrón No. 4. Vientos Vespertinos del Sur.

Patrón No. 4: Vientos Vespertinos del Sur. En este patrón de circulación, los cúmulos de estados de viento se desarrollan a partir de la hora 13, creciendo su población hasta alcanzar sus valores más altos entre las horas 17 y 18, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 22 del día. Los estados de viento de este patrón representan vientos que, en promedio, soplan de sur a norte en los cuatro cuadrantes de la ciudad, gracias al canal de ventilación S-N que existe al este de la ciudad. En general, estos vientos se manifiestan durante todo el año, no obstante que no se observaron durante el periodo de Julio a Septiembre en los años de 2003 a 2005, y tuvieron bajas frecuencias durante el mismo periodo estacional en los años de 2001, 2002 y 2006.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

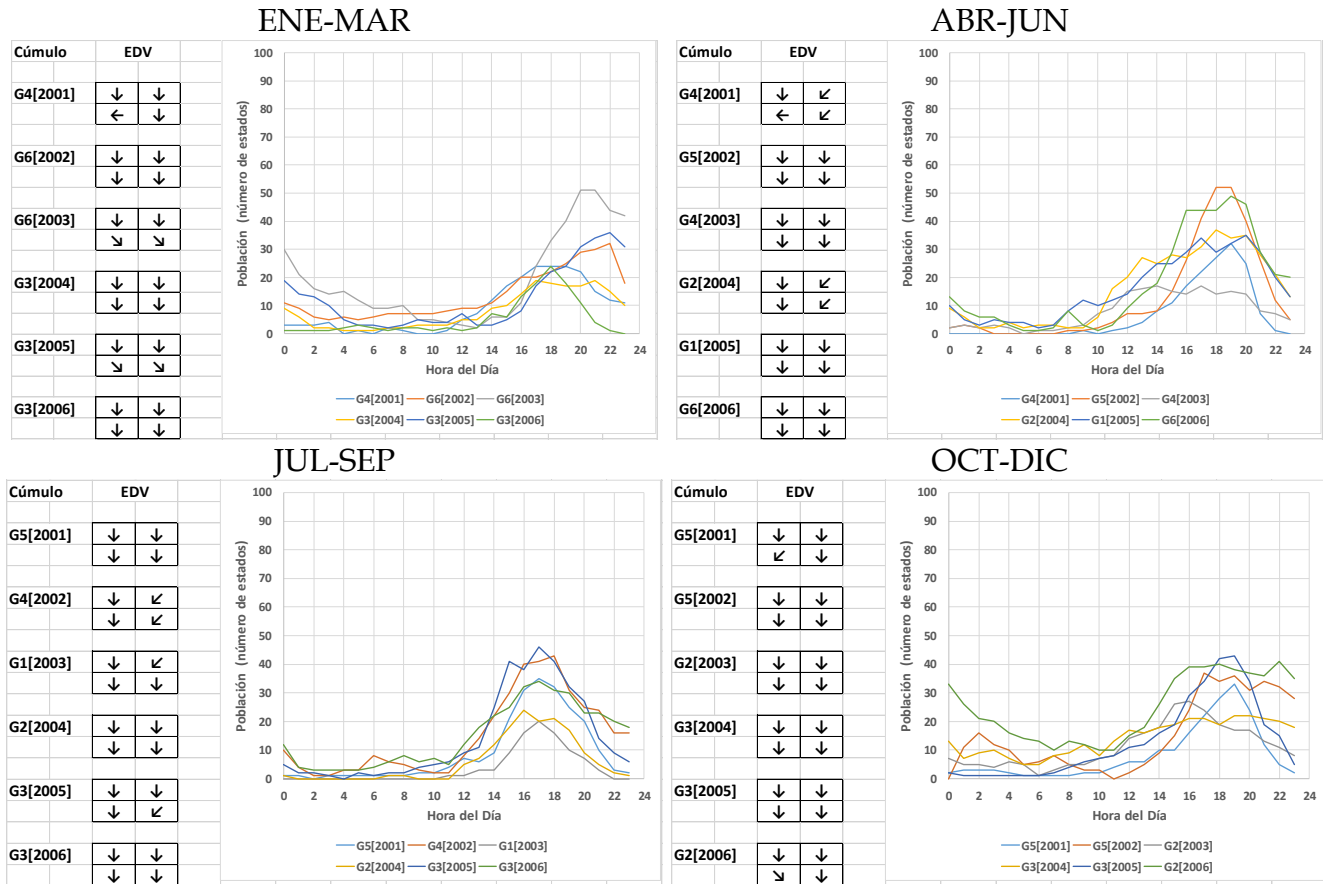


Figure 5.19. Patrón No. 5. Vientos Vespertinos del Norte.

Patrón No. 5: Vientos Vespertinos del Norte. De manera similar al caso del patrón de circulación anterior, los cúmulos de estados de viento de este patrón se desarrollan a partir de la hora 13, creciendo su población hasta alcanzar sus valores más altos entre las horas 17 y 19, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 22 del día. Los estados de viento de este patrón representan vientos que de manera dominante soplan de norte a sur en los cuatro cuadrantes de la ciudad, gracias al canal de ventilación S-N que existe al este de la ciudad. Estos vientos se manifiestan durante todo el año.

Taxonomía de los Estados de Viento de la Ciudad de México

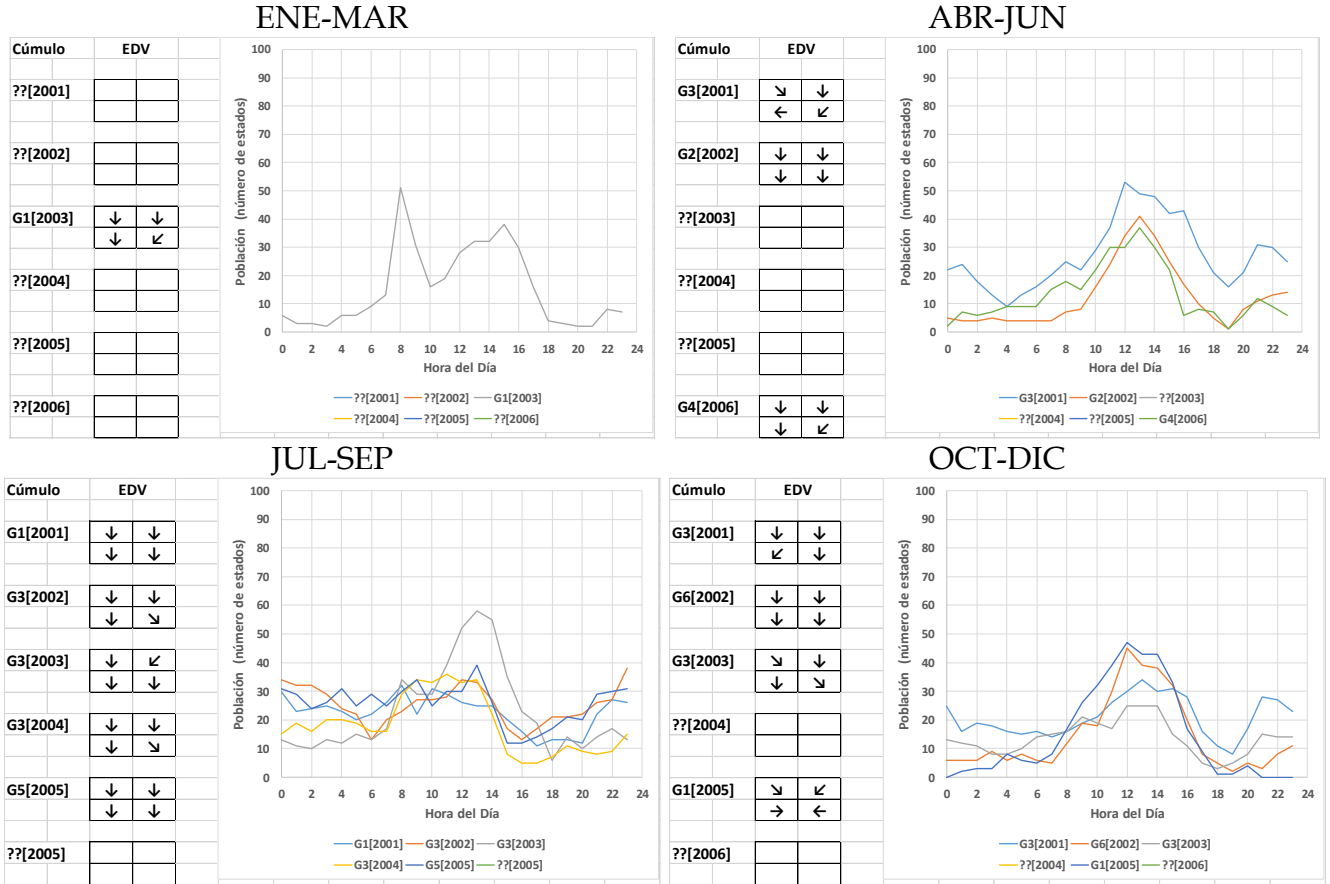


Figure 5.20. Patrón No. 6. Vientos Matutinos del Norte.

Patrón No. 6: Vientos Matutinos del Norte. Los cúmulos de estados de viento de este patrón se desarrollan al amanecer, creciendo su población hasta alcanzar sus valores más altos alrededor del mediodía, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 18. Los estados de viento en este patrón representan vientos que de manera dominante soplan de norte a sur en los cuatro cuadrantes de la ciudad, gracias al canal de ventilación S-N que existe al oriente de la ciudad. Estos vientos se presentaron en los cuatro periodos estacionales, aunque con no de manera regular. En el periodo de invierno solo se presentaron en 2003, en el periodo de primavera no se observaron durante los años 2003, 2004 y 2005, y en el de otoño no se encontraron durante los años de 2004 y 2006. En el periodo de verano, por el contrario, sólo en 2006 no fueron observados.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

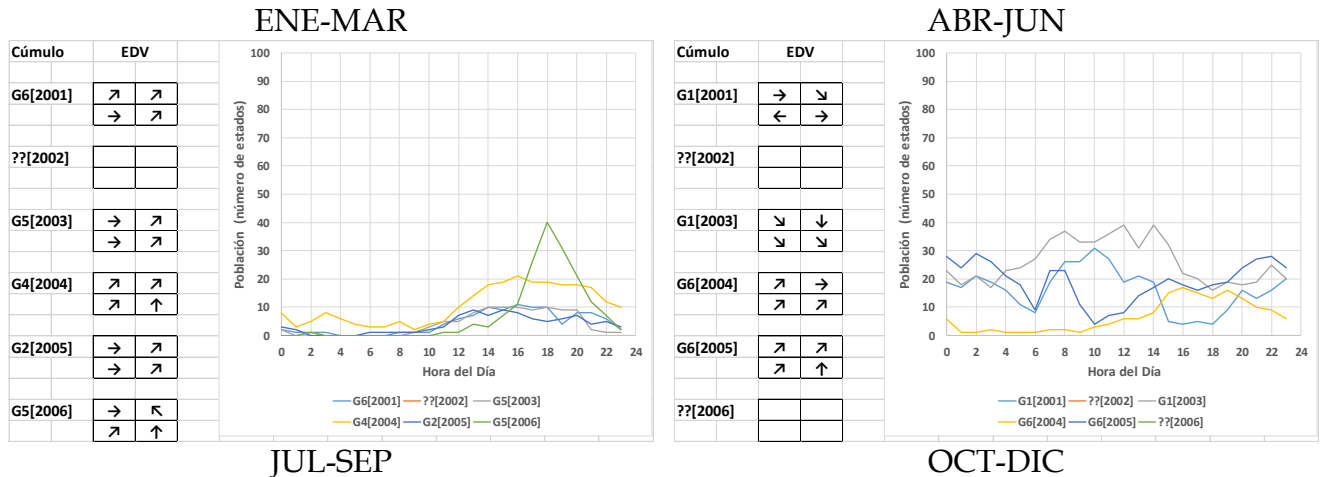


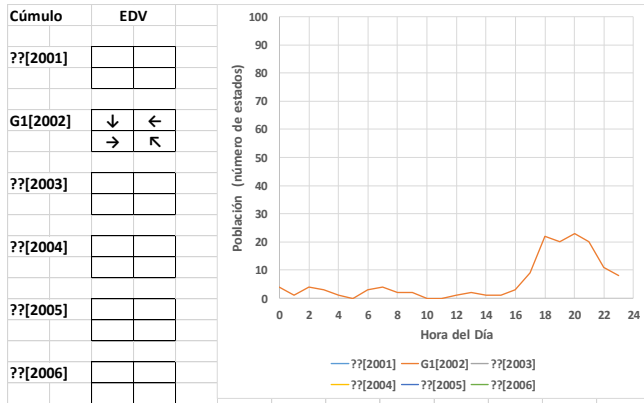
Figure 5.21. Patrón No. 7. Vientos del Oeste (westerlies).

Patrón No. 7: Vientos del Oeste. Para los periodos de invierno y primavera, es decir durante el primer semestre de cada año, se encontraron cúmulos formados por estados de viento que corresponden a vientos que presentan una componente de flujo del oeste en casi todos los cuadrantes de la ciudad. Para los periodos estacionales de verano y otoño no se encontraron este tipo de estados de viento. Los horarios fueron muy claros en el invierno, de media mañana hacia la media noche; pero en primavera fueron muy variados con respecto al horario de ocurrencia. Además, no se presentaron en todos los años de los periodos. En el periodo invernal no se encontraron durante el año de 2002; mientras que en el periodo de la primavera, no ocurrieron en los años de 2002 y 2006. El origen de estos vientos podría estar relacionado con la corriente de chorro¹⁸ (jet stream) subtropical y/o con los vientos del oeste (también llamados contralisios o westerlies) que ocurren de manera permanente en las latitudes subtropicales y medias de las zonas templadas, en latitudes entre 30 y 60 grados de ambos hemisferios.

¹⁸ Según la Organización Meteorológica Mundial, una corriente en chorro es «una fuerte y estrecha corriente de aire concentrada a lo largo de un eje casi horizontal en la alta troposfera o en la estratosfera, caracterizada por una fuerte cizalladura vertical y horizontal del viento. Presentando uno o dos máximos de velocidad, la corriente en chorro discurre, normalmente, a lo largo de varios miles de kilómetros, en una franja de varios centenares de kilómetros de anchura y con un espesor de varios kilómetros».

ENE-MAR

ABR-JUN



JUL-SEP

OCT-DIC

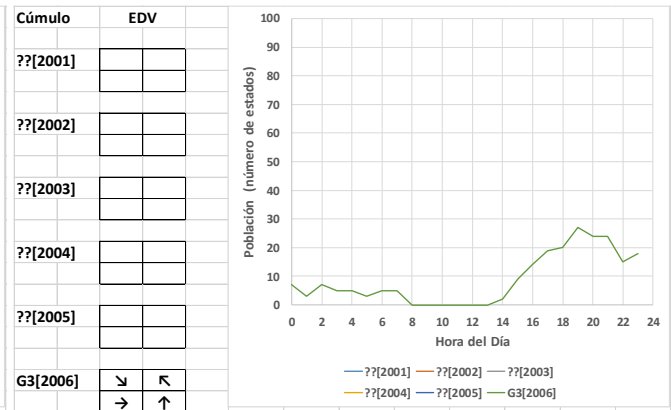
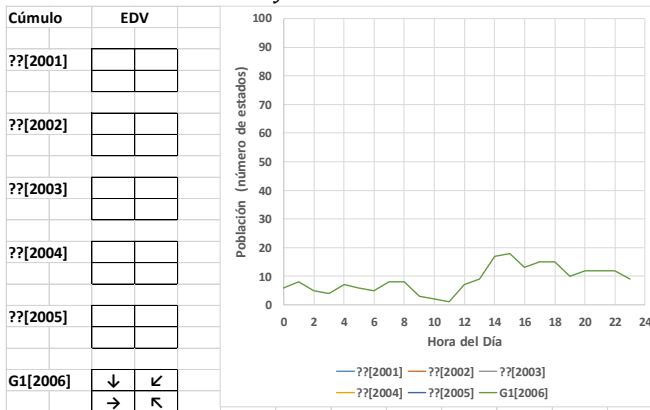
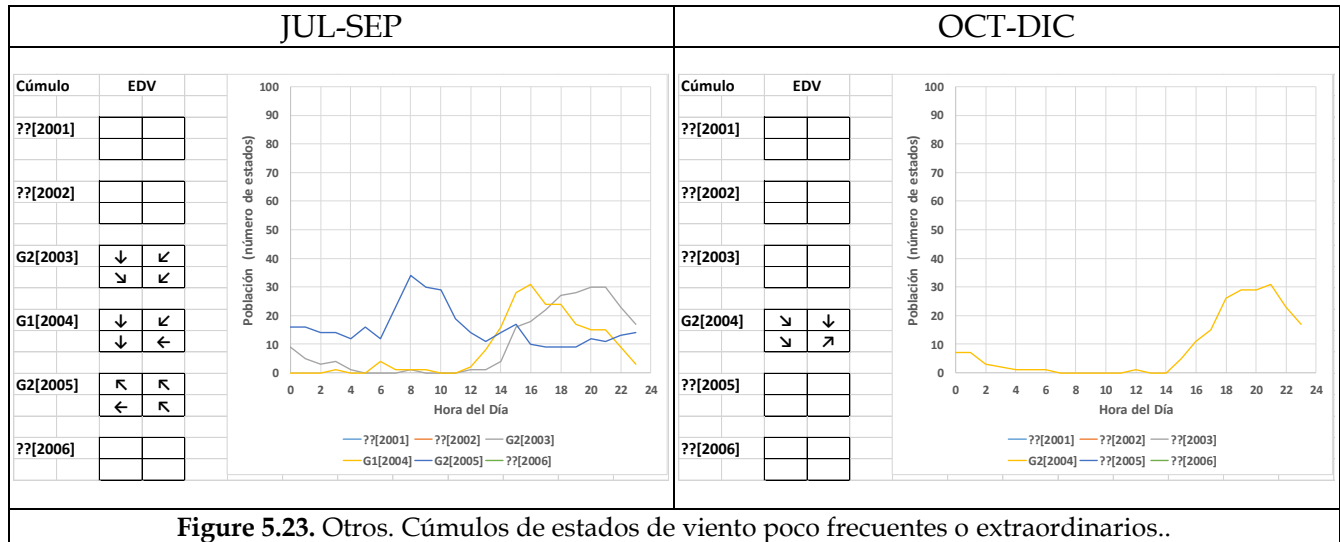


Figure 5.22. Vientos vespertinos altamente convergentes.

Patrón No. 8: Vientos Vespertinos Altamente Convergentes. De manera esporádica se encontraron tres cúmulos de estados de viento, poco poblados, que representan eventos de vientos vespertinos altamente convergentes. Estos cúmulos se desarrollaron a partir de mediodía, creciendo hasta alcanzar sus valores más altos entre las horas 19 y 20, para luego disminuir hasta casi anularse alrededor de la hora 23. Estos cúmulos sólo se formaron en el periodo de Enero a Marzo de 2002, en los periodos de Julio a Septiembre y de Octubre a Diciembre de 2006. Los vientos de este patrón pudieran tener su origen en el efecto de isla de calor urbana.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso-β. Periodo 2001-2006.

En los periodos de Julio a Septiembre de los años de 2003, 2004 y 2005, y en el periodo de Octubre a Diciembre de 2004, se presentaron eventos de viento que fueron organizados en cuatro cúmulos (tres en el primer periodo y uno en el segundo) que se muestran en la Figura 5.23, bajo el título de Otros. Estos cúmulos no pudieron ser identificados con ninguno de los patrones antes descritos, aunque sus distribuciones de las poblaciones horarias se parecen a los de cúmulos que pertenecen a patrones ya identificados. Los estados de viento de estos cúmulos pudieran estar asociados con eventos meteorológicos poco frecuentes o extraordinarios.



5.5.5. Frecuencias de Ocurrencia de los Principales Patrones de Circulación del Viento en la Ciudad de México

En la Tabla 5.19 se muestra la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los patrones de circulación del viento que fueron identificados para la Ciudad de México en el periodo de los años de 2001 a 2006. En esta tabla, se incluyen los números de estados que se encontraron en cada patrón para cada uno de los periodos estacionales y para el periodo completo. Las frecuencias de ocurrencia, presentadas en la última columna de la tabla, representan la fracción, en porcentaje, de los estados que ocurrieron en cada patrón relativa al total de eventos horarios de viento del periodo de estudio completo.

Patrón	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sep	Oct-Dic	Periodo 2001-2006	Frecuencia de Ocurrencia
1	3912	3087	2848	3627	13474	25.63
2	1774	1538	1789	2019	7120	13.54
3	3020	2490	2739	2344	10593	20.15
4	1438	1231	582	1223	4474	8.51
5	1621	1844	1491	2087	7043	13.40
6	367	1282	2760	1527	5936	11.29
7	707	1632	0	0	2339	4.45
8	145	0	212	212	569	1.08
Otros	0	0	818	209	1027	1.95
Sumas	12984	13104	13239	13248	52575	100.00

Como puede observarse en esta tabla, el patrón de viento más frecuente fue el primero, identificado como *Vientos Catabáticos de la Madrugada*, con una frecuencia del 25.6%; siguiéndole, en el orden de importancia de mayor a menor, los patrones 3, 2, 5 y 6, con frecuencias de 20.1%, 13.5%, 13.4% y 11.3% e identificados como *Vientos Matutinos del NE y E*, *Vientos Catabáticos de Medianoche*, *Vientos Vespertinos del Norte*, y *Vientos Matutinos del Norte*, respectivamente. Estos cinco patrones totalizan el 84% de los eventos de viento ocurridos durante el periodo de interés del estudio.

5.6. Comparación con Resultados de Otros Autores

Las características generales del comportamiento del viento en la Ciudad de México y área metropolitana, de sus forzantes y de sus relaciones con la contaminación atmosférica y el clima urbano, han sido reportadas desde hace más de dos décadas, iniciando con los trabajos de E. Jáuregui¹⁹ de 1988 y 1997, donde analizó las interacciones entre los vientos locales, la contaminación atmosférica y el desarrollo de la isla de calor urbana. En 1997, J.E. Bossert²⁰ estudió los regímenes de flujo que afectan la región de la Ciudad de México. En 2003, A. Salcido²¹ y colaboradores reportaron los resultados de la primera campaña experimental micrometeorológica de larga duración en la Ciudad de México. Respecto a la campaña MILAGRO, realizada en Marzo de 2006, B. de Foy²² y colaboradores publicaron en 2005 un estudio sobre la circulación del viento en la cuenca de la Ciudad de México durante una campaña experimental de corta duración realizada en 2003, y J. Fast²³ y colaboradores, en 2007, y B. de Foy²⁴ y colaboradores en 2008, reportaron, respectivamente, una visión meteorológica general de las campañas de MILAGRO y un estudio de la capacidad de transporte del viento y su relación con la climatología usando análisis de conglomerados, también durante el periodo de la campaña MILAGRO. Recientemente, Celada²⁵ y colaboradores, estudiaron en 2013 la circulación del viento durante la campaña MILAGRO usando una representación del viento a escala meso- β .

¹⁹ E. Jáuregui (1988). Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin. *Atmósfera*, **1**, 131-140.

E. Jáuregui (1997). Heat Island Development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, **31**, 3821-3831.

²⁰ J. E. Bossert (1997). An investigation of flow regimes affecting the Mexico City región. *J. Appl. Meteorol.* **36**, 119-140.

²¹ A. Salcido; A.T. Celada; R. Villegas; H., Salas; R., Sozzi; y T., Georgiadis (2003). A micrometeorological database for the Mexico City Metropolitan Area. *Il Nuovo Cimento*, **26C**, 317-355.

²² B. de Foy; E. Caetano; V. Magaña; A. Zitácuaro; B. Cárdenas; A. Retama; R. Ramos; L.T. Molina; y M.J. Molina (2005). Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **5**, 2267-2288.

²³ J.D. Fast; B. de Foy; F. Acevedo-Rosas; E. Caetano; G. Carmichael; L. Emmons; D. McKenna; M. Mena; W. Skamarock; X. Tie; R.L. Coulter; J.C. Barnard; C. Wiedinmyer; y S. Madronich (2007). A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**, 2233-2257.

²⁴ B. de Foy; J.D. Fast; S.J. Paech; D. Phillips; J.T. Walters; R.L. Coulter; T.J. Martin; M.S. Pekour; W.J. Shaw; P.P. Kastendeuch; N.A. Marley; A. Retama; y L.T. Molina (2008). Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**, 1209-1224.

²⁵ A.T. Celada-Murillo; **S. Carreón-Sierra**; A. Salcido; T. Castro; O. Peralta; y T. Georgiadis (2013). Main Characteristics of Mexico City Local Wind Events during MILAGRO 2006 Campaign within a Meso- β Scale Lattice Wind Modeling Approach. *ISRN Meteorology*, 2013, ID 605210, 14 pages. ISSN: 2090-7524.

Los anteriores son sólo algunos ejemplos de las investigaciones que han contribuido a la caracterización de los vientos urbanos de la Ciudad de México. De los diferentes trabajos publicados que fueron revisados durante esta investigación, sólo en uno de ellos²⁶ se encontró la aplicación de los métodos del análisis de conglomerados como herramientas para la identificación de los patrones de circulación del viento de la Ciudad de México. Dicho trabajo se usará aquí como el principal referente para comparar los resultados que fueron obtenidos. Desde luego, también serán considerados como referentes los trabajos del Dr. Ernesto Jáuregui, ya que ellos poseen una importancia singular en el tema de la taxonomía eólica urbana del área metropolitana de la Ciudad de México, no sólo por sus contribuciones, sino también porque para muchos, Jáuregui fue el más significativo de los pioneros y maestros de la climatología urbana en este país.

5.6.1. Comparación con los Resultados de E. Jáuregui

A continuación se resumen las características de los principales patrones de viento observados por Jáuregui en la Ciudad de México²⁷, incluyendo en cada caso algunos comentarios comparativos respecto a los resultados de este trabajo, los cuales han sido resaltados usando letra cursiva.

5.6.1.1. Vientos Sinópticos

- **Temporada de Secas:** Vientos del Oeste de Noviembre a Abril de cada año, con flujo anticiclónico y cielos con pocas nubes.
- **Temporada de Lluvias:** Vientos húmedos del Este de Mayo a Octubre de cada año.

*Asociados con los patrones sinópticos observados por Jáuregui, en el presente trabajo se encontraron el **Patrón No. 7: Vientos del Oeste**, que sólo se manifestó durante el primer semestre del año, principalmente en el periodo de invierno (Enero-Marzo), a partir de las 10 de la mañana y hasta la media noche; así como el **Patrón No. 3: Vientos Matutinos del E y NE**, que se manifestó durante todo el año durante las horas de sol.*

5.6.1.2. Vientos a Nivel de Superficie.

A nivel de superficie, los vientos locales son determinados por influencia combinada de los vientos en altura, la topografía de la zona, la morfología urbana (edificaciones) y los efectos térmicos derivados de los diferentes usos y tipos de suelo en la ciudad y sus alrededores. Las investigaciones de Jáuregui mostraron una variedad de características para esta clase de vientos, que se intentan describir brevemente a continuación.

²⁶ B. de Foy; J.D. Fast; S.J. Paech; D. Phillips; J.T. Walters; R.L. Coulter; T.J. Martin; M.S. Pekour; W.J. Shaw; P.P. Kastendeuch; N.A. Marley; A. Retama; y L.T. Molina (2008). Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 1209-1224.

²⁷ E. Jáuregui (1988). Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin. *Atmósfera*, 1, 131-140.

D. Klaus, E. Jáuregui, A. Poth, G. Stein y M. Voss (1999). Regular Circulation Structures in the Tropical Basin of Mexico City as a Consequence of the Urban Heat Island Effect. *Erdkunde*, Band 53, 231-243.

D. Klaus, A. Poth, M. Voss y E. Jáuregui. (2001). Ozone distributions in Mexico City using principal component analysis and its relation to meteorological parameters. *Atmósfera*, 14, 171-188.

En Temporada de Secas

- Sistema de vientos montaña-valle, valle-montaña asociados a la topografía de la zona.
- En la noche, vientos catabáticos o de drenaje²⁸.
- Durante la noche (8 pm a 7 am), vientos que bajan de las montañas del Oeste y Este, y convergen en el centro de la Ciudad. En el día, también identificó vientos convergentes y los relacionó con un efecto de isla de calor.
- Entre las 21-23 h y de las 0-8 h, del lado Oeste de la Ciudad observó vientos del WNW y, en el lado Este identificó vientos del Sur a partir de las 16 h (con picos de intensidad entre las 17-21 h). Comenta que el patrón de vientos WNW en el Oeste de la ciudad y de vientos del Sur en el Este, están presentes al final de la tarde y durante la madrugada, los cuales resultan en un flujo ciclónico convergente, reforzado por un flujo centrípeto generado por la isla de calor del área urbana.

*En este trabajo se encontraron dos patrones de circulación del viento con características similares a las anteriores: El Patrón No. 1: **Vientos Catabáticos de la Madrugada** y el Patrón No. 2: **Vientos Catabáticos de Medianoche**. El primero se manifiesta a partir de la puesta del sol (alrededor de la hora 19 o 20), adquiriendo y manteniendo sus valores más altos en el intervalo de la medianoche hasta la hora 07, decayendo rápida y repentinamente hasta casi anularse en el amanecer, entre las horas 07 y 08. El segundo comienza a manifestarse hacia al anochecer, alcanzado sus valores más altos alrededor de la medianoche, y disminuyendo hasta anularse durante las primeras horas de la madrugada. Se trata de vientos catabáticos en los cuadrantes del oeste (NW y SW) de la ciudad, bajando por gravedad de la Sierra de las Cruces y de la Sierra del Ajusco-Chichinautzín hacia el valle; mientras que en los cuadrantes del este (NE y SE) se manifiesta la presencia de vientos catabáticos que bajan de la Sierra Nevada superpuestos a los vientos vespertinos tardíos que fluyen a lo largo del canal de viento que se establece en esa región por efecto de las dos puertas de ventilación que existen al sur del valle, entre el Ajusco y el Popocatepetl, y al norte del mismo, al este de la sierra de Guadalupe.*

- En el curso de la mañana, en la zona Este de la ciudad, dominan vientos con una componente del Este hasta alrededor de la media tarde y entre las 9 y las 12 horas, en el lado Oeste predominan vientos superficiales del Norte.

*El Patrón No. 3: **Vientos Matutinos del E y NE**, que se manifestó durante todo el año durante las horas de sol presenta estas características justamente.*

- Durante la tarde, del lado Oeste de la ciudad se presentan vientos del Norte con máximos de intensidad entre las 18 y 19 horas. En la zona Este, después de las 16 horas indica la presencia de vientos del Sur con máximos de intensidad entre las 19 y 21 horas.

*El Patrón No. 5: **Vientos Vespertinos del Norte** y el Patrón No. 4: **Vientos Vespertinos del Sur** se componen de estados de viento que reflejan estas características. La población del primero se desarrolla a partir de la hora 13, creciendo hasta alcanzar sus valores más altos entre las horas 17*

²⁸ Tipo de vientos locales que se producen por desplazamiento de aire frío por acción de la gravedad, desde regiones topográficamente más altas hacia otras de menor altitud.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

y 19, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 22 del día. Los estados de viento de este patrón representan vientos que de manera dominante soplan con componente del norte en los cuatro cuadrantes de la ciudad. En el segundo patrón, cuyos eventos corresponden a vientos que soplan predominantemente con una componente del sur, particularmente en los cuadrantes del Este, la población de los estados de viento se desarrolla a partir de la hora 13, creciendo hasta alcanzar sus valores más altos entre las horas 17 y 18, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 22.

En Temporada de Lluvias

- Sistema de vientos montaña-valle, valle-montaña asociados a la topografía de la zona.
- En la noche identificó vientos de drenaje.

Los patrones 1 y 2 reportados en este trabajo, reflejan claramente estas características del comportamiento de los vientos en la Ciudad de México.

- En el día, en la zona Oeste se tienen vientos del NW, y en la zona Este, hay vientos del Norte y del NW.

El Patrón No. 6: Vientos Matutinos del Norte representa eventos de circulación del viento que de manera dominante soplan con una componente del norte en los cuatro cuadrantes de la ciudad. Comienza a manifestarse al amanecer, creciendo su población hasta alcanzar sus valores más altos alrededor del mediodía, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 18. Estos vientos se presentan principalmente durante el verano y el otoño. De hecho, durante el invierno solo se presentaron en 2003 y en primavera no se observaron durante los años 2003, 2004 y 2005.

En la Figura 5.24, tomada de uno de los trabajos de Jáuregui, se muestran esquemáticamente las direcciones de flujo del viento que él identificó en la cuenca de México, tanto para las horas del día como para las horas de la noche.

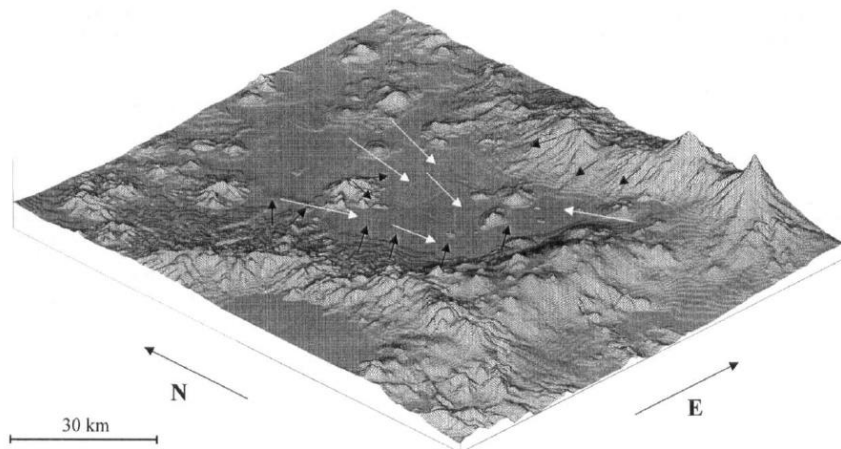


Fig. 1a: 3D-View of the basin of Mexico. The prevailing winds during the daylight (white) and night hours (black) are shown
Dreidimensionale Ansicht des Hochbeckens von Mexiko. Die vorherrschenden Winde während der Tagesstunden (weiß) und der Nachtstunden (schwarz) sind angegeben

Figura 5.24. Vista 3D de la cuenca de México. Se muestran las principales direcciones del viento, tanto para horas diurnas como para horas nocturnas. Tomada de D. Klaus (1999)²⁹.

²⁹ D. Klaus, E. Jauregui, A. Poth, G. Stein y M. Voss (1999). Regular Circulation Structures in the Tropical Basin of Mexico City as a Consequence of the Urban Heat Island Effect. *Erdkunde*, Band 53, 231-243.

5.6.2. Comparación con los Resultados de B. de Foy

En 2008, B. de Foy y colaboradores publicaron un trabajo donde utilizan el análisis de conglomerados para identificar las formas principales de circulación de los vientos en el área metropolitana de la ciudad de México durante el periodo de la campaña MILAGRO (Marzo, 2006) y dentro de los 8 años previos para la estación de secas cálida³⁰.

De Foy y colaboradores, realizaron un estudio de conglomeración sobre los datos horarios de viento en superficie registrados por Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) durante la estación de secas durante los años de 1999 a 2006. De acuerdo con la disponibilidad de datos, las estaciones seleccionadas para el estudio fueron XAL, TLA, EAC, TAC, PLA, PED, CES y MER. En su validación de los datos, ellos consiguieron 16791 eventos horarios de un total de 21168 del periodo considerado. Los cúmulos de eventos de viento fueron creados primero usando un método jerárquico con vinculación completa. Luego las medianas resultantes fueron usadas para alimentar un algoritmo de conglomeración del tipo *k-means*. La distancia entre dos *campos* (sic) de viento para este algoritmo fue calculada tomando las diferencias *rms* (*root mean square*) de todos los puntos de datos. El número de cúmulos que escogieron fue 8 (para que coincidiera con un mínimo local en distancia máxima entre cúmulos). Los cúmulos obtenidos fueron organizados de la siguiente manera: tres tipos de vientos de drenaje, identificados como *Sfc Drain1*, *Sfc Drain2* y *Sfc Drain3*; tres tipos de vientos del norte al este, llamados *Sfc Northeast*, *Sfc East* y *Sfc North*, y dos tipos de vientos del sur: *Sfc South* y *Sfc Southwest*.

La distribución de los cúmulos obtenida por De Foy et al. Se muestra en la Figura 5.25, tanto para el periodo completo que eligieron como para el periodo de la campaña MILAGRO (Marzo, 2006).

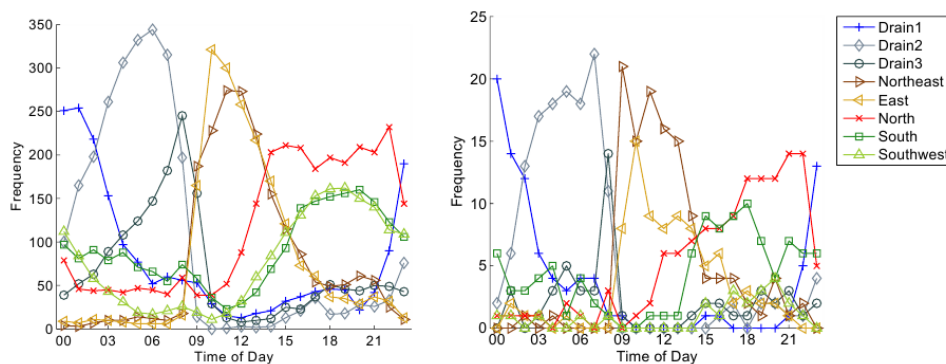


Fig. 7. Histogram of the diurnal distribution of the surface wind clusters (Sfc.) for the 10 year record (left) and the MILAGRO field campaign (right).

Figura 5.25. Distribución de los cúmulos obtenida por De Foy et al.³⁰ A la izquierda, la de 8 años. A la derecha, la de la campaña MILAGRO.

³⁰ B. de Foy; J.D. Fast; S.J. Paech; D. Phillips; J.T. Walters; R.L. Coulter; T.J. Martin; M.S. Pekour; W.J. Shaw; P.P. Kastendeuch; N.A. Marley; A. Retama; y L.T. Molina (2008). Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 1209-1224.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Aquí se observa que el método de conglomeración utilizado en ese trabajo pudo reconocer la estructura diurna de la circulación del viento en la cuenca, con una progresión clara de los cúmulos de *Sfc Drain1* a *Sfc Drain2*, y luego a *Sfc Drain3*. Después de ello, la circulación va a los cúmulos *Sfc East* y *Sfc Northeast* antes de ser reemplazados por alguno de los cúmulos *Sfc North* o *Sfc South* durante la tarde media y tardía, y por algunos de cúmulos *Sfc Southwest* al final de algunas tardes.

Para facilitar la comparación de los resultados obtenidos durante la investigación realizada en esta tesis y los resultados de de Foy et al., reproducimos aquí las Figuras 5.11 de la sección 5.5.2.

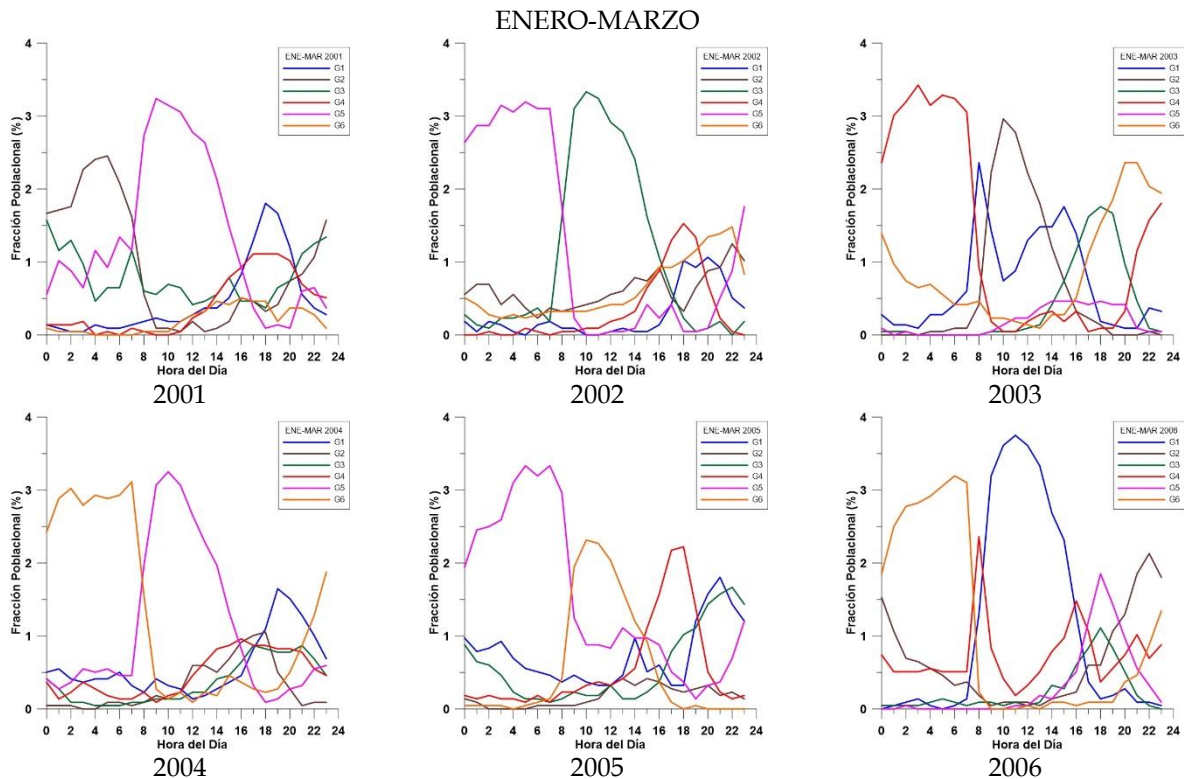


Figura 5.11. Fracciones poblacionales de los cúmulos de estados de viento de la Ciudad de México del periodo estacional Enero-Marzo (Invierno) para los años de 2001 a 2006.

Observando de manera comparativa las gráficas de esta figura, donde se muestran las distribuciones de población de los cúmulos obtenidos en nuestro trabajo, junto con las gráficas de los cúmulos de los patrones aquí identificados (Figuras 5.15 a 5.20), contra las gráficas de la Figura 5.25 de de Foy et al., se pueden identificar claramente coincidencias y similitudes muy significativas. Particularmente, las siguientes: El *Patrón No. 2: Vientos Catabáticos de Medianoche* coincide con el patrón *Sfc Drain1*, el *Patrón No. 1: Vientos Catabáticos de la Madrugada* coincide con el patrón *Sfc Drain2*, el *Patrón No. 3: Vientos Matutinos del E y NE* contiene a los patrones *Sfc Northeast* y *Sfc East*, el *Patrón No. 5: Vientos Vespertinos del Norte* se corresponde con el patrón *Sfc North*, y el *Patrón No. 4: Vientos Vespertinos del Sur* engloba a los patrones *Sfc South* y *Sfc Southwest*.

Capítulo 6

Conclusiones

Al final del camino no siempre está todo dicho. Más bien, casi siempre ocurre lo contrario, y uno se da cuenta de que en el tintero se han quedado numerosas palabras, numerosas frases, numerosos comentarios, numerosas ideas... En fin... pero es necesario cerrar los ciclos iniciados para poder dar los pasos siguientes y proyectarnos hacia el futuro.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Introducción

Ha sido un largo y sinuoso camino el que hemos recorrido para llegar hasta este capítulo, pero ya estamos aquí. Finalmente llegó el momento de cerrar el ciclo de esta investigación.

En este trabajo se implementó y aplicó una metodología práctica y sencilla para la caracterización de los eventos meteorológicos de la circulación del viento en una zona urbana, así como para la identificación de los principales patrones del comportamiento de este fenómeno dentro de un periodo de tiempo dado.

La realización de estudios como éste se considera de importancia desde varios puntos de vista, tales como su aplicación para la evaluación de recursos eólicos; para la modelación del transporte y la dispersión de contaminantes atmosféricos, la estimación de las zonas de impacto y la cuantificación del mismo sobre la calidad del aire; para la caracterización climatológica de zonas de interés; para la planeación urbana estratégica y sustentable; entre otras. En cualquier caso, la taxonomía eólica permite identificar los principales escenarios de circulación del viento en una región dada y para un periodo de tiempo determinado.

El trabajo se desarrolló considerando la Ciudad de México como caso de estudio y bajo las hipótesis siguientes:

- La ubicación geográfica, la topografía, el tipo y uso de suelo y la morfología urbana de la Ciudad de México, en interacción con el ciclo diurno de la insolación, los vientos sinópticos y la circulación atmosférica global, determinan la forma en que ocurren los vientos locales y la existencia de patrones de circulación en superficie, donde se reflejan los efectos de estas forzantes.
- La caracterización de los eventos de circulación local del viento en la Ciudad de México se puede realizar mediante el uso de modelos celulares de representación del viento a escala meso- β , identificando localmente (en las celdas) a dichos eventos en términos de sus propiedades de intensidad, dirección, divergencia y vorticidad.
- El análisis de conglomerados permite identificar los patrones de circulación del viento. Específicamente, el método jerárquico del análisis de conglomerados, con una medida de distancia entre estados de viento de tipo euclidiana, es ya suficiente para la aglomeración de estos estados en grupos meteorológicamente significativos, de los cuales se pueden inferir los patrones de circulación del viento.

Los datos de viento utilizados para el estudio fueron los promedios horarios de los registros de intensidad y dirección del viento de todas las estaciones de la REDMET del SIMAT que se encontraron disponibles para el periodo del día 1 de Enero de 2001 al día 31 de Diciembre de 2006. Sobre estos datos se aplicaron los modelos de representación del viento en una y cuatro celdas, obteniéndose un conjunto de objetos de datos (los estados

Conclusiones

de viento) caracterizados por cuatro parámetros (intensidad, dirección, divergencia y vorticidad del viento) para cada celda del modelo.

El análisis de la información obtenida se concentró principalmente sobre los resultados del modelo de una celda, realizándose su escrutinio desde los siguientes puntos de vista:

- en términos de las series de tiempo de los parámetros de los estados de viento y sus transformadas de Fourier,
- a través de las frecuencias de ocurrencia de los estados de viento discretos y los estados de dirección del viento, y
- mediante el análisis de conglomerados jerárquico, el cual se realizó específicamente usando el método de Ward con una medida de distancia euclidiana, habiendo normalizado previamente los datos en términos de los valores absolutos máximos que obtuvieron los parámetros en el periodo de tiempo considerado. El número de cúmulos seleccionado para el análisis fue 6, ya que muchos de los dendrogramas presentaron a la organización de 6 cúmulos como un punto de transición en la estabilidad de los cúmulos respecto a la variación del parámetro de distancia de Ward.

No obstante su potencial relevancia, los estados de viento obtenidos con el modelo de cuatro celdas se utilizaron solamente para apoyar la interpretación de los patrones de viento de la Ciudad de México producidos por el análisis de conglomerados.

6.2. Las Principales Conclusiones

Del análisis de las series de tiempo de los parámetros de estado de los eventos de viento y de las transformadas discretas de Fourier (FFT) de las mismas se obtuvieron resultados importantes como los siguientes:

- En el periodo de estudio, se observaron vientos de baja intensidad (ventolinas) con la dirección del Norte ligeramente predominante, en promedio.
- Los valores negativos de la divergencia predominaron durante el 78% de las horas del periodo de estudio, indicando que las condiciones de viento convergente prevalecieron no solamente durante las horas de la noche, sino también durante el 50% de las horas de sol, cuando se esperaría que el mezclado derivado de la turbulencia tendiera a debilitar el flujo inducido por efecto de isla de calor.
- La vorticidad fue positiva durante el 61% de las horas del periodo de estudio, mostrando un predominio de los vientos de carácter ciclónico. Este hecho, debido a los rasgos orográficos de la zona, pudiera estar relacionado, al menos parcialmente, con el predominio de los vientos con componente del norte (66%).
- Todos los parámetros usados para caracterizar a los estados de viento tuvieron comportamientos cuyos espectros de frecuencias resaltaron de manera importante las componentes de Fourier con periodos de 24, 12, 8 y 6 horas. La componente dominante en todos los casos fue la del periodo de 24h, reflejando el efecto del ciclo diurno de la insolación sobre los vientos de esta zona. La relación entre las amplitudes de las componentes de 12 y 24h fue de 75%, aproximadamente, para la divergencia, con valores considerablemente menores para los parámetros restantes. Una posible explicación de esto pudiera estar en el efecto de isla de calor urbana.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

El análisis de las distribuciones de frecuencias de ocurrencia de los *estados de viento discretos* mostró, básicamente, lo siguiente respecto a las características convergentes, ciclónicas, categoría en la escala de Beaufort y dirección del viento:

- Durante la madrugada (00-07) predominan vientos con carácter de ventolinas, convergentes, ligeramente ciclónicos, y que provienen de los sectores del N y NW.
- Durante la mañana y las primeras horas de la tarde (08-15) predominan ventolinas y brisas muy débiles de carácter ciclónico que llegan a la ciudad desde los sectores N, NE y E, con un equilibrio entre las características de convergencia y divergencia.
- Al final de la tarde y hasta medianoche (16-23), se observan brisas muy débiles predominantemente convergentes y ciclónicas que provienen principalmente de los sectores N y NW, y en menor grado del S y NE.

Por su parte, el análisis de los estados de dirección del viento reflejó lo siguiente:

- Numerosos EDV representan vientos que soplan del norte o que tienen una componente de flujo del norte.
- Durante la madrugada (00-07h), aunque la mayoría de los estados más frecuentes representan vientos del N y NW, un número importante de ellos corresponden a vientos que fluyen de manera altamente convergente hacia el centro del valle, bajando (por gravedad) de las montañas que rodean a la ciudad.
- Durante la mañana y las primeras horas de la tarde (08-15h) los principales estados representan vientos del N y NE, debido, probablemente, al efecto de los vientos alisios (a escala sinóptica) sobre la circulación en superficie.
- Por la tarde y hasta la medianoche (16-23h), los estados de mayor frecuencia representan vientos que soplan principalmente del N, NE y NW, aunque se pueden identificar también estados que representan vientos del S y SW.

En términos del análisis de conglomerados, los principales patrones de circulación del viento que pudieron identificarse en el periodo de estudio para la Ciudad de México fueron los siguientes:

Patrón No. 1: Vientos Catabáticos de la Madrugada. Vientos que bajan de las montañas circundantes hacia el valle de la Ciudad de México por efecto gravitacional, presentando una convergencia muy alta. Los cúmulos representativos comienzan a crecer con la puesta del sol (alrededor de la hora 19 o 20), adquiriendo y manteniendo sus valores más altos en el intervalo de la medianoche hasta la hora 07, decayendo rápida y repentinamente hasta casi anularse en el amanecer, entre las horas 07 y 08. Este patrón se manifestó durante todo el año, aunque de manera más marcada durante el primer semestre, es decir, en invierno y primavera. Las principales direcciones del viento fueron: en el cuadrante NW, de NW y N; en el cuadrante SW, de W y SW; en el cuadrante SE, de SE y S; y en el cuadrante NE, de NE y N.

Patrón No. 2: Vientos Catabáticos de Medianoche. Este patrón se manifiesta básicamente alrededor de medianoche, entre el anochecer y el amanecer, durante todo el año. En los cúmulos, el número de estados de viento comienza a crecer hacia el anochecer, alcanza sus valores más altos alrededor de la medianoche, disminuyendo hasta anularse durante

Conclusiones

las primeras horas de la madrugada. Sus estados representan vientos catabáticos en los cuadrantes del oeste (NW y SW) de la ciudad, bajando por gravedad de la Sierra de las Cruces (al oeste) y de la Sierra del Ajusco-Chichinautzin (al suroeste y sur) hacia el valle; mientras que en los cuadrantes del este (NE y SE) se manifiestan vientos catabáticos que bajan de la Sierra Nevada superpuestos a vientos vespertinos tardíos que fluyen a lo largo del canal de viento que se establece en esa región por efecto de las dos puertas de ventilación que existen al sur del valle, entre el Ajusco y el Popocatepetl, y al norte del mismo, al este de la sierra de Guadalupe.

Patrón No. 3: *Vientos Matutinos del E y NE.* Los estados de viento de este patrón se manifiestan principalmente durante la mañana, los cúmulos se desarrollan a partir del amanecer, sus poblaciones alcanzan sus valores máximos poco antes del mediodía, y disminuyen hasta anularse hacia las horas 16 o 17. Este patrón representa vientos divergentes que soplan predominantemente del NE y E a consecuencia de los vientos alisios que soplan de las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales, desviándose hacia el oeste por efecto de la rotación de la tierra.

Patrón No. 4: *Vientos Vespertinos del Sur.* En este patrón, los cúmulos se desarrollan a partir de la hora 13, creciendo su población hasta alcanzar sus valores más altos entre las horas 17 y 18, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 22 del día. Este patrón representa vientos del sur que se manifiestan durante todo el año, no obstante que no se observaron durante el periodo de Julio a Septiembre en los años de 2003 a 2005, y tuvieron bajas frecuencias durante el mismo periodo estacional en los años de 2001, 2002 y 2006.

Patrón No. 5: *Vientos Vespertinos del Norte.* De manera similar al caso anterior, los cúmulos de estados de viento de este patrón se desarrollan a partir de la hora 13, creciendo hasta alcanzar sus valores más altos entre las horas 17 y 19, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 22. Este patrón representa vientos dominantes del N en los cuatro cuadrantes de la ciudad, durante todo el año.

Patrón No. 6: *Vientos Matutinos del Norte.* Los vientos de este patrón se desarrollan al amanecer, creciendo su población hasta alcanzar sus valores más altos alrededor del mediodía, para luego disminuir hasta anularse alrededor de la hora 18. Este patrón representa vientos dominantes del norte en los cuatro cuadrantes de la ciudad. Estos vientos se presentan principalmente en verano (época de lluvias).

Patrón No. 7: *Vientos del Oeste.* Durante el invierno y la primavera, es decir durante el primer semestre de cada año, los vientos presentan una componente de flujo del oeste en casi todos los cuadrantes de la ciudad. Estos vientos no se observan durante el verano y el otoño. Se manifiestan a partir de media mañana hacia la medianoche. El origen de estos vientos está relacionado con la corriente de chorro (jet stream) subtropical y/o con los vientos del oeste (contralisios o westerlies) que ocurren de manera permanente en las latitudes subtropicales y medias de las zonas templadas, en latitudes entre 30 y 60 grados de ambos hemisferios.

Patrón No. 8: *Vientos Vespertinos Altamente Convergentes.* Aunque no de manera importante, se encontró un patrón que representa vientos vespertinos altamente convergentes. Se desarrollan a partir de mediodía, creciendo hasta alcanzar sus valores más altos entre las horas 19 y 20, para luego disminuir hasta casi anularse alrededor de la hora 23. Estos cúmulos sólo se formaron en el periodo de Enero a Marzo de 2002, en los periodos de Julio a Septiembre y de Octubre a Diciembre de 2006. Los vientos de este patrón pudieran tener su origen en eventos extremos del efecto de isla de calor urbana.

6.3. Validación de los Resultados

Los resultados obtenidos en este trabajo fueron validados comparándolos contra los resultados de otros investigadores. Como referentes se consideraron los trabajos de Ernesto Jáuregui y de Benjamin de Foy, y sus colaboradores. Las coincidencias encontradas fueron muy importantes en ambos casos, lo cual indica que los modelos utilizados para la representación del viento de la Ciudad de México, así como las herramientas de análisis, fueron suficientemente apropiados para los propósitos de este trabajo. Cabe resaltar, que la elección de los atributos de divergencia y vorticidad como variables extendidas en la descripción de los estados de viento, proporcionaron mayor información, tanto cualitativa como cuantitativa, respecto a las características distintivas de los patrones de viento.

6.4. Proyección al Futuro

Como es frecuente durante la realización de los proyectos de investigación, nuevas veredas de búsqueda se abren a lo largo del camino, atrayéndonos, y distrayéndonos a veces de los objetivos de la investigación inicial. Estas veredas son como nuevas vetas en una mina de materiales preciosos. En este trabajo, ha quedado pendiente la exploración de las veredas que pueden desprenderse del análisis de los estados de viento producidos por el modelo de cuatro celdas. Aquí, la información relativa a ellos sólo fue utilizada de manera parcial y limitada para identificar a los estados de dirección del viento medio asociados a los diferentes cúmulos producidos por el análisis de conglomerados, facilitando su organización e interpretación. Por otra parte, la aplicación de estas técnicas de análisis para la identificación de escenarios importantes para el estudio del transporte y la dispersión de contaminantes atmosféricos, aunque ello no se reportó en este trabajo de tesis, fue una actividad que resultó muy reconfortante y alentadora respecto a la utilidad de estos estudios durante un par de colaboraciones en trabajos de investigación con miembros del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y del Instituto de Investigaciones Eléctricas, los cuales fueron publicados en revistas de prestigio y circulación internacional. Considero que esta vereda podría ser de mucho interés para el desarrollo de trabajos de investigación básica y aplicada en el futuro inmediato.

Bibliografía

Bibliografía

- [1] Aldenderfer, MS & Blashfield, RK. (1984). *Cluster Analysis*, SAGE Publications. The Publishers of Professional Social Sciences. Newbury Park, CA, Quinta impresión, 1988.
- [2] Andrews, DG. (2010). *An Introduction to Atmospheric Physics*, Cambridge University Press, New York
- [3] Bravo, HA & Torres, RJ. (2002). *Air Pollution levels and trends in the Mexico City metropolitan area*, In: *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*, M. Fenn, L. Bauer, and T. Hernández, (Eds.), Springer-Verlag, ISBN:978-0-387-95337-3, New York, 121-159.
- [4] Bossert, JE (1997). *An investigation of flow regimes affecting the Mexico City región*. J. Appl. Meteorol. 36, 119-140.
- [5] Calderón-Garcidueñas, L; Franco-Lira, M; Torres-Jardón, R; Henríquez-Roldán, C; Barragán-Mejía, G; Valencia-Salazar, G; González-Maciél, A; Reynoso-Robles, R.; Villareal-Calderón, R; & Reed, W. (2007). *Pediatric Respiratory and Systemic Effects of Chronic Air Pollution Exposure: Nose, Lung, Heart, and Brain Pathology*, Toxicologic Pathology, 35, 154-162.
- [6] Castro T. & Salcido, A. (2006). *Influencia de la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en Tres Sitios Perimetrales*, **En**: Contaminación Atmosférica Contaminación Atmosférica V.- Leopoldo García-Colín Scherer, Juan Rubén Varela Ham (Eds.), 119-144, El Colegio Nacional, ISBN: 970-640-303-5, México.
- [7] Celada-Murillo, AT; **Carreón-Sierra, S**; Salcido, A; Castro, T; Peralta, O; and Georgiadis, T. (2013). *Main Characteristics of Mexico City Local Wind Events during MILAGRO 2006 Campaign within a Meso- β Scale Lattice Wind Modeling Approach*. ISRN Meteorology, 2013(2013), ID 605210, 14 pages. ISSN: 2090-7524 (Online). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/605210>.
- [8] Celada-Murillo, AT & Salcido, A. (2009). *The Mexico City 2006 Wind Direction States*, Proc. 20th IASTED International Conference on Modelling and Simulation, Banff, Canada, pp. 51-58.

Bibliografía

- [9] A.W. Date, AW. (2005)
Introduction to Computational Fluid Dynamics, Cambridge University Press, Cambridge
- [10] De Foy B; Caetano, E; Magaña, V; Zitácuaro, A; Cárdenas, B; Retama, A; Ramos, R; Molina, LT; y Molina, MJ (2005).
Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2267-2288.
- [11] De Foy, B.; Fast, JD; Paech, SJ; Phillips, D; Walters, JT; Coulter, RL; Martin, TJ; Pekour, MS; Shaw, WJ; Kastendeuch, PP; Marley, NA; Retama, A & Molina, LT (2008).
Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1209-1224.
- [12] Dolnicar S. (2003).
Using cluster analysis for market segmentation –typical misconceptions, established methodological weaknesses and some recommendations for improvement. *Australasian J Mark Res* 11(2):5–12.
- [13] Elliott, D.; Schwartz, M.; Scott, G.; Haymes, S.; Heimiller, D. & George, R. (2004, Abril).
Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca. Laboratorio Nacional de Energía Renovable. NREL/TP-500-35575.
- [14] Evans, J, Levy, J, Hammitt, J, Santos-Burgoa, C, Castillejos, M, Caballero-Ramirez, M, Hernandez-Avila, M, Riojas-Rodriguez, H, Rojas-Bracho, L, Serrano-Trespacios, P, 25 Spengler, J D, and Suh, H. (2002).
Health benefits of air pollution control, **En:** *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*, Molina, LT & Molina, MJ (Eds.), Kluwer Academic Publishers, 103–136.
- [15] Everitt, BS; Landau, S & Leese, M. (2001).
Cluster Analysis, Arnold, London, Fourth Edition.
- [16] Fast, JD; Foy, B; Acevedo3-Rosas, F; Caetano, E; Carmichael, G; Emmons, L; McKenna, D; Mena, M; Skamarock, W; Tie, X; Coulter, RL; Barnard, JC; Wiedinmyer, C; y Madronich, S. (2007).
A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 2233–2257.
- [17] Foundation, Leiden. (2005, December).
Megacities - our global urban future. The International Year of Planet Earth. Earth Sciences for Society, The Netherlands

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

- [18] García-Palomo, A; Zamorano, JJ; López-Miguel, C; Galván-García, A; Carlos-Valerio, V; Ortega, R y Macías, JL. (2008).
El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 25, núm. 1, pp 158-178.
- [19] Jáuregui Ostos, E. (2000, Junio).
El Clima de la Ciudad de México, *Temas Selectos de Geografía de México*, Instituto de Geografía, UNAM, Plaza y Valdés, S.A. de C.V..- ISBN: 968-856-819-8).
- [20] Jáuregui Ostos, E. (1997).
Heat Island Development in Mexico City. Atmospheric Environment, 31, 3821-3831.
- [21] Jáuregui Ostos, E. (1988).
Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin. Atmósfera, 1, 131-140
- [22] Johnson, DL; Ambrose, SH; Bassett, TJ; Bowen, ML; Crummey, DE; Isaacson, JS; Johnson, DN; Lamb, P; Saul, M and Winter-Nelson, AE. (1997).
Meanings of environmental terms. Journal of Environmental Quality. 26: 581-589.
- [23] Kaufman, L. & Rousseeuw, PJ. (2005).
Finding Groups in Data. An Introduction to Cluster Analysis, Wiley Series in Probability and Statistics, Wiley-Interscience, Hoboken, N.J.
- [24] Kaufman, L; Rousseeuw, PJ. (2005).
Finding groups in data. An introduction to cluster analysis. Wiley, Hoboken, NY
- [25] Klaus, D; Jauregui, Poth, E; G. Stein, G; y Voss, M. (1999).
Regular Circulation Structures in the Tropical Basin of Mexico City as a Consequence of the Urban Heat Island Effect. Erdkunde, Band 53, 231-243.
- [26] Klaus, D; Poth, A.; Voss, M; y Jauregui, Poth, E. (2001).
Ozone distributions in Mexico City using principal component analysis and its relation to meteorological parameters. Atmósfera, 14, 171-188.
- [27] Landau, LD & Lifshitz, EM. (2005).
Fluid Mechanics, Volume 6 of Course of Theoretical Physics, Second English Edition, Pergamon Press, New York, 1987.
- [28] Lugo-Hubp, J y Salinas-Montes A. (1996).
Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al Norte de la Ciudad de México) y su Relación con Peligros Naturales, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 13, núm. 2, 1996, pp. 240-251.

Bibliografía

- [29] Lugo-Hubp, J; Mooser, F; Pérez-Vega, A y Zamorano-Orozco, J. (1994). *Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina, D.F., México*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 11, núm. 1, pp. 43-52.
- [30] Malvern, LE. (1969). *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. Prentice-Hal Series in Engineering of the Physical Sciences, Reswick, JB and Rohsenow, WM (eds.). Prentice-Hal, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey
- [31] Molina, LT; Madronich, S; Gaffney, JS; Apel, [et. al.]. (2010). *An overview of the MILAGRO 2006 campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation*. Atmos. Chem. Phys., 10, 8697–8760.
- [32] Molina, MJ & Molina, LT. (2004). *Critical Review: Megacities and atmospheric pollution*, J. Air Waste Manage. Assoc., 54(6), 644–680.
- [33] Orlanski, I. (1975). *A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes*, Bull. Amer. Meteorol. Soc., Vol. 56, pp. 527-530.
- [34] Peralta, O; Castro, T; Durón, M; Salcido, A; Celada-Murillo, AT; Navarro-González, R; Márquez, C; García, J; de la Rosa, J; Torres, R; Villegas-Martínez, R; Carreón-Sierra, S; Imaz, M; Martínez-Arroyo, A; Saavedra, I; Espinosa, ML; and Torres-Jaramillo, A. (2013). *H2S emissions from Cerro Prieto geothermal power plant and air pollutants measurements in the área*. Geothermics, 46, 55–65.
- [35] Ratto, G.; Maronna, R. & Berri, G. (2010). *Analysis of Wind Roses Using Hierarchical Cluster and Multidimensional Scaling Analysis at La Plata, Argentina*. Boundary-Layer Meteorol. 137:477–492. DOI 10.1007/s10546-010-9539-3.
- [36] Romesburg, HC. (2004). *Cluster Analysis for Researchers*, Lulu Press, North Carolina.
- [37] Salcedo, D.; Castro, T., Ruiz-Suárez, LG.; García-Reynoso, A.; Torres-Jardón, R.; Torres-Jaramillo, A.; Mar-Morales, BE.; Salcido, A.; Celada-Murillo, AT.; **Carreón-Sierra, S.**; Martínez, AP.; Fentanes-Arriaga, OA.; Deustúa, E.; Ramos-Villegas, R.; Retama-Hernández, A.; Saavedra, MI & Suárez-Lastra, M. (2012). *Study of the Regional Air Quality South of Mexico City (Morelos State)*, Science of the Total Environment 2012, Jan 1; vol. 414, pp. 417-432. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.09.041.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

- [38] Salcido, A; **Carreón-Sierra, S** & Celada-Murillo, AT. (2014). *A Brief Clustering Analysis of the Mexico City Local Wind States Occurred During the MILAGRO Campaign*. **Aceptado en:** The 4th IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering (EME2014). Julio 16-18, 2014. Banff, Canada.
- [39] Salcido, A; **Carreón-Sierra, S** & Celada-Murillo, AT. (2012, July) *Paths described by the Mexico City air pollution centroids during MILAGRO campaign*. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling and Simulation (MS2012). Baff, Canada. pp 209-215. DOI: 10.2316/P.2012.783-058 20.
- [40] Salcido, A; Celada-Murillo, AT; **Carreón-Sierra, S.** & Salcido-Merino, CD. (2011, November). *Brief Analysis of the Spatial Clustering of the Mexico City Air Pollution Centroids during the MILAGRO 2006 Campaign*. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Simulation, and Identification (MSI 2011). Pittsburgh, USA. pp 198-206. DOI: 10.2316/P.2011.755-022.
- [41] Salcido, A; Celada-Murillo AT; Castro, T. (2010). *A meso- β scale description of surface wind events in Mexico City during MILAGRO 2006 campaign*. **En:** Proc. of the Second IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering. Banff, Canada. Pág., 820-827.
- [42] Salcido, A; Celada-Murillo, AT; Salcido, CD. (2010) *Representación a Escala Meso- β de los Eventos de Circulación del Viento en la Ciudad de México*. **En:** El Proceso de Innovación Radical, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Registro Público de Derecho de Autor No. 03-2010-061712280600-01, 101-118.
- [43] Salcido, A; Celada-Murillo, AT. (2010, February) *A Lattice Gas Approach to the Mexico City Wind Field Estimation Problem.- En:* Modelling, Simulation and Optimization/ Romero Rey, Gregorio; Martinez Muneta, Luisa.- Ed.- INTECH, 385-416. ISBN: 978-953-307-048-3. Disponible en línea en: <http://sciyo.com/articles/show/title/a-lattice-gas-approach-to-the-mexico-city-wind-field-estimation-problem>.
- [44] Salcido, A; Celada-Murillo AT; Castro, T. (2008). *Lattice Gas Simulation of Wind Fields in the Mexico City Metropolitan Area*, Proceedings of the 19th IASTED International Conference on Modelling and Simulation (MS2008), Quebec, Canada, pp. 95-100
- [45] Salcido, A; Celada-Murillo, AT; Villegas, R; Salas, H; Sozzi, R; Georgiadis, T. (2003, May/June)

Bibliografía

- A micrometeorological database for the Mexico City Metropolitan Area. Il Nuovo Cimento, 26C, 3, 317-355, ISSN: 11241896.*
- [46] Salcido A; Celada-Murillo AT; Villegas, R; Salas, Sozzi, R; Georgiadis, T. (2003).
A Micrometeorological Database for Air Pollution Modelling in the Mexico City Metropolitan Area. Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 66, 53-64, WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3541.
- [47] Salcido, A.; Sozzi, R.& Castro T. (2003, December).
A Least Squares Variational Approach to the Convective Mixing Height Estimation Problem, Environmental Modelling & Software, 18, 10, 951-957, ISSN: 13648152.
- [48] Salcido, A; Celada-Murillo AT; Villegas, R; Salas, H; Sozzi, R; y Georgiadis, T. (2003).
A micrometeorological database for the Mexico City Metropolitan Area. Il Nuovo Cimento, 26C, 317-355.
- [49] Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal (2008).
Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México 2006. México: Autor.
- [50] UNEP (United Nations Environment Programme) & WHO (World Health Organization). (1992).
Urban Air Pollution in Megacities of the World, Blackwell Publishers, Oxford.
- [51] Ward, JH. (1963).
Hierarchical groupings to optimize an objective function. Journal of the American Statistical Association, 58, 236-244.
- [52] Wedel M, Kamakura WA. (2000).
Market segmentation: conceptual and methodological foundations, 2nd edn. Kluwer, Boston, NE.

Taxonomía del Viento en Superficie en la Ciudad de México con un Modelo Celular de Representación a Escala Meso- β . Periodo 2001-2006.

Anexos
Publicaciones

Publicaciones

Derivados de este trabajo de tesis, se realizaron (en colaboración con investigadores del Instituto de Investigaciones Eléctricas y del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM) seis trabajos que ya fueron publicados o están aceptados para ello. Tres son trabajos en extenso publicados en memorias de congresos internacionales, y los otros tres son artículos de investigación publicados en revistas de prestigio a nivel internacional. En este apartado de anexos se incluyen copias completas de las publicaciones realizadas, las cuales se enlistan a continuación.

- [1] A. Salcido, A.T. Celada-Murillo, **S. Carreón-Sierra** & C.D. Salcido-Merino, Brief Analysis of the Spatial Clustering of the Mexico City Air Pollution Centroids during the MILAGRO 2006 Campaign. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Simulation, and Identification (MSI 2011). November 7-9, 2011 Pittsburgh, USA. pp 198-206. DOI: 10.2316/P.2011.755-022.
- [2] D. Salcedo, T. Castro, L.G. Ruiz-Suárez, A. García-Reynoso, R. Torres-Jardón, A. Torres-Jaramillo, B.E. Mar-Morales, A. Salcido, A.T. Celada, **S. Carreón-Sierra**, A.P. Martínez, O.A. Fentanes-Arriaga, E. Deustúa, R. Ramos-Villegas, A. Retama-Hernández, M.I. Saavedra & M. Suárez-Lastra. (2012). Study of the Regional Air Quality South of Mexico City (Morelos State), Science of the Total Environment 2012, Jan 1; vol. 414, pp. 417-432. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.09.041.
- [3] A. Salcido, **S. Carreón-Sierra** & A.T. Celada-Murillo, Paths described by the Mexico City air pollution centroids during MILAGRO campaign. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling and Simulation (MS2012). July 3-5, 2012. Baff, Canada. pp 209-215. DOI: 10.2316/P.2012.783-058 20.
- [4] O. Peralta; T. Castro; M. Durón; A. Salcido; A.T. Celada-Murillo; R. Navarro-González; C. Márquez; J. García; J. de la Rosa; R. Torres; R. Villegas-Martínez; **S. Carreón-Sierra**; M. Imaz; A. Martínez-Arroyo; I. Saavedra; M.L. Espinosa; and A. Torres-Jaramillo. "H₂S emissions from Cerro Prieto geothermal power plant and air pollutants measurements in the área". Geothermics, 46, 55-65, 2013.
- [5] A.T. Celada-Murillo; **S. Carreón-Sierra**; A. Salcido; T. Castro; O. Peralta; and T. Georgiadis. "Main Characteristics of Mexico City Local Wind Events during MILAGRO 2006 Campaign within a Meso- β Scale Lattice Wind Modeling Approach". ISRN Meteorology, 2013(2013), ID 605210, 14 pages. ISSN: 2090-7524 (Online). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/605210>.
- [6] A. Salcido, **S. Carreón-Sierra** & A.T. Celada-Murillo, A Brief Clustering Analysis of the Mexico City Local Wind States Occurred During the MILAGRO Campaign. Aceptado en: The 4th IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering (EME2014). Julio 16-18, 2014. Banff, Canada.

BRIEF ANALYSIS OF SPATIAL CLUSTERING OF MEXICO CITY AIR POLLUTION CENTROIDS DURING MILAGRO CAMPAIGN

Alejandro Salcido¹, Ana-Teresa Celada-Murillo¹, Susana Carreón-Sierra^{1,2} and Carlos-Daniel Salcido-Merino³
Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Energías Alternas. Reforma 113, Col. Palmira, 62490-Cuernavaca,
Morelos, México, salcido@iie.org.mx
Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM (Matemáticas Aplicadas y Computación). San Juan Totoltepec s/n,
Santa Cruz Acatlán, 53150-Naucalpan, Estado de México, México.
Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM (Medicina). Avenida de Los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala,
54090-Tlalnepantla Estado de México, México.

ABSTRACT

It is proposed a very simple analysis approach for investigating the spatial distribution of the surface concentrations of air pollutants in Mexico City in response to the wind blowing. The spatial distribution of a given air pollutant is modeled by the mass centroid of its concentrations that the automated stations of the official air quality network (RAMA-SIMAT) measures and reports each hour. The wind events are characterized with a meso- β scale representation cellular model using as input the wind data measured at the stations of the official meteorological network (REDMET-SIMAT). We applied this innovative approach for analyzing the spatial clustering of the Mexico City air pollution centroids of ozone, nitrogen oxides, carbon monoxide and sulfur dioxide during the period of the MILAGRO campaign (March 2006). In particular, we found out the densities of states of the wind events for those Mexico City sectors that the pollution centroids were visiting during this period.

KEY WORDS

Mexico City, air pollution centroids, spatial clustering, meso- β scale wind states, mathematical modelling

1. Introduction

In big urban settlements, some important chronic health effects are associated with chronic exposures to high concentrations of air pollutants. Exposures to particulate matter and gaseous air pollutants have been associated with respiratory tract inflammation, disruption of the nasal respiratory and olfactory barriers, systemic inflammation, production of mediators of inflammation capable of reaching the brain and systemic circulation of particulate matter [1]. This is an important issue for the 20 million people (including 9 million children) living in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA), which in 1992 was considered by the *United Nations Environment Programme* and the *World Health Organization* as one of the seven megacities with the worst problems of air pollution [2]. The emissions of air pollutants in the MCMA have been abated in a strong substantial way in

the last two decades. In fact, emission reductions around 86% in sulfur dioxide (SO₂), 60% in carbon monoxide (CO), 30% in nitrogen oxides (NO_x), 50% in PM₁₀ (particulate matter < 10 μ m in diameter), and 40% in volatile organic compounds (VOC), were reported for the years 1990-2006 in the official emission inventory [3]. But even so, close to 1.8 megatons of CO, 187 kilotons of NO_x, 6 kilotons of SO₂, 21 kilotons of PM₁₀, and 512 kilotons of VOC are still being produced in the MCMA and released to its ambient atmosphere every year [3]. The critical air pollutants in MCMA are ozone (O₃), PM₁₀ and PM_{2.5} with concentrations above their daily and annual US air quality standards [4]. Ozone, however, is by far the most important air pollutant because of the frequency of occurrence of high levels, persistence, and spatial distribution [4, 5, 6].

The gravity and complexity of the air pollution problem at the MCMA are also strongly related to other important factors such as the geographical setting, meteorology, and topography. The MCMA lies inside a subtropical basin (with latitudes between 19.2 and 19.6 °N and longitudes between 98.9 and 99.4 °W) with an average altitude of 2240m. It is almost completely surrounded by high mountains, as shown in Figure 1. To the north, however, the basin extends into the Mexican plateau and the arid interior of the country, with the Sierra de Guadalupe creating a small 800m barrier above the basin floor. Its climate is classified, broadly speaking, into two seasons: the rainy season from May to October, and the dry season from November to April. This classification stems from the two main meteorological patterns on the synoptic scale: dry westerly winds with anticyclone conditions from November until April, and moist flows from the east due to the weaker trade winds along the other six months [7]. The MCMA meteorology, however, is by far more complex than it is expressed by this simple classification. Important interactions of the basin with the Mexican plateau and the lower coastal areas may occur. Moreover, due to the MCMA location, large-scale pressure gradients are generally weak, and a very strong solar radiation is registered here throughout the year [7-11]. These conditions, combined with the surrounding mountains, are ideal for the development of thermally driven winds.

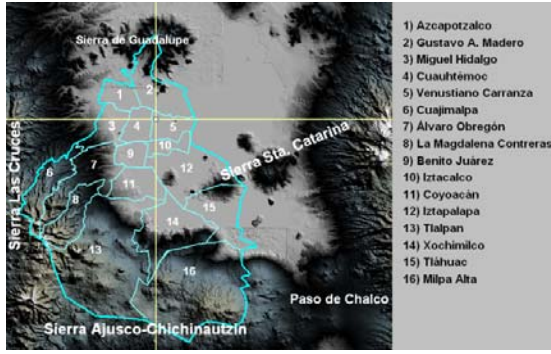


Figure 1. Topographic features of the MCMA basin and its surroundings. The Mexico City Delegations are shown also for future reference.

The knowledge of the wind events and their patterns constitutes an important issue to understand how the air pollutant emissions produced in an urban settlement may be dispersed in atmosphere, how these air pollutants may be distributed spatially in the city, and how they could be exported towards neighboring sites [12, 13].

In March 2006, it was carried out the MILAGRO field campaign in the MCMA. It was an international scientific collaborative effort focused on the study of the local, regional and global impact of air pollution in a megacity, using as a case study the MCMA and its surrounding areas [14]. In particular, the MCMA was selected as a case study for the MILAGRO campaign because it has tropical latitude similar to other megacities, it receives a large amount of incoming solar radiation all year long making its atmosphere extremely active photochemically, which helps to determine the transformation of atmospheric pollutants; but also because the existence of reliable urban and air quality measurement records, which the official air quality and meteorological monitoring networks provide systematically each hour. The MCMA atmospheric monitoring network (RAMA-SIMAT) has 36 stations which cover Mexico City and the State of Mexico. The surface concentrations of O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_x and CO are measured in this monitoring network, and public domain reports of the 1-hour average values are provided [15]. The surface meteorological conditions (wind speed, wind direction, temperature, and relative humidity) are measured and reported by fifteen stations of the REDMET-SIMAT.

In this paper, with a very simple analysis approach, we try to identify the main features of the Mexico City spatial distribution of the air pollutants surface concentrations and their possible correlations with the surface wind circulation events. For any time, we represent the spatial distribution of a given air pollutant by the mass centroid of its concentration values measured at the stations of the official air quality network, and we describe the local wind circulation events using a meso- β scale cellular model and the simple and discrete wind state concept introduced by Salcido et al. [16, 17, 18]. We used this analysis technique for studying the spatial and temporal clustering of the Mexico City air pollution centroids of ozone, nitrogen oxides, carbon monoxide and sulfur dioxide for the period of the MILAGRO field campaign.

2. Theoretical Framework

In this section we present an overview of the theoretical framework we used to study the spatial clustering of the Mexico City air pollution centroids in response to the local wind circulation. Specifically, under the context of the Mexico City air pollution problem, it is described and discussed the dynamics of the air pollution centroids and the meso- β scale cellular model we used for representing the local wind.

2.1. Air Pollution Centroids

The system we are interested in is an open spatial domain D within a polluted region of the troposphere. A number n of polluting chemical species, with labels $\alpha = 1, 2, \dots, n$, will be considered. The mass density of the pollutant α and its mass production per unit time and unit volume will be denoted by the field variables $\mu_\alpha(\mathbf{x}, t)$ and $\sigma_\alpha(\mathbf{x}, t)$, respectively, and the wind velocity field will be denoted by $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$. Now, associated with the spatial distributions of mass and mass production of one given pollutant, its mass and the mass production centroids are defined as follows.

The center of mass (or mass centroid) of a pollutant α is the point \mathbf{R}_α at which all its mass (which is spatially distributed within a given region) may be considered to be concentrated in analyzing its behavior. It is defined by

$$\mathbf{R}_\alpha = \frac{1}{M_\alpha} \int_D \mathbf{x} \mu_\alpha dV,$$

where M_α is the total mass of the pollutant contained in the domain D . Analogously, the mass production centroid of the pollutant α is the point \mathbf{Q}_α at which all its mass production rate may be considered to be concentrated in analyzing its behavior. We define this point as

$$\mathbf{Q}_\alpha = \frac{1}{\dot{M}_\alpha} \int_D \mathbf{x} \sigma_\alpha dV,$$

where \dot{M}_α with the dot superposed denotes its time derivative.

Using the definitions of these pollution centroids and the conservation of mass, expressed by the balance equation

$$\frac{\partial \mu_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mu_\alpha \mathbf{v}) = \sigma_\alpha,$$

when applied to the pollutant α , we obtain the following relation for the velocity of the pollutant mass centroid

$$\mathbf{V}_\alpha = \mathbf{U}_\alpha + \gamma(\mathbf{Q}_\alpha - \mathbf{R}_\alpha) - \Phi_\alpha$$

Here γ is the time rate of the pollutant total mass per unit mass

$$\gamma = \frac{\dot{M}_\alpha}{M_\alpha},$$

\mathbf{U}_α is the average velocity of the movement of the pollutant as it is advected by the wind

$$\mathbf{U}_\alpha = \frac{1}{M_\alpha} \int_D \mu_\alpha \mathbf{v} dV,$$

and the flow term

$$\Phi_\alpha = \frac{1}{M_\alpha} \oint_{\partial D} \mathbf{x} \mu_\alpha \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA$$

represents the contribution to the velocity of the mass centroid associated to the pollutant mass exchange between the considered domain D and its surroundings through the boundary surface ∂D .

Although the flow term Φ_α may be very important in considering exportation of air pollutants from a highly polluted place to its surroundings [12], it can be neglected when air pollution remains trapped within a finite region in space. In such a case, the displacements of the mass centroid of the pollutant will be determined only by the relative position of its mass and mass production centroids, and by the velocity of advection of the pollutant by the wind. In the case of Mexico City basin, because its topography and the low-wind conditions which prevail very often [10], air pollution may remain trapped by days in the city, particularly when thermal inversions occur.

2.2. Cellular Models of Local Winds

Here we present an overview of a simple and innovative analysis approach we have used for characterizing local wind circulation in Mexico City. It allows a discrete characterization of wind events which is simpler than that provided by a continuum wind velocity field but much complete and detailed than that provided by just a wind rose [16-18]. This approach makes easy wind taxonomy for different purposes, such as wind resource assessment, modelling of urban air pollution dispersion, and some other.

The spatial domain of interest is a region of atmosphere extending from ground up to a given height H , which is assumed sufficiently small that the horizontal movement of the air masses can be represented by the velocity of wind measured at surface meteorological stations. For Mexico City, these meteorological stations could be those ones which belong to the official atmospheric monitoring network (SIMAT). To describe the Mexico City local wind circulation, we represent the region by a cellular spatial domain, D , which can be viewed as a 2D lattice with four rectangular cells (or quadrants). In practice, as the spatial domain we considered a tropical basin located at North latitudes extending from $19^\circ 18'$ to $19^\circ 34'$ and West longitudes extending from $99^\circ 00'$ to $99^\circ 16'$. Then the cells dimensions are $L_{WE} = 14.0$ km (in the West-East direction) and $L_{SN} = 18.5$ km (in the South-North direction). The wind conditions at time t in any lattice cell will be described by a state variable defined by a tetrad $(v, \theta, \gamma, \omega)$, where the parameters v, θ, γ and ω denote the spatial averages of speed, direction, divergence and vorticity of the wind in the cell. In practice, the values of these parameters can be calculated from the wind data of the stations of the REDMET-SIMAT, which covers the

spatial domain of interest. Under this model, for each time t , the spatial complexity of the wind velocity field is mapped into a 2×2 matrix $\xi(t)$ defined by the cell wind states $(v, \theta, \gamma, \omega)_{ij}$. This matrix represents the wind state of the whole system; it is a cellular representation of the local wind event. The additional parameters γ and ω endows the model with a slightly non-local character and serve for compensating the information lost due to the spatial averaging process. Thus, at any lattice cell, the mean wind velocity is known, but also, at some extent, its tendencies of rotation and divergence inside the cell.

If the state parameters $(v, \theta, \gamma, \omega)$ are expressed in terms of discrete scales, such as the Beaufort wind speed scale, the eight sectors scale of wind direction (N=0, NE=1, E=2, SE=3, S=4, SW=5, W=6, NW=7), a three level scale for divergence (0 = Convergent, 1 = Parallel, 2 = Divergent), and a three level scale for vorticity (0 = Cyclonic, 1 = No Rotation, 2 = Anticyclonic), the wind states can be identified by non-negative integer numbers ε given by

$$\varepsilon = \omega + 3[\gamma + 3(\theta + 8v)]$$

When the first 18 categories of the Beaufort scale are considered, the number of the possible different wind states at a lattice cell is $N_{CS} = 18 \times 8 \times 3 \times 3 = 1296$, and the number of states of the cellular domain is $N_T = N_{CS}^4$.

The wind direction state (WDS) is a reduced version of the concept of wind state of a cellular domain. It is defined just by the four average wind directions $\theta_{NE}, \theta_{NW}, \theta_{SW}$ and θ_{SE} (each expressed in the 8 sectors scale) at the cells NW, NE, SW and SE, respectively. A wind direction state can be conveniently identified by a four digits octal number $(\theta_{NE}\theta_{NW}\theta_{SW}\theta_{SE})$, which can be equal to 0000 ... 7777) or its decimal equivalent. Within this representation model, the number of wind direction states of the cellular domain is 4096. However, not all of them can be necessarily observed at the region of interest. This possibility depends on the topographical features and on the particular wind driving forces which may exist in the region. The frequency distribution of the wind direction states (referred as the density of states of wind direction) constitute a convenient way to identify which of them can be observed at the study area and also to get an estimate of their probabilities of occurrence under different conditions (hourly, by day and night, by dry and rainy season, by specific time lapses, etc.)

3. Results and Discussion

We want to understand how the spatial distribution of the surface concentrations of air pollutants in Mexico City behaved in response to the wind circulation during the MILAGRO campaign (March, 2006). First we applied the models and concepts presented in the previous section to the air quality and meteorological data reported by the RAMA and REDMET subnetworks of SIMAT for this period, and then the spatial clustering of the air pollution centroids and its possible correlations with the local wind states in Mexico City were studied.

3.1. Data Sources: Air Quality and Meteorology

The MCMA atmospheric monitoring system (SIMAT) has 36 stations: 24 located in Mexico City and 12 at the State of Mexico. Among them, 23 stations measure the surface concentrations of ozone (O₃), 19 stations measure nitrogen oxides (NO_x), 20 stations measure carbon monoxide (CO) and 27 stations measure sulfur dioxide (SO₂). The surface meteorological conditions (wind speed, wind direction, temperature, and relative humidity) are also measured and reported by 15 stations. SIMAT provides reliable and systematic reports of the average values in an hourly basis [15].

The names, IDs, and geographical coordinates of the stations, so as the parameters they measure, are related in Table 1. The spatial distribution of the stations of the O₃, NO_x, SO₂, and meteorology subnetworks of SIMAT are shown in Figures 2. In the figures, the intersection point of the dotted lines represents the origin of our reference frame. It has been set at the geometric center defined by the station positions of the Mexico City monitoring network. This point is located 2 km at the NE of the Mexico City Zócalo (Plaza de la Constitución: it is the main square in the heart of the historic center of the city), very close to the crossing of Circunvalación and Eje 2 OTE avenues. For the purposes of this study, Mexico City was considered as divided in eight angular sectors (hereafter referred as the cardinal sectors of Mexico City), each one 45° wide and extending itself from the origin towards one of the cardinal points N, NE, E, SE, S, SW, W and NW.

The database we used to carry out the study comprises the hourly reports of wind speed and wind direction provided by REDMET and the hourly reports of the concentrations of SO₂, O₃, NO_x and CO provided by RAMA throughout March 2006. This is a database with 744 hourly events that describe the meteorology and air quality conditions which prevailed at the MCMA during the MILAGRO campaign.

3.2. Clustering of Mexico City Air Pollution Centroids

The hourly positions of the Mexico City air pollution centroids of SO₂, O₃, NO₂, NO and CO were calculated for March 2006. Their spatial clustering and frequency distributions are shown in Figure 3. The frequencies of the mean wind direction are shown also in these figures (as white bar histograms); however, here the cardinal sectors indicate downwind directions (wind direction + 180°). In the figures, the origin of the reference frame was set as described above.

In the figures, the coordinates of the positions of the air pollution centroids are relative to our choice of reference frame. The first interesting features we can observe in this figure are the differences among the spatial clusterings of the air pollution centroids, which indicate very clearly that wind is not the only one neither the main mechanism to what they are responding. This behavior, of course, is what one can expect in agreement with the theoretical framework we presented above, in section 2.1.

Table 1
Positions and Measured Parameters of the Stations of the MCMA Atmospheric Monitoring Network

ID	Name	Position		Parameters			
		LAT	LOX	O ₃	NO _x	SO ₂	MET
TAC	Tacuba	19.4550678	99.2024531	1	1	1	1
EAC	Acatlán	19.4819228	99.2432703	1	1	1	1
SAG	San Agustín	19.5322472	99.0299392	1	1	1	1
TLA	Tlanepantla	19.5283969	99.2042314	1	1	1	1
XAL	Xalostoc	19.5277481	99.0764447	1	1	1	1
MER	La Merced	19.4243867	99.1192769	1	1	1	1
PED	Pedregal	19.3247347	99.2037158	1	1	1	1
GES	Cerro de la Estrella	19.3358844	99.0746747	1	1	1	1
PLA	Plateros	19.3670278	99.2001047	1	1	1	1
HAN	Hangares	19.4216736	99.08362	1	1	1	1
GUA	Cuajimalpa	19.3638264	99.2986544	1	0	0	1
TPN	Tlalpan	19.2562875	99.1839258	1	0	0	1
CHA	Chapingo	19.459805	98.9024778	1	0	0	1
TAH	Tlahuac	19.2457292	99.0102186	1	0	1	1
VIF	Villa de las Flores	19.6581667	99.0965806	0	1	1	1
VAL	Vallejo	19.5235975	99.1657022	0	0	1	0
SUR	Santa Ursula	19.313689	99.149665	1	1	1	0
LLA	Los Laureles	19.5788056	99.0396417	0	0	1	0
LPR	La Presa	19.534079	99.117353	0	0	1	0
LVI	La Villa	19.469051	99.117754	0	0	1	0
AZC	Azcapotzalco	19.48889	99.19865	1	1	1	0
ARA	Aragón	19.47138	99.074546	0	0	1	0
TLJ	Tultitlán	19.6025278	99.1770861	0	1	1	0
ATI	Atizapán	19.5771306	99.2540139	0	1	1	0
LAG	Lagunilla	19.44358	99.13518	1	1	1	0
UIZ	UAM Iztapalapa	19.36239	99.07117	1	1	1	0
TAX	Taxqueña	19.33684	99.1232	1	1	1	0
ACO	Acolman	19.6355	98.912	1	0	1	0
IZT	Iztacalco	19.3844167	99.1176389	1	1	1	0
CHO	Chalco	19.2669444	98.8860833	1	0	1	0
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo	19.48872	99.1472939	0	0	0	0
GOY	Coyoacán	19.3493611	99.1571389	1	0	0	0

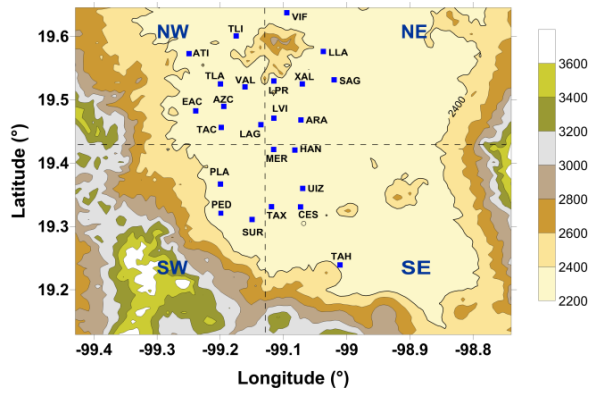


Figure 2a. SIMAT: Sulfur dioxide monitoring subnetwork.

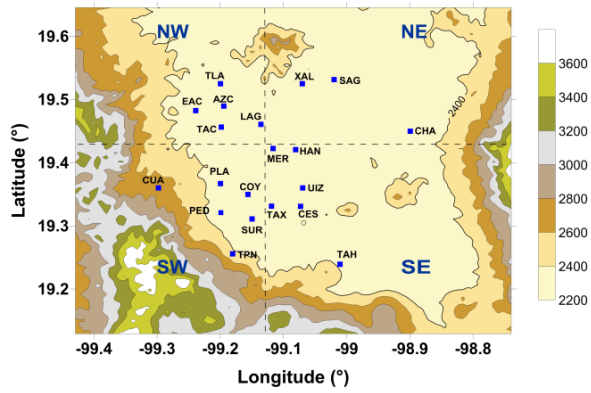
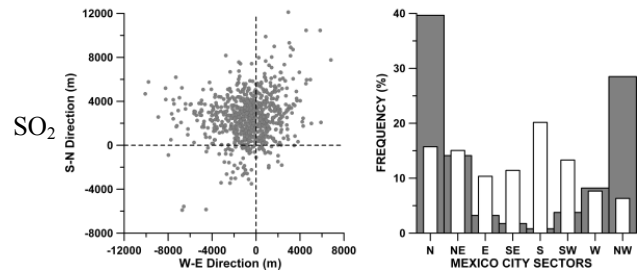


Figure 2b. SIMAT: Ozone monitoring subnetwork.

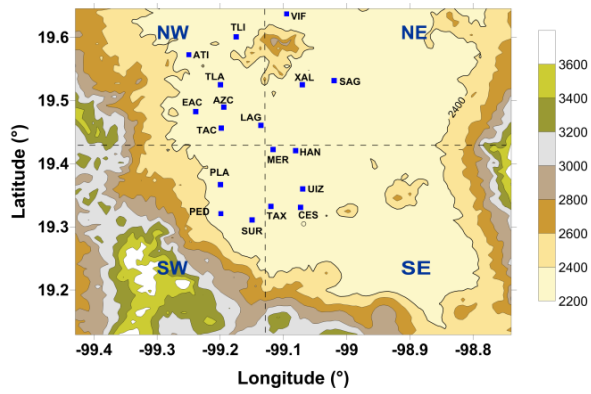
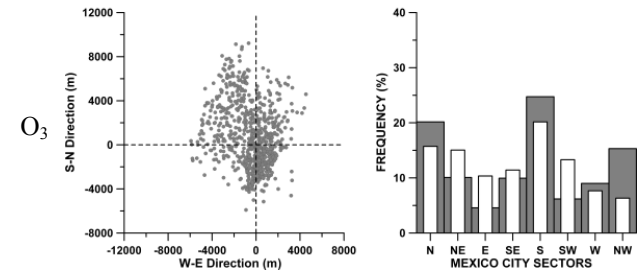


Figure 2c. SIMAT: Nitrogen oxides monitoring subnetwork.

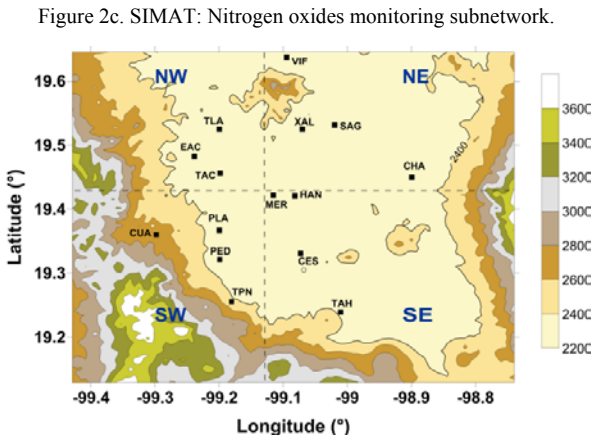
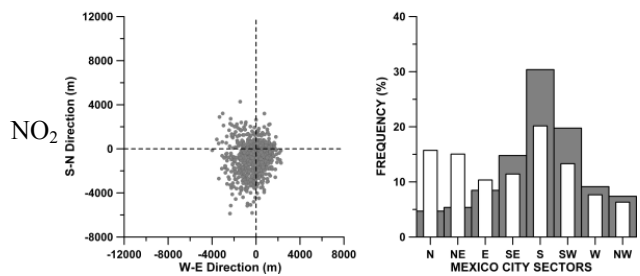


Figure 2d. SIMAT: Meteorological subnetwork.

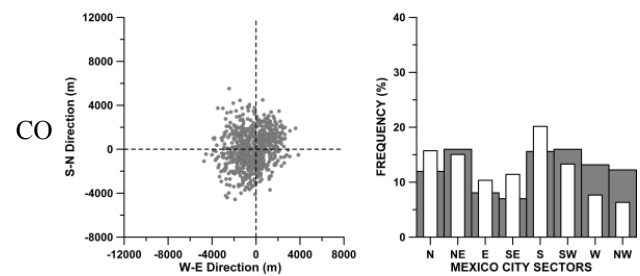
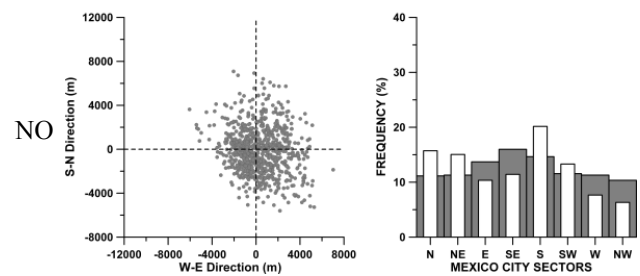


Figure 3. Spatial clustering of Mexico City pollution centroids of sulfur dioxide, ozone, nitrogen oxides and carbon monoxide during MILAGRO campaign (March 2006). White bar histograms correspond to downwind direction frequency distributions.

In Figure 3, we can observe that the spatial clustering of the 1-hour centroids throughout the period displays frequency distributions where the main Mexico City sectors visited by each air pollution centroid were: for SO₂, the N, NW and NE sectors with the frequencies of 39, 28 and 14%, respectively; for O₃, the S, N and NW sectors with frequencies of 25, 20 and 15%, respectively; for NO₂, the S, SW and SE sectors with frequencies around 30, 20 and 15%, respectively; for NO, the sectors SE, S and E with frequencies of 16, 15 and 14%, respectively; and for CO, the sectors SW, S and NE with a frequency of 16% each one. The frequency distributions of the SO₂, NO₂ and NO centroids resemble normal distributions centered on the N, S, and SE sectors, respectively; however, no such a feature is observed for the spatial clustering of the O₃ and CO centroids.

It is interesting to compare the spatial clustering of the Mexico City pollution centroids against the frequency distribution of mean wind direction in the same period. It is shown in Figure 3 that mean wind was blowing mainly to S, N, NE and SW with frequencies of 20, 16, 15 and 13%, respectively. These sectors are exactly the same ones visited by the CO centroid with the highest frequencies. Also for ozone, the sectors S, N and NE were among the most visited by the O₃ centroid. These results suggest that the CO and O₃ spatial distributions were strongly determined by the wind blowing. However, the spatial distributions of the sulfur dioxide and the nitrogen oxides reflect also the effect of the spatial distribution of their emission sources. For SO₂, for example, this is particularly clear. In fact, as it is well known (See [3]), the SO₂ emission sources are located at the Northern Delegations of the city, such as Gustavo A. Madero, Azcapotzalco and Miguel Hidalgo (Figure 1), and also at the municipalities of the State of Mexico such as La Paz, Iztapaluca, Tlalnepantla, Ecatepec and Naucalpan.

The histograms presented in Figure 4, show the frequency distributions of the visits of the air pollution centroids to the Mexico City cardinal sectors for each downwind direction. Here, it is remarkable that the centroids of SO₂ visited the sectors N and NW with the highest frequencies independently of wind direction. Also they visited the NE sector with high frequencies for six of the eight wind directions considered. In contrast, it is observed that for O₃, NO₂, NO and CO, the spatial clustering of the pollution centroids at South sector showed frequencies considerably high when wind was blowing exactly towards that sector of the city. We presume this behavior is due to the fact that NO_x and CO pollutants come from fuel combustion, mainly by the vehicular traffic in the city. In fact, at the Southern part of the city (SW, S and SE sectors) vehicular traffic occurs with more intensity than at the Northern part and, such as it is indicated in the MCMA emission inventory [3], the higher emissions of mobile sources occur at downtown and at the Delegations Benito Juárez, Cuauhtémoc, Coyoacán and Miguel Hidalgo (see Figure 1).

The spatial clustering of the CO centroids is also very interesting. It reflects that CO is a pollutant whose spatial distribution is determined mainly by the wind blowing. For each downwind direction, the CO centroid visited the corresponding cardinal sector with the highest frequency for the sectors N, NE, S, SW and W, and with a relative high frequency for the others. For NO_x, the centroids clustering is somehow similar to the CO clustering: with frequencies relative high, the centroids visited the city sectors pointed out by the wind, but in general the highest clustering frequencies were not found linked to those sectors.

The spatial clustering of the O₃ centroids is quite peculiar. The highest clustering frequencies were associated to the visits to the S sector when mean wind was blowing to the S, SW and N directions (8.7, 6.0 and 4.6%, respectively). The O₃ centroids visited the sectors N, W and NW with relative high frequencies when mean wind velocity had a blowing component to East. However, no evident pattern is observed when mean wind velocity had a blowing component to West. We presume this behavior is close related to the photochemical origin of ozone.

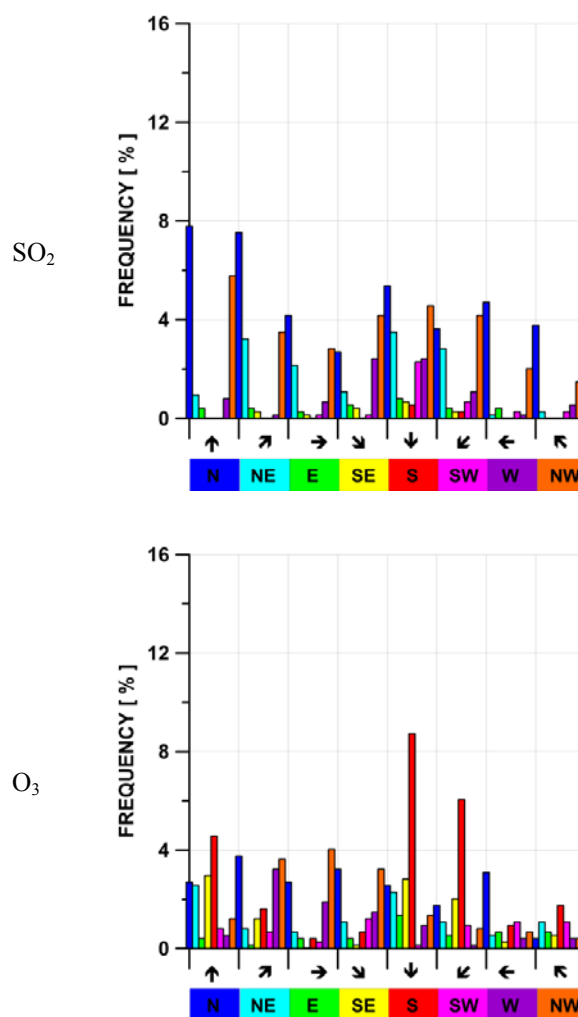


Figure 4. Spatial clustering of Mexico City pollution centroids of sulfur dioxide, ozone, nitrogen oxides and carbon monoxide during March 2006.

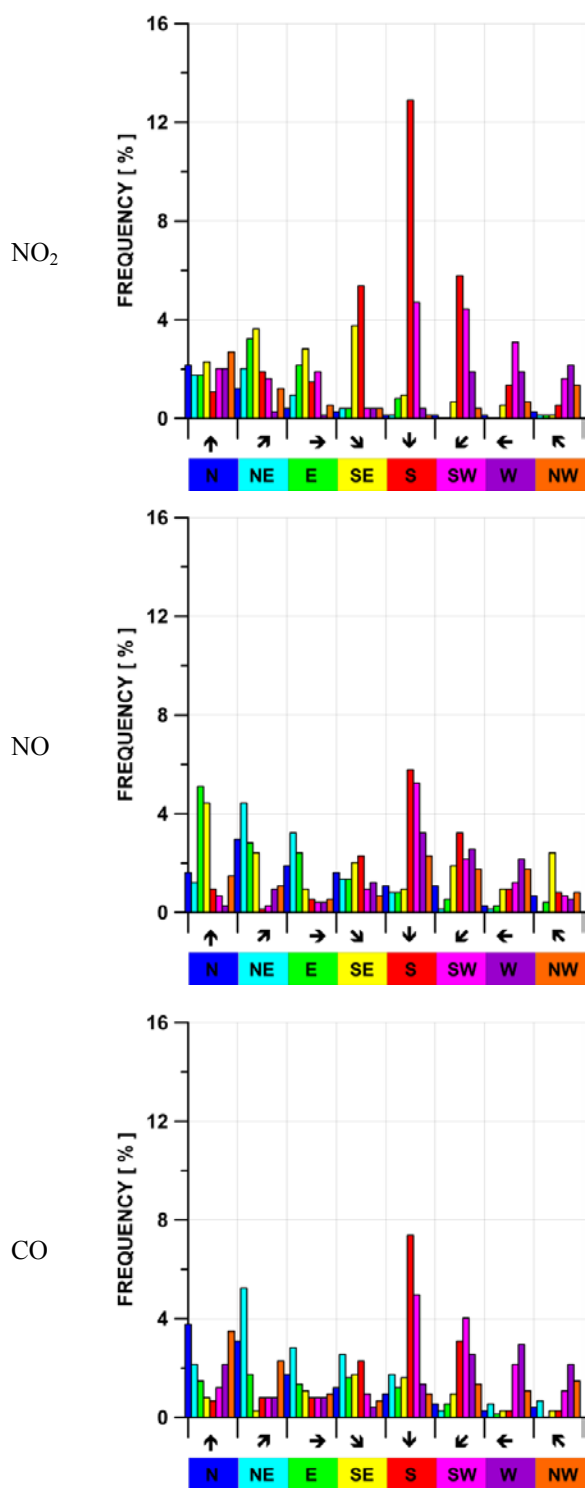


Figure 4 (cont.). Spatial clustering of Mexico City pollution centroids of sulfur dioxide, ozone, nitrogen oxides and carbon monoxide during March 2006.

3.3. Mexico City Wind States and Pollution Clustering

During the MILAGRO campaign (March 2006), in Mexico City were observed 308 different wind direction states (WDS) from the 4096 possibilities. In Figure 5, the frequency distribution of the WDS is presented. The first five WDS with the highest frequencies were: 0 [0000],

939 [1653], 8 [0010], 2340 [4444] and 521 [1011], with the frequencies 5.0, 3.1, 3.0, 1.9 and 1.6%, respectively. Here we have included the octal notation of the WDS between brackets.

Three of the highest frequency WDS represent winds with a Northerly flow component (states 0, 8 and 521), one of them (state 2340) represents winds from South, and the other one (state 939) represents highly convergent winds which occurred a 3.1% of the 744 hours of the MILAGRO campaign.

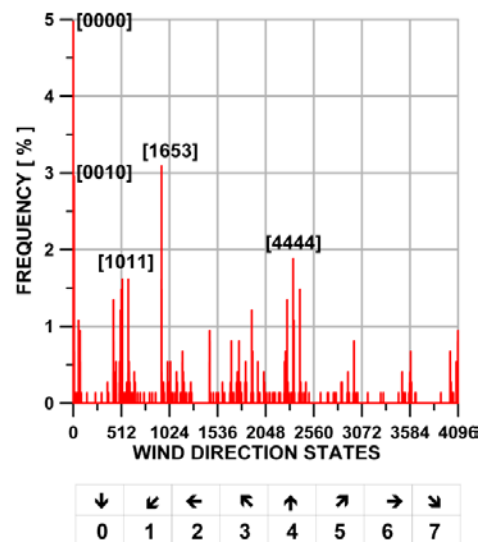


Figure 5. The density of wind direction states of Mexico City during the MILAGRO campaign period.

In Table 2, it is presented the listing of the first four WDS which obtained the highest frequencies when the ozone centroid was found at each one of the cardinal sectors of Mexico City. Each cell of this table contains three numbers: the decimal and octal expressions of the WDS and its occurrence frequency while the ozone centroid is located at the Mexico City sector indicated in the first row of the table. The frequency distribution of those WDS which occurred at Mexico City with the ozone centroid located at the South sector of the city is shown in Figure 6, where the WDS we included in column S of Table 2 were labeled with their octal expressions.

Here, it is remarkable that when the O_3 centroid visited the South sector of Mexico City, the four WDS which prevailed at Mexico City with the highest frequencies were 0 [0000], 8 [0010], 585 [1111] and 2340 [4444], with frequencies of 3.23, 2.69, 1.21 and 1.21%, respectively. The first three of these WDS represent winds with Northerly flow components (blowing to South) at the four quadrants (NE, NW, SW and SE) of the city. This is consistent, of course, with the fact that the O_3 centroid was found in sector S very frequently. However, the last one (state 2340) of these WDS represent Southerly winds at the four quadrants of the city. The presence of this state with an important frequency reflects (we presume) the fact that ozone was being produced mainly at the South part of the city during this event, because the centroid was found there although wind was blowing to North.

Table 2
The first four wind direction states with the highest frequencies when the ozone centroid is found at each one of the Mexico City cardinal sectors.

N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
939 [1653] 0.81%	0 [0000] 0.67%	512 [1000] 0.27%	2412 [4554] 0.81%	0 [0000] 3.23%	1682 [3222] 0.27%	939 [1653] 0.81%	939 [1653] 1.21%
940 [1654] 0.67%	511 [0777] 0.40%	0 [0000] 0.13%	0 [0000] 0.54%	8 [0010] 2.89%	4095 [7777] 0.27%	938 [1652] 0.67%	428 [0654] 0.67%
56 [0070] 0.54%	63 [0077] 0.27%	1 [0001] 0.13%	7 [0007] 0.40%	585 [1111] 1.21%	61 [0075] 0.13%	427 [0653] 0.40%	502 [0766] 0.67%
427 [0653] 0.54%	513 [1001] 0.27%	9 [0011] 0.13%	521 [1011] 0.40%	2340 [4444] 1.21%	72 [0110] 0.13%	511 [0777] 0.40%	511 [0777] 0.54%

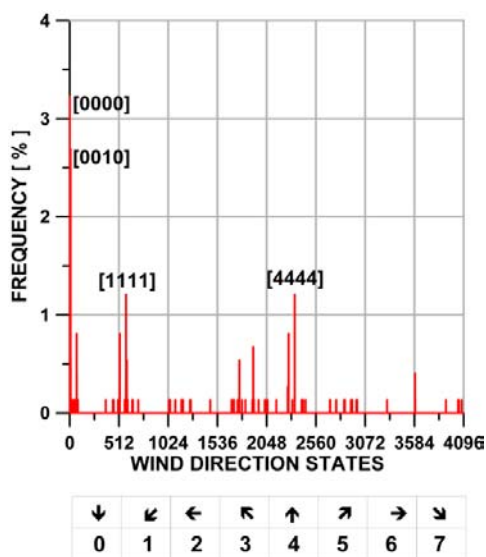


Figure 6. The density of wind direction states which occurred at Mexico City with the centroid of ozone located at the South sector of the city, during the period of the MILAGRO campaign.

In Table 3 we presented the listing of the first four WDS which obtained the highest occurrence frequencies when the sulfur dioxide centroid was found at each one of the Mexico City sectors. Figure 7 shows the frequency distribution of all those WDS which occurred while the SO₂ centroid was found at the North sector of the city.

The main WDS occurred at Mexico City with the SO₂ centroid at sector N were 939 [1653], 0 [0000], 8 [0010], and 2412 [4554], and their frequencies were 2.02% for the first one, and 1.21% each one of the other three. The first of these WDS represents winds highly convergent towards downtown, therefore it have no clear contribution in clustering the SO₂ centroid at the North part of the city. The states 0 and 8 correspond, basically, to winds from North. And the state 2412 is just the one that corresponds to winds from South.

These observations suggest that the spatial clustering of the SO₂ centroid at the North part of Mexico City is

strongly determined by the spatial distribution of its emission sources, and not only by the transport by the winds. We believe these results are important for evaluating the pollution exportation from Mexico City to the neighboring urban settlements.

Table 3
The first four wind direction states with the highest frequencies when the sulfur dioxide centroid is found at each one of the Mexico City cardinal sectors.

N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
939 [1653] 2.02%	0 [0000] 1.48%	0 [0000] 0.13%	0 [0000] 0.40%	0 [0000] 0.27%	0 [0000] 1.08%	585 [1111] 0.54%	2276 [4344] 1.08%
0 [0000] 1.21%	8 [0010] 0.81%	1 [0001] 0.13%	3 [0003] 0.13%	8 [0010] 0.13%	8 [0010] 0.40%	4095 [7777] 0.54%	2340 [4444] 1.08%
8 [0010] 1.21%	938 [1652] 0.81%	56 [0070] 0.13%	9 [0011] 0.13%	58 [0072] 0.13%	3584 [7000] 0.27%	2340 [4444] 0.40%	511 [0777] 0.81%
2412 [4554] 1.21%	1450 [2652] 0.54%	72 [0110] 0.13%	81 [0121] 0.13%	513 [1001] 0.13%	7 [0007] 0.13%	0 [0000] 0.27%	521 [1011] 0.67%

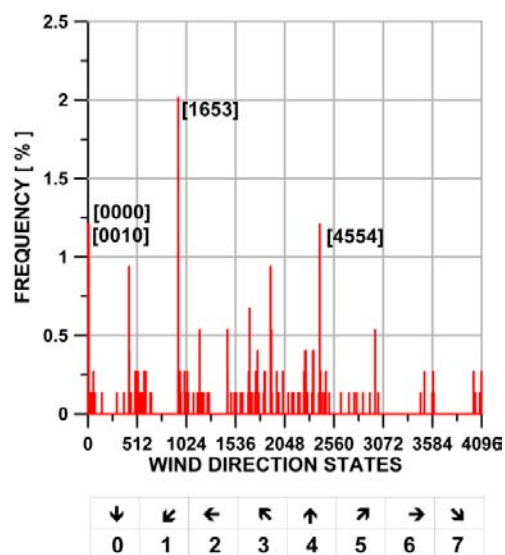


Figure 7. The density of wind direction states which occurred at Mexico City with the centroid of sulfur dioxide located at the North sector of the city, during the period of the MILAGRO campaign.

4. Conclusion

In this paper we have proposed an innovative analysis approach for studying the air pollution spatial distribution behavior in response to the wind circulation events and the spatial distribution of the emission sources. The basics of the theoretical framework were exposed, and the methods were applied for carrying out a brief analysis of the spatial clustering of the Mexico City air pollution centroids during the MILAGRO field campaign period. To our knowledge, no similar analysis approach has been proposed or used in the past for this kind of problems. In general, for the problem we are interested in, very heavy meteorological and air quality models (such as MM5 and

MCCM) are considered, but these are very time consuming models and not always highly detailed results are necessary or convenient in practice.

The use of the modelling and analysis approach we have proposed for the problem of the spatial distribution of the Mexico City air pollution made evident the strong dependence of the air pollutants ground concentrations on the wind circulation events and the spatial distribution of the emission sources. This is an important issue to be considered in the future in preparing the official emission inventory for the Mexico City Metropolitan Area, special attention is required (we think) for improving the spatial and temporal resolutions of the fixed and mobile emission sources distributions. Our results have shown, in fact, that very different clustering behavior may be followed by the centroids of different pollutants under the same wind circulation events. This is important, in particular, for the study of the influence of the Mexico City air pollution on the neighboring urban settlements.

Acknowledgements

One of us (SCS) acknowledges the economical support received from the Instituto de Investigaciones Eléctricas during her academic stay for carrying out a BSc thesis.

References

- [1] L. Calderón-Garcidueñas, M. Franco-Lira, R. Torres-Jardón, C. Henríquez-Roldán, G. Barragán-Mejía, G. Valencia-Salazar, A. González-Maciel, R. Reynoso-Robles, R. Villareal-Calderón & W. Reed, Pediatric Respiratory and Systemic Effects of Chronic Air Pollution Exposure: Nose, Lung, Heart, and Brain Pathology, *Toxicologic Pathology*, 35, 2007, 154–162.
- [2] UNEP (United Nations Environment Programme) and WHO (World Health Organization), *Urban Air Pollution in Megacities of the World* (Blackwell Publishers, Oxford, 1992).
- [3] Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal, *Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México* (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, 2006).
- [4] H.A. Bravo & R.J. Torres, Air Pollution levels and trends in the Mexico City metropolitan area, In: *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*, (M. Fenn, L. Bauer, and T. Hernández, eds.), Springer-Verlag, NY, 2002, 121–159.
- [5] J.C. Bonner, A.B. Rice, P.M. Lindroos, P.O. O'Brien, K.L. Dreher, I. Rosas, E. Alfaro-Moreno & A.R. Osornio-Vargas, Induction of the lung myofibroblast PDGF receptor system by urban ambient particles from Mexico City, *Am. J. Respir. Cell. Molec. Biol.*, 19, 1998, 672–680.
- [6] A.R. Osornio-Vargas, J.C. Bonner, E. Alfaro-Moreno, L. Martinez, C. Garcia-Cuellar, S. Ponce-de-Leon-Rosales, J. Miranda & I. Rosas, Proinflammatory and cytotoxic effects of Mexico City air pollution particulate matter in vitro are dependent on particle size and composition, *Environ. Health Perspect.*, 111, 2003, 1289–1293.
- [7] E. Jáuregui, Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin, *Atmósfera*, 1, 1988, 131-140.
- [8] B. de Foy, E. Caetano, V. Magaña, A. Zitácuaro, B. Cárdenas, A. Retama, R. Ramos, L.T. Molina & M.J. Molina, Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2005, 2267-2288.
- [9] T.R. Oke, G. Zeuner & E. Jauregui, The Surface Energy Balance in Mexico City, *Atmos. Environ. Part B – Urban Atmosphere*, 26, 1992, 433-444.
- [10] E. Jauregui & E. Luyando, Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City, *Int. J. Climatol.*, 19, 1999, 683-694.
- [11] A. Salcido, A.T. Celada, R. Villegas, H. Salas, R. Sozzi & T. Georgiadis, A micrometeorological database for the Mexico City Metropolitan Area, *Il Nuovo Cimento*, 26C(3), 2003, 317-355.
- [12] A. Salcido & R. Saldaña, Estudios micro-meteorológicos para el diagnóstico de la dispersión atmosférica de contaminantes. In: *Contaminación Atmosférica* (L. García-Colín Scherer & R. Varela Ham, eds.), El Colegio Nacional, México, 1996, 211-236.
- [13] T. Castro & A. Salcido, Influencia de la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en tres sitios perimetrales, In: *Contaminación Atmosférica V* (L. García-Colín Scherer & R. Varela Ham, eds.). El Colegio Nacional, México, 2006, 119-144.
- [14] L.T. Molina, S. Madronich, J.S. Gaffney, E. Apel, B. de Foy, J. Fast, R. Ferrare, S. Herndon, J. L. Jimenez, B. Lamb, A.R. Osornio-Vargas, P. Russell, J. J. Schauer, P. S. Stevens, R. Volkamer & M. Zavala, An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 2010, 8697–8760.
- [15] Mexico City Air Quality Monitoring Network (Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México). <http://www.sma.df.gob.mx/simat>.
- [16] A.T. Celada-Murillo & A. Salcido, The Mexico City 2006 Wind Direction States. *Proc. of 20th IASTED International Conference on Modelling and Simulation (MS2009)*, Banff, Alberta, Canada, 2009, 6-8.
- [17] A. Salcido & A.T. Celada-Murillo, A Lattice Gas Approach to the Mexico City Wind Field Estimation Problem, In: *Modelling, Simulation and Optimization* (G. Romero Rey & L. Martínez Muneta, eds.), InTech, 2010, 385-416.
- [18] A. Salcido, A.T. Celada-Murillo & T. Castro, A Meso- β Scale Description of Surface Wind Events in Mexico City During MILAGRO 2006 Campaign. *Proc. of the Second IASTED International Conference Environmental Management and Engineering (EME2010)*, Banff, Alberta, Canada, 2010, 820-827.

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state)

D. Salcedo ^{a,*}, T. Castro ^b, L.G. Ruiz-Suárez ^b, A. García-Reynoso ^b, R. Torres-Jardón ^b, A. Torres-Jaramillo ^b, B.E. Mar-Morales ^b, A. Salcido ^c, A.T. Celada ^c, S. Carreón-Sierra ^{b,c,d}, A.P. Martínez ^e, O.A. Fentanes-Arriaga ^e, E. Deustúa ^e, R. Ramos-Villegas ^f, A. Retama-Hernández ^f, M.I. Saavedra ^b, M. Suárez-Lastra ^g

^a Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, 62209 Cuernavaca, Mexico

^b Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04510 D.F., Mexico

^c División de Energías Alternas, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, 62490 Cuernavaca, Mexico

^d Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Alcanfores y San Juan Totoltepec s/n, Col. Santa Cruz Acatlán, 53150 Estado de México, Mexico

^e Centro de Investigación y Capacitación Ambiental, Instituto Nacional de Ecología, Blvd. El Pipila No.1, Col. Lomas de Tecamachalco, 53950, Estado de México, Mexico

^f Dirección de Monitoreo Atmosférico, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, Agricultura 21, Col. Escandón, 11800 D.F., Mexico

^g Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04510 D.F., Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 July 2011

Received in revised form 15 September 2011

Accepted 15 September 2011

Available online 10 December 2011

Keywords:

Air quality

Criteria pollutants

Ground level ozone

Morelos

Central Mexico

AOT40

ABSTRACT

Results from the first study of the regional air quality in Morelos state (located south of Mexico City) are presented. Criteria pollutants concentrations were measured at several sites within Morelos in February and March of 2007 and 2009; meteorological data was also collected along the state for the same time periods; additionally, a coupled meteorology–chemistry model (Mesoscale Climate Chemistry Model, MCCM) was used to gain understanding on the atmospheric processes occurring in the region. In general, concentrations of almost all the monitored pollutants (O₃, NO_x, CO, SO₂, PM) remained below the Mexican air quality standards during the campaign; however, relatively high concentrations of ozone (8-hour average concentrations above the 60 ppb level several times during the campaigns, *i.e.* exceeding the World Health Organization and the European Union maximum levels) were observed even at sites with very low reported local emissions. In fact, there is evidence that a large percentage of Morelos vegetation was probably exposed to unhealthy ozone levels (estimated AOT40 levels above the 3 ppm h critical limit). The MCCM qualitatively reproduced ozone daily variations in the sites with an urban component; though it consistently overestimated the ozone concentration in all the sites in Morelos. This is probably because the lack of an updated and detailed emission inventory for the state. The main wind patterns in the region corresponded to the mountain–valley system (downslope flows at night and during the first hours of the day, and upslope flows in the afternoon). At times, Morelos was affected by emissions from surrounding states (Distrito Federal or Puebla). The results are indicative of an efficient transport of ozone and its precursors at a regional level. They also suggest that the state is divided in two atmospheric basins by the Sierras de Tepoztlán, Texcal and Monte Negro.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Air pollution is one of the most important environmental problems that urban areas face nowadays due to the presence of high concentrations of primary pollutants emitted during industrial and transport activities, and secondary pollutants generated in the atmosphere through *in situ* chemical reactions. The presence and persistence of such pollutants pose severe risks to human health (Pope III and Dockery, 2006). The earliest and most basic air quality management actions to control the health risks include measures such as

the continuous monitoring of criteria pollutants as well as studies to characterize atmospheric emissions and processes (meteorology and chemistry).

The Mexico City Metropolitan Area (MCMA), which is the largest city in the country and one of the largest in the world, has faced severe air quality problems for a long time; hence, there has been a lot of interest on studying the atmospheric processes (meteorology, emissions, chemistry, and pollutants transport) occurring there (Molina *et al.*, 2010 and references therein). There are several studies that describe the regional influence of the MCMA on air pollution near the surface (Doran *et al.*, 2007; de Foy *et al.*, 2008; Mena-Carrasco *et al.*, 2009); and there is evidence that the MCMA is affected by emissions from its surrounding urban areas under certain meteorological circumstances (García-Reynoso *et al.*, 2009). Several other urban areas have grown around Mexico City, including Cuernavaca, Cuautla, Puebla, Toluca and Pachuca; however, studies on the air quality of these cities are very

* Corresponding author at: Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Juriquilla, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, 76230 Querétaro, Mexico. Tel.: +52 442 238 1104x137.

E-mail address: dara.salcedo@ciencias.unam.mx (D. Salcedo).

scarce. Several studies have shown that Morelos state (south of Mexico City) might be receiving some of the outflow from the MCMA through the mountain gap joining the MCMA and the Cuernavaca–Cautla airsheds (de Foy et al., 2006; Magaña and Caetano, 2007; Ruiz-Suárez et al., 2009; Ruiz-Suárez et al., 2010). However, none of them were based on an actual monitoring or modeling air quality study within the Morelos state basin. Given the size of the MCMA and its total emissions to the atmosphere in comparison with the neighboring urban areas, as well as the growing population in these urban areas, information on atmospheric processes that affect their air quality is very much needed.

Morelos state is situated in the center of Mexico, south of the MCMA (see Fig. 1), and has a population of 1,777,227 inhabitants, from which 48% live in the Metropolitan Area of Cuernavaca and 23.5% live in the Metropolitan Area of Cautla (INEGI, 2010). The emission inventory of Morelos state describes the sources of criteria pollutants (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , CO , NO_x , and volatile organic compounds (VOC)), which include point, area, vehicular and biogenic sources (CEAMA, 2007a). An atmospheric monitoring network with four automatic stations (see Fig. 1) is maintained by the environmental agency of Morelos (Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente, CEAMA); however, due to operational difficulties, the network has not yet produced any validated dataset of historical air quality information. To the best of our knowledge, there has not been any previous study in Morelos on the atmospheric processes occurring there, nor the regional air quality.

We present the results from two field campaigns in Morelos that took place in February and March of 2007 and 2009 with the objective to make a diagnostic of the regional air quality. During both campaigns, concentrations of air criteria pollutants were measured in

several sites within Morelos. Here, time series of the criteria pollutants are presented and discussed in terms of national and international air quality standards. Efforts were made to gain some understanding on the processes causing the ozone concentrations observed (such as photochemistry, emissions, and transport) through analysis of the ozone and NO_x ($NO_x = NO_2 + NO$) diurnal cycles and the use of the Mesoscale Climate Chemistry Model (MCCM). In addition, wind direction data for February and March 2009 was collected and analyzed in order to understand the wind patterns affecting pollution transport and dispersion in the region.

2. Methodology

2.1. Field campaigns

The first campaign was performed in February and March of 2007 in the Metropolitan Area of Cuernavaca. During this campaign, criteria pollutants concentrations were collected at three sites: UAE, CUE and PRE. The second campaign was performed in February and March of 2009 with the objective of studying the regional air quality in Morelos state. In this case, nine sites were chosen, including CUE and PRE. The other seven sites were: XOC, YAU, CUA, PIC, JAN, ZAC, and OCU. Fig. 1 shows the location of all the sites, and a brief description of each one of them is given in Table 1. For presentation purposes, all the sites have been loosely classified into urban, rural and industrial. This classification should not be considered strict because some of the sites have mixed sources impacting them. For example, YAU was classified as rural because of the low population density around the site; however, there is a major road with light and heavy vehicles that runs within few kilometers. Also, PRE was

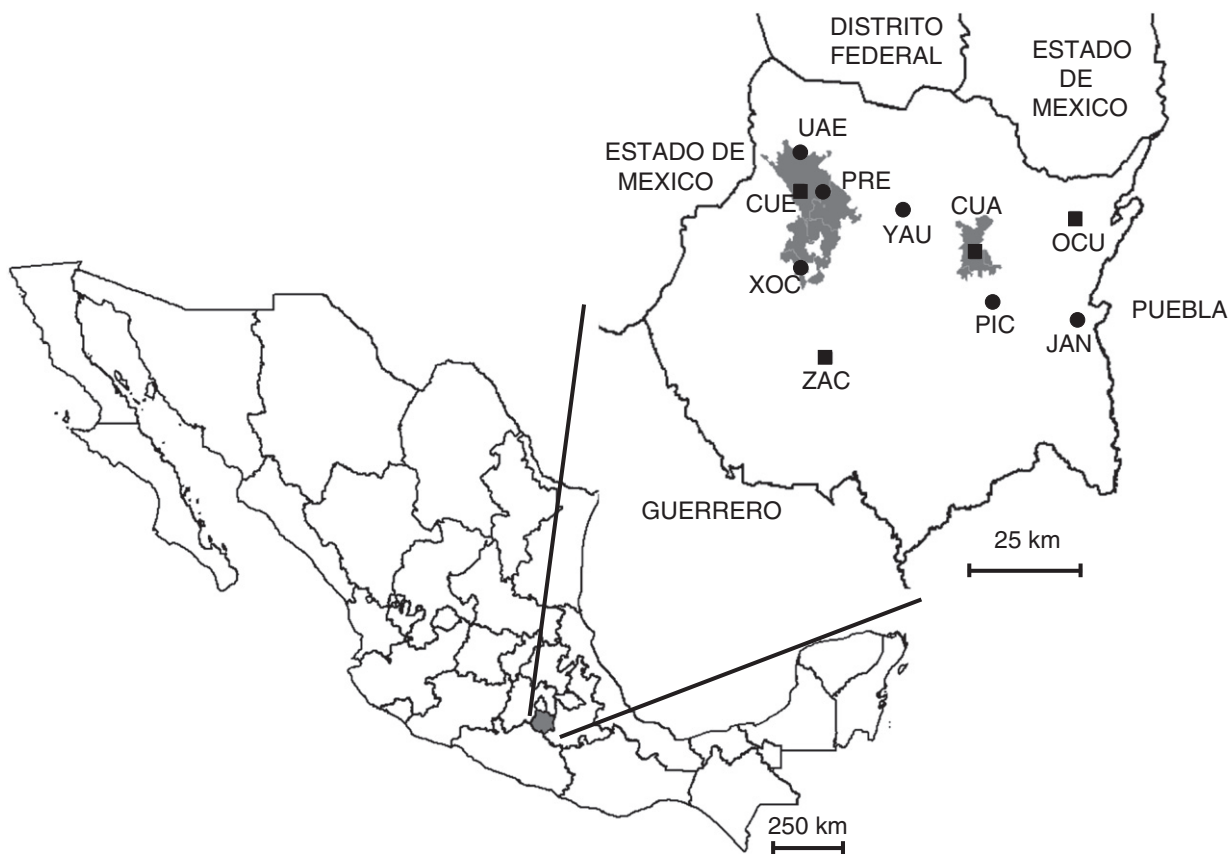


Fig. 1. Map of Morelos and its surrounding states. Black lines indicate state limits; gray areas correspond to Morelos or to the main urban centers in Morelos (Cuernavaca and Cautla). Sites used during the 2007 and 2009 campaigns are indicated with squares (CEAMA fixed monitoring stations) and circles (temporal sites).

Table 1
Monitoring sites in Morelos during the 2007 and 2009 campaigns and selected stations from the monitoring network in Mexico City (RAMA). Sites which are part of the Morelos monitoring network are indicated with an asterisk.

Site	Description	Importance	Coordinates
<i>Morelos</i>			
Universidad	UAE Rural	In the northern limit of the metropolitan area of Cuernavaca; few local emissions; close to a large road with mixed traffic.	18° 58' 52.57"N 99° 13' 57.65"W
Cuernavaca	CUE* Urban	In Cuernavaca downtown; high population density; mobile sources.	18° 55' 18.47"N 99° 14' 5.97"W
Preparatoria No. 1	PRE Industrial	~1 km from industrial area and close to heavy traffic streets; high population density.	18° 55' 5.85"N 99° 11' 41.46"W
Xochitepec	XOC Urban	In the southern limit of the metropolitan area of Cuernavaca; few local emissions.	18° 47' 55.22"N 99° 14' 0.12"W
Yautepec	YAU Rural	Intermediate site between Cuernavaca and Cuautla; close to a large road with mixed traffic.	18° 53' 27.95"N 99° 3' 41.35"W
Cuautla	CUA* Urban	In Cuautla downtown; high population density; mobile sources.	18° 49' 21.94"N 98° 56' 28.92"W
Parque Industrial Cuautla	PIC Industrial	~1 km from a large glass production facility.	18° 44' 41.42"N 98° 54' 35.67"W
Jantetelco	JAN Rural	In the eastern limit of the state; few local emissions.	18° 42' 57.54"N 98° 46' 14.35"W
Zacatepec	ZAC* Industrial	~1 km from a large sugar cane facility with visible black emissions.	18° 39' 23.51"N 99° 11' 23.82"W
Ocuituco	OCU* Rural	Few km away from Popocatepetl volcano.	18° 52' 41.00"N 98° 46' 30.99"W
<i>Mexico City (SIMAT, 2011)</i>			
Tlalnepantla	TLA Industrial	In the industrial area in the north of Mexico City.	19° 31' 42.229"N 99° 12' 15.233"W
Merced	MER Urban	In Mexico City downtown.	19° 25' 27.792"N 99° 07' 09.397"W

classified as industrial because it is close to a major industrial area; however the immediate surrounding area is residential and there are two large roads with light and heavy traffic within 1 km. Table 2 summarizes the criteria pollutants measured during both campaigns at each site and the dates for which data is available. Additionally, Table S1 in the Supplementary materials, lists the equipment deployed in each monitoring site. In order to assure the quality of the data gathered during both campaigns, all equipments, including those belonging to CEAMA, were calibrated previous to the campaign.

The period of February and March was chosen for both campaigns due to the atmospheric stability and the dry weather that promote large concentrations of air pollutants; in fact, pollutant concentrations during this period are expected to be among the largest of the year. The period of February 18 to 23, 2009 was selected for several

Table 2
Criteria pollutants measured in the Morelos sites during the 2007 and 2009 campaigns. Crosses indicate that data is available for the site.

Site	Dates	Criteria pollutants					
		O ₃	NO _x	CO	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
<i>2007</i>							
UAE	19 Feb–2 Mar	X	X	X	X	X	X
CUE	1–5 Mar	X	X	X		X	
PRE	19 Feb–5 Mar	X	X	X	X		
<i>2009</i>							
CUE	20 Feb–20 Mar	X	X				
PRE	12 Feb–3 Mar	X					
XOC	17–23 Mar	X	X				
YAU	16 Feb–25 Mar	X	X	X	X		
CUA	14 Feb–20 Mar	X	X	X			
PIC	17 Feb–8 Mar	X	X	X	X		X
JAN	14–21 Feb	X	X	X	X	X	
OCU	19 Feb–22 Mar	X					
ZAC	3–6 Mar	X	X	X	X	X	

specific analysis discussed below because this is the period with ozone data available for most of the sites.

All data is presented in local standard time which corresponds to Central Standard Time (CST) or Coordinated Universal Time (UTC) minus 6 h.

2.2. Meteorological data

Meteorological data in Morelos for February and March 2009, was collected from the Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimáticas (RNEEA, INIFAP, 2009), which has 23 automatic meteorological stations in Morelos (shown in Fig. S1, in the Supplementary materials). The RNEEA provides surface meteorological parameters with a time resolution of 15 min.

The RNEEA data was organized according to the Wind Direction States model, which has been described in detail before (Celada-Murillo and Salcido, 2009; Salcido and Celada, 2010; Salcido et al., 2010) and only a brief explanation is given here. In order to describe local wind circulation in Morelos, the region was represented by a 2D lattice with four identical rectangular cells (see Fig. S1). At each lattice cell, the wind direction state (WDS) was defined by the four average wind directions for quadrants NE, NW, SW and SE (θ_{NE} , θ_{NW} , θ_{SW} , and θ_{SE} , respectively). The wind direction in each quadrant was expressed in terms of the eight sectors scale of wind direction (N=0, NE=1, E=2, SE=3, S=4, SW=5, W=6, NW=7). In this case, each WDS was identified by a four digits octal number (θ_{NE} , θ_{NW} , θ_{SW} , θ_{SE} , which can be equal to 0000, 0001, ... 7777) or its decimal equivalent. In order to calculate average wind directions for each quadrant, the Krigging method for vector interpolation was used to calculate the components of the wind vector over an 8×8 lattice (4×4 nodes in each quadrant). A unit wind speed was assumed because the database had too many gaps for this variable. In each quadrant, the data obtained for the nodes was used to calculate the wind components and the average wind direction.

2.3. Mesoscale climate chemistry model

The Mesoscale Climate Chemistry Model (MCCM) was used in order to gain some understanding about the processes that cause the observations during the campaigns. The model includes modules for meteorology, photolysis, biogenic emissions, radiation, and deposition among others (Grell et al., 2000) and it has been implemented for the central region of Mexico (Garcia et al., 2000). The MCCM has previously been used to successfully model atmospheric processes affecting the air quality of the MCMA (Jazcilevich et al., 2003a, 2003b,

2003c, 2005; Garcia-Reynoso et al., 2009). For this study, a domain of 3 km grid cell in a mesh of 121 by 91 cells was used and the model results were displayed hourly. The boundary and initial conditions were obtained from the North American Regional Reanalysis grid of 34 km resolution and 29 vertical layers (<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/>). The domain used, which is shown in Fig. S2, included Estado de México, Puebla, Hidalgo, Morelos and Distrito Federal. Although there are several urban areas within this domain (Cuernavaca, Cuautla, Toluca, Pachuca, and Puebla), the only city that has an emission inventory (EI) with the chemical and temporal detail needed to feed the MCCM is the MCMA. Hence, for all the surrounding states, an approximate EI was calculated by scaling the MCMA EI (SMADF, 2008) to the population density in each area.

3. Results and discussion

3.1. Ozone concentrations

One hour averaged concentrations of ozone measured in all sites in Morelos during the 2007 and 2009 campaigns are shown in Figs. 2 and 3, respectively. The Mexican air quality standard for hourly ozone concentration is 110 ppb (SS, 2000) and it was not exceeded in any of the Morelos sites during the campaigns. The Mexican legislation has a second standard for 8-hour averaged ozone concentration, which should not exceed 80 ppb more than 4 times a year. Although the 8-h average ozone concentration is not shown, the 80 ppb level was exceeded once at PRE during the 2007 campaign and once in the 2009 one; at OCU, the 8-h standard level was exceeded 12 times during the 2009 campaign. In order to understand the implications of the above results regarding the air quality in Morelos, it is important to note that the campaigns were only few weeks long, that there is a lack of long-term historical data, and that, due current understanding of ozone impacts on human health, international air quality standards are stricter than the Mexican ones. For example, in order to protect human health, the World Health Organization (WHO) recommends an ozone maximum limit of $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (~50 ppb) for 8-h averages (WHO, 2005); the United States sets the limit to 75 ppb (EPA, 2008); and in the European Union (EU) the maximum level is $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (~60 ppb) (EP, 2008).

During the 2007 campaign, the CUE site did not present any 8-h averaged ozone concentration above 60 ppb; however, UAE and PRE had 11 and 12 exceedances, respectively (more than 90% of the total monitored days). During the 2009 campaign the only site with no exceedances to the 60 ppb limit was JAN. CUA and PIC had 7 exceedances each (~25% of the days monitored); CUE, PRE, XOC, and YAU, had 16, 12, 5, and 5 exceedances, respectively (~55% of the days monitored); ZAC and OCU had 3 and 28 exceedances, respectively (~80% of the

days monitored). Taking into account that almost 80% of the Morelos population lives in the Cuernavaca, Cuautla, and Zacatepec metropolitan areas (INEGI, 2010), if continuous monitoring was performed for several years, it would probably be found that most of the population in the state is exposed to unhealthy levels of ozone. In order to support this conclusion, a map was drawn using the number of days with hourly ozone concentration above 60 ppb (exceedances) for the nine monitoring sites of the 2009 campaign, and for six modeled boundary sites along the Morelos border using the MCCM. Ozone concentrations at the modeled sites were corrected to account for the systematic bias observed between modeled and measured concentrations (see Section 3.5). The number of exceedances was interpolated using the Inverse Distance Weighting (IDW) method included in the ArcGIS 9 software (ESRI, 2008). The resulting interpolated hybrid modeled-experimental map is presented in Fig. 4, along with the population affected by the exceedances. The map shows that ~98% of the state population was probably exposed to ozone levels above 60 ppb for more than 5 days during one month period.

High ozone concentrations can be harmful not only to human health at the local level, but also can damage vegetation at a regional scale (Mills et al., 2007). The accumulated exposure above a threshold concentration of 40 ppb (AOT40) has commonly been used as a method to describe the critical levels of ozone above which direct adverse effects may occur on sensitive vegetation. AOT40 is calculated as the sum of the differences between the hourly mean ozone concentration (in ppb) and 40 ppb when the concentration exceeds 40 ppb during daylight hours, accumulated over a stated time period. The critical level of ozone for agricultural crops and (semi-)natural vegetation is defined as an AOT40 of 3 ppm h over a period of three months during the growing season. For horticultural crops, the critical level is 6 ppm h over a period of 3.5 months. In general, yield reduction is observed for crops with exposures above the ozone critical level; for (semi-)natural species ozone concentrations above critical levels cause a growth reduction in perennial species and growth reduction and/or seed production in annual species (UNECE-LRTAP, 2004). As an approximation, AOT40 was calculated for all sites in Morelos during the two campaigns as the sum of exceedances on a daily basis for the available data and linearly scaled to one month, when not enough data was available. The results are listed in Table 3, which shows that AOT40 levels for the two campaigns were consistent as they were similar for CUE and PRE in both years. AOT40 for all the sites (except for JAN) during both years were equal or above the 3 ppm h critical limit, even when the accumulation time period used was only one third of the required time period. In order to have a state wide picture of the AOT40 levels, a map was drawn using the data in Table 3 for the nine monitoring sites of the 2009 campaign. Additionally, AOT40 levels were estimated at six

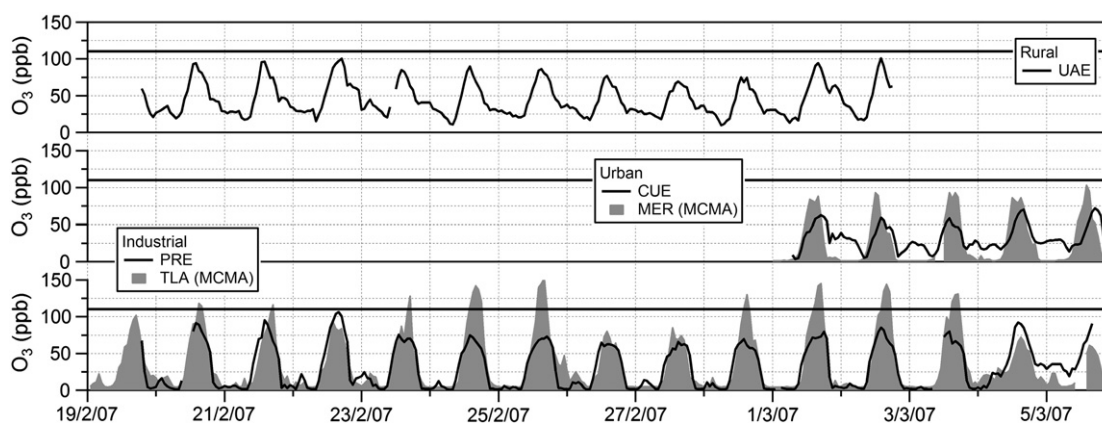


Fig. 2. Hourly ozone concentrations measured during the 2007 campaign. The black horizontal line represents the Mexican air quality standard for hourly ozone concentrations (110 ppb).

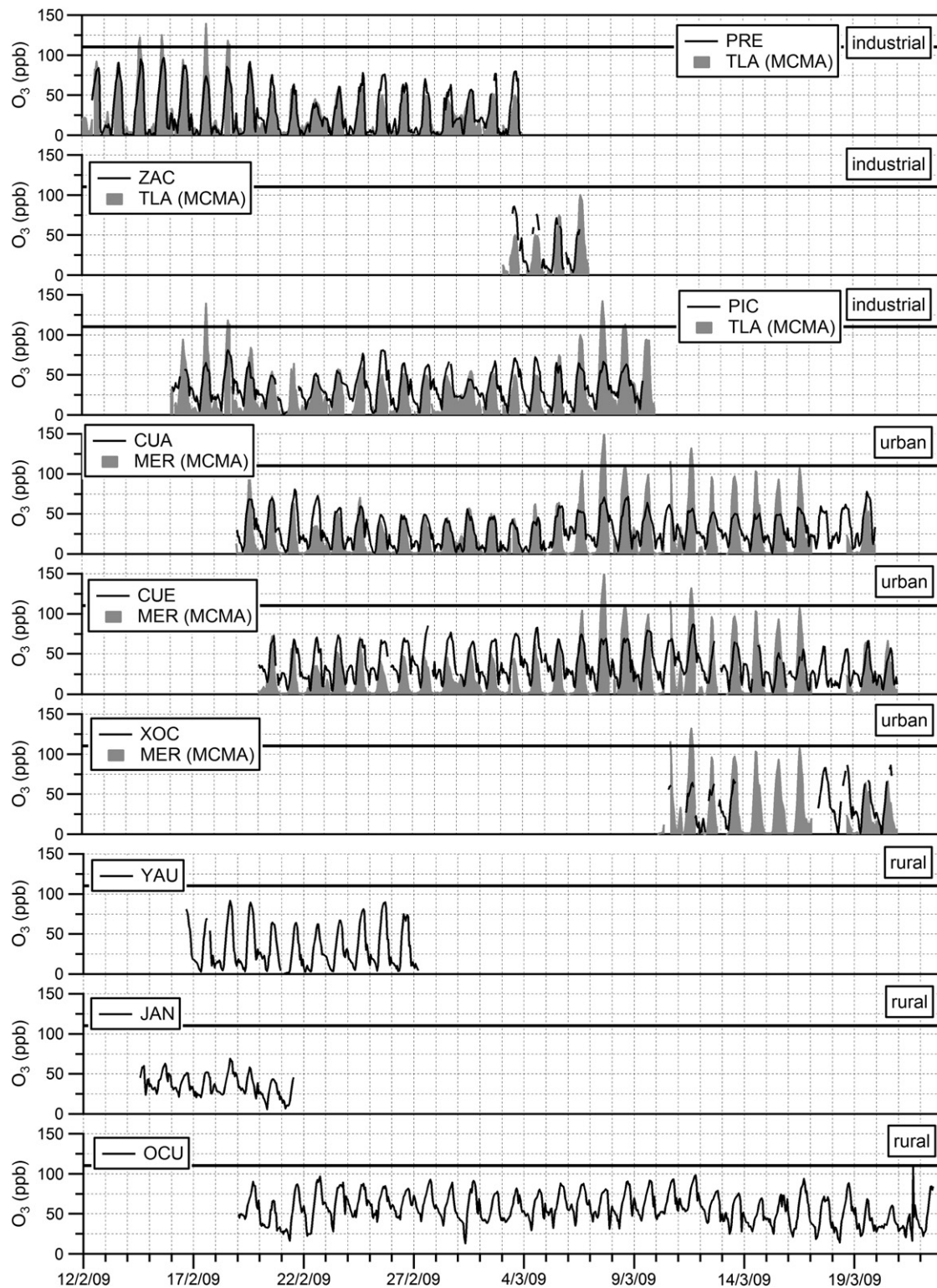


Fig. 3. Hourly ozone concentrations measured during the 2009 campaign. The black horizontal line represents the Mexican air quality standard for hourly ozone concentrations (110 ppb).

modeled boundary sites along the Morelos border using the MCCM. These ozone AOT40 levels were interpolated and the resulting map is presented in Fig. 5, which also shows the type of vegetation found in Morelos. Both, Table 3 and Fig. 5 show that the largest AOT40 levels during the 2009 campaign occurred in OCU (9 ppm h); AOT40 decreased to

the west (towards Cuautla) and then increased again in the urban area of Cuernavaca. The map indicates that ~85% of the Morelos surface was above the AOT40 critical level (>4 ppm h) for a one month accumulation period. Fig. 5 suggests that almost 100% of the Morelos surface would have been above the critical level if there was enough data available to

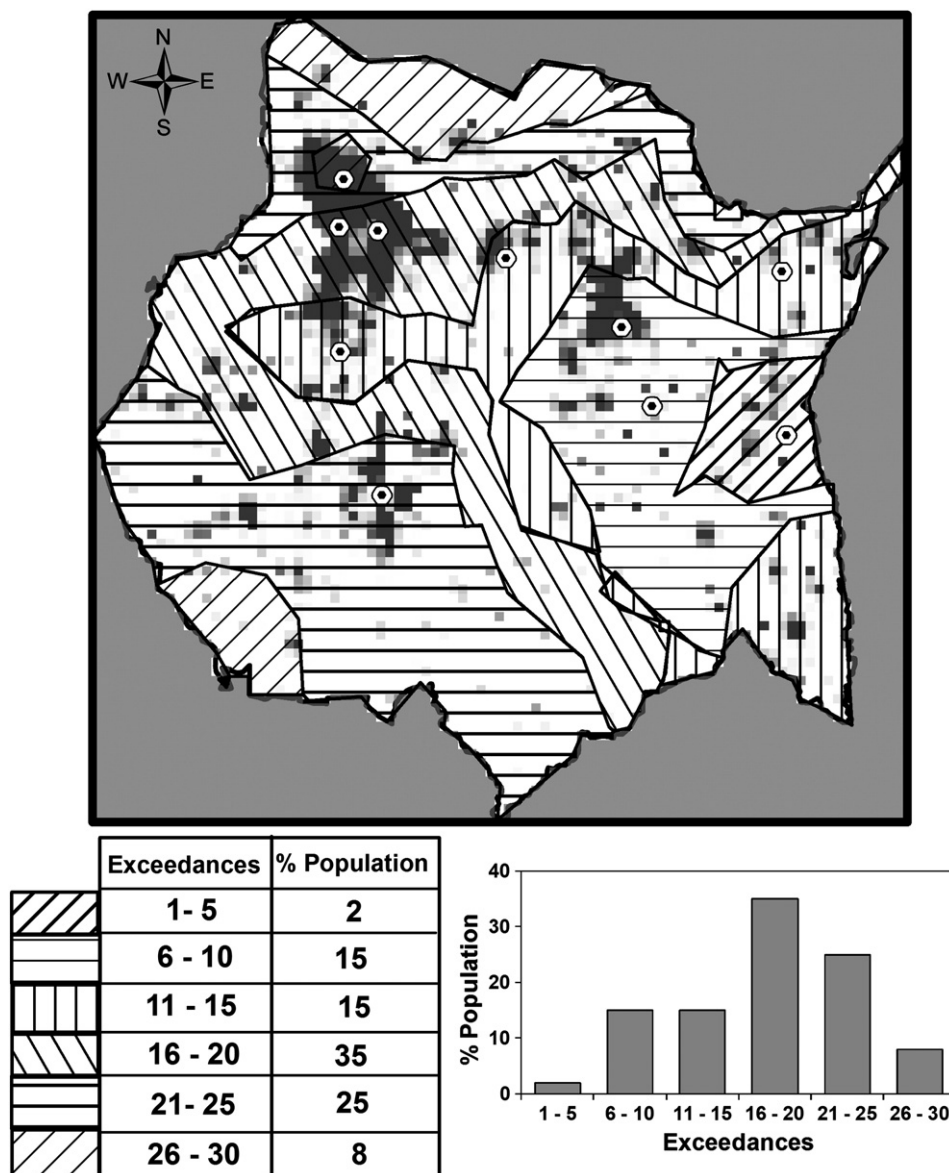


Fig. 4. Morelos map showing the estimated number of exceedances to 60 ppb for hourly ozone concentrations during a 1 month period. The figure also shows the population exposed to a specific number of exceedances for the same time period. Circles represent the monitoring sites for the 2007 and 2009 campaigns.

calculate the AOT40 for a three months period; i.e. that all vegetation in Morelos, regardless of its type (grain crop, horticultural crops, natural or semi natural vegetation) remained under excess ozone conditions.

Table 3
Estimated AOT40 ozone levels for one month accumulation time, at all the Morelos sites during the 2007 and 2009 campaigns.

	AOT40 (ppm h)	
	2007	2009
UAE	8	
CUE	3	4
PRE	7	5
XOC		5
YAU		6
CUA		3
PIC		4
JAN		2
OCU		9
ZAC		6

As a reference, two sites in the MCMA were chosen among the monitoring sites of the atmospheric monitoring network of Mexico City (Red Automática de Monitoreo Atmosférico, RAMA) (see Table 1). Criteria pollutant data for these sites, for the same periods of the two campaigns, was downloaded from the RAMA data base (SIMAT, 2011) and plotted in Figs. 2 and 3. Excluding the days that O₃ concentrations exceeded the 110 ppb limit at the MCMA, concentrations measured in Morelos were on the same order of magnitude as their counterparts in MCMA, even at sites classified as rural (UAE in 2007 and YAU, JAN, and OCU in 2009). This observation results striking, given the reported emissions of atmospheric pollutants in Morelos and the MCMA, which are shown in Table 4 (CEAMA, 2007a; SMADF, 2008). According to the latest available emission inventories, Morelos has lower emissions of all the criteria pollutants (with the exception of SO₂, which is not an ozone precursor) than the MCMA. Furthermore, within Morelos, Ocuilutco (where OCU site is located) is one of the municipalities with the lowest emissions to the atmosphere; and Jantetelco (where JAN site is located) is reported as having zero emissions. It is possible that the emission inventory of Morelos needs to be revised. However, the

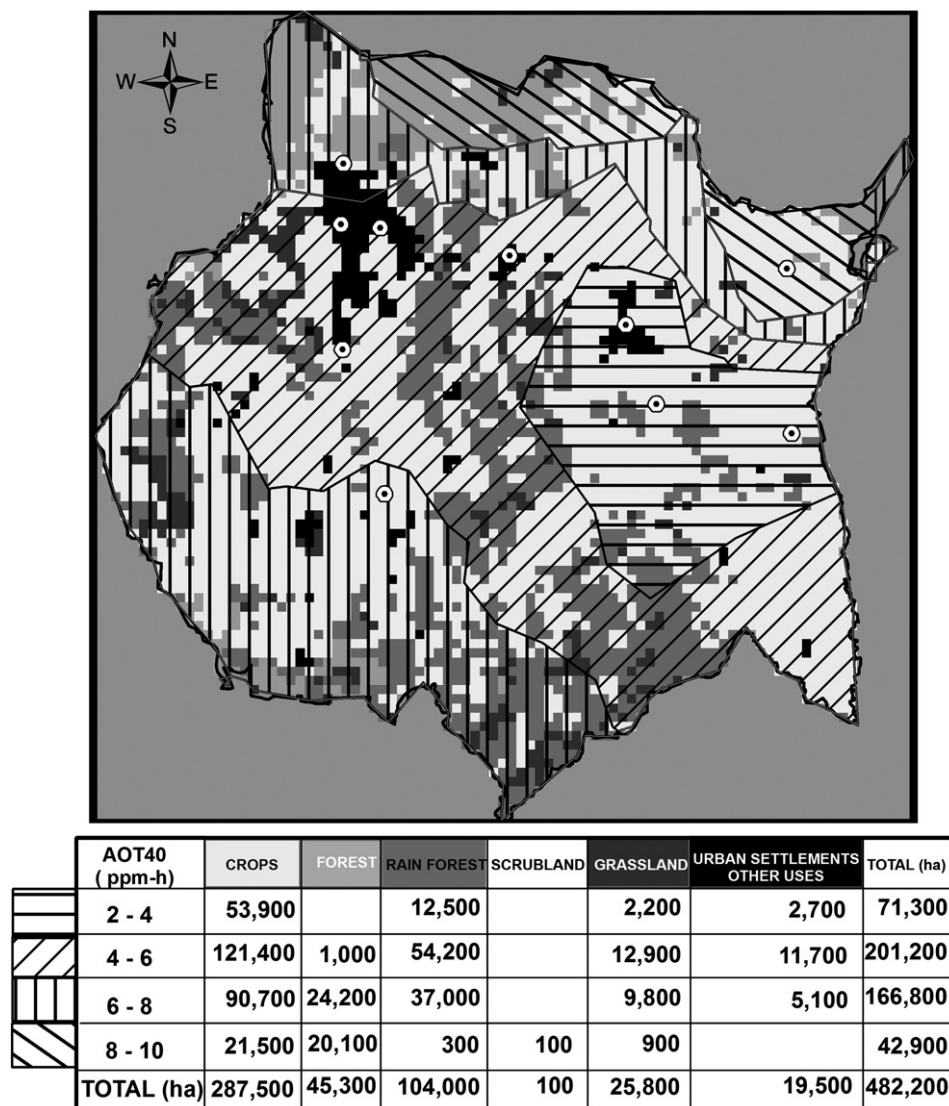


Fig. 5. Map of Morelos showing the state surface affected by different estimated AOT40 levels, for one month accumulation period. The map also shows the type of vegetation found in Morelos. Circles represent the monitoring sites for the 2007 and 2009 campaigns.

above observations, together with the fact that daily ozone peaks were wider at Morelos sites than at MCMA sites, also suggest an efficient regional transport of pollutants and ozone production.

Table 4
Surface, population and yearly emissions of criteria atmospheric pollutants at Morelos and the MCMA, according to the latest emission inventories available (CEAMA, 2007a; SMADF, 2008).

	Morelos (M)	Mexico City (MCMA)	Ratio (MCMA/M)
Surface (km ²)	4959	7734	1.6
Population (millions)	1.7	20	11.8
Emissions (ton/year)			
PM ₁₀	3223	23,053	7.2
PM _{2.5}	277	6191	22.4
SO ₂	9553	6193	0.7
CO	146,348	1,990,806	13.6
NO _x	6006	194,689	32.4
Volatile organic compounds (VOC)	38,028	566,061	14.9

3.2. Ozone chemistry

Diurnal cycles of ozone concentration in all the Morelos sites showed the expected profile: maximum concentrations of ozone were observed at midday due to early emissions of NO_x and organic compounds that contribute to ozone production through photochemistry; at night, excess NO titrated O₃ causing minimum concentrations to occur (Seinfeld and Pandis, 1998). Figs. 2 and 3 show that nighttime ozone concentrations observed at the rural sites (UAE in 2007 and JAN and OCU in 2009, where concentrations rarely fell below 15, 20, and 25 ppb, respectively) were higher than at the rest of the sites (where nighttime ozone concentrations usually fell below 5 ppb). Large ozone concentrations at night usually indicate low concentrations of NO in the atmosphere. Hence, the above observation is consistent with the hypothesis that, in Morelos, ozone and its precursors are transported from sites with relatively high emissions to the remote sites where NO_x emissions are the lowest; under these circumstances, ozone accumulates causing relatively large afternoon concentrations too.

As mentioned before, excess NO suppresses O₃ overnight; moreover, fresh emissions of NO early in the morning inhibit O₃ formation even after sunrise and until a sufficient amount of NO has been converted

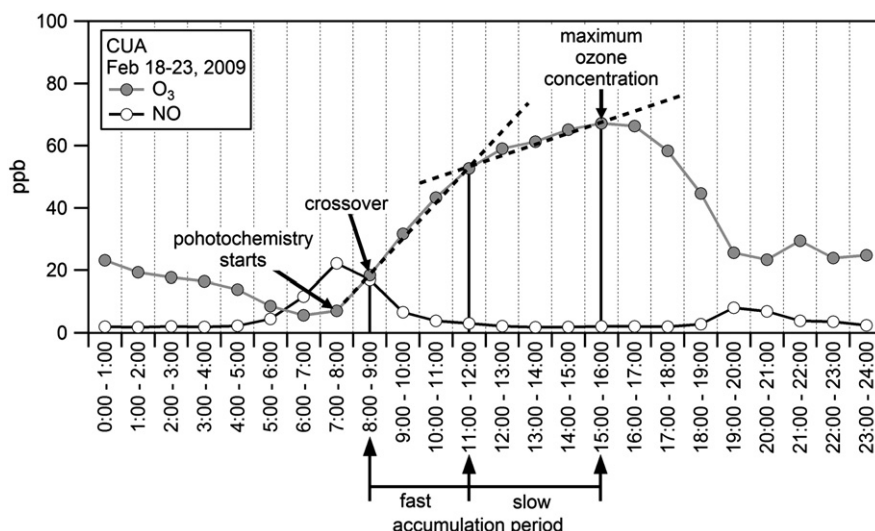


Fig. 6. Average diurnal cycle of NO and O₃ for February 18 to 23, 2009 at CUA. The slopes of the dotted lines represent the ozone accumulation rate.

to NO₂. The morning crossover of NO and O₃ (i.e. equal concentrations of NO and O₃) can be used as an indicator of when the inhibition period ends and the O₃ accumulation period begins. The slope of the ozone time series line during this period is indicative of the ozone accumulation rate (Fujita et al., 2002). As an example, Fig. 6 shows the O₃ and NO average hourly diurnal cycle from February 18 to 23, 2009 at CUA. An increase of NO was observed starting at 5 AM due to vehicle emissions, with a maximum between 7 and 8 AM; at the same time, the ozone concentration started increasing. NO and O₃ crossover occurred between 8 and 9 AM indicating the end of the inhibition period and the beginning of the fast ozone accumulation period, which is caused mainly by photochemistry. Around noon, the slope of the ozone time series decreased (start of slow accumulation); the net accumulation of ozone during this period can be related to both, photochemistry and transport. The maximum ozone concentration occurred between 3 and 4 PM (end of accumulation period). Results of a similar analysis performed on all sites with available data from February 18 to 23,

2009 are shown in Table 5. PRE and CUE sites exhibited similar values for maximum concentrations of NO and O₃, the three slopes, and the duration of the O₃ accumulation period; on the other hand, there was a decreasing gradient for these variables going from YAU to CUA to PIC to JAN (west to east). OCU did not seem to have any correlation with the rest of the sites. The observed gradient between YAU and JAN cannot be explained by emissions alone because, according to the Morelos emissions inventory, from the four sites, CUA and PIC are located in the municipality with the largest emissions to the atmosphere, followed by YAU; JAN, on the other hand, is located in a municipality with zero emissions.

In order to understand the above observations, it is important to take into account that Morelos is divided in two airshed regions by Sierra de Tepoztlán, Sierra del Texcal and Sierra de Montenegro which run north to south (in between Jiutepec and Yautepec municipalities) from Sierra del Chichinautzin to, approximately, the middle of the state, ending at Tlatizapan (see Fig. S1). The altitude in the three Sierras goes from 1300 to 3480 m above sea level (masl); in general, the altitude decreases from north to south (CEAMA, 2007b). PRE and CUE sites rest on the western side of the Sierras; YAU, CUA, PIC, JAN and OCU on the eastern one. The gradients discussed above seem to indicate that each of these regions (east and west of the Sierras) corresponds to an independent atmospheric basin. Although OCU is on the eastern basin, it is probably not directly affected by the other sites because it is situated on the edge of the Chalco Pass between the Mexico City basin and Morelos; hence, it might be receiving some of the outflow from the MCMA, depending on the wind circulation patterns (de Foy et al., 2006).

The O₃/NO_y ratio (NO_y includes NO_x and the products of its atmospheric oxidation, such as HNO₃, HONO, PAN and others) has been successfully used as a photochemical indicator (PI) to describe the ozone production sensitivity to VOC and NO_x in the MCMA (Torres-Jardón et al., 2009). In general, high O₃/NO_y and low NO_y ratio are associated with ozone production being sensitive to changes in NO_x concentrations (NO_x-sensitive conditions) and photochemically aged air. Low O₃/NO_y ratio and/or high NO_y might indicate ozone production being sensitive to changes in VOC concentrations (VOC-sensitive conditions) or relatively fresh emissions of ozone precursors; they are also related to conditions where O₃ has been titrated through reactions with directly emitted NO. Since measurements of NO_y were not available for this study, we used NO_x* (measured nitrogen oxides with a chemiluminescent analyzer) as its surrogate. Although it is well known that NO_x* concentrations usually have a positive bias due to the detection of

Table 5

Analysis of NO and O₃ average diurnal cycles from February 18 to 23, 2009 for all the sites with available information (see Fig. 6). Slope I corresponds to the ozone concentration slope during the fast accumulation period; slope II corresponds to the slow accumulation period; global slope corresponds to the slope from the start of the fast accumulation period to the end of the slow accumulation period. The duration of O₃ accumulation period includes fast and slow periods. Given that the diurnal cycles have a time resolution of 1 h, a time of 8:30, for example, indicates that a period started between 8 and 9 AM. Similarly, 14:00 means that the period started between 1 and 3 PM.

	CUE	PRE	YAU	CUA	PIC	JAN	OCU
Maximum NO (ppb)	17		35	22	12	4	
Maximum O ₃ (ppb)	69	63	71	67	55	48	81
Time of maximum O ₃	14:00	12:30	15:00	15:30	13:30	13:30	14:30
O ₃ at start of accumulation	16		9	18			
Start of O ₃ of accumulation	08:30	6:30 ^a	08:30	08:30	8:30 ^b	8:30 ^b	7:30 ^a
Slope I	12	10	12	11	8	8	9
Slope II	5	3	6	4	4	3	3
Global slope	9	9	10	7	7	6	7
Duration of O ₃ accumulation (h)	6	6	6.5	7	4	4	7

^a NO data was not available. Start of accumulation period was considered as 1 h after O₃ increase started (similar to other sites).

^b Ozone was always larger than NO. Start of accumulation period was considered as 1 h after O₃ increase started.

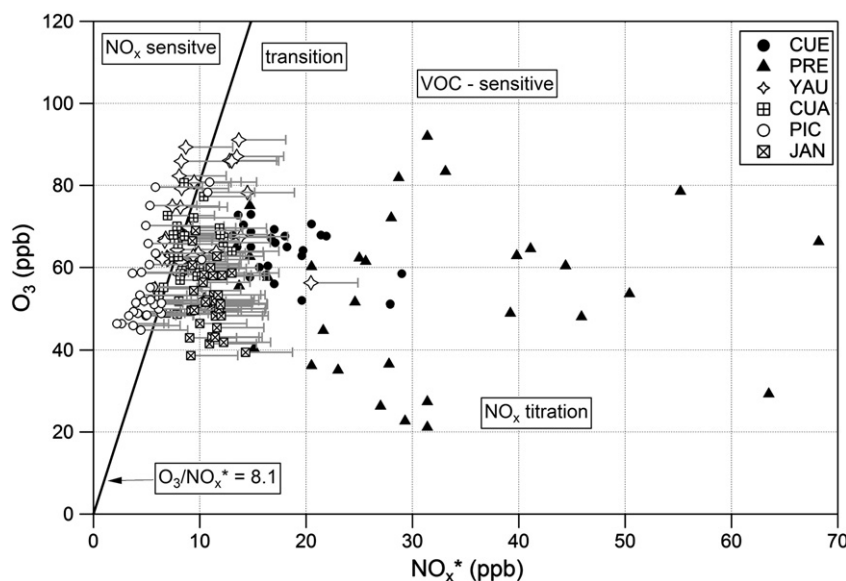


Fig. 7. Scatter plot of O_3 vs. NO_x^* concentrations measured between 12:00 and 17:00 at six sites between February 18 and 23, 2009. Gray bars on each data point represent the range for the expected NO_x values. The O_3/NO_x transition value previously obtained by Torres-Jardón et al. (2009) for the MCMA is shown (8.1). The ozone production sensitivity regions are marked as reference.

undefined amounts of HNO_3 and PAN species along with NO_2 ; NO_x^* may be regarded as a lower bound of NO_y . In fact, a number of studies have previously used NO_x^* as a reasonable approach to represent NO_y (Blanchard and David, 2001; Kleinman et al., 2005; Lei et al., 2007; LaFranchi et al., 2011). Fig. 7 shows the O_3 vs. NO_x^* concentrations measured between 12:00 and 17:00 in six of the monitoring sites between February 18 and 23, 2009. The O_3/NO_y transition value (which defines the transition between NO_x - and VOC-sensitive conditions) previously obtained by Torres-Jardón et al. (2009) for the MCMA is also shown (8.1). The sites on the west of the Sierras de Tepoztlán, Texcal, and Montenegro (CUE and PRE) clearly fell on the VOC-sensitive to NO_x -titration regions where fresh emissions dominate the chemistry. The rest of the sites (PIC, JAN, CUA and YAU) roughly fell between the NO_x -sensitive and the transition region. In order to take into account that NO_x^* is a lower bound for NO_y , Fig. 7 also shows, in the form of uncertainty bars, an estimated range for the expected NO_y values if measurements were available. The uncertainty bars, were calculated based on two recent campaigns, performed in Central Mexico, when NO_x^* and NO_y data was obtained at an urban smog receptor site in Mexico City, and a rural site receptor of aged air masses outside Mexico City. Linear correlations of both measurements resulted in the following equations: $NO_y = (1.0828 \times NO_x^*) + 4.4093$ ($R^2 = 0.9734$), and $NO_y = (1.0098 \times NO_x^*) + 2.5292$ ($R^2 = 0.9974$) for the urban and rural sites respectively (R^2 is the squared correlation coefficient). Because the slopes of the above correlations are close to one, the largest intercept (4.4) of the above correlations was used as an uncertainty bar of the NO_x^* measurements in Fig. 7. The results indicate that even in the case of the largest NO_y values expected, the eastern sites were unlikely to fall in the VOC-sensitive region, implying that most of the ozone measured in these sites can be associated to photochemically aged air masses. These results are again consistent with Morelos being divided in two atmospheric basins, with different ozone chemistry.

3.3. Particulate matter and other gasses

Particulate matter (PM) data collected during both campaigns is shown in Figs. S3 and S4. Relatively low levels ($10\text{--}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) of $PM_{2.5}$ were observed at UAE during the 2007 campaign. Higher levels of $PM_{2.5}$ ($20\text{--}100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) were detected at PIC during the 2009 campaign, with two large peaks above $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at midnight. Regarding PM_{10} ,

relatively high concentrations, with several peaks larger than $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, were observed at CUE in 2007 and JAN in 2009. The lowest concentrations of PM_{10} were observed at UAE in 2007 and the largest ones at ZAC in 2009 with concentrations above $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ most of the time. Mexican air quality standards indicate that 24-h averaged PM concentration should not be above $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} and $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $PM_{2.5}$ (SS, 2005). These limits were exceeded on March 1 at PIC for $PM_{2.5}$ and on March 4 and 5 at ZAC for PM_{10} .

Hourly concentrations of NO_2 , CO, and SO_2 available in Morelos during the 2007 and 2009 campaigns are shown in Figs. S5 to S10. Concentrations of the three gasses were far from exceeding the Mexican air quality standards during the campaigns.

The largest concentrations of PM were observed during the 2009 campaign, at the industrial sites PIC and ZAC, which are located within 1 km from a glass production facility and a sugar cane refinery, respectively. The closeness to the industrial sources is probably the reason that the PM standards were exceeded in these two sites. On the other hand, the highest concentrations of SO_2 , as expected, were observed at the industrial sites PRE in 2007 and PIC in 2009. Unfortunately, there was no PM data at PRE to compare with the SO_2 data. Although ZAC is also an industrial site, it is not expected to present high SO_2 concentrations because the sugar cane refinery mainly burns biomass.

In general, NO_2 and CO concentrations roughly followed the same trends for all the sites. Highest concentrations of CO and NO_2 were measured at PRE in 2007, followed by CUE in 2007, and YAU and ZAC in 2009. In other words, highest CO and NO_2 concentrations were not found only in the industrial sites. This is probably because vehicular combustion sources are very important in Morelos. For example, PRE site is close to two large avenues with heavy mixed traffic (gasoline and diesel); CUE is located downtown Cuernavaca, being impacted by light vehicular emissions, and YAU is located within 1 km from a major road with mixed traffic.

As it was discussed in Section 3.1, in contrast to the rest of the criteria pollutants discussed above, ozone concentrations did not follow any trend that correlates with emissions to the atmosphere. The reason might be that ozone is a secondary pollutant, while the rest are primary (with the exception of $PM_{2.5}$ which might also have a secondary production). But more important is the fact that transport of ozone and its precursors play a very important role in the regional ozone levels observed.

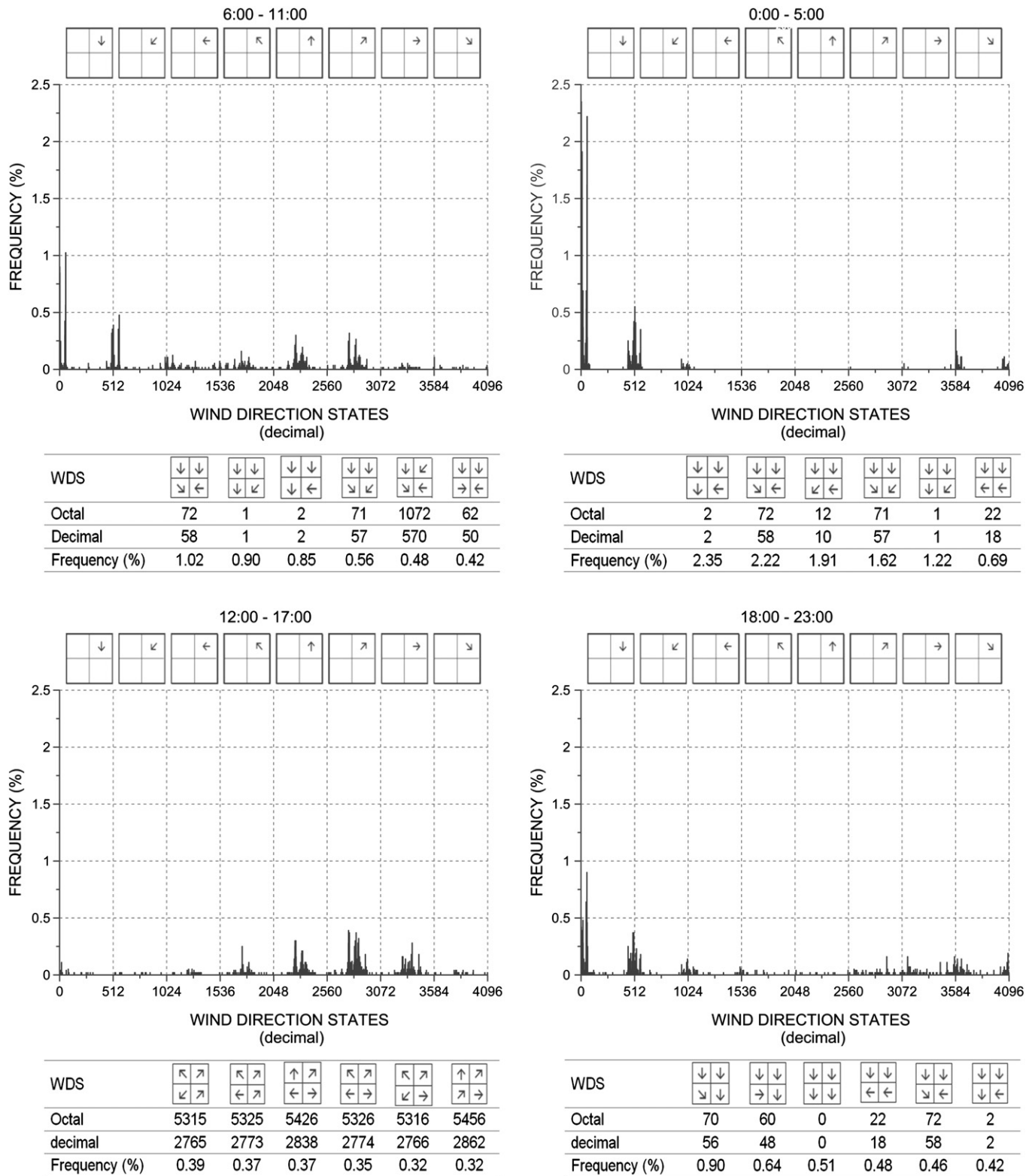


Fig. 8. Frequency of wind direction states in Morelos during February and March, 2009. Squares on top of each graph indicate the wind direction in the NE quadrant in each section of the graph. The six wind direction states with the highest frequencies are shown at the bottom of each graph.

3.4. Wind patterns

A Wind Direction States analysis was performed for all February and March, 2009 meteorological data. The results are shown in

Fig. 8, where the frequency of WDS for four different day periods is shown. The six most frequent wind direction states for each period are also shown. Squares on top of each graph indicate the wind direction in the NE quadrant in each section of the graph. The wind direction states

between 0 and 1023 and from 3584 to 4095 correspond to wind events that have a Northerly flow component at the NE quadrant, while the states between 1536 and 3071 represent wind events with a Southerly flow component at the same quadrant. Finally, states from 1024 to 1535 and from 3072 to 3583 represent wind events with Easterly and Westerly winds at the NE quadrant, respectively. Fig. 8 shows that during the first hours of the day (0:00–5:00) the most frequent WDS had a flow component from the North at NE and NW quadrants (WDS~0, 512, and 3584). These winds corresponded to downslope winds blowing from Sierra del Chichinautzin. However, the frequencies of these WDS decreased during the morning (6:00–11:00) and disappeared in the afternoon (12:00–17:00); only to increase again during the night hours (18:00–23:00). On the other hand, WDS with a flow component from the South in the NE and NW quadrants (states from 1536 to 3071) gradually increased their frequency during the morning, showing a maximum in the afternoon. This behavior reflects the alternated presence of downslope and upslope wind conditions, thermally driven by the mountain–valley systems in Morelos.

Table 6 shows the average WDS for four different day periods from February 18 to 23, 2009. WDS for the 6 days of the 2009 campaign (Table 6) were similar to the most frequent WDS for February and March, 2009 (Fig. 8), suggesting that the observations during the campaign were not uncharacteristic of the season.

Table 6
Wind direction states in Morelos for four different day periods from February 18 to 23, 2009.

	0:00–5:00	6:00–11:00	12:00–17:00	18:00–23:00
February 18				
WDS				
Octal	1	3103	5406	60
Decimal	1	1603	2822	40
February 19				
WDS				
Octal	1	3703	5404	26
Decimal	1	1987	2820	32
February 20				
WDS				
Octal	13	703	3403	72
Decimal	11	451	1795	58
February 21				
WDS				
Octal	1	6172	5216	71
Decimal	1	3194	2702	57
February 22				
WDS				
Octal	71	1001	22	19
Decimal	57	513	18	23
February 23				
WDS				
Octal	2	2172	4403	1012
Decimal	2	1146	2307	522

3.5. Modeling results

Because MCCM relies on synoptic scale data to calculate local and regional wind patterns, it is important to compare its results with experimental ground meteorological data, before it can be used to obtain information on other atmospheric processes. For this reason, we compared the WDS results in Table 6, with wind fields calculated using the MCCM for four different day periods from February 18 to 23, 2009, which are shown in Fig. 9. Both models (WDS and MCCM) presented approximately the same wind patterns occurring in Morelos, especially in the north part, where the highest ozone concentrations were observed and most of the state population lives. For example, from 0:00 to 5:00 and 18:00 to 23:00, both models showed downslope winds from Sierra del Chichinautzin for the six days analyzed. From 12:00 to 17:00, both models showed upslope winds for all days, except for February 22, which presented downslope winds. Wind circulation in the morning hours (6:00–11:00) was more complex, but similarities were still seen between both models. For example, February 22 and 23, showed convergent winds in the morning and afternoon.

Fig. 10 compares ozone concentrations calculated using MCCM with ozone concentrations measured at seven sites in Morelos from February 18 to 23, 2009. Linear fits to the modeled vs. experimental ozone data in Morelos and Mexico City were performed; the resulting slope and Pearson correlation coefficient (r) are presented in Table 7 for each site in Morelos and five sites in Mexico City (see Fig. S11 for the time series). Ozone concentrations in 21 other sites in Mexico City were calculated and compared to measured values; results of these comparisons were similar to those shown in Table 7. In general, the MCCM overestimates ozone concentrations ($\text{slope} > 1$) in all sites in Morelos and the MCMA. However, the correlation between the model and measured data is relatively good ($r > 0.8$) for CUE, PRE, YAU, and CUA in Morelos and all sites in MCMA. On the other hand, the correlation is not as good at PIC, JAN, and OCU. In order to explain these observations it is important to consider that the Morelos emission inventory used to feed the MCCM was only an estimation based on the MCMA emission inventory and scaled using population density in the region. Because of this, the model reproduced ozone concentrations better at the sites where urban and vehicular emissions are important (CUE, PRE, YAU, and CUA), than at rural sites with very low emissions (JAN and OCU) or at primarily industrial sites (PIC) in Morelos. The overestimation of O_3 concentrations by the model must be related with the error in the emission inventory used; however, the added uncertainties of modeling a large domain that includes a very rough terrain and five large urban areas, probably plays an important role in this issue too.

The background color in Figs. 9 and 11 represent 6-h average ozone concentrations for four different time periods, and the ozone concentration at 8:00, 13:00, or 17:00 each day from February 18 to 23, 2009 in Morelos, respectively. In general, the highest ozone concentrations occurred north of the state, usually at the Sierra del Chichinautzin, which is a Federal Natural Reserve. This observation, again, can only be explained by ozone and its precursors being efficiently transported from sites with high emissions, reinforcing the idea that regional transport of pollutants plays a major role in the observed regional ozone concentrations in Morelos. High ozone concentrations also occurred in the north-east part of the state (Metropolitan Area of Cuernavaca) where almost 50% of the state inhabitants live.

Back-trajectories to the monitoring sites of the 2009 campaign were calculated using wind data from the MCCM and the Grid Analysis and Display System (GrADS, (IGES, 2011)). Results are shown in Fig. 11 for February 18 to 23, 2009. Back-trajectories were calculated 9 h back; each point on the lines represents 1 h back. In general, back-trajectories at 8:00, were similar for CUE and PRE (with air masses originated north from the sites) and for CUA, PIC and JAN (with air masses coming from the NE); in both cases, air masses seemed to move around the Sierras de Tepoztlán, Texcal, and Montenegro,

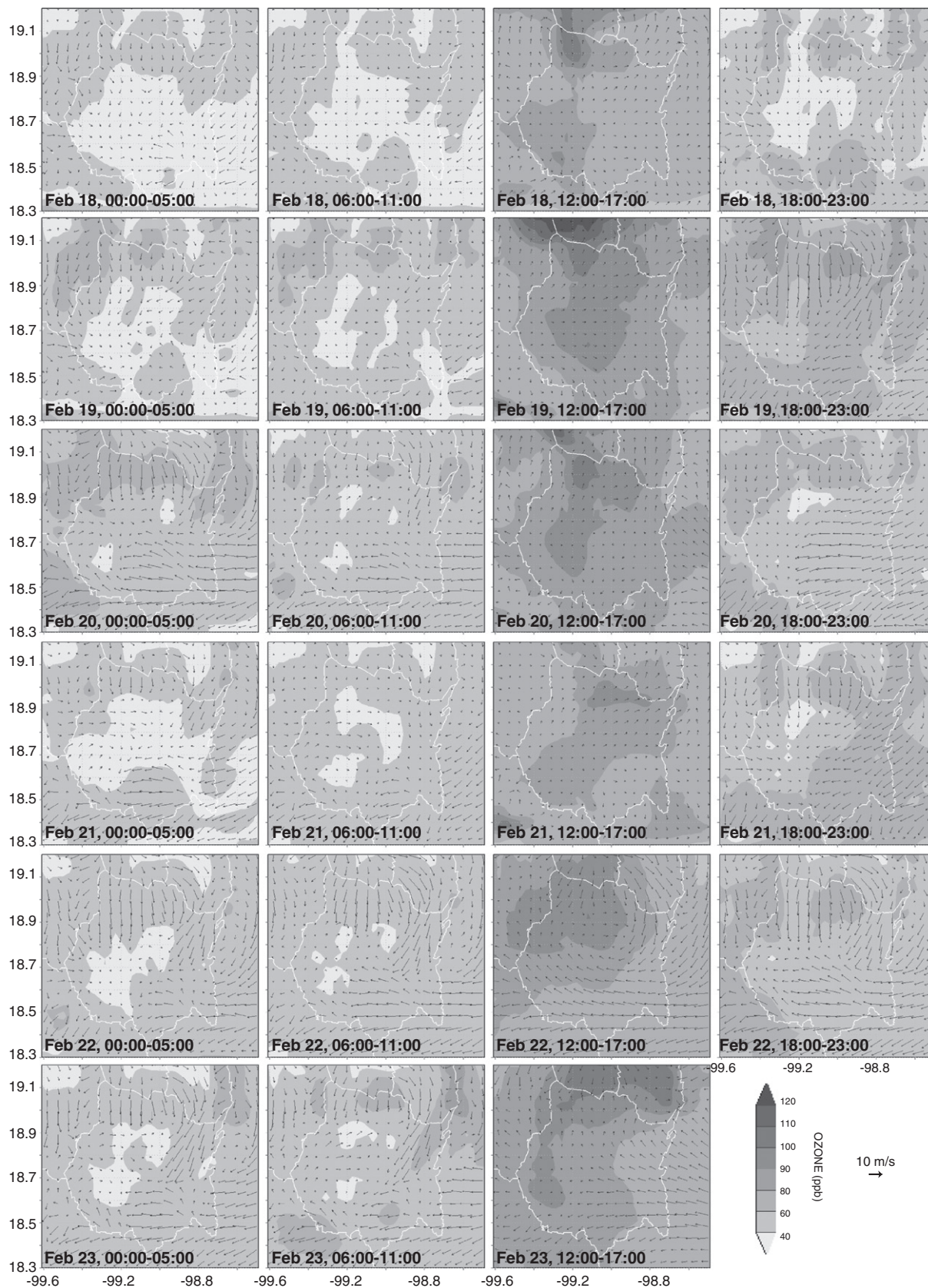


Fig. 9. Average wind fields in Morelos from February 18 to 23, 2009 for 4 daily time periods, calculated using MCM. Background color represents the calculated 6-h average ozone concentration for each time period.

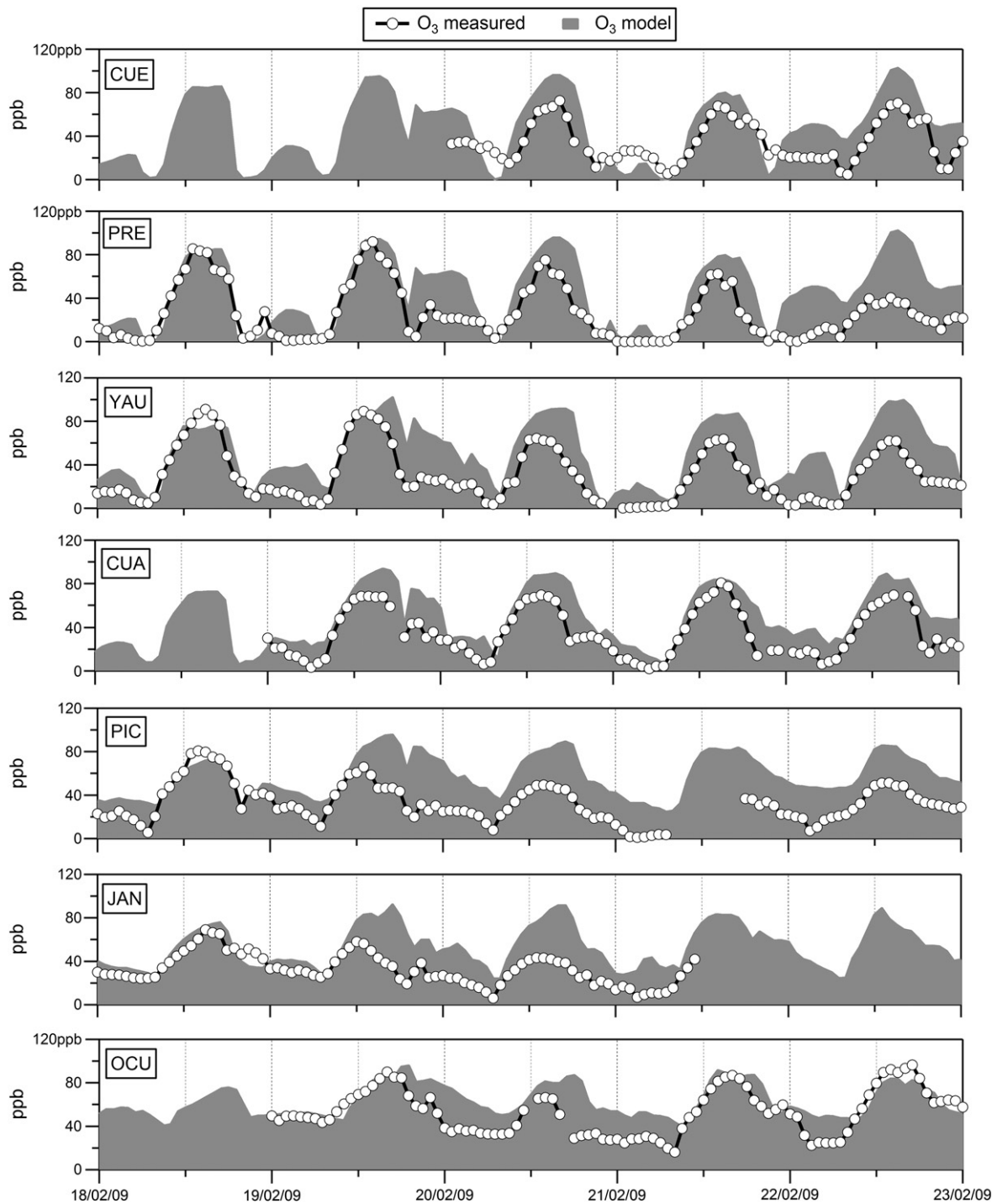


Fig. 10. Hourly ozone concentrations measured and calculated using the MCCM model at seven sites in Morelos from February 18 to 23, 2009.

supporting the hypothesis that Morelos is divided into two atmospheric basins. Some days, back-trajectories at YAU were similar to the former group, and to the latter group the rest of the days; this was probably because YAU is situated in the limit of the basins. During the day, back-trajectories showed more variability among different days and times, showing patterns similar to the ones just described; but also showing air masses from the SE affecting the western basin, or air masses from the SW affecting the eastern one; furthermore, some of the days air masses moved across the Sierras (for example, February 23 at 13:00 and February 19 at 17:00). This

variability during the day was probably related to synoptic flows affecting the surface wind patterns, combined with the fact that during the day the boundary layer might have been higher than the mountains in the Sierras. In contrast, during the night hours, the boundary layer was lower and the winds were mainly thermally induced, causing surface winds to follow the slope of the mountains.

Fig. 11 shows few occasions when Morelos was affected by air masses that 9 h back were in neighboring regions such as Mexico City (February 22) and Puebla (February 23). However, most of the time, for the previous 9 h, the air parcels came from within Morelos and not

Table 7

Results of linear fits between ozone concentrations in Morelos and Mexico City sites, calculated using modeled (MCCM) vs. measured data from February 18 to 23, 2009 (see Fig. 10 and Fig. S11). *m* is the slope and *r* is the Pearson correlation coefficient. The intercept was kept equal to zero for all the fits. The sites PED (Pedregal), CES (Cerro de la Estrella), and CUAJ (Cuajimalpa) are RAMA stations located south, east, and west of the MCMA, respectively (SIMAT, 2011).

	<i>m</i>		<i>r</i>			<i>m</i>		<i>r</i>	
	Morelos				Mexico City				
CUE	1.35	0.8081	PED	1.25	0.8781				
PRE	1.42	0.8011	CES	1.48	0.9042				
YAU	1.35	0.8112	CUAJ	1.32	0.8127				
CUA	1.34	0.8900	MER	1.39	0.9251				
PIC	1.50	0.6610	TLA	1.12	0.8495				
JAN	1.42	0.5789							
OCU	1.07	0.6771							

from neighboring states; *i.e.* the ozone levels observed mainly depended on local emissions. It is interesting to note that the back-trajectory analysis does not suggest that the transport of air masses from the high emission sites (such as CUA) to the rural sites (such as JAN and OCU) was important every day. Hence, the remnant ozone (which is not titrated during the night by NO) and its precursors from previous days must have played an important role in the development of the observed daily ozone concentrations at rural sites.

4. Conclusions

Criteria pollutants' concentrations were measured at several sites within the Morelos state in February and March of 2007 and 2009. Concentrations of almost all the pollutants monitored remained below the Mexican air quality standards during the campaigns. The exceptions were 8-h averaged ozone concentrations at PRE and OCU; 24-h concentrations of PM₁₀ at ZAC; and PM_{2.5} at PIC. Although ozone concentrations remained within the hourly Mexican standard, they were relatively high in all sites (*i.e.* on the same order of magnitude of ozone concentrations found in Mexico City during the same time period) even in those with low reported local emissions (rural sites). Taking into account that the campaigns were only few weeks long; that there is no continuous historical validated data in Morelos, and that Mexican air quality standards are less stringent than the WHO, USA, and EU standards; the results of this study suggest that Morelos inhabitants may be exposed to possibly harmful ozone levels (8-h average O₃ concentrations larger than 60 ppb, *i.e.* exceeding the World Health Organization and the European Union maximum levels, several times). Additionally, there is evidence that the AOT40 critical ozone levels are routinely exceeded in a large area, suggesting that vegetation in Morelos might, in general, be exposed to damaging ozone levels (estimated AOT40 levels above the 3 ppm h critical limit).

Relatively high nighttime ozone concentrations were observed in rural sites (*i.e.* larger than in urban sites). The high concentrations of ozone observed in the rural sites during the day and night are indicative of an efficient transport of ozone and its precursors at a regional level. Regional transport of aged air masses combined with low NO_x emissions, caused ozone to accumulate from day to day originating high background concentrations at a regional level.

Meteorological data in Morelos during February and March, 2009 shows that the main wind patterns in the northern part of the state were similar to the mountain–valley system (flows are downslope at night and during the first hours of the day, and upslope in the afternoon). At times, Morelos was under the influence of winds coming from surrounding states (Distrito Federal or Puebla).

An analysis of diurnal O₃ and NO_x time profiles, together with an analysis of wind direction states and back-trajectories suggest that Morelos is divided in two atmospheric basins by the Sierras de Tepoztlán, Texcal and Monte Negro. Depending on the meteorological conditions, both basins remain independent from each other; or there may be flows connecting them though air masses traveling above the mountains.

MCCM was used to calculate ozone concentrations over Morelos for six days in February 2009. The model qualitatively reproduced ozone daily variations in those sites with an urban component in Morelos. Correlations between calculated and measured ozone concentrations were not good in the rural sites. Furthermore, the model consistently overestimated the ozone concentration in all sites in Morelos. The disagreement is probably caused mainly by the lack of a detailed emission inventory for all the states in Central Mexico (except for the MCMA).

This is, to the best of our knowledge, the first published study on the troposphere dynamics of the Morelos state. Results confirm the urgency of a functional air quality monitoring network in the state, in order to generate historical data to identify trends and variability in the meteorological and pollution patterns. The network should also be extended to other urban areas with high population density such as Xochitepec, Temixco, Jiutepec (south, south and east of the metropolitan area of Cuernavaca, respectively) and Yautepec, as well as to other population centers between Cuernavaca and Cuautla. Including rural and agricultural areas in the network might also be important to determine the extent of the effect of ozone on vegetation. It is also very important to generate an updated and more detailed emission inventory in order to develop precise models for a better understanding of the atmospheric processes which produce the ozone concentrations observed in Morelos. Information regarding particulate matter was very scarce during the campaigns. In addition, to the best of our knowledge, there is no PM chemical composition published study in the region. Because particulate matter is one of the air pollutants that imposes more health risks to the population, it is essential to obtain information on the concentration and chemical composition of PM.

The above recommendations could also apply to all states in Central Mexico (Puebla, Hidalgo, and Estado de México), where there is also a growing population in urban areas, and a lack of atmospheric studies, historical air quality data, and detailed emission inventories.

Acknowledgments

The two campaigns were financially supported by Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente from Morelos state. Additional funding was obtained from CONACYT-SEMARNAT through grants 2006/23496 and 2006/2380. We thank Consejo Estatal de Ecología from Hidalgo state for the use of their mobile monitoring unit during the 2009 campaign. We also thank Engr. Manuel García Espinosa, Engr. Wilfrido Gutiérrez López, and Engr. Alfredo Rodríguez Manjarréz for preparing the UNAM mobile monitoring unit for both campaigns.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at [doi:10.1016/j.scitotenv.2011.09.041](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.041).

References

- Blanchard CL, David F. Spatial mapping of VOCs and NO_x-limitation of O₃ formation in central California. *Atmos Environ* 2001;35:3861–74.
- CEAMA. Inventario de emisiones a la atmósfera del estado de Morelos, 2004. Cuernavaca: Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos; 2007a.
- CEAMA. Sistema de Áreas Naturales Protegidas. Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos; 2007b.
- Celada-Murillo AT, Salcedo A. The Mexico City 2006 Wind Direction States. In: Alhajj RS, editor. 20th IASTED International Conference on Modelling and Simulation, Banff, Canada; 2009. p. 51–8.

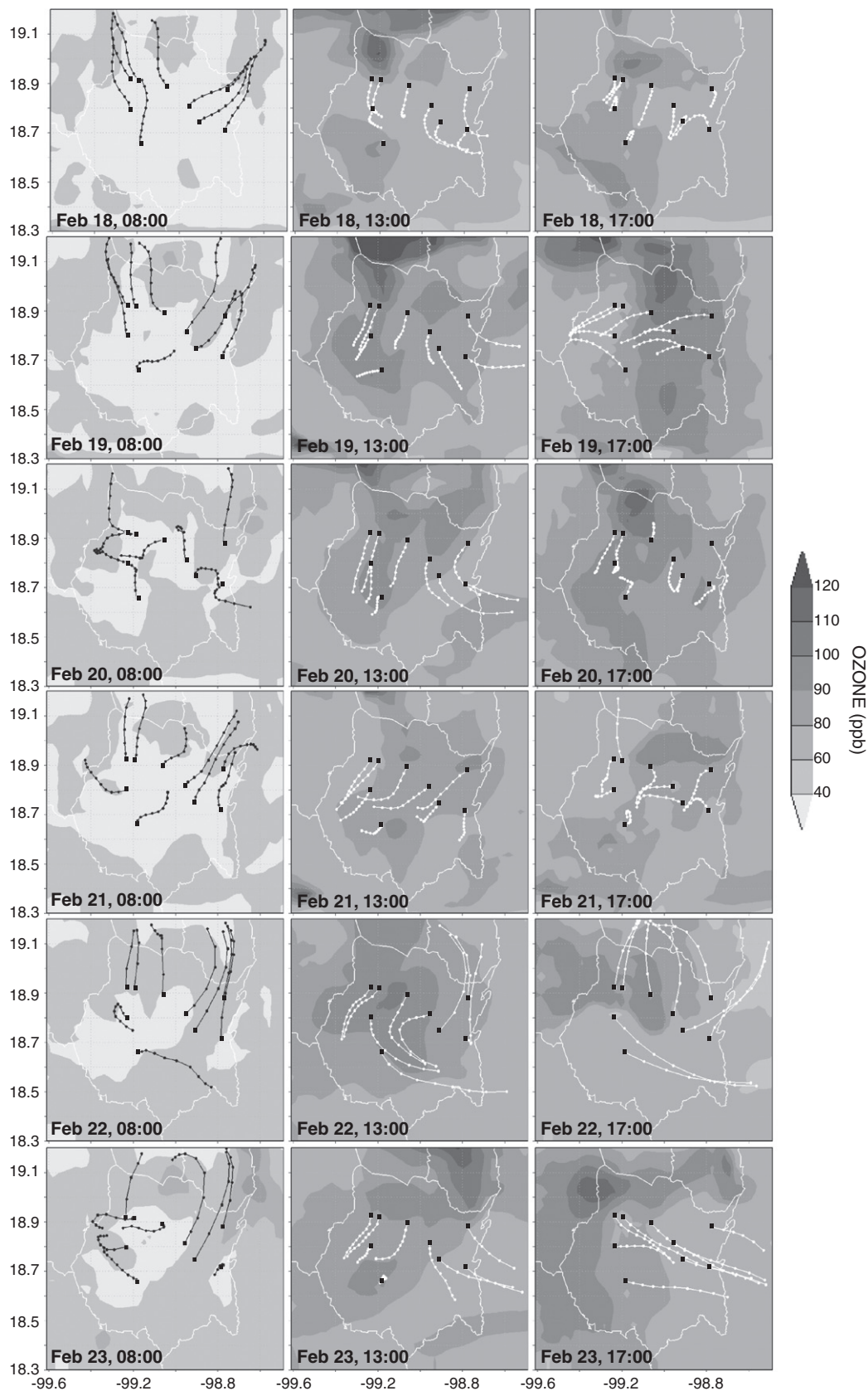


Fig. 11. Back-trajectories towards the nine Morelos sites of the 2009 campaign, for three different time periods from February 18 to 23, 2009. White or black lines represent 9 h back-trajectories; each point in the lines represents 1 h back. Background color represents the ozone concentration at 8:00, 13:00 or 17:00 each day.

- de Foy B, Varela JR, Molina LT, Molina MJ. Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume. *Atmos Chem Phys* 2006;6:2321–35.
- de Foy B, Fast JD, Paech SJ, Phillips D, Walters JT, Coulter RL, et al. Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. *Atmos Chem Phys* 2008;8:1209–24.
- Doran JC, Barnard JC, Arnott WP, Cary R, Coulter R, Fast JD, et al. The T1–T2 study: evolution of aerosol properties downwind of Mexico City. *Atmos Chem Phys* 2007;7:1585–98.
- EP. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. The European Parliament and the Council of the European Union; 2008.
- EPA. National Ambient Air Quality Standards for Ozone. U. S. Federal Registry 2008; 73:16436–16514.
- ESRI. ArcGIS Desktop v.9.3. New York, USA: Environmental Systems Research Institute; 2008.
- Fujita EM, Campbell DE, Stockwell W, Keislar RE, Zielinska B, Sagebiel JC, et al. Weekend/weekday Ozone Observations in the South Coast Air Basin; Volume II – Analysis of Air Quality Data. Reno, NV: Desert Research Institute; 2002.
- García A, Schoenemeyer T, Jazcilevich DA, Ruiz-Suarez G, Fuentes-Gea V. Implementation of the multiscale climate chemistry model (MCCM) for central Mexico. In: Longhurst JWS, Brebbia CA, Power H, editors. *Air Pollution VII*. WIT Press; 2000. p. 71–8.
- García-Reynoso A, Jazcilevich A, Ruiz-Suarez LG, Torres-Jardón R, Suarez-Lastra M, Resendiz-Juarez NA. Ozone weekend effect analysis in México City. *Atmósfera* 2009;22:281–97.
- Grell GA, Emei S, Stockwell WR, Schoenemeyer T, Forkel R, Michalakes J, et al. Application of a multiscale, coupled MM5/Chemistry model to the complex terrain of the VOLTAP valley campaign. *Atmos Environ* 2000;34:1435–53.
- IGES. Grid Analysis and Display System (GrADS). Institute of Global Environmental and Society; 2011.
- INEGI. Censo de Población y Vivienda, 2010. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; 2010.
- INIFAP. Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatólogicas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; 2009.
- Jazcilevich A, García A, Ruiz-Suarez LG. An air pollution modeling study using three surface coverings near the new International Airport of Mexico City. *J Air Waste Manag Assoc* 2003a;53:1280–7.
- Jazcilevich A, García A, Ruiz-Suarez LG. A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the central region of Mexico. *Atmos Environ* 2003b;27:183–93.
- Jazcilevich A, García A, Ruiz-Suarez LG, Cruz-Núñez X, Delgado JC, Tellez C, et al. An air quality modeling study comparing two possible sites for the new International Airport for Mexico City. *J Air Waste Manag Assoc* 2003c:366–78.
- Jazcilevich A, García A, Caetano E. Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the valley of Mexico. *Atmos Environ* 2005;39:5481–9.
- Kleinman LI, Daum PH, Lee YN, Nunnermacker LJ, Springston SR, Weinstein-Lloyd J, et al. A comparative study of ozone production in five U.S. metropolitan areas. *J Geophys Res* 2005;110:D02301.
- LaFranchi BW, Goldstein AH, Coehn RC. Observations of the temperature dependent response of ozone to NOx reductions in the Sacramento. *Atmos Chem Phys* 2011;11:6945–60.
- Lei W, de Foy B, Zavala M, Volkamer R, Molina LT. Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model. *Atmos Chem Phys* 2007;7:1347–66.
- Magaña V, Caetano E. Identificación de Cuencas Atmosféricas en México. México: Instituto Nacional de Ecología; 2007.
- Mena-Carrasco M, Carmichael GR, Campbell JE, Zimmerman D, Tang Y, Adhikary B, et al. Assessing the regional impacts of Mexico City emissions on air quality and chemistry. *Atmos Chem Phys* 2009;9:3731–43.
- Mills G, Buse A, Gimeno B, Bermejo V, Holland M, Emberson L, et al. A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. *Atmos Environ* 2007;41:2630–43.
- Molina LT, Madronich S, Gaffney JS, Apel E, de Foy B, Fast J, et al. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos Chem Phys* 2010;10:8697–760.
- Pope III CA, Dockery DW. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manag Assoc* 2006;56:709–42.
- Ruiz-Suárez LG, Torres-Jardón R, Jazcilevich-Diamant A, García-Reynoso A, Grutter M, Torres-Jaramillo A, et al. Analysis of observations and modeling of criteria pollutants and photochemical age indicators during MILAGRO at Tenango del Aire. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria; 2009.
- Ruiz-Suárez LG, Torres-Jardón R, Woernschimmel H, Steinbrecher R, Junkerman W, Nigenda E, et al. In depth analysis of the role of the mountain gap south of the Valley of Mexico on the air quality in Mexico City. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria; 2010.
- Salcido A, Celada AT. A lattice gas approach to the Mexico City wind field estimation problem. In: Rey GR, Muneta LM, editors. *Modelling, Simulation and Optimization*. INTECH; 2010. p. 385–416.
- Salcido A, Celada AT, Castro T. A meso- β scale description of surface wind events in Mexico City during MILAGRO 2006 campaign. Proceedings of the Second IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering, Banff, Canada; 2010. p. 820–7.
- Seinfeld JH, Pandis SN. Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change. USA: John Wiley and Sons; 1998.
- SIMAT. Sistema Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México; 2011.
- SMADF. Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2006. México: Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal; 2008.
- SS. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono (O₃). Valores normados 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. Secretaría de Salud, 2000.
- SS. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. “Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM10 y partículas menores de 2.5 micrómetros PM2.5 de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire.” Diario Oficial de la Federación, Tomo DCXXIV, no. 17, pp. 55–64. Secretaría de Salud, 2005.
- Torres-Jardón R, García-Reynoso JA, Jazcilevich A, Ruiz-Suárez LG, Keener TC. Assessment of the ozone–nitrogen oxide–volatile organic compound sensitivity of Mexico City through an indicators-based approach: measurements and numerical simulations comparison. *J Air Waste Manag Assoc* 2009;59:1155–72.
- UNECE-LRTAP. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Pollution; 2004.
- WHO. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide; Global update 2005. Geneva: World Health Organization; 2005.

PATHS DESCRIBED BY THE MEXICO CITY AIR POLLUTION CENTROIDS DURING MILAGRO CAMPAIGN

Alejandro Salcido¹, Susana Carreón-Sierra² and Ana-Teresa Celada-Murillo¹

1. Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Energías Alternas. Reforma 113, Col. Palmira, 62490-Cuernavaca, Morelos, México. E-mail: salcido@iie.org.mx
2. Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM (Matemáticas Aplicadas y Computación). San Juan Totoltepec s/n, Santa Cruz Acatlán, 53150-Naucalpan, Estado de México, México.

ABSTRACT

The temporal behavior of the spatial distribution of the Mexico City air pollutants during the period of the MILAGRO campaign (March 2006) is studied in terms of the paths described by their pollution centroids. The spatial distribution of an air pollutant is modeled by the mass centroid of its surface concentration. Each pollution centroid moves as the spatial distribution of the pollutant concentration changes with time. The particular path described by the pollution centroid is determined by the wind field and the temporal evolution of the pollutant mass production field by emission and/or chemical reaction. We found that the average daily paths of the pollution centroids are periodic and follow the diurnal cycle. Moreover, the number of daily hours of presence of the pollution centroids in certain Mexico City zones seems to reflect some features of the atmospheric chemistry in this area.

KEY WORDS

Mexico City, air pollution, pollution centroids, pollution centroid paths, mathematical modelling.

1. Introduction

In big urban settlements, some important chronic health effects have been observed and associated with chronic exposures to high concentrations of air pollutants. This is an important issue for the 20 million people (including 9 million children) living in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA), which twenty years ago was considered by the *United Nations Environment Programme* and the *World Health Organization* as one of the megacities with the worst problems of air pollution [1]. Nevertheless, although the emissions of air pollutants in the MCMA have been abated substantially in these two decades, large amounts of air pollutants are still released every year to the Mexico City atmosphere [2].

In a recent work [3], we proposed a simple analysis approach for identifying the features of the Mexico City air pollution spatial distribution in response to the wind circulation events. In that work, we represented the spatial distribution of a given air pollutant by the mass centroid of its concentration values measured at the stations of the official air quality network and we described the local wind circulation events using a meso- β scale cellular model with a simple and discrete wind state concept. This

analysis technique was applied for studying the spatial and temporal clustering of the Mexico City air pollution centroids of ozone, nitrogen oxides, carbon monoxide and sulfur dioxide for the period of the MILAGRO campaign.

The MILAGRO campaign was carried out in March 2006. It was an international scientific collaborative effort focused on the study of the local, regional and global impact of air pollution in a megacity, using as a case study the MCMA and its surrounding areas [4]. The MCMA was selected as a case study because it has tropical latitude similar to other megacities, it receives a large amount of incoming solar radiation all year long making its atmosphere extremely active photochemically, which helps to determine the transformation of atmospheric pollutants; but also because the existence of reliable urban and air quality measurement records, which the official air quality and meteorological monitoring networks provide systematically each hour.

In this paper, we have studied the paths described by the Mexico City pollution centroids of ozone, nitrogen oxides, carbon monoxide and sulfur dioxide in the period of the MILAGRO campaign. These paths provide a quantitative description of the average movement of the zone of the city where pollution can be considered to be concentrated for analyzing purposes. We have found that, at least for our study period, the 24-hour paths of the Mexico City pollution centroids resulted in closed curves in average, which can be interpreted as the existence in the MCMA of strong time-varying forcings with a diurnal cycle.

2. Dynamics of Air Pollution Centroids

In this section we present an overview of the air pollution centroids theoretical approach [3].

The system is an open spatial domain D within a polluted region of troposphere. A set \mathcal{B} of n of polluting chemical species, labeled as $\alpha = 1, 2, \dots, n$, will be considered. The mass density of the pollutant α and its mass production per unit time and unit volume will be denoted by the field variables $\mu_\alpha(\mathbf{x}, t)$ and $\sigma_\alpha(\mathbf{x}, t)$, respectively, and the wind velocity will be denoted by $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$. Now, associated with the spatial distributions of mass and mass production of one given pollutant, its mass and the mass production centroids are defined as follows.

The mass centroid of a pollutant α is the point \mathbf{R}_α at which all its mass may be considered to be concentrated in analyzing its behavior. It is defined by

$$\mathbf{R}_\alpha = \frac{1}{M_\alpha} \int_{\mathcal{D}} \mathbf{x} \mu_\alpha dV,$$

where M_α is the total mass of the pollutant contained in the domain \mathcal{D} . Analogously, the mass production centroid of the pollutant α is the point \mathbf{Q}_α at which all its mass production rate may be considered to be concentrated in analyzing its behavior. This point is given by

$$\mathbf{Q}_\alpha = \frac{1}{\dot{M}_\alpha} \int_{\mathcal{D}} \mathbf{x} \sigma_\alpha dV,$$

where \dot{M}_α with the dot superposed denotes its time derivative. If the elements of $\mathcal{P} \subset \mathcal{B}$ are to be involved in a closed set of chemical reactions, then

$$\sum_{\alpha \in \mathcal{P}} \dot{M}_\alpha \mathbf{Q}_\alpha = \int_{\mathcal{D}} \mathbf{x} \sum_{\alpha \in \mathcal{P}} \sigma_\alpha^* dV$$

where σ_α^* denotes the emission sources contributions to the pollutant production rate. Taking the time derivative of the mass centroid position vector, it is obtained

$$M_\alpha \dot{\mathbf{R}}_\alpha + \dot{M}_\alpha \mathbf{R}_\alpha = \int_{\mathcal{D}} \mathbf{x} \frac{\partial \mu_\alpha}{\partial t} dV$$

Then, using the conservation of mass expressed by the equation

$$\frac{\partial \mu_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mu_\alpha \mathbf{v}) = \sigma_\alpha,$$

and the divergence theorem, it is obtained the mass centroid velocity:

$$\mathbf{V}_\alpha \equiv \dot{\mathbf{R}}_\alpha = \mathbf{U}_\alpha + \gamma (\mathbf{Q}_\alpha - \mathbf{R}_\alpha) - \Phi_\alpha$$

Here γ is the time rate of the pollutant total mass per unit mass

$$\gamma = \frac{\dot{M}_\alpha}{M_\alpha},$$

\mathbf{U}_α is the average wind velocity weighted by the mass of the pollutant,

$$\mathbf{U}_\alpha = \frac{1}{M_\alpha} \int_{\mathcal{D}} \mu_\alpha \mathbf{v} dV,$$

and the flow term

$$\Phi_\alpha = \frac{1}{M_\alpha} \oint_{\partial \mathcal{D}} \mathbf{x} \mu_\alpha \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA$$

represents the effect on the centroid velocity due to the pollutant mass exchange between the considered domain \mathcal{D} and its surroundings through the boundary surface $\partial \mathcal{D}$. The flow term Φ_α can be neglected when air pollution

remains trapped within a finite region in space¹. In such a case, the mass centroid velocity is determined only by the relative position of its mass and mass production centroids and by the velocity of advection of the pollutant by the wind. It must be observed that the mass centroid velocity does not involve the mean wind velocity directly but the mean velocity associated to the pollutant flow.

3. The Study Area

The air pollution problem at the MCMA is strongly related (beside emissions) to important factors such as the geographical setting, regional orography, topography and meteorology. Mexico City, the most important part of the MCMA, lies inside a subtropical basin located between the 19.05 and 19.60 degrees of North latitude and between the 98.95 and 99.35 degrees of West longitude, with an average altitude of 2240m. It is almost completely surrounded by high mountains, as shown in Figure 1. To the north, however, the basin extends into the Mexican plateau and the arid interior of the country, with the Sierra de Guadalupe creating a small 800m barrier above the basin floor. For describing purposes, the Mexico City area is considered here as divided in the quadrants NE, NW, SW and SE which result defined by the West-East and South-North axis of the reference frame we have chosen. The origin of the reference frame has been set at the geometric center defined by the stations positions of the Mexico City atmospheric monitoring network. This point is 2 km at the NE of the Mexico City Zócalo (the main square in the heart of the historic center of the city), very close to the crossing of Circunvalación and Eje 2 OTE avenues.

The MCMA climate, on another hand, has been classified, broadly speaking, into two seasons: the rainy season from May to October, and the dry season from November to April. This classification stems from the two main meteorological patterns on the synoptic scale: dry westerly winds with anticyclone conditions from November until April, and moist flows from the east due to the weaker trade winds along the other six months [6]. The MCMA meteorology, however, is by far more complex than it is expressed by this simple classification. Important interactions of the basin with the Mexican plateau and the lower coastal areas may occur. Moreover, due to the MCMA location, large-scale pressure gradients are generally weak, and strong solar radiation is registered in this megacity throughout the year [5-9]. These conditions, combined with the surrounding mountains, are ideal for the development of thermally driven winds, such as anabatic and katabatic winds.

¹ In Mexico City, because the regional orography and the low-wind conditions that prevail very often [5, 6], air pollution may remain trapped by days in the city, particularly when thermal inversions occur.

4. Data Sources

The MCMA atmospheric monitoring system (SIMAT) has 36 stations: 24 located in Mexico City and 12 at the State of Mexico. Among them, 23 stations measure the surface concentrations of ozone (O₃), 19 measure nitrogen oxides (NO_x), 20 measure carbon monoxide (CO) and 27 measure sulfur dioxide (SO₂). The local meteorological conditions (wind speed, and direction, temperature and relative humidity) are also measured and reported by 15 stations. SIMAT provides reliable and systematic reports of the average values in an hourly basis [10].

The database we used to carry out the study comprises the hourly reports of the average meteorology parameters and concentrations of SO₂, O₃, NO_x and CO registered by SIMAT throughout March 2006. This is a database with 744 hourly events that describe the meteorology and air quality conditions which prevailed at the MCMA during the MILAGRO campaign.

5. Results and Discussion

For each hour of March 2006, the position vector of each Mexico City pollution centroid (SO₂, O₃, NO₂, NO and CO) was estimated, in practice, as the average of the positions of the monitoring stations weighted by the local fractional concentrations of the pollutant in question:

$$\mathbf{R}_\alpha = \frac{1}{C_\alpha} \sum_{i=1}^S \mathbf{x}_i c_{\alpha i} \quad C_\alpha = \sum_{i=1}^S c_{\alpha i}$$

Here, the \mathbf{x}_i ($i = 1, \dots, S$) are the positions of the stations of the air quality monitoring network, and the $c_{\alpha i}$ are the concentrations measured at those stations for the pollutant under consideration.

The set of hourly positions of each pollution centroid defines the centroid path in the study period. According to Section 2, the centroid path of a given pollutant is determined by the wind velocity field and the space-time distribution of the production mechanisms (emissions and reactions) in the study area, and also by the exchange of this pollutant between the study area and its surroundings.

5.1 Mexico City Wind Patterns during March 2006

Later, it will be interesting to compare the pathways followed by the Mexico City pollution centroids against the mean winds prevailing at the quadrants of the city during the study period. For future reference, some of the main characteristics of the Mexico City winds during the period of the MILAGRO campaign are described in this section.

Using the wind data provided by the stations of the official meteorological monitoring network (REDMET-SIMAT), a wind velocity vector for each hour of the study period was estimated for each Mexico City quadrant with boundary constrained Krigging interpolation techniques. Also a wind velocity vector was assigned to the city itself each hour. These velocities were calculated as averages of the wind velocities of the city quadrants. The frequencies

of the speeds and directions of these wind velocities are shown in Figure 2.

In Table 1, the intensity (WSP) and direction (WDR) of the mean wind velocity estimated at each Mexico City quadrant (NE, NW, SW and SE) by averaging over the hourly lapses of dawn, morning, afternoon and night of March 2006 are presented. In Figure 3, the frequencies of the main wind directions (winds from N, NE, E, SE, S, SW, W and NW) are shown for the same quadrants and lapses of the day. In the legend of the histogram, the average of wind speed over each lapse is shown for each quadrant. Note the differences of the average wind speed values with respect to the magnitudes of the mean wind velocities reported in Table 1.

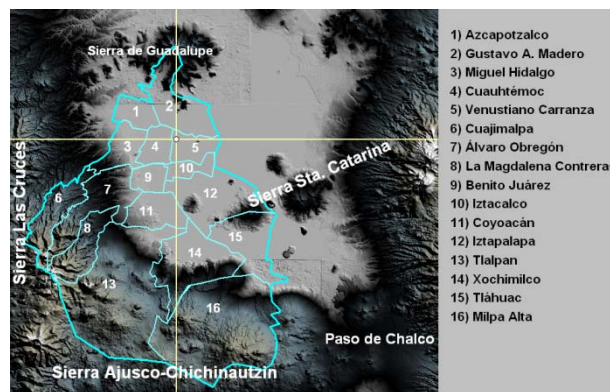


Figure 1. Topographic features of the MCMA basin and its surroundings. The Mexico City and its political division in Delegations are also shown.

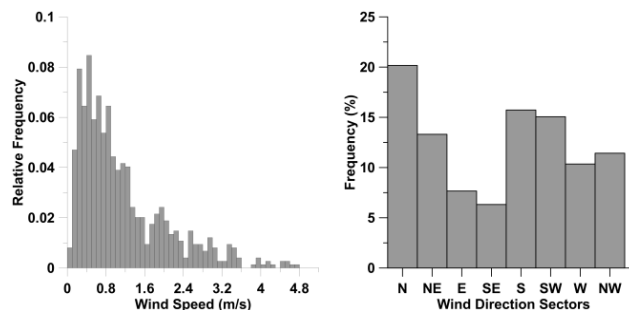


Figure 2. Frequency distributions of the spatial averages of wind speed and wind direction over Mexico City.

Table 1. Average Wind Velocities at the Mexico City quadrants during the MILAGRO campaign (March 2006).

Quadrant	Variable	Time Lapses			
		Dawn	Morning	Afternoon	Night
NE	WSP(m/s)	0.31	0.41	0.32	0.70
	WDR(°N)	15.79	58.05	92.86	28.54
NW	WSP(m/s)	0.63	0.40	0.48	1.05
	WDR(°N)	291.81	8.57	23.46	331.16
SW	WSP(m/s)	0.80	0.40	0.34	0.72
	WDR(°N)	242.99	46.29	66.79	295.86
SE	WSP(m/s)	0.30	0.33	0.54	0.15
	WDR(°N)	182.10	75.85	157.65	164.32

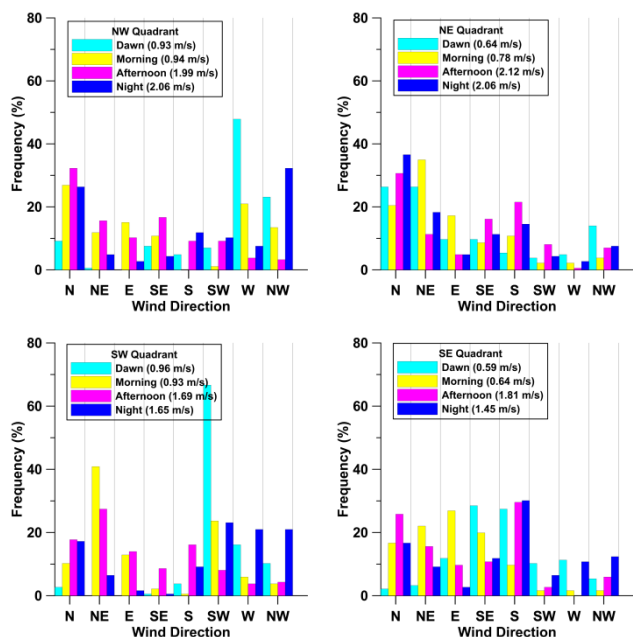


Figure 3. Frequencies of wind direction at the quadrants NW, NE, SW and SE of Mexico City during the afternoon and night lapses throughout the MILAGRO campaign (March 2006).

5.2 Clustering of the Mexico City Pollution Centroids

The spatial clustering diagrams of the ozone, nitrogen oxides, and sulfur dioxide pollution centroids, so as their frequency distributions by cardinal sectors in the city are shown in Figure 4, such as they were estimated in a previous work [3]. The frequencies of the mean wind direction are shown also in these figures (as white bar histograms), but the cardinal sectors indicate in this case the downwind directions (wind direction + 180°). In the figures, the crossing point of the dotted lines represents the origin of our reference frame.

One interesting feature we can observe in this figure is the clear difference among the spatial clustering of the air pollution centroids, which indicates that wind is not the only one neither the main mechanism to what the centroids movements are responding. This behavior is in agreement with the theoretical framework we presented above.

More interesting results emerge from the comparison of the spatial clustering of the Mexico City pollution centroids against the frequency distribution of mean wind direction in the same period. As it is shown in Figure 4, the mean wind was blowing mainly to S, N, NE and SW with frequencies of 20, 16, 15 and 13%, respectively. These sectors are also those visited by the CO centroid with the highest frequencies. For ozone, the sectors S, N and NE were also among the most visited by its centroid. These facts suggest a strong influence of the wind blowing direction on the CO and O₃ spatial distributions. On another hand, however, the clustering of the centroids of sulfur dioxide and nitrogen oxides reflect also the effect of the spatial distribution of the emission sources. This is particularly clear for SO₂ because, as it is known [2], the SO₂ emission sources are mainly located at the

Northern Delegations of the city, such as Gustavo A. Madero, Azcapotzalco and Miguel Hidalgo (Figure 1), and also at the municipalities of the State of Mexico such as La Paz, Iztapalaca, Tlalnepantla, Ecatepec and Naucalpan.

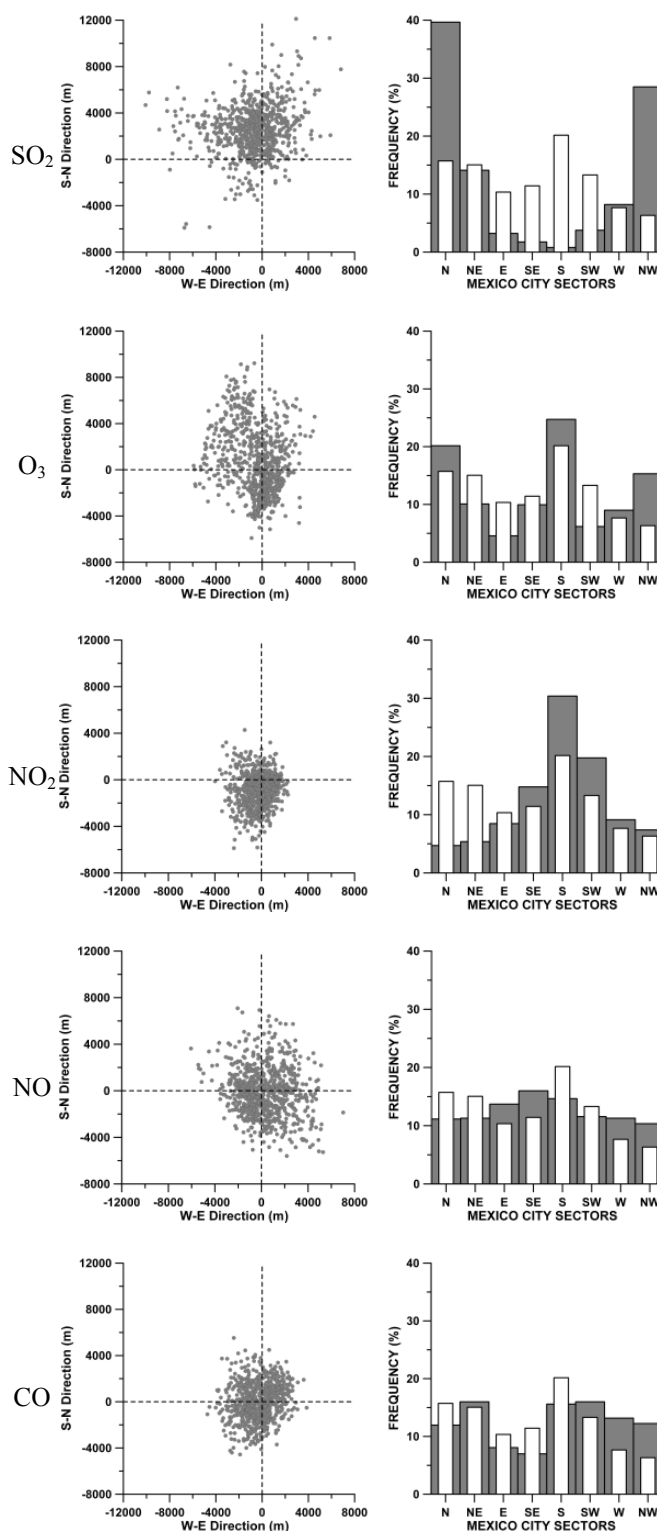


Figure 4. Spatial clustering of Mexico City pollution centroids of sulfur dioxide, ozone, nitrogen oxides and carbon monoxide during MILAGRO campaign (March 2006). White bar histograms correspond to downwind direction frequency distributions.

5.3 Pathway of the Mexico City Pollution Centroids

For each hour of the day, the monthly average position of each pollution centroid was calculated to find out the mean path it described during the study period. Figure 5 presents the 24-hour paths followed in average by the pollution centroids of SO_2 , O_3 , NO_2 , NO and CO during the MILAGRO campaign. The same paths are presented separately in Figure 6.

The plots in the first figure allow the comparison between the extensions of the paths in space and between the Mexico City quadrants they passed through; the individual plots shown in the second figure allow a more detailed view of these paths, here the centroids positions have been labeled with the hours of the day. As before, in these plots the intersection point of the dotted lines represents the origin of the reference frame we chose.

As it is observed in Figure 5, the pathways have different extensions in space and go across different quadrants of Mexico City; however, in average, all the pollution centroids followed periodic pathways with a diurnal cycle. In the next paragraphs, a description of the path of each pollution centroid is given, and Table 2 summarizes the average daily hours of presence of each centroid at each Mexico City quadrant.

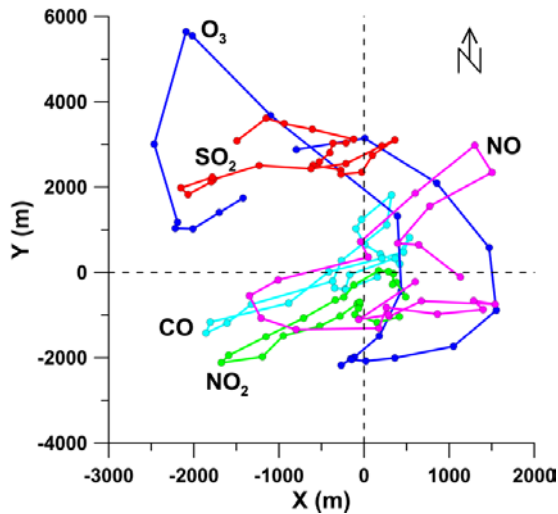


Figure 5. Mean paths of the Mexico City pollution centroids of sulfur dioxide, ozone, nitrogen oxides and carbon monoxide during MILAGRO campaign (March 2006).

Sulfur Dioxide. The path described by the SO_2 centroid is almost completely contained in the NW quadrant; only during the first three hours of afternoon the SO_2 centroid was out of this quadrant, just when it was found at the NE quadrant. Although not conclusive because the effect of the wind have to be considered, this result seems to be in agreement with the fact that the major emission sources of SO_2 in Mexico City are located in the Delegations of Gustavo A. Madero, Azcapotzalco and Miguel Hidalgo (see Figure 1), which has been already reported in the official MCMA emission inventory [2].

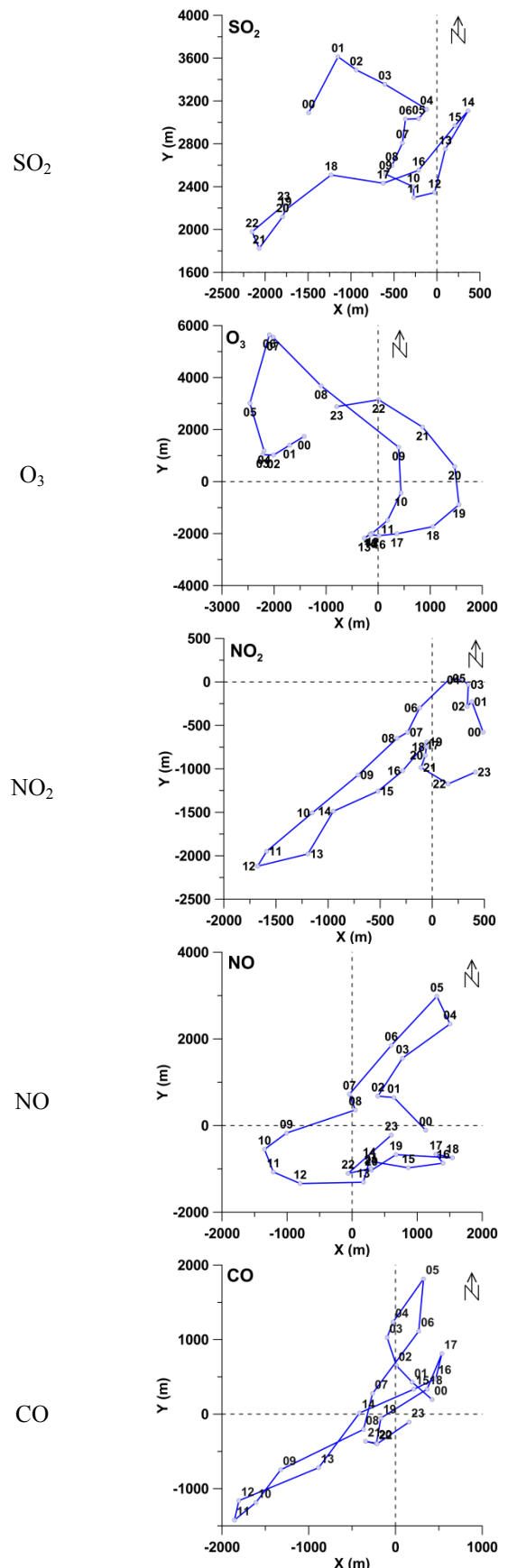


Figure 6. Average daily paths of the Mexico City pollution centroids of sulfur dioxide, ozone, nitrogen oxides and carbon monoxide during MILAGRO campaign (March 2006).

Ozone. The pathway followed by the O₃ centroid is very interesting. It had the largest extension and went across the NW, NE and SE quadrants of the city, but practically it did not visit the SW quadrant. Broadly speaking, the O₃ centroid was walking through the NW quadrant during the dawn lapse and the first hours of the morning (00-08); then, crossing through the NE quadrant very briefly, it remained walking over the SE quadrant during the hours of the morning and afternoon (09-19); after the sun went down, the O₃ centroid went back to the NE quadrant where it stayed throughout the night lapse (20-22); and finally, it went back to the NW quadrant before midnight.

Nitrogen Oxides. The NO₂ centroid walked throughout the SW quadrant almost all day long, with exception of the first hours of dawn and two hours before midnight, when it was located at the SE quadrant. The NO centroid visited during the day the NE, SW and SE quadrants of the city. It was found at the NE quadrant during the dawn lapse, crossing through the NW quadrant very briefly it went to the SW quadrant where remained until midday; then it went to the SE quadrant and stayed there during afternoon and night hours.

Carbon Monoxide. Finally, the CO centroid was found going back and forth among the NE and SW quadrants of the city almost all day. It stayed in the NE quadrant during dawn; it went to the SW quadrant and remained there during the morning and the first two hours after midday; then it went back to the NE quadrant where it remained until the sun went down; and finally, it went back again to the SW quadrant remaining there until midnight.

Table 2. Daily hours of presence of each pollution centroid at each Mexico City quadrant.

Quadrant	Pollutant	Dawn	Morning	Afternoon	Night
NE	SO ₂	0	0	3	0
	O ₃	0	1	0	3
	NO ₂	0	0	0	0
	NO	5	2	0	0
	CO	4	1	3	1
NW	SO ₂	6	6	3	6
	O ₃	6	3	0	1
	NO ₂	0	0	0	0
	NO	0	1	0	0
	CO	2	1	1	0
SW	SO ₂	0	0	0	0
	O ₃	0	0	4	0
	NO ₂	0	6	6	4
	NO	0	3	1	1
	CO	0	4	2	4
SE	SO ₂	0	0	0	0
	O ₃	0	2	2	2
	NO ₂	6	0	0	2
	NO	1	0	5	5
	CO	0	0	0	1

The results presented in Figure 6 and Table 2 may allow interesting conjectures.

Tropospheric ozone formation requires NO_x, CO or VOC (volatile organic compounds), and sunlight. Mexico City

is located in a tropical basin where clear skies are very frequent during the month of March, and then in general very high incidence of solar radiation is registered throughout the city all this month². In Table 2, it can be seen that, in average, during the morning lapse, the NO₂, NO and CO centroids were present at the SW quadrant during 6, 3 and 4 hours, respectively. Later, during the afternoon lapse, the O₃ centroid was just in that quadrant for 4 hours. This suggests that along the study period, the SW quadrant of Mexico City had better conditions than the other quadrants for the O₃ formation by photo-dissociation of the NO₂ produced via NO and CO.

At the SE quadrant, on another hand, it is observed that in going from night to early morning the number of hours of presence of the NO₂ centroid is increased from 2 to 6, while the numbers of hours that the NO and O₃ centroids were present in that quadrant decreased from 5 to 1 and 2 to 0, respectively. This suggest that the reaction of NO and O₃ producing NO₂ was the reason this behavior was observed.

6. Conclusion

An innovative approach for analyzing some of the main features of air pollution was proposed, the basics of the theory were exposed, and the methods were applied for analyzing the pathways of the pollution centroids during March 2006. The results provided evidence about the strong influence of the wind circulation and the spatial distribution of the emission sources on the spatial distribution of the pollutants concentrations. They have shown that very different clustering behavior may result for the centroids of different pollutants under the same wind circulation events. This could be important, in particular, in the study of the influence of the Mexico City air pollution on the neighboring urban settlements. Moreover, it was found that the average daily paths of the pollution centroids are periodic and follow the diurnal cycle. This has to be interpreted as the existence in the MCMA of strong time-varying wind forcings with a diurnal cycle, such as the heating of the urban soil by insolation, and the thermal effects of the mountain-valley systems. On another hand, the pathways of the pollution centroids of ozone, nitrogen oxides and carbon monoxide were able to reflect important features of the atmospheric photochemistry in this area, such the tropospheric ozone daytime production by photo-dissociation of the NO₂ produced via NO and CO, and the NO₂ nighttime production through the reaction of O₃ with NO. Viewed from another point, the pollution centroids approach may be useful in preparing the emission inventories because it could be applied for finding out the pollutant production centroids in terms of the air quality and meteorology data provided by an atmospheric monitoring network.

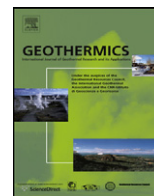
² In March 2001, for example, the mean and maximum values of global solar radiation at the NE, NW and SE quadrants of Mexico City were, respectively, 266, 236 and 210 W/m², and 1022, 938 and 894 W/m² [5].

Acknowledgement

One of us (SCS) acknowledges the partial economical support received from the Instituto de Investigaciones Eléctricas.

References

- [1] United Nations Environment Programme and World Health Organization, *Urban Air Pollution in Megacities of the World* (Blackwell Publishers, Oxford, 1992).
- [2] *Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México* (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, 2006).
- [3] A. Salcido, A.T. Celada-Murillo, S. Carreón-Sierra & C.D. Salcido-Merino, Brief Analysis of Spatial Clustering of Mexico City Air Pollution Centroids during MILAGRO Campaign. *Proc. of the IASTED International Conference Modelling, Simulation, and Identification (MSI 2011), Pittsburgh, USA, 2011, 198-207. DOI: 10.2316/P.2011.755-022.*
- [4] L.T. Molina, S. Madronich, J.S. Gaffney, E. Apel, B. de Foy, J. Fast, R. Ferrare, S. Herndon, J. L. Jimenez, B. Lamb, A.R. Osornio-Vargas, P. Russell, J. J. Schauer, P. S. Stevens, R. Volkamer & M. Zavala, An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 2010, 8697–8760.
- [5] A. Salcido, A.T. Celada, R. Villegas, H. Salas, R. Sozzi & T. Georgiadis, A micrometeorological database for the Mexico City Metropolitan Area, *Il Nuovo Cimento*, 26C(3), 2003, 317-355.
- [6] E. Jáuregui, Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin, *Atmósfera*, 1, 1988, 131-140.
- [7] B. de Foy, E. Caetano, V. Magaña, A. Zitácuaro, B. Cárdenas, A. Retama, R. Ramos, L.T. Molina & M.J. Molina, Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2005, 2267-2288.
- [8] T.R. Oke, G. Zeuner & E. Jauregui, The Surface Energy Balance in Mexico City, *Atmos. Environ. Part B – Urban Atmosphere*, 26, 1992, 433-444.
- [9] E. Jauregui & E. Luyando, Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City, *Int. J. Climatol.*, 19, 1999, 683-694.
- [10] Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. <http://www.sma.df.gob.mx/simat>.



H₂S emissions from Cerro Prieto geothermal power plant, Mexico, and air pollutants measurements in the area

Oscar Peralta^{a,*}, Telma Castro^a, Matilde Durón^b, Alejandro Salcido^c, Ana-Teresa Celada-Murillo^c, Rafael Navarro-González^d, Claudia Márquez^a, José García^a, José de la Rosa^d, Ricardo Torres^a, Raymundo Villegas-Martínez^c, Susana Carreón-Sierra^c, Mireya Imaz^e, Amparo Martínez-Arroyo^a, Isabel Saavedra^a, María de la Luz Espinosa^a, Alejandro Torres-Jaramillo^f

^a Aerosoles Atmosféricos, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 México, DF, Mexico

^b Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, Mexico

^c Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, Mexico

^d Laboratorio de Química de Plasmas y Estudios Planetarios, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Apartado Postal 70-543, 04510 México, DF, Mexico

^e Programa Universitario de Medio Ambiente, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 México, DF, Mexico

^f Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 May 2012

Accepted 14 December 2012

Keywords:

Cerro Prieto geothermal plant

Environmental concentration of H₂S

Air pollution

AERMOD dispersion modeling of H₂S

ABSTRACT

We measured meteorological parameters and environmental concentrations of hydrogen sulfide (H₂S) and criteria pollutants at Cerro Prieto, Mexico, from May to July 2010. In addition, non-condensable gases from vent stacks at Cerro Prieto geothermal power plant were sampled and analyzed by gas chromatography–mass spectrometry. A dispersion model, which was validated with environmental measurements, was applied to H₂S. Criteria pollutants never exceeded the Mexican air quality standards. Results from dispersion modeling were compared against measured concentrations showing acceptable agreements for Chi square goodness of fit (χ^2) in the 95% significance level ($\alpha = 0.05$), at afternoons and evening events when boundary layer is decreasing and wind speed is less than 5.5 m s⁻¹. Determination coefficient of curve fitting for computed concentrations at less than 4 km from the source was 0.513 and farther 0.568. This study was the first to measure criteria pollutants and H₂S in Cerro Prieto area.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

One of the most important environmental issues related to the use of geothermal fluids to generate electricity is the emission of non-condensable gases to the atmosphere. Vent stacks from geothermal plants emit carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) causing concern because of their role as greenhouse gases, despite those emissions are quite small compared to carbon and fossil fuel plants, indicating that geothermal emissions are practically negligible (Miller and Van Atten, 2004).

Geothermal power plants also emit hydrogen sulfide (H₂S) in relative high amounts. It has an unpleasant odor even at very low concentrations; so it can be detected far away from the source (Noorollahi, 1999; Kristmannsdóttir et al., 2000; Thorsteinsson et al., 2012). In humans, H₂S is unlikely to bio-concentrate in the

food-chain because it is excreted through the urine, intestines and expired air (World Health Organization, 2000). However, at high concentrations it may irritate and injure eyes (10 ppm), membranes of upper respiratory tracts (50–100 ppm), and lead to loss of smell (150 ppm) (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2006).

H₂S is not considered an air pollutant in Mexico. In fact, there is no local or federal standard for H₂S environment concentrations. Criteria pollutants (O₃, NO_x, CO, SO_x, and Pb) and particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) are the species involved in the air quality assessment in the country (Environmental Protection Agency, 2010a; Secretaría de Salud, 2012). Despite some of them are not related to geothermal power plant emissions, it is important to measure the air quality around any electric power generation facility in order to know its potential impact on the environment.

Atmospheric emissions from geothermal power plants generally cover many different point sources: silencers, cooling towers, pipe leaks, and vent stack, among others. In this work, only emissions from vent stacks were measured and taken into account to apply the dispersion model. Non-condensable gases were sampled at stacks and chemically analyzed to estimate the Cerro Prieto

* Corresponding author at: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito exterior s/n, 04510 Coyoacán, Ciudad Universitaria, México, DF, Mexico. Tel.: +52 55 5622 4056; fax: +52 55 5622 4079.

E-mail address: oscar@atmosfera.unam.mx (O. Peralta).

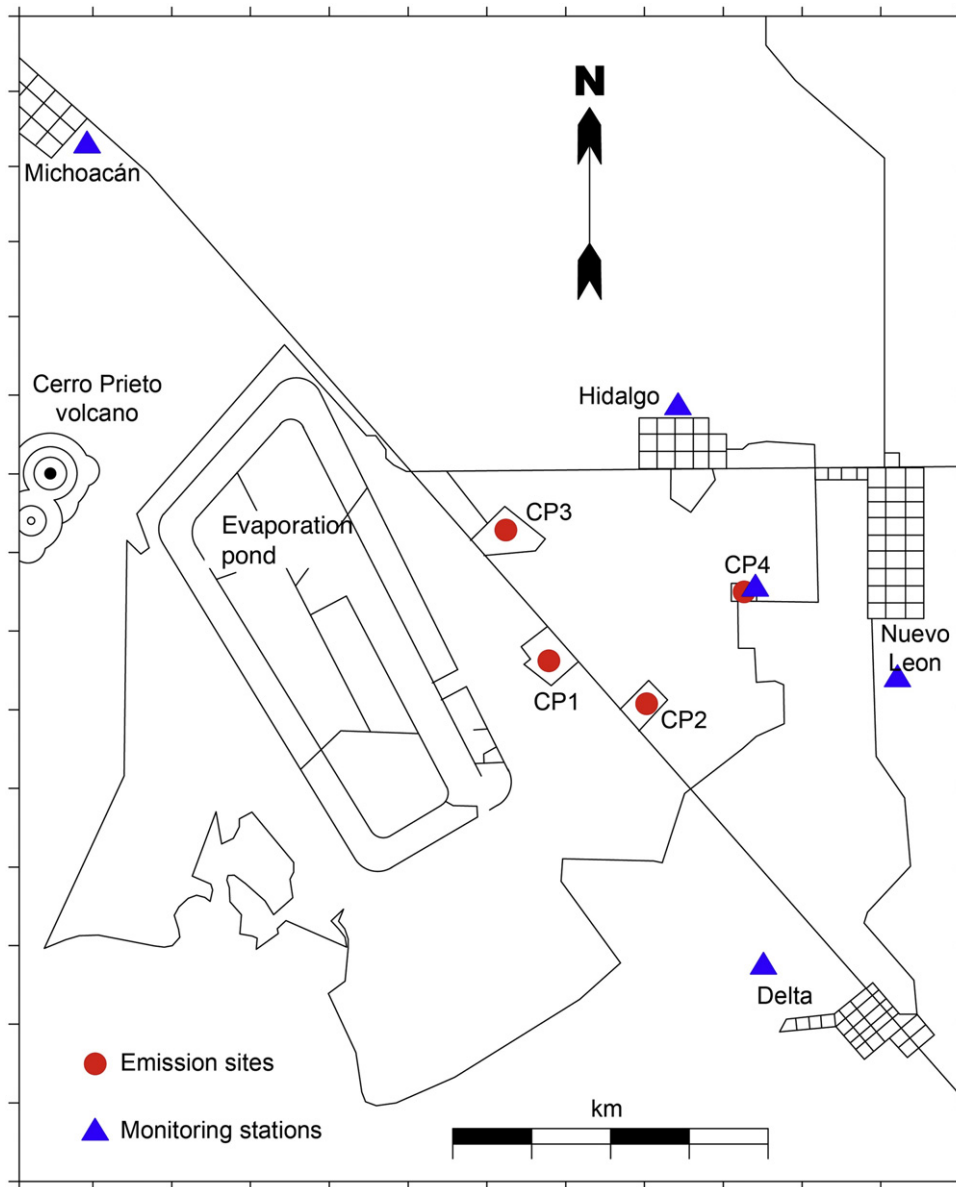


Fig. 1. Cerro Prieto geothermal power plant emission sites and monitoring stations.

geothermal power plant (CP) emissions, and AERMOD program was applied to model the H_2S dispersion in the area to assess its atmospheric impact. Also, we measured meteorological parameters and the following gas pollutants: ozone (O_3), nitrogen dioxide (NO_2), nitrogen monoxide (NO), sulphur dioxide (SO_2), carbon monoxide (CO), hydrogen sulfide (H_2S), and methane (CH_4) to evaluate the environmental impact in the area.

1.1. Study area

The area is delimited by 32.15 – 32.60° north latitudes and 115.45 – 115.00° west longitudes. The terrain is flat with rural and semi-urban activities. Exceptions to this are the northwest area, where Mexicali is situated, and the Cucapah Mountain to the west, with a 900 m average high above ground level, including the Cerro Prieto volcano (Hiriart and Gutiérrez-Negrín, 2003). There are no major water bodies in the area, except for the evaporation pond at the geothermal field (Fig. 1). The study area was divided into five sectors covering all municipalities around the geothermal field (Fig. 2). Center sector covered a 5 km radius from CP and includes

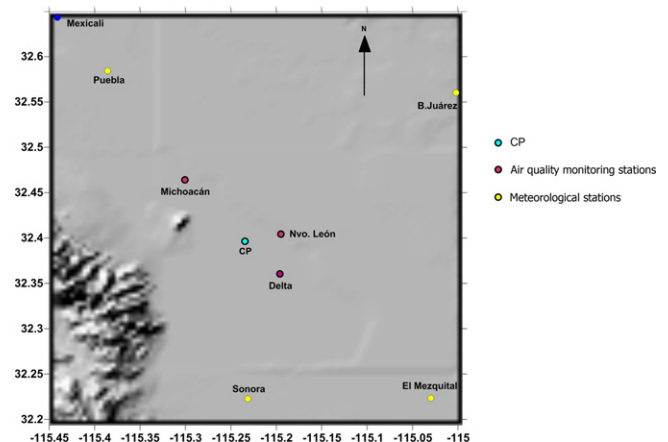


Fig. 2. Study area.

the geothermal field (32.43°N, 115.23°W) and Hidalgo municipality (32.41°N, 115.22°W). Northeast sector (NE) covered Puebla (32.58°N, 115.38°W) and Michoacán (32.46°N, 115.30°W) municipalities. Northwest sector (NW) spanned on Benito Juárez (32.56°N, 115.00°W) and Nuevo León (32.42°N, 115.19°W) municipalities. Southeast sector (SE) extended over Delta (32.36°N, 115.20°W) and Mezquital (32.23°N, 115.10°W) municipalities. Southwest sector (SW) encompassed Sonora municipality (32.22°N, 115.23°W) and part of Cucapah Mountain.

1.2. Cerro Prieto geothermal power plant

The geothermal facility (CP) is one of the largest geothermal power plants in the world. The facility is located at Baja California, Mexico, roughly 30 km south of Mexicali and the international boundary between Mexico and United States. CP has 13 units grouped in four individual powerhouses. Previous reports of CP mention an installed capacity of 720 MW (Bertani, 2012). Cerro Prieto 1 (CP1) had a total installed capacity of 180 MW, generated by four 37.5 MW units and one 30 MW unit (Units 1–5). Cerro Prieto 2 (CP2) powerhouse had a total installed capacity of 220 MW, generated by two 110 MW units (Units 6 and 7). Cerro Prieto 3 (CP3) had a total installed capacity of 220 MW, generated by two identical units (Units 8 and 9) as CP2. Cerro Prieto 4 (CP4) consisted of four identical turbines (Units 10–13) with 25 MW capacities each one connected to a general vent stack.

In 2002, the geothermal field had 138 production wells generating 47.5 million tons of steam, with an average production rate of 5418 tons per hour. In 2003, CP generated around 4934 GWh (Hiriart and Gutiérrez-Negrín, 2003). In 2007, García et al. (2007) reported 162 integrated wells. Table 1 shows powerhouse ages, year commissioning, and gas extraction systems employed at CP. Units 1–5 use ejectors to extract gases. Units 6–9 use turbo compressors and Units 10–13 have a hybrid system to extract non-condensable gases. Table 1 also shows what units were operating when the measuring campaign. Units 1–4 are officially out of service since February 2011. (See Arellano et al. (2011) for other information regarding the field.)

2. Methodology

The project consisted in four measuring campaigns: meteorology, vent stream gases, environmental concentrations of H₂S, and

criteria pollutants (CO₂, O₃, NO₂, NO, SO₂, CO and CH₄). Hydrogen sulfide measuring results were used to evaluate the dispersion modeling accuracy.

2.1. Meteorology

Five meteorological stations with 3D ultrasonic thermo-anemometers were placed in the area to measure ambient temperature and wind speed and direction. Fig. 1 shows the location of stations. The Center station was equipped additionally with sensors for pressure, humidity and solar radiation. Meteorological parameters were measured from 19 May 2010 to 29 July 2010. Table 2 lists the instrumentation on meteorological stations. At Center sector station meteorological variables were measured with 1 Hz frequency, and on the others the orthogonal components of wind velocity and temperature were measured with 10 Hz frequency.

Data provided by the meteorological network was organized according to a meso-β scale lattice wind model (Celada and Salcido, 2009; Salcido and Celada, 2010; Salcido et al., 2010), which was used to perform the wind pattern analysis. The study area was considered a four cells 2D lattice and local wind conditions were represented as discrete wind states (DWS) defined by four parameters: speed (v), direction (θ), divergence (γ), and vorticity (ω). Each parameter was expressed in terms of a discrete measuring scale. Wind speed was expressed in the Beaufort scale. Wind direction was sorted in eight sectors scale: N=0, NE=1, E=2, SE=3, S=4, SW=5, W=6 and NW=7. Divergence was categorized as convergent wind=0, null divergence wind=1, and divergent wind=2. Vorticity was classified in anticyclonic wind=0, null vorticity wind=1, and cyclonic wind=2. Each DWS is denoted by v : θ : γ : ω , or a non-negative integer ε given by

$$\varepsilon = \omega + 3[\gamma + 3(\theta + 8v)]$$

DWS main patterns observed on the meteorological campaign were identified using hierarchical cluster analysis techniques, applied with the statistical analysis software DataLab (<http://www.lohninger.com/datalab/>).

Four radiosondes (Vaisala) were launched daily (17–28 July 2010) to provide vertical profiles of wind speed and direction, temperature, pressure, and relative humidity. This information was used to estimate the mixed layer evolution with a methodology proposed by Salcido et al. (2003).

Table 1
Cerro Prieto power capacity and emission rates.

Unit	Powerhouse	Year commissioning	Capacity (MW)	Condenser exhaust	Gas extraction	Operation on 2010	Stack height (m)	Stack internal diameter (m)	Stack gases temperature (°C)	Gases average velocity (m/s)	Flow (m ³ /s)
1	CP1	1973	37.5	Barometric	Ejectors	No					
2	CP1	1973	37.5	Barometric	Ejectors	No					
3	CP1	1979	37.5	Barometric	Ejectors	No					
4	CP1	1979	37.5	Barometric	Ejectors	No					
5	CP1	1982	30	Low level	Ejectors	Yes	54.71	0.406	52	5.66	0.73
6	CP2	1986	110	Low level	Turbo compressor	Yes	40.23	0.305	115	23.1	1.69
7	CP2	1987	110	Low level	Turbo compressor	Yes	40.23	0.305	109	25.07	1.83
8	CP3	1986	110	Low level	Turbo compressor	Yes	40.23	0.305	115	36.39	2.66
9	CP3	1986	110	Low level	Turbo compressor	Yes	40.23	0.305	116	30.04	2.19
10	CP4	2000	25	Low level	Hybrid	Yes	54.86	0.609	56	8.09	2.36
11	CP4	2000	25	Low level	Hybrid	Yes					
12	CP4	2000	25	Low level	Hybrid	Yes					
13	CP4	2000	25	Low level	Hybrid	Yes					

Table 2
Equipment on meteorological and monitoring stations.

Equipment	Brand	Model	Sampling frequency (Hz)
Ultrasonic anemometer 3D	METEK	USA1	10
Thermometer RTD	RM Young	43347	1
Thermo hygrometer	Vaisala	HMP45C	1
Barometer	Vaisala	PTA101B	1
Pyrometer	LICOR	LI200X	1
Data acquisition	Campbell Scientific	CR10X	
Data acquisition system	AXIOM		
Meteorological data management software	TECALCO	Siranda μ Met	
Meteorological tower (10 m high)	Campbell Scientific	UT30	
Monitoring stations			
Manometer	Vaisala	PTB101B	± 5 mb
Wind speed	Climatronics	F460 (P/N 100075)	± 0.07 m s ⁻¹
Wind direction	Climatronics	F460 (P/N 100076)	$\pm 2^\circ$
Pyanometer	Li-Cor	Pyranometer	90 ± 5 W m ⁻²
O ₃ analyzer	API	400	0.03 ppb
NO _x —NO—NO ₂ analyzer	TEI	42 °C	0.5–3 ppb
CO analyzer	TEI	48 °C	0.02 ppb
SO ₂ analyzer	TEI	43 °C	ppb
CH ₄ and non-CH ₄ hydrocarbons analyzer	TEI	55 °C	20 ppb CH ₄ 50 ppb non-CH ₄
H ₂ S analyzer	Jerome	631-X	ppm
CO ₂ analyzer	PP Systems	Ciras 2	ppm
Air-pointer O ₃ analyzer	Thermo Scientific	EN 14625	0.5 ppb
Air-pointer NO, NO ₂ analyzer	Thermo Scientific	EN 14211	0.4 ppb
Air-pointer SO ₂ analyzer	Thermo Scientific	EN 14212	0.5 ppb
Air-pointer barometer	Vaisala	WXT 520	0.5 hPa
Air-pointer anemometer	Vaisala	WXT 520	$\pm 3^\circ$
Air-pointer anemometer	Vaisala	WXT 520	± 0.3 m s ⁻¹
Air-pointer thermometer	Vaisala	WXT 520	± 0.3 °C

2.2. Sampling and analysis of vent stream gases

We measured gases velocity and temperature, and sampled gases in the closest sampling ports to the venting stacks exit. On Unit 5, the sampling port is six meters away from the pipe elbow that goes to the venting stack. On Units 6, 7, 8, and 9 sampling ports are on the venting stacks ten meters above the ground and 30 m away from the stacks exit. The sampling port on CP4 general stack is 6 m above the ground and 48 m away from the stack's exit.

Gas samples were collected in 1000 ml Pyrex round flasks with Teflon stopcocks, previously vacuum pumped to 10^{-3} mbar (ASTM E1675-95a, 1995) to capture them directly from the stacks. Analysis was performed by gas chromatography–mass spectroscopy. Gases were injected into the gas chromatograph (Hewlett Packard, 5890 series) by a six-port gas-sampling valve with a gas loop of 10 ml, and detected by a quadruple mass spectrometer (Hewlett Packard, model 5989B) operating by electron impact at 70 eV. The carrying gas was helium with ultra-high purity (99.9995%) at a constant flow of 2 ml min⁻¹. To identify the substances, the spectra obtained were compared with the mass spectra library Wiley 138 and NIST version 5.0. CO₂, CH₄, H₂S, and C₂-hydrocarbons were used to calibrate the system with gas mixtures at various concentrations using a Linde mass flow measuring and control gas blending console (FM4660) equipped with fast response mass flow control modules (FRC) of 20 cm³ min⁻¹ capacity. The remaining gases were quantified based on the CO₂ response. The chemical compounds determined by chromatography–mass spectroscopy were nitrogen (N₂), oxygen (O₂), methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂), ethane (C₂H₆), hydrogen sulfide (H₂S), propane (C₃H₈), and benzene (C₆H₆).

2.3. Environmental concentration of H₂S

A Jerome 631-X (Arizona Instruments LLC, 2004) was used to determine the atmospheric concentrations of H₂S. The instrument was calibrated previously based on the Jerome's operation

manual. H₂S was measured with continuous readings for 12 h at Delta (SE), Nuevo León (NE), Michoacán (NW), and Hidalgo (Center) in automatic mode with two minutes frequency. We also took measurements of atmospheric H₂S on several points around the geothermal field, covering approximately a 700 km² circle with 15 km radius with CP at the center's circle.

2.4. Dispersion modeling

AERMOD is a steady-state plume model that incorporates air dispersion based on planetary boundary layer turbulence structure and scaling concepts, including treatment of both surface and elevated sources, and both simple and complex terrain. It is recommended by EPA (2004) for use in regulatory studies. Meteorology data required by AERMOD were obtained directly from the meteorological station at Center sector. Also, radiosondes provided information on wind vertical profiles and data to estimate the convective mixed layer height (Salcido et al., 2003).

2.5. Criteria pollutants

We used the meteorological information obtained from May to June 2010 to place the monitoring stations in a system oriented toward the source. An air-pointer instrument measured SO₂, NO_x, O₃, and basic meteorological parameters (temperature, relative humidity, wind speed and direction). It was placed at Nuevo León and operated from 3 July 2010 to 15 July 2010. Also, two mobile units (with SO₂, NO_x, and O₃ analyzers) were placed at Delta and Michoacán. They operated from 18 July 2010 to 29 July 2010. The measurement procedures and sampling probes installation were established according to criteria recommended by the United States Environmental Protection Agency (EPA, 2010b). Table 2 lists the instruments placed on each monitoring site.

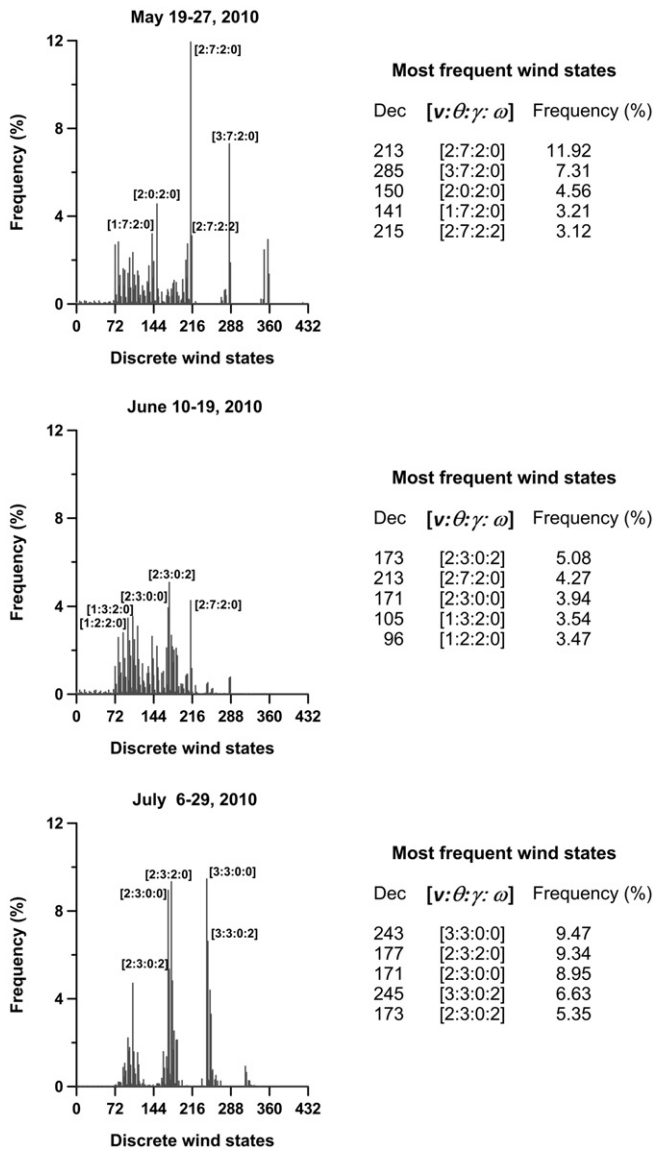


Fig. 3.

3. Results

3.1. Meteorology

The meteorological analysis considers 11,480 1 min average wind events from May, 12,049 from June, and 29,038 from July. DWS histograms are shown in Fig. 3. Divergent anticyclonic northwesterly wind, slower than 5.5 m s⁻¹, had 30% frequency of occurrence on May 2010. Anticyclonic southeasterly wind, slower than 3.5 m s⁻¹, was the most common, with 20% probability of occurrence and divergent anticyclonic behavior on June 2010. Convergent southeasterly wind, slower than 5.5 m s⁻¹, was the most frequent with 40% of occurrence on July 2010.

The mixed layer reaches its minimum level 50 m above the ground at midnight, and the maximum, 1300 m, at noon. Fig. 4 shows the best fitting of mixed layer evolution obtained with a semi-empirical model, where *t* denotes the Julian time (Salcido et al., 2003).

$$H_m(t) = 574.46 + 486.95 \sin[2\pi(t - 1.25)]$$

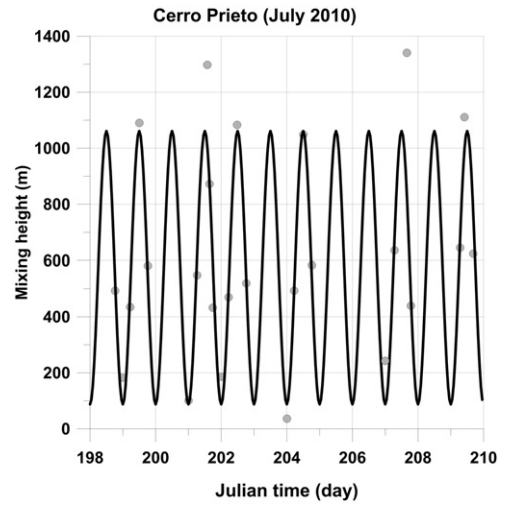


Fig. 4.

3.2. Vent stream

Units 1–4, at CP1, were out of service during the sampling period and they were not considered in the emission inventory or the dispersion modeling. We sampled directly non-condensable gases at the vent stacks on Units 5–13. Each powerhouse has its own steam supply and all the units in a powerhouse receive the same kind of geothermal fluid. Unit 5 uses an ejector, and Units 6–9 turbo compressors to expel the non-condensable gases out from their systems. As a regular operation on all of those units, air from the environment is introduced into the system to maintain the pumps at operating conditions, mixing air with non-condensable composition gases expelled from the turbine. Units 10–13 use a hybrid system to eject non-condensable gases (Table 1). Accordingly, composition of gases in some of the vent duct samples contain higher amount of N₂ and O₂ than other taken directly from production wells (Ellis and Mahon, 1977; Glassley, 2010), where there is no air mixing or interference.

Table 3 shows the average chemical composition in mole percent of non-condensable gases at each powerhouse. We calculated the flow rates using gas velocity measurements and gas analyses, with the following equations:

$$S_A = \pi r_A^2$$

$$F_A = v_A \times S_A$$

$$F_i = F \times x_i \times M_i$$

where *r_A* is the stack's internal radius, *S_A* is the stack's surface area, *v_A* is the gas velocity, and *F_A* is the flow gas at stack *A*. The emission source, *F_i*, for *i* component was calculated with its molar fraction, *x_i*, and its molecular weight, *M_i*. We estimated CP emission sources

Table 3
Average chemical composition of vent stream (mole percent).

Peak	Compound	Formula	CP1	CP2	CP3	CP4
1	Nitrogen	N ₂	26.76	18.34	9.84	8.71
2	Oxygen	O ₂	18.55	12.20	6.21	5.94
3	Methane	CH ₄	15.77	19.06	26.90	27.92
4	Carbon dioxide	CO ₂	31.14	45.27	42.12	36.36
5	Ethane	CH ₃ –CH ₃	0.09	0.10	0.13	0.13
6	Hydrogen sulfide	H ₂ S	7.17	3.15	11.44	17.47
7	Propane	CH ₃ –CH ₂ –CH ₃	0.02	0.02	0.02	0.02
8	Benzene	C ₆ H ₆	0.04	0.06	0.14	0.13

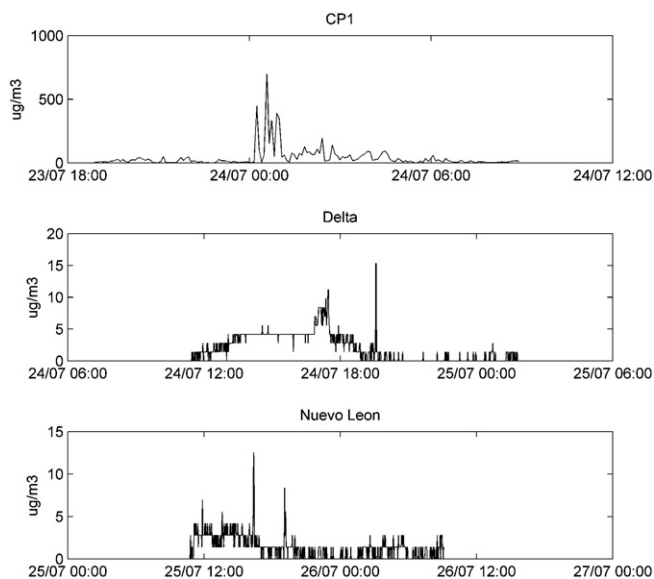


Fig. 5.

around 57 Gg of CH_4 , 277 Gg of CO_2 , and 52 Gg of H_2S to the atmosphere per year. However, the emissions are quite small compared to carbon and fossil fuel plants indicating that geothermal emissions are practically negligible (Miller and Van Atten, 2004). For instance, one of the most important facilities in Mexico, Francisco Perez Rios energy plant at Tula, 80 km to the NW of Mexico City, consumes fossil fuel and has an installed capacity of 1500 MW generating annually around 5983 Gg of CO_2 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009).

3.3. Environmental concentration of H_2S

We measured H_2S at CP1 and four other points around the geothermal field. At CP1, the 24-h average concentration was 0.027 ± 0.57 ppm ($41 \pm 86 \mu\text{g m}^{-3}$). At Hidalgo, 1.2 km toward the east from the geothermal plant, the average concentration was 0.030 ± 0.045 ppm ($45 \pm 67 \mu\text{g m}^{-3}$). Delta municipality is toward the southeast, 6.7 km away from the plant. It had an average concentration of 0.001 ± 0.002 ppm ($2 \pm 2 \mu\text{g m}^{-3}$). Nuevo León is toward the east, 4.3 km away from the plant, where we registered an average concentration of 0.001 ± 0.001 ppm ($1 \pm 1 \mu\text{g m}^{-3}$), and Michoacán, 9.8 km toward the northwest, recorded an average concentration of 0.004 ± 0.010 ppm ($6 \pm 15 \mu\text{g m}^{-3}$).

Concentration peaks of H_2S were measured at CP1 (0.500 ppm = $750 \mu\text{g m}^{-3}$) and Hidalgo (0.380 ppm = $570 \mu\text{g m}^{-3}$). They were measured at night when the boundary layer reaches its minimum height. The concentration peaks on July 24 and July 27 matched with slow wind that prevents the H_2S dispersion over a larger area. Average and maxima H_2S concentrations measured at the five measuring sites are shown in Table 4. Figs. 5 and 6 show time series of environmental concentrations measured at each point. Also, we measured environmental concentrations of H_2S at 136 points around the geothermal plant and plotted them with a Surfer mapping program (<http://www.goldensoftware.com/>) to establish concentration areas. Fig. 7 shows lines of concentration and two perimeters around the geothermal plant (5 and 15 km). Since we measured H_2S at different times, Fig. 7 represents a spatial distribution of H_2S around CP.

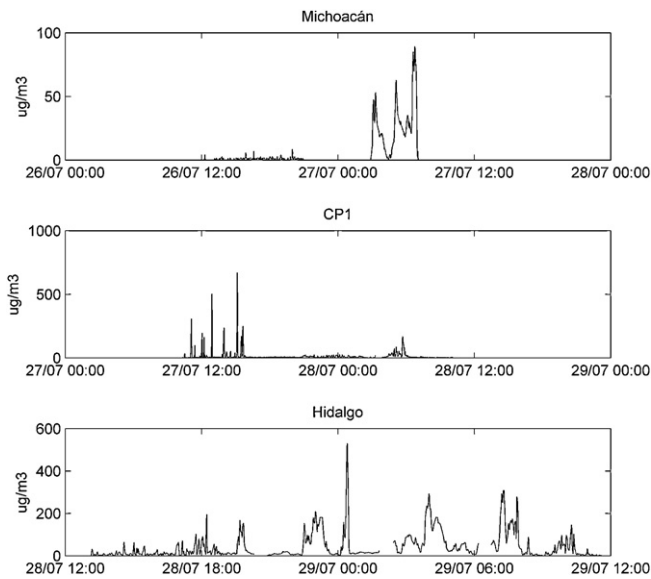


Fig. 6.

3.4. Dispersion modeling of H_2S

AERMOD dispersion model was applied every hour from 19 May 2010 to 28 July 2010 with data provided by our meteorological network and mixed layer values estimated with the semi-empirical model described in Section 3.1. CP emission rates were considered constant, so the variability observed in the distribution of surface concentrations from 1 h to another is due solely to changes in meteorological conditions and temporal evolution of the boundary layer. AERMOD simulated 312 h for May, 720 h for June, and 679 h for July 2010.

Fig. 8 shows average concentrations of H_2S sorted by dawn (00:00–05:59), morning (06:00–11:59), afternoon (12:00–17:59) and evening (18:00–23:59). The H_2S plume spreads to NE sector at night and dawn, reaching Michoacán and Nuevo León with concentrations around $50 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.033 ppm), and stays over CP at morning and afternoon, with an environmental concentration of $40 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.027 ppm). Plume dispersion modeling results show a continuous impact of H_2S on Michoacán and Nuevo León municipalities, but concentrations ranged from 10 to $50 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.007 – 0.033 ppm). The determination coefficients of linear fitting are shown in Table 5.

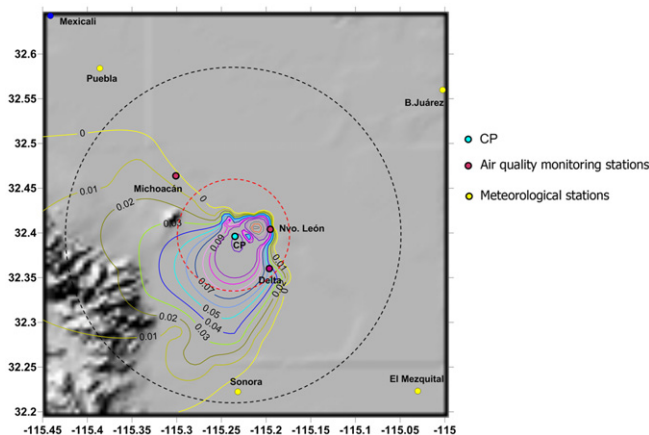


Fig. 7.

Table 4
Environmental concentration of H₂S.

Site (sector)	Date	Measuring frequency (min)	Sampling time (h)	Average concentration (ppm)	H ₂ S measured range (min–max) (ppm)
CP1 (center)	07/23/2010	5	15	0.027	0.000–0.500
	07/27/2010	2	24	0.010	0.000–0.480
Delta (SE)	07/24/2010	1	14	0.001	0.000–0.011
Nuevo León (NE)	07/25/2010	2	23	0.001	0.000–0.009
Michoacán (NW)	07/26/2010	2	21	0.004	0.000–0.064
Hidalgo (Center)	07/28/2010	2	22	0.030	0.000–0.380

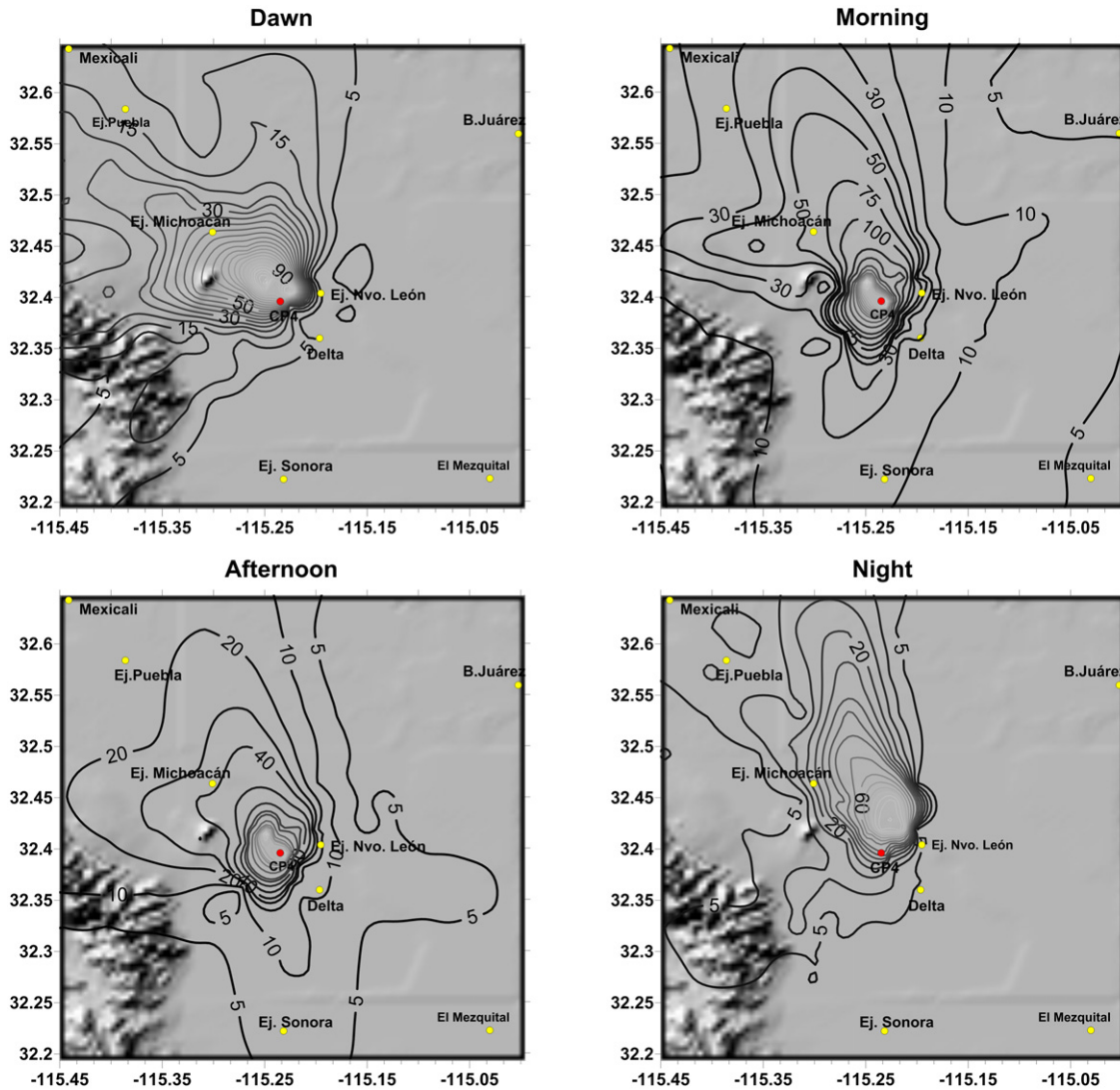


Fig. 8.

Table 5
Linear regression parameters.

Linear regression $f(x) = p_1 \times x + p_2$	p_1	p_2	Sum of squares due to error (SSE)	Determination coefficient (R^2)
Data > 4 km (Delta, Nuevo León, and Michoacán)	1.768	1.27	114.8	0.5683
Data < 4 km (CP1 and Hidalgo)	2.336	12.642	4400	0.5131

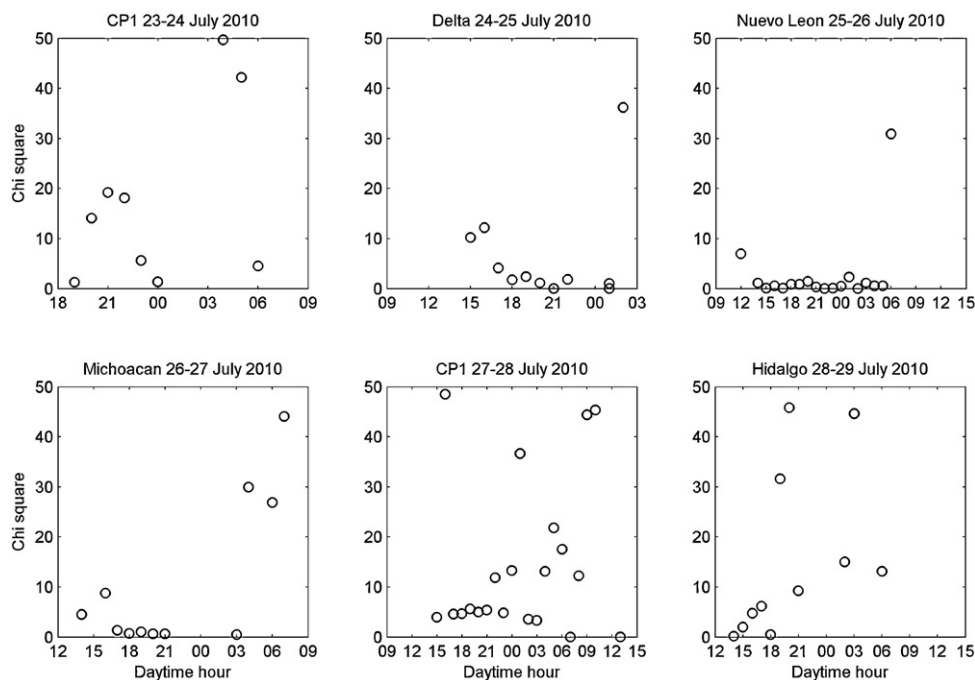


Fig. 9.

3.5. Dispersion model validation

We used environmental concentrations of H_2S measured at five sites as receptors to evaluate the agreement of AERMOD dispersion model. The goodness of fit (χ^2) was the statistical tool to validate the dispersion modeling results. The following equation was used to calculate Chi square (χ^2):

$$\chi^2 = \frac{(o - e)^2}{e}$$

$$H_0 : F_o = F_e$$

$$H_1 : F_o \neq F_e$$

where o represents the observed (measured) and e the expected values. The goodness of fit indicates when the null hypothesis (H_0 , measured and modeled values are equal) is accepted or not. F_o and F_e represent the frequency of observed and expected data, respectively. The degrees of freedom (ν) were set on 18, corresponding to each variable used on the dispersion model minus one. So, for a 95% of confidence ($\alpha = 0.05$), and $\nu = 18$, $\chi^2 = 28.869$. Fig. 9 shows the Chi square values by hour on classified by measuring site, where direct measurements of H_2S took place.

In general, good model-measured value agreements occur at afternoon-evening. At that time the boundary layer is decreasing to its minimum height and the wind speed and direction are stable or maintain values within a narrow range slower than 5.5 m s^{-1} . On the other side, at night–morning events dispersion modeling does not match with measured values. At that time, the boundary layer height is increasing and has an unstable behavior, and wind speed and direction are constantly changing.

Also, a plot comparison of H_2S measured and calculated concentrations are shown in Fig. 10. Linear regression was applied to data sorted in two groups: (a) concentrations measured at less than 4 km from CP, and (b) farther than 4 km. Also, values higher than $50 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.033 ppm) were not taken into account. So, Hidalgo and CP data are in the first group, while Nuevo León, Delta, and Michoacán concentrations are in the second group. Table 5 shows the main results of linear fitting. Close to CP, computed concentrations overestimate measured values by a factor of 2.336 and

the determination coefficient is 0.5683; meanwhile away from the source the model overestimate measured concentrations by a factor of 1.768, but linear regression has a determination coefficient of 0.5131.

3.6. Criteria pollutants

Monitoring stations worked continuously throughout July 2010 and never registered any concentration above the Mexican health standards (Secretaría de Salud, 2012). Criteria gases (O_3 , SO_2 , NO , and NO_x) follow similar daily evolution, and events with high concentrations match on day and time for all pollutants, indicating that they are linked to local activities, not to CP. Fig. 11 shows the time series for concentrations of criteria pollutants and Table 6 summarizes the statistical results for the monitoring period.

4. Discussion

During the meteorological campaign, north-northwesterly wind prevailed on May 2010 and changed to south-southeasterly on July 2010. The most common wind speeds ranged from 1.5 to 3.5 m s^{-1} . The boundary layer height evolved from 100 m (at 00:00) to 1300 m (at 12:00) above ground level, following closely diurnal cycles. So, although the boundary layer was relatively small, wind rapidly diluted the chemical species around CP.

Hydrocarbons detected in non-condensable gases agree with other studies done to geothermal fluids at CP, like Nehring and Fausto (1979) and Des Marais et al. (1988), because they are originated on sedimentary geothermal aquifers. Also, non-condensable gases samples differ on CO_2 , N_2 and O_2 from previous studies (i.e., Ellis and Mahon, 1977; Glassley, 2010) at Cerro Prieto. Perhaps one reason is the sampling site; we sampled at vent stacks, that is at the discharge point of gases, and other studies report gases composition from production wells, before the geothermal fluids be feed to the powerhouses.

There are significant amounts of N_2 and O_2 in vent gases samples, probably caused by the expelling systems employed at CP,

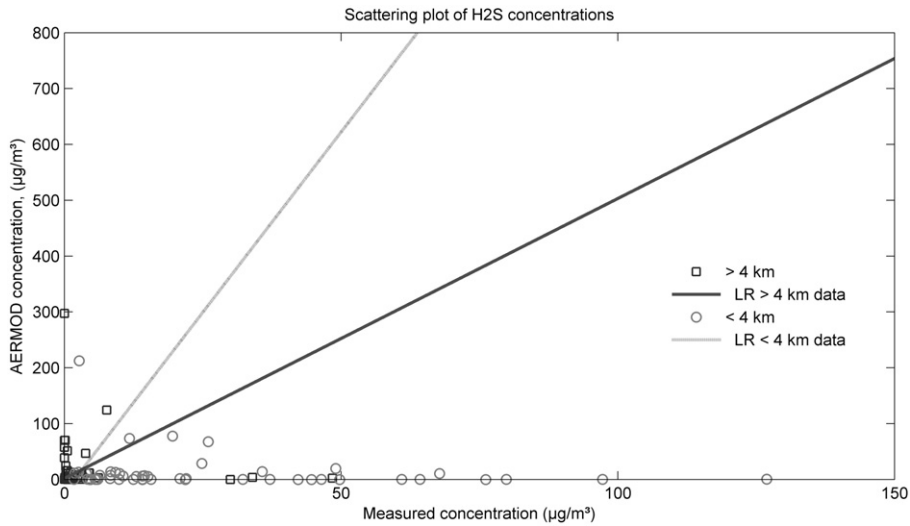


Fig. 10.

which mix air and non-condensable gases in the stacks, diluting the pollutants, especially on Units 5–9. The volume of air injected is estimated to be around 20–40% of the total flow measured at the stacks, based on the chemical analysis applied to gases samples. But we do not have information about the volume of air injected to the systems. Units 10–13 have a hybrid expelling gas system keeping the non-condensable gases almost without changes.

The exposition limit to H₂S in a workplace, based on the health standard of Mexico's Secretaría de Trabajo y Previsión Social (Ministry of Labor and Social Welfare) NOM-010-STPS-1999 is an average 10 ppm (15,000 µg m⁻³) in 8 h. Hydrogen sulfide

concentrations registered at CP1 on that period of time are well below the Mexican health standard threshold value.

The regulatory approach controlling air pollution differs from one country to another. Different countries have different political, regulatory and administrative approaches, and legislative and executive activities can be carried out at various levels such as national, regional and local. For instance, World Health Organizations establishes a H₂S average environmental concentration guideline at 150 µg m⁻³ (0.100 ppm) in 24 h (WHO, 2000). H₂S environmental standards have a wide variety, even in the same country; for instance in the United States, Arizona has a standard

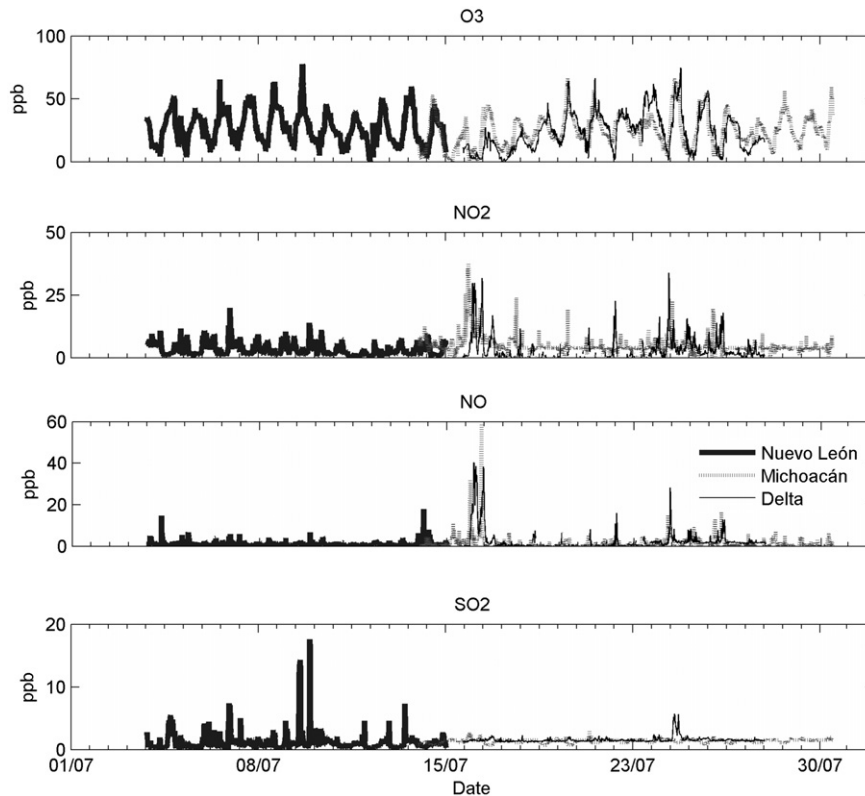


Fig. 11.

Table 6
Environmental concentration of criteria gases.

Site (area)		O ₃ (ppb)	NO ₂ (ppb)	NO (ppb)	SO ₂ (ppb)	CO (ppm)	CH ₄ (ppm)	CO ₂ (ppm)
	Standard ^a	110	210		110	110		
Michoacán (NW)	Average	24.33	4.82	1.23	6.05	1.37	1.43	366.75
	Std. deviation	12.59	3.31	2.71	5.05	0.28	1.00	17.25
	Maximum	66.81	37.37	58.35	78.41	2.88	8.15	429.90
	Mode	18.71	3.87	0.15	4.01	1.11	0.13	360.12
Nuevo León (NE)	Average	26.70	3.21	0.92	4.14	1.09		370.49
	Std. deviation	12.70	2.41	1.00	2.99	1.33		25.70
	Maximum	77.41	19.80	17.78	25.51	17.56		494.70
	Mode	31.48	4.87	0.41	2.17	0.34		365.54
Delta (SE)	Average	23.34	3.89	2.86	7.22	1.53		368.77
	Std. deviation	14.91	4.95	5.31	10.17	0.44		15.64
	Maximum	74.81	33.87	40.34	70.16	5.69		428.50
	Mode	0.05	0.61	0.00	1.30	1.34		

^a Secretaría de Salud (2012).

on $180 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.128 ppm), California $42 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.030 ppm), and New Mexico $14 \mu\text{g m}^{-3}$ (0.010 ppm), all of them in one hour exposure average (CEPA, 2009). The average concentrations measured at the municipalities around the geothermal field were below the WHO guideline exposition limit and the Arizona standard, but higher than those from New Mexico and California.

Dispersion modeling results, compared to measured concentrations, indicate an H₂S overestimation up to 30% in Center sector (5 km around the geothermal plant). In NW and SW sectors, between 5 and 15 km away from CP4, the overestimation decreased to 10%. Hydrogen sulfide has a half-life of 0.23 days on summer days (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2006) and oxidizes to SO₂ and SO₄, depending on reaction and atmospheric conditions (Brown and Webster, 1993). AERMOD does not involve atmospheric chemistry in its calculations, so perhaps that is one source of overestimation. Another cause may be due to the variability on composition and emission rates on vent stacks, because those were considered constant for modeling. Based on the goodness of fit, AERMOD has a good estimation at afternoon and evening events, at least on the measuring sites, but at night and morning events the model differs from measured values. Also, computed concentrations have a better determination coefficient for far points than closer to the source.

Meteorological parameters at Cerro Prieto change along the year (Puente and Hernández, 2005), so dispersion modeling results are only applicable to summer season when we have temperatures in the range of 22–40 °C, and a boundary layer height in range of 100–1300 m.

5. Conclusions

The actual capacity of Cerro Prieto (CP) geothermal field is 520 MW, because Units 1–4 are out of service since 2011. Air pollutants measured at CP never exceeded the local environmental standards. That is normal because those gases are more linked to automotive exhaust emissions than geothermal plant activities. AERMOD modeling shows long-term exposure to H₂S, it maybe produces an unpleasant odor, although no health damage has been reported at those environmental concentrations (López Cervantes, personal communication, 2011). Ellis (1978) mentioned that the Rotorua population has lived for several generations with H₂S in the range 0.001–0.2 ppm yet there is no indication that their health is less than that of any other group in New Zealand. However, even though H₂S is not considered a criterion pollutant, environmental determinations and dispersion modeling showed a radius of 5 km around the geothermal plant continuously covered by H₂S. So, it

is important to monitor that compound on a regular basis in Cerro Prieto area.

Acknowledgements

This work was partially funded by Comisión Federal de Electricidad (CFE). We thank Sergio Rosas, Ricardo Cervantes, Leonardo Robles, and Lourdes Hernández for their invaluable support. We also thank Gerardo Ruiz for helping us with the air quality stations facilities and Rubén Mendoza for his aid on sampling procedures. We recognize also the support from Instituto de Investigaciones Eléctricas and Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental.

References

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2006. Toxicological Profile for Hydrogen Sulfide. US Department of Health and Human Services, Atlanta, GA.
- Arellano, V.M., Barragán, R.M., Aragón, A., Rodríguez, M.H., Pérez, A., 2011. The Cerro Prieto IV (Mexico) geothermal reservoir: pre-exploitation thermodynamic conditions and main processes related to exploitation (2000–2005). *Geothermics* 40 (3), 190–198.
- American Society for Testing and Materials, 1995. E 1675-95a Standard Practice for Sampling Two-Phase Geothermal Fluid for Purposes of Chemical Analysis.
- Arizona Instruments LLC, 2004. JEROME 631-X Operation Manual. Arizona Instruments LLC, Chandler, AZ, USA.
- Bertani, R., 2012. Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. *Geothermics* 41, 1–29.
- Brown, K.L., Webster, J.G., 1993. H₂S oxidation in aerosols. In: Proceedings in 15th NZ Geothermal Workshop.
- California Environmental Protection Agency, 2009. Air Resource Board, Ambient Air Quality Standards, Hydrogen Sulfide. <http://www.arb.ca.gov/research/jaqs/caaqs/caaqs.htm>
- Celada, A.T., Salcido, A., 2009. The Mexico City 2006 Wind Direction States. Proceedings of the 20th IASTED International Conference on Modeling and Simulation (MS 2009), Banff, Alberta, Canada, July 2009. Acta Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp. 51–58, ISBN:978-0-88986-799-4.
- Des Marais, D.J., Stallard, M.L., Nehring, N.L., Truesdell, A.H., 1988. Carbon isotope geochemistry of hydrocarbons in Cerro Prieto geothermal field, Baja California Norte, Mexico. *Chemical Geology* 71, 159–167.
- Ellis, A.J., Mahon, W.A.J., 1977. Chemistry and Geothermal Systems. Academic Press, Orlando, FL, p. 392.
- Ellis, A.J., 1978. Geothermal fluid chemistry and human health. *Geothermics* 6, 175–182.
- Environmental Protection Agency, 2004. AERMOD: Description of Model Formulation. EPA-454/R-03-004, September.
- Environmental Protection Agency, 2010a. Air Pollution Control Orientation Course, Criteria Pollutants. <http://www.epa.gov/apti/course422/ap5.html>
- Environmental Protection Agency, 2010b. Nation Ambient Air Quality Standards. <http://www.epa.gov/air/criteria.html>
- García, A., Martínez, J.I., Hernández, A.F., Ceceñas, M., Ovando, R., Salas, E., Cancchola, I., Mora, O., Gutiérrez, S., Miranda, C., Hernández, M., López, S., 2007. Simulación numérica de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geothermia* 20 (2), 2–7.
- Glassley, W.E., 2010. Geothermal Energy and the Environment. CRC Press, Boca Raton, FL, p.290.

- Hiriart, G., Gutiérrez-Negrín, L.C., 2003. Main aspects of geothermal energy in Mexico. *Geothermics* 32, 389–396.
- Kristmannsdóttir, H., Sigurgeirsson, M., Ármannsson, H., Hjartanson, H., Ólafsson, M., 2000. Sulfur gas emissions from geothermal power plants in Iceland. *Geothermics* 29, 529–538.
- López-Cervantes, M., 2011. Fase II del estudio de evaluación de impacto ambiental del Complejo Geotermoeléctrico de Cerro Prieto. In: Programa Universitario de Medio Ambiente, UNAM, México, DF.
- Miller, P.J., Van Atten, C., 2004. Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas de América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental para América del Norte, Montreal, Canada <http://www.cec.org/>
- Nehring, N.L., Fausto, J.J., 1979. Gases in steam from Cerro Prieto geothermal wells with a discussion of steam/gas ratio measurements. *Geothermics* 8, 253–255.
- Noorollahi, Y., 1999. H₂S and CO₂ dispersion modeling for the Nesjavellir geothermal power plant, S-Iceland and preliminary geothermal environmental impact assessment for the Theistareykir area, NE-Iceland. Geothermal training program, Reports 1999. Number 10, Reykjavik, Iceland.
- Puente, H., Hernández, L., 2005. H₂S monitoring and emission control at the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico. In: Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April 24–29, 2005.
- Salcido, A., Celada, A.T., 2010. In: Rey, G.R., Muneta, L.M. (Eds.), A Lattice Gas Approach to the Mexico City Wind Field Estimation Problem (Modeling, Simulation and Optimization). INTECH, ISBN 978-953-307-048-3, pp. 385–416 <http://sciendo.com/articles/show/title/a-lattice-gas-approach-to-the-mexico-city-wind-field-estimation-problem>
- Salcido, A., Celada, A.T., Castro, T., 2010. A meso-β scale description of surface wind events in Mexico City during Milagro 2006 campaign. In: Proceedings of the Second IASTED International Conference Environmental Management and Engineering (EME 2010), Banff, Alberta, Canada, July 15–17, 2010.
- Salcido, A., Sozzi, R., Castro, T., 2003. Least squares variational approach to the convective mixing height estimation problem. *Environmental Modelling and Software* 18, (10), 951–957.
- Secretaría de Medio Ambiente and Recursos Naturales, 2009. Registro de Transferencia de Contaminantes. <http://app1.semarnat.gob.mx/retc/retc/index.php>
- Secretaría de Salud, 2012. Normas oficiales mexicanas en materia de salud. <http://bibliotecas.salud.gob.mx/cgi-bin/library/>
- Thorsteinsson, T., Hackenbruch, J., Sveinbjörnsson, E., Jóhannsson, T., 2012. Statistical assessment and modeling of the effects of weather conditions on H₂S plume dispersal from Icelandic geothermal power plants. *Geothermics* 45, 31–40.
- World Health Organization, 2000. Air quality guidelines for Europe. WHO Regional Publications, No. 91, 2nd ed.

Research Article

Main Characteristics of Mexico City Local Wind Events during the MILAGRO 2006 Campaign within a Meso- β Scale Lattice Wind Modeling Approach

Ana-Teresa Celada-Murillo,¹ Susana Carreón-Sierra,^{1,2,3} Alejandro Salcido,¹ Telma Castro,⁴ Oscar Peralta,⁴ and Teodoro Georgiadis⁵

¹ *División de Energías Alternas, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Palmira, 62490 Cuernavaca, MOR, Mexico*

² *División de Matemáticas e Ingeniería, Programa de Matemáticas Aplicadas y Computación, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida San Juan Totoltepec s/n, Santa Cruz Acatlán, 53150 Naucalpan, MEX, Mexico*

³ *International Institute for Learning México S.A. de C.V., Prado Sur 240-303, Lomas de Chapultepec, Miguel Hidalgo, 11000 Mexico City, DF, Mexico*

⁴ *Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 Mexico City, DF, Mexico*

⁵ *Istituto di Biometeorologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche (IBIMET-CNR), Via Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy*

Correspondence should be addressed to Alejandro Salcido; vasalcido@gmail.com

Received 29 November 2012; Accepted 17 December 2012

Academic Editors: N. A. Mazzeo and D. Moreira

Copyright © 2013 Ana-Teresa Celada-Murillo et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A characterization of local wind events in Mexico City, which occurred during MILAGRO campaign, was carried out within the framework of a lattice wind modeling approach at a meso- β scale. Mexico City was modeled as a 2D lattice domain with a given number of identical cells. Local wind conditions at any cell were described by a state variable defined by the spatial averages of wind attributes such as speed, direction, divergence, and vorticity. Full and partial densities of wind states were discussed under different conditions using two simple lattice wind models. We focus on the results obtained with the 1-cell lattice wind model and provide brief comments about preliminary results obtained with the 4-cell model. The 1-cell model allowed identifying the main patterns of the wind circulation in Mexico City throughout the study period (anabatic and katabatic winds, winds induced by the urban heat island, and winds with high possibilities for exchanging pollutants between Mexico City and the neighboring settlements, among others). The model showed that Mexico City wind divergence and vorticity disclose superposed oscillations whose most important periods were 24 and 12 hours, suggesting strong connections with the diurnal cycle of incoming solar radiation and the urban heat island.

1. Introduction

Poor air quality is a common problem in the world biggest cities due to the atmospheric emissions derived from the anthropogenic impact on the environment. Also, topography and meteorology may increase the severity of local air pollution. So, local wind circulation is particularly important for estimating transport and dispersion of air pollutants, and consequently for carrying out air quality assessment studies and assessing the export of air pollutants to neighboring human settlements.

The best description of wind circulation is provided by the eulerian wind velocity field. However, in practical problems of meteorology and air pollution, wind flow involves a number of complex features (turbulent regime, complex terrain, unsolvable difficulties for establishing initial and boundary conditions, etc.) and no analytical expression can be obtained for wind velocity field. Then, numerical solutions provided by computational models (such as MM5 and other mesoscale meteorological models) and also simple analysis and diagnostic approaches (such as wind roses and

constrained interpolation techniques) are well appreciated in general for describing wind circulation when complex features (such as topography) are involved.

In this paper, a simple and innovative wind modeling approach proposed by Salcido and collaborators [1–3] is described and then applied to perform a characterization study of the Mexico City local wind events which prevailed during the MILAGRO campaign (March 2006). Mexico City area was modeled as a two-dimensional lattice domain with a given number of identical cells. Local wind conditions at any lattice cell were described by a discrete wind state variable, which is defined in terms of spatial average values of wind attributes of speed, direction, divergence, and vorticity; all expressed in convenient discrete measuring scales. The inclusion of the wind's divergence and vorticity describing local wind condition at a lattice cell constitutes an extension of local wind state variables that gives a slightly nonlocal character to lattice wind models. With two of the simplest lattice wind models (the one-cell model and the four-cell model), wind data reported by the official atmospheric monitoring network (REDMET-SIMAT) of the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) were elaborated obtaining several sets of hourly meso- β scale wind states that occurred in Mexico City throughout March 2006. The densities of discrete wind states were calculated and analyzed for different conditions (diurnal and nocturnal conditions, given time periods, etc.), allowing the identification of wind patterns and characteristics.

The general characteristics of the local wind behavior in the MCMA boundary layer, its driving forces, and its relations with air pollution and urban climate were discussed more than two decades ago. In 1988, Jáuregui analyzed the interactions between local winds and air pollution in the Mexico basin [4], and in 1997, he studied the heat island development in Mexico City [5]. In 1997, Bossert studied the flow regimes affecting the Mexico City region [6], and in 1998, Fast and Zhong [7] and Doran et al. [8] studied meteorological factors associated with air pollution, and particularly with the ozone concentrations in Mexico City basin. In 2003, Salcido et al. reported the first long-term surface micrometeorological campaign carried out in MCMA in 2001 [9], and also statistical analysis of convective mixing height in Mexico City [10]. In relation with the MILAGRO campaign, many interesting results were reported in the last years: De Foy et al. in 2005 described the Mexico City basin wind circulation during a previous short-term campaign carried out in 2003 [11]; Fast et al. in 2007, and de Foy et al. in 2008, reported a meteorological overview of MILAGRO campaign [12], and a basin-scale study of wind transport and its comparison to climatology for MILAGRO campaign [13], respectively.

The main characteristics we found for the Mexico City local winds were in agreement with the wind patterns described by the above-mentioned authors; however, the lattice wind modeling approach was also able to provide more detailed description of wind circulation events and to reveal new characteristics as a result of including additional wind state variables properties, like divergence and vorticity.

2. The Lattice Wind Modeling Approach

The lattice wind modeling approach consists in representing the spatial region of interest by a 2D lattice domain made up of a given number N of identical rectangular cells: $N = N_x \times N_y$, where N_x (N_y) denotes the number of cells along the west-east (south-north) direction. Each cell is invested with a wind state (WS) variable that describes local wind conditions in the cell in terms of four parameters (U , θ , γ , and ω), where U is wind speed, θ is wind direction, and γ and ω denote the wind's divergence and vorticity (as they are usually defined in meteorology in terms of the horizontal components of the wind velocity field). The values of state parameters are understood as spatial averages over the lattice cell. The inclusion of divergence and vorticity, as additional wind state variables, endows the model with a slightly nonlocal character and allows recovering some wind behavior information lost by the filtering due to spatial averaging process of the wind velocity over each cell. Thus, besides the mean velocity, its tendencies of rotation and divergence on each cell are assumed to be known.

From the local equilibrium hypothesis of linear fluid mechanics point of view, a lattice wind model (LWM) becomes overdetermined in the limit $N \rightarrow \infty$, or more precisely $N_x \rightarrow \infty$ and $N_y \rightarrow \infty$. However, in some extended thermodynamic theories, the gradients of the velocity field have been considered as additional state variables, and this extension allows finding out nonlinear constitutive equations for non-Newtonian fluids [14].

Under an LWM, the spatial complexity of the wind velocity field is mapped into an $N_x \times N_y$ matrix $\xi(t)$, defined by cell wind states $(U, \theta, \gamma, \omega)_{ij}$. The wind state in the lattice is represented by this matrix.

When the values of the state parameters (U , θ , γ , and ω) are expressed in terms of finite and discrete scales, such as the Beaufort wind speed scale, a N_θ sectors scale for wind direction, a N_γ levels scale for wind divergence, and a N_ω levels scale for wind vorticity, the wind states are referred to as discrete wind states (DWSs), and each DWS can be identified by a nonnegative integer number ε given by

$$\varepsilon = \omega + N_\omega [\gamma + N_\gamma (\theta + N_\theta U)]. \quad (1)$$

For any lattice cell, the number of all possible DWS will be the product of the numbers of levels of wind speed (N_v), wind direction (N_θ), divergence (N_γ), and vorticity (N_ω):

$$N_s = N_v \times N_\theta \times N_\gamma \times N_\omega. \quad (2)$$

For purposes of this work, we consider the DWS in terms of Beaufort wind speed scale, wind direction scale with $N_\theta = 8$ ($N = 0$, NE = 1, E = 2, SE = 3, S = 4, SW = 5, W = 6, and NW = 7), wind divergence scale with $N_\gamma = 3$ (0 = convergent, 1 = parallel, and 2 = divergent), and vorticity scale with $N_\omega = 3$ also (0 = anticyclonic (clockwise rotation), 1 = no rotation, and 2 = cyclonic (counterclockwise rotation)).

In the case of the 4-cell LWM, we have found useful the wind direction state (WDS) concept, with $N_\theta = 8$, which is defined by four mean wind directions θ_{NE} , θ_{NW} , θ_{SW} , and θ_{SE}

(each expressed in 8-sectors-scale) at cells (or quadrants) NE, NW, SW, and SE of the lattice domain, respectively. WDS can be conveniently identified by a four-digit octal number (0000, ..., 7777) or its decimal equivalent.

It must be observed that not all wind states will be necessarily observed at the region of interest. It depends on topographical features and the particular wind driving forces existing in the region. The relative frequency distribution of wind states, hereafter referred to as the density of wind states (DOWSs), constitutes a convenient way to identify the probability of occurrence for each wind state under different conditions (specific time periods, season, daytime, nighttime, etc.); it gives the fraction of times that a given state was present at the region of interest within a given period of time.

3. Study Area and Its Main Characteristics

This work is focused on Mexico City, the most important part of MCMA. It lies inside the Basin of Mexico, between 19.05 and 19.60 degrees north latitude, and 98.95 and 99.35 degrees west longitude, and it has an average altitude of 2240 m.

3.1. Topography. The Basin of Mexico City belongs to the Neovolcanic Axis and it is almost completely surrounded by high mountains [15], as it is shown in Figure 1. To the north, with the Sierra de Guadalupe creating a small 800 m barrier above the ground, the basin extends into the Mexican plateau and the arid interior of the country. To the west, lies the Sierra de las Cruces, a range 65 km long with altitudes surpassing 3300 meters, although the terrain altitude decreases below the 3000 m close to the middle of the range (around 19.3 degrees north). To the south, lies the Sierra del Ajusco-Chichinautzin, with the Ajusco volcano as the most prominent feature (3930 m altitude). This range extends eastward to about 98.9 degrees west; thereafter the terrain altitude decreases below 2500 m, creating a mountain gap, 22 km long, which ends at the Iztaccihuatl mountain. Finally, to the east lies the Sierra Nevada; it is a range 70 km long which extends from the Popocatepetl volcano (5426 m altitude) at the south up to the hills that descend from the Monte Tláloc at the north.

3.2. Climate. The Mexico City climate has been classified into two seasons: rainy season, from May to October, and dry season, from November to April. This classification comes from the two main meteorological patterns on the synoptic scale: dry westerly winds with anticyclone conditions from November to April, and moist flows from the east due to weaker trade winds during the other six months [4]. However, Mexico City's meteorology is more complex. Important interactions of the basin with the Mexican plateau and lower coastal areas may occur. Moreover, it is common to have weak large-scale pressure gradients and strong solar radiation throughout the year [4, 9, 13, 15]. These conditions, combined with the surrounding mountains, are ideal for the development of thermally driven winds, such as anabatic and katabatic winds, and also winds driven by the heat island phenomenon.

TABLE 1: Stations of MCMA meteorological monitoring network (REDMET-SIMAT).

ID	Station name	Position		Parameters			
		LAT	LON	WSP	WDR	TEM	RH
TAC	Tacuba	19.455	-99.202	1	1	1	1
EAC	Acatlán	19.482	-99.243	1	1	1	1
SAG	San Agustín	19.532	-99.030	1	1	1	1
TLA	Tlanepantla	19.528	-99.204	1	1	1	1
XAL	Xalostoc	19.528	-99.076	1	1	1	1
MER	La Merced	19.424	-99.119	1	1	1	1
PED	Pedregal	19.325	-99.204	1	1	1	1
CES	Cerro de la Estrella	19.336	-99.075	1	1	1	1
PLA	Plateros	19.367	-99.200	1	1	1	1
HAN	Hangares	19.422	-99.084	1	1	1	1
CUA	Cuajimalpa	19.364	-99.299	1	0	0	1
TPN	Tlálpán	19.256	-99.184	1	0	0	1
CHA	Chapingo	19.460	-98.902	1	0	0	1
TAH	Tláhuac	19.246	-99.010	1	0	1	1
VIF	Villa de las Flores	19.658	-99.097	0	1	1	1

LAT: latitude, LON: longitude, WSP: wind speed, WDR: wind direction, TEM: temperature, and RH: relative humidity.

4. Wind Data

The MILAGRO campaign was carried out on March 2006 in Mexico City Metropolitan Area (MCMA). It was an international scientific collaborative effort focused on the study of local, regional, and global impacts of megacity air pollution, using as a case study MCMA and its surrounding areas [16]. This urban area was selected as a case study for the MILAGRO campaign because it has a tropical latitude similar to other megacities, it receives a large amount of incoming solar radiation all year long making its atmosphere extremely active photochemically, which promotes the transformation of atmospheric pollutants; but also because of the existence of reliable urban and air quality measurement, with the official air quality and meteorological monitoring networks, providing hourly records systematically.

The MCMA atmospheric monitoring system (SIMAT) has 36 stations: 24 located in Mexico City and 12 in the State of Mexico. Among them, 15 stations measure local meteorology (wind speed, wind direction, temperature, and relative humidity) and provide reliable and systematic reports of average values in an hourly basis [17]. The meteorology subnetwork of SIMAT is known as REDMET. The names, IDs, and geographical coordinates of REDMET stations are presented in Table 1, and their spatial distribution is shown in Figure 1.

The database we used for carrying out this study comprises hourly reports of wind speed and wind direction provided by REDMET throughout March 2006. It is a database with 744 hourly events describing the local meteorology conditions which prevailed at MCMA during MILAGRO

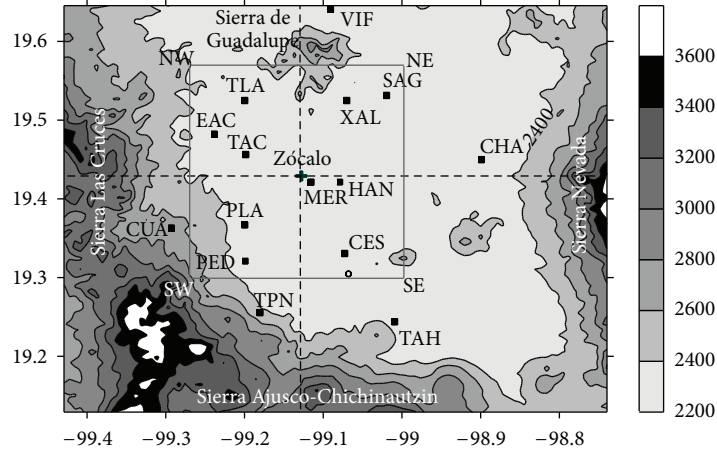


FIGURE 1: Topographic features of Mexico City Metropolitan Area. The lattice domains used in the 1-cell (solid line rectangle) and the 4-cell (solid line rectangle divided by dotted lines) lattice wind models are shown. The positions of the stations of the meteorological network (REDMET-SIMAT) are also shown (small solid squares).

campaign. During this time, the average performance of REDMET was 90% with respect to wind data.

5. Mexico City Wind States

For the lattice wind modeling purposes, the spatial domain we considered was the Mexico City region located at north latitudes extending from 19.30° to 19.57° and west longitudes extending from 99.00° to 99.27° . This area was considered as the single cell in the 1-cell LWM, but for the purposes of the 4-cell LWM, it was divided into the quadrants NE, NW, SW, and SE, defined by west-east and south-north axes shown in Figure 1 (dotted lines). The origin of this reference axes frame was set at the geometric center defined by the station positions of Mexico City atmospheric monitoring network. This point is 2 km to the NE of the Zócalo (the main place in the heart of the city's historic center). The geometric centers coordinates of the lattice cells were (19.499°N , 99.067°W) for NE cell; (19.499°N , 99.200°W) for NW cell; (19.366°N , 99.200°W) for SW cell; (19.366°N , 99.067°W) for SE cell. Horizontal cell dimensions were $L_{WE} = 14.0$ km in west-east direction, and $L_{SN} = 18.5$ km in south-north direction. The cell height was assumed no larger than the surface layer depth. Because of the lattice cell dimensions, this description will correspond to a meso- β scale representation of Mexico City wind events.

Using the 1-hour average data of wind speed and wind direction provided by REDMET [17], wind speed U , wind direction θ , wind divergence γ , and wind vorticity ω were estimated at the geometric centers of the lattice cells. The frameworks of 1-cell and 4-cell lattices wind models of Mexico City were considered.

The procedure was as follows: for each hour of the study period, wind speed and wind direction of all meteorological stations of REDMET were used to estimate the wind velocity components at each site of a 8×8 regular grid (immersed in the study domain) using a boundary-constrained vector interpolation technique of Kriging type; then results were used to calculate the spatial averages of wind state parameters

(U , θ , γ , and ω) at each cell of LWM, and the corresponding discrete wind states (DWS) were calculated in terms of Beaufort scale for wind speed, the scale with $N_\theta = 8$ for wind direction, and the scales with $N_\gamma = 3$ and $N_\omega = 3$ for wind divergence and wind vorticity, respectively. The relative frequency distributions were determined for the DWS occurred during the study period and then analyzed to recognize the main wind patterns of the same period.

6. Results and Discussion

The densities of discrete wind states that occurred during March 2006 in Mexico City are presented in this section. For each wind state, the density of DWS gives the fraction of times (expressed in %) that this state is found within the full set of the observed DWS (or within a given specific subset of them). The states with the highest frequencies of occurrence are indicated explicitly, including a visual representation of them. The plots of the density of states show the highest frequencies states with the integer identification ε followed by values of state parameters (U , θ , γ , and ω), expressed in the form $[U: \theta: \gamma: \omega]$. The visual representation of a DWS is composed by one oriented circle, two oriented secants (arrows), and one small circle (inside of and concentric with the oriented circle) with a nonnegative integer written inside. The oriented circle represents the wind vorticity, the oriented secants represent both wind direction and wind divergence, and the number inside the small circle denotes wind speed in the Beaufort scale.

6.1. Results from the 1-Cell Lattice Wind Model. As a first approximation, the Mexico City area was considered as a single cell and its local wind conditions were described by spatial averages of state parameters (U , θ , γ , and ω) over the region. The time series of the wind state parameters are shown in Figure 2 for the complete study period.

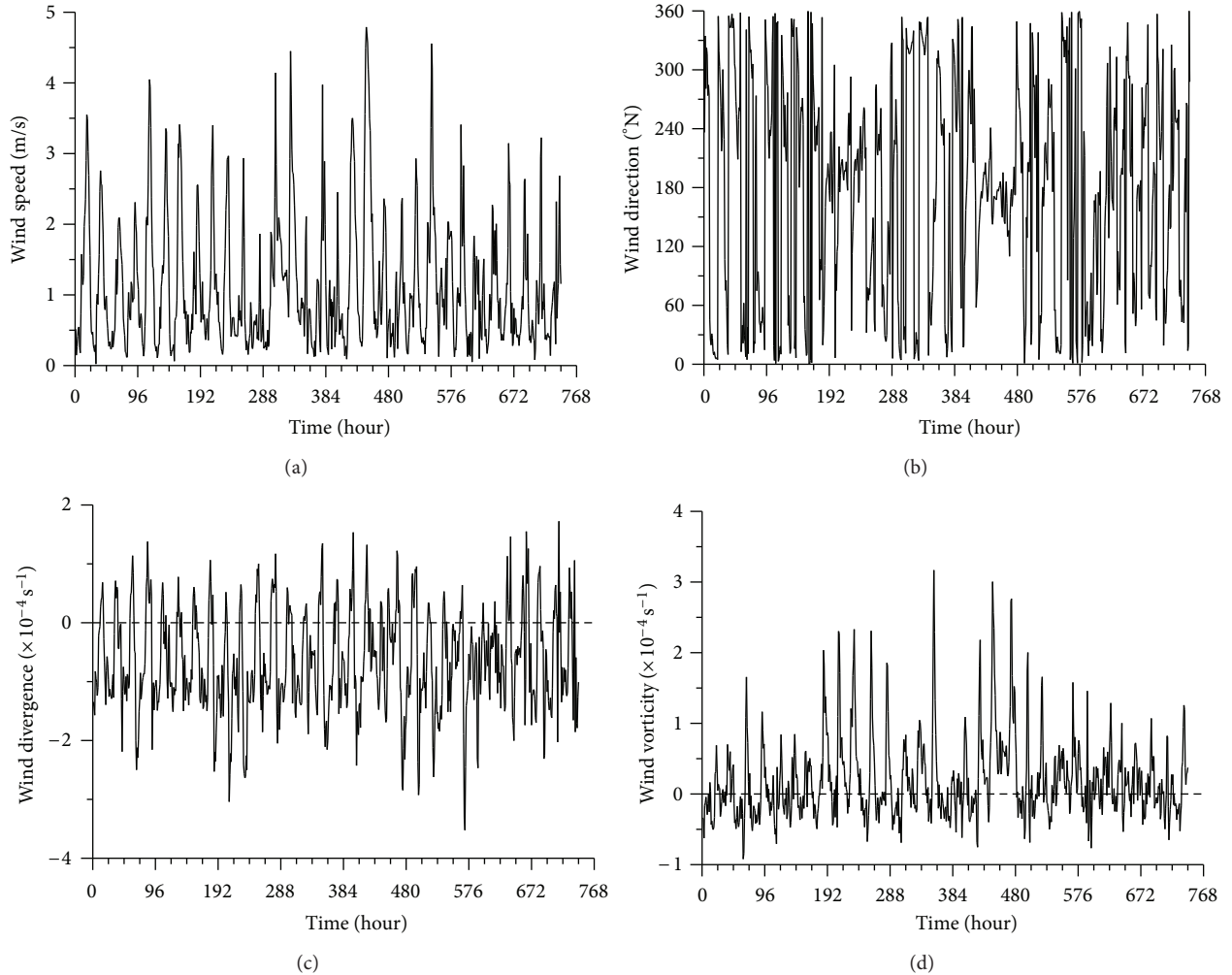


FIGURE 2: Results of the 1-cell lattice wind model applied to Mexico City. Time series of the wind state parameters (wind speed, wind direction, wind divergence, and wind vorticity) for March 2006.

The corresponding set of DWS was also determined and analyzed to estimate their occurrence probabilities during specific time periods of the day and different conditions, such as the presence or absence of sunlight.

6.1.1. Mexico City Wind States for March 2006. For each hour of March 2006, the local wind state of Mexico City can be obtained from the plots of Figure 2. In this period, the mean wind velocity was blowing from North at 0.163 m/s , as obtained from the mean horizontal components; the mean wind speed, however, was 1.143 m/s . Mean wind divergence was $-6.564 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ and mean wind vorticity was $1.975 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. So, this period, in average, was characterized by low-intensity northerly convergent cyclonic winds. Moreover, the result shown in Figure 2 for wind divergence indicates that (as observed by Jáuregui in 1988 [4]) convergent flow prevailed not only during the night period, but was also present during most of the daylight hours, when it would be expected that turbulent mixing would tend to weaken the heat-island induced flow. On the other hand, it

is worth mentioning that the time series of wind divergence revealed three main Fourier components with periods of 24, 12, and 6 hours, in decreasing order of importance. For the wind vorticity time series, on the other hand, the main Fourier component had also a 24 h period clearly defined. Several other important higher-frequency components were also identified, although with considerably smaller magnitudes.

6.1.2. The Complete Density of Discrete Wind States. In Figure 3, the total density of Mexico City DWS for March 2006 is shown. In the same figure, the first ten DWSs with the highest frequencies of occurrence are shown. They were, in decreasing order, the states: 110 [1:4:0:2], 117 [1:5:0:0], 146 [2:0:0:2], 137 [1:7:0:2], 126 [1:6:0:0], 87 [1:1:2:0], 96 [1:2:2:0], 182 [2:4:0:2], 119 [1:5:0:2], and 128 [1:6:0:2]. They comprise 49.4% of the total number of wind events (744) that occurred in Mexico City during the MILAGRO campaign. In Table 2, the main attributes of these states are briefly described.

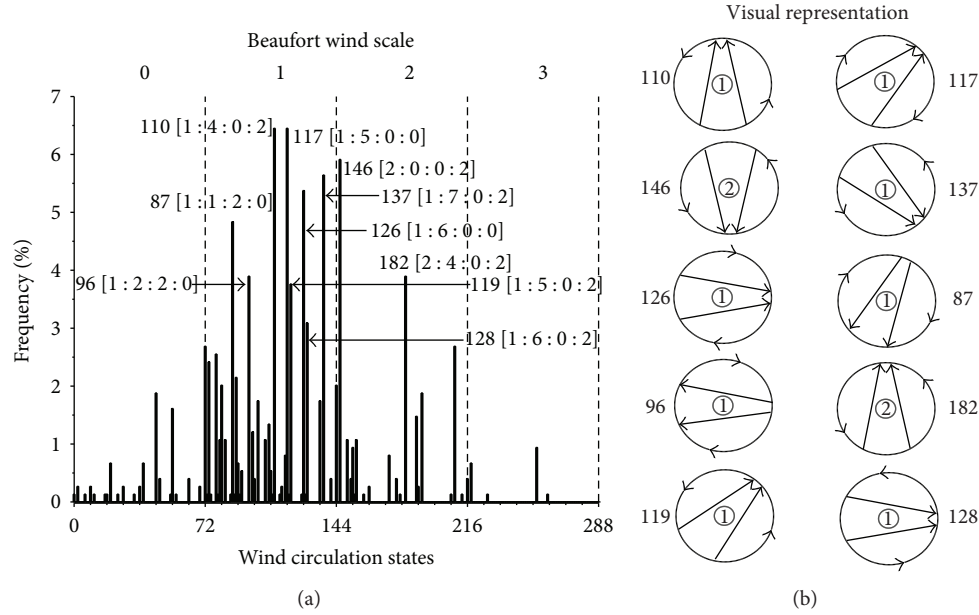


FIGURE 3: One-cell lattice wind model. (a) Complete density of DWS occurred in Mexico City during March 2006. (b) Visual representation of the DWS. The number inside the small circle indicates the intensity of wind in the Beaufort scale; the oriented circle represents wind vorticity; the couple of arrows indicates wind direction and divergence. The decimal IDs of the DWS were assigned according to (1).

TABLE 2: The first ten discrete wind states with the highest frequencies.

State number	$[U:\theta:\gamma:\omega]$	Frequency (%)	WSP (m/s)	WDR	WDIV	WVOR
110	[1:4:0:2]	6.45	$0.25 \leq v < 1.5$	S	Convergent	Cyclonic
117	[1:5:0:0]	6.45	$0.25 \leq v < 1.5$	SW	Convergent	Anticyclonic
146	[2:0:0:2]	5.91	$1.5 \leq v < 3.5$	N	Convergent	Cyclonic
137	[1:7:0:2]	5.65	$0.25 \leq v < 1.5$	NW	Convergent	Cyclonic
126	[1:6:0:0]	5.38	$0.25 \leq v < 1.5$	W	Convergent	Anticyclonic
87	[1:1:2:0]	4.84	$0.25 \leq v < 1.5$	NE	Divergent	Anticyclonic
96	[1:2:2:0]	3.90	$0.25 \leq v < 1.5$	E	Divergent	Anticyclonic
182	[2:4:0:2]	3.90	$1.5 \leq v < 3.5$	S	Convergent	Cyclonic
119	[1:5:0:2]	3.76	$0.25 \leq v < 1.5$	SW	Convergent	Cyclonic
128	[1:6:0:2]	3.09	$0.25 \leq v < 1.5$	W	Convergent	Cyclonic

WSP: wind speed, WDR: wind direction, WDIV: wind divergence, and WVOR: wind vorticity.

Among the first ten DWSs with the highest frequencies there were four states (110, 117, 182, and 119) that represent wind events with a flow component from South, three states (87, 137, and 146) with a flow component from north, five states (117, 137, 126, 119, and 128) with a flow component from west, and two states (87 and 96) with a flow component from east. We observed also that eight of these DWSs were convergent, and six were cyclonic.

In Figure 4, the statistical behaviors of state parameters during the study period are presented separately. Wind events had speeds predominantly within the level 1 of Beaufort scale (around 65% of the wind speed events); the N, S, SW, and NE were the main wind directions, with frequencies around 20%, 16%, 15%, and 13%, respectively; 75% of the DWSs represented winds with convergent features; 55% of wind states had cyclonic (positive) vorticity.

The set of DWS obtained for March 2006 represent wind events with speed ranging from 0 to 5.50 m/s. States with speeds from 0.25 to 1.5 m/s (level 1 of the Beaufort scale) were found predominant, followed by states with speeds from 1.5 to 3.5 m/s (Beaufort, level 2), and states with speeds from 0 to 0.25 m/s (Beaufort, level 0).

6.1.3. Some Partial Densities of Discrete Wind States. The Mexico City's geographic location, the long and high mountains that surround it and the strong solar radiation it receives throughout the year, very frequently, establish ideal conditions for thermally driven winds. In order to identify the DWSs which are driven by these conditions and in response to the presence or absence of sunlight, we analyzed partial densities of states associated with day periods of early morning, morning, afternoon, and night, which, in

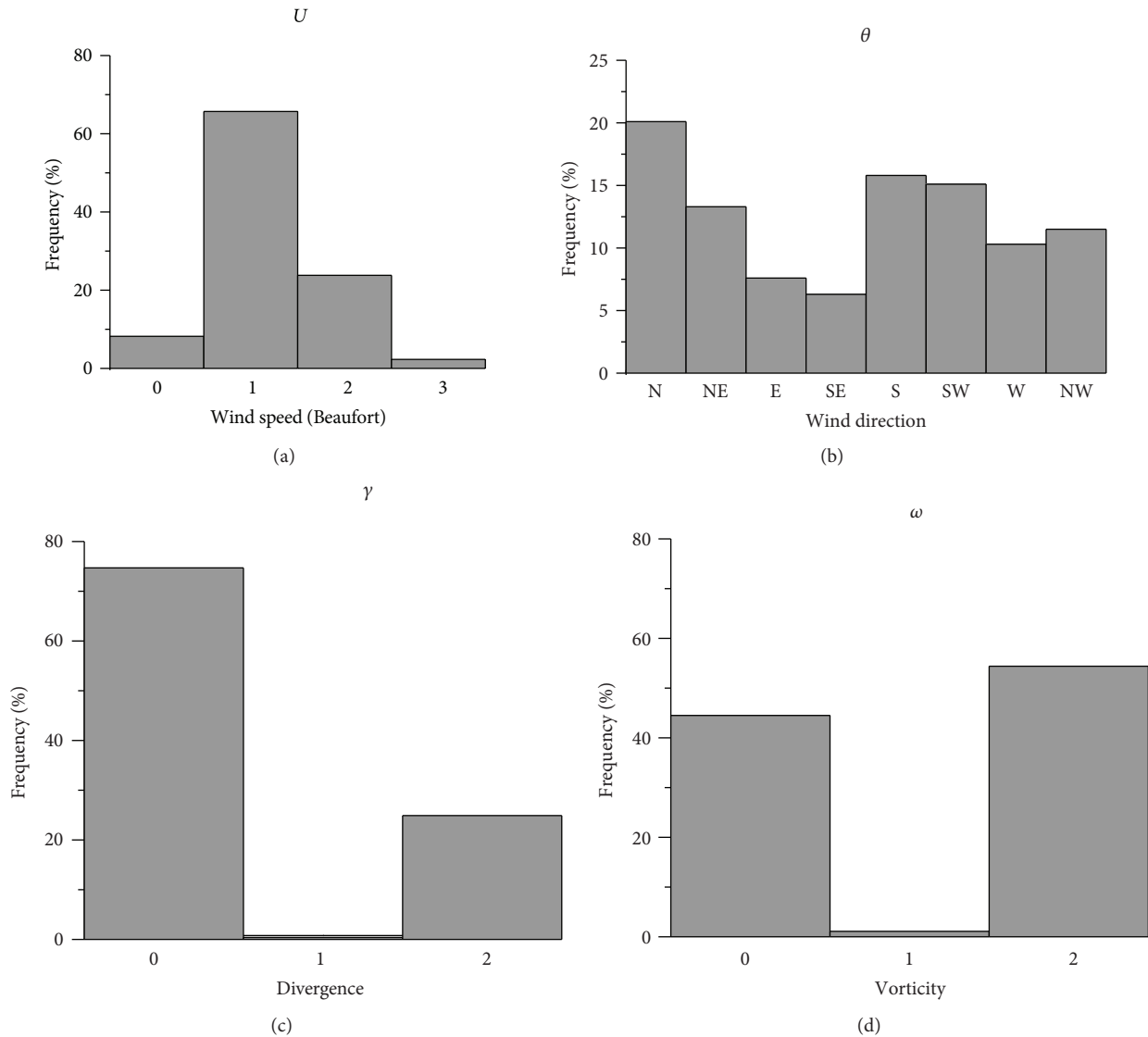


FIGURE 4: Frequency distributions of the state parameters (U , θ , γ , and ω) relative to the whole set of the states that took place in Mexico City during March 2006.

local standard time, correspond to the following four 6-hour groups: 00–05 h, 06–11 h, 12–17 h, and 18–23 h, respectively. Here, the hour ID hh (hh = 00, 01, ..., 23) denotes a one-hour period that starts at hh; for example, 05 hour denotes the period from 05:00:00 to 05:59:59 hours.

In Figure 5, the plots of partial densities of states for early morning, morning, afternoon, and night are shown, and in Figure 7, the main attributes of the first five DWSs with the highest frequencies of occurrence are presented for each time period. The top axis in the plots indicates the level of the Beaufort scale to which the DWS (indicated at the bottom axis) belong. The occurrence frequencies are relative to the total number of wind events registered during March 2006.

In the plots of DWS partial densities (Figure 5), it is observed immediately that only winds with speeds within the first 4 levels of the Beaufort scale were present in Mexico City during March 2006. Low-speed winds (0–0.25 m/s) appeared

mainly during early morning and morning, while the wind conditions with higher speeds (1.5–5.5 m/s) prevailed during afternoon and night.

With reference to Figure 7, it is observed that DWS with the highest frequencies along the nocturnal intervals were the states identified with numbers 117, 126, 110, 119, and 137 for the early morning, and 146, 137, 110, 209, and 182 states for the night. All DWS correspond to convergent winds with vorticity predominantly cyclonic and blowing mainly from S, NW, and SW sectors of the city. The states represent typical nocturnal winds coming down to Mexico City from the nearest surrounding mountains (katabatic winds). On the other hand, during the sunlight hours the highest frequencies states were those identified as 96, 87, 78, 117, and 81 for the morning, and the 87, 182, 146, 110, and 96 states for the afternoon. The 96 and 87 states were present during all the sunlight hours; along with 78 state, they correspond to

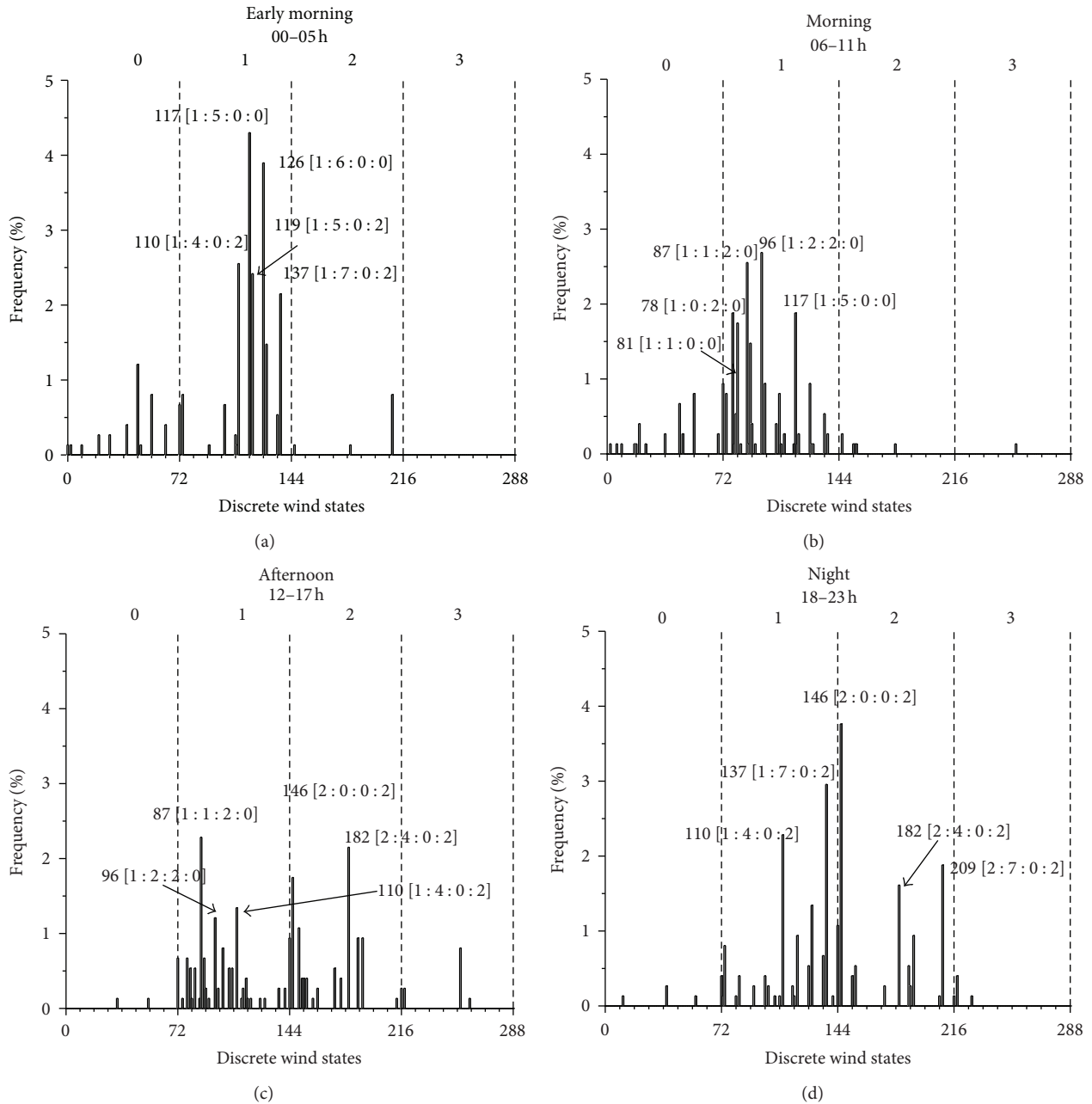


FIGURE 5: Occurrence frequencies of the Mexico City discrete wind states for March 2006 day periods of early morning (00–05 h), morning (06–11 h), afternoon (12–17 h), and night (18–23 h). The decimal IDs of the DWS were assigned according to (1).

divergent winds with anticyclonic vorticity going up from the city area towards the surrounding mountains (anabatic winds) located at the W, SW, and S city boundaries. The other five main states, which took place during the sunlight hours (117, 81, 182, 146, and 110), correspond to convergent winds, in the anticyclonic state for the morning (117 and 81) and cyclonic for the other three.

In Figure 6(a), it is observed that the occurrence frequency of convergent states ($\gamma = 0$) had its highest values on nighttime; it started to decrease very fast from the sunrise, kept low values during the hours around midday, and it

increased from the first hours of afternoon to the sunset. The divergent states ($\gamma = 2$), on the other hand, showed an opposed and complementary behavior along the day. This behavior of Mexico City winds is typical of the mountain-valley systems. However, it is interesting to highlight that convergent wind during sunlight hours could be considered as an evidence of an urban heat island effect in Mexico City, as it has been suggested by Jáuregui [4, 5].

In Figure 6(b), it is observed that the occurrence frequency of cyclonic states ($\omega = 0$) started to grow from the first hours of the day, reaching its highest value at sunrise,

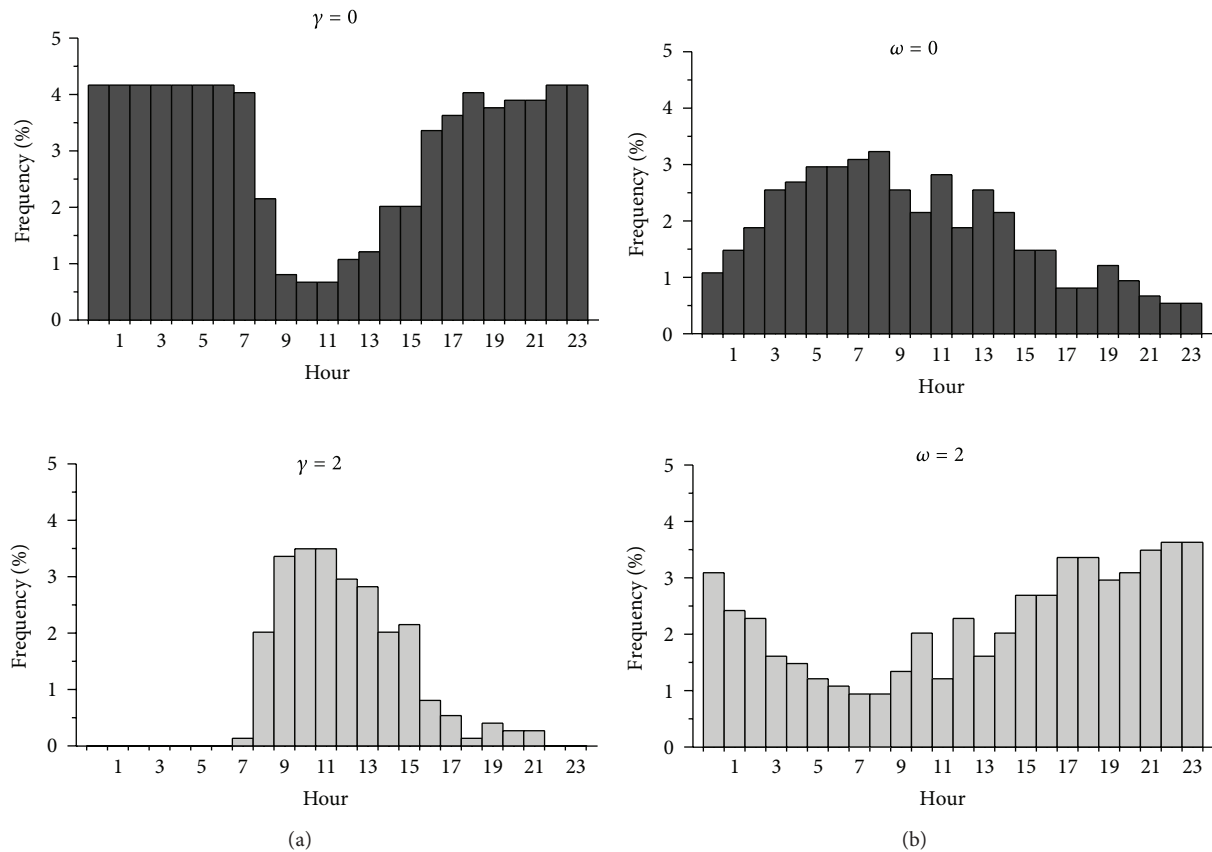


FIGURE 6: (a) Hourly distribution of the occurrence frequency of the Mexico City discrete wind states during March 2006 with respect to wind divergence. Top: convergent states. Bottom: divergent states. These results are consistent with upslope wind during day (divergent) and downslope wind at night (convergent). (b) Hourly distribution of the occurrence frequency of the Mexico City discrete wind states during March 2006 with respect to wind vorticity. Top: anticyclonic (negative) vorticity states. Bottom: cyclonic (positive) vorticity states.

and then decreased slowly, reaching its smallest values at midnight. Anticyclonic states ($\omega = 2$) presented an opposed and complementary behavior along the day.

Results presented in the Figures 6(a) and 6(b), so as those of Figure 2, underline that Mexico City winds presented a diurnal cycle behavior during March 2006 with respect to divergence and vorticity wind-state parameters. It can be stressed that the diurnal cycle behavior of Mexico City winds with respect to the vertical wind vorticity has never been reported before.

6.1.4. Northerly and Southerly Winds. Mexico City is located inside a subtropical basin surrounded almost completely by high mountains. To the north, the basin extends into the Mexican plateau with the Sierra de Guadalupe, creating a natural small barrier of 800 m high above the ground. To the south, the Sierra del Ajusco-Chichinautzin extends from west to east up to 98.9°W , approximately, and thereafter the altitude decreases below the 2500 m, creating a mountain gap of 22 km long which ends at the Iztaccihuatl volcano. The topographic features of Mexico City Area set up a wind corridor north-south, which is the main mechanism to ventilate the city. The northerly and southerly winds in the region are important because of the exchange of air pollution

between Mexico City and the human settlements located to the north and the south of the city.

During March 2006, DWS associated with northerly and southerly winds in Mexico City had occurrence frequencies of 20% and 16%, respectively, as it was shown in Figure 4. So 36% of DWS contributed strongly to ventilate the city during the study period, but also to export air pollutants to the neighboring northern and southern settlements.

The DWSs named as 110, 117, 182, and 254 belong to states that obtained the highest occurrence frequencies in this period (6.5, 6.5, 3.9, and 0.9%, resp., see Figure 7). The states represent winds with a flow component from south, which are the kind of winds that were expected to prevail during the MILAGRO 2006 campaign. Wind events like these were identified on March 9 during 19 hours (from 00 to 06 h and from 12 to 23 h). In Figure 8, the set of DWS occurred this day is described.

On the other hand, 137, 87, 78, 81, 146, and 209 states represent winds with a flow component from north and were found among the DWS with the highest occurrence frequencies (see Figure 7). Wind events like those were found on March 5 from 08 to 23 h. In Figure 9, the set of DWS occurred this day is described.

Early-morning (00–05 h)			Morning (06–11 h)		
State	Freq. (%)	Representation	State	Freq. (%)	Representation
117 [1 : 5 : 0 : 0]	4.3		96 [1 : 2 : 2 : 0]	2.7	
126 [1 : 6 : 0 : 0]	3.9		87 [1 : 1 : 2 : 0]	2.6	
110 [1 : 4 : 0 : 2]	2.6		78 [1 : 0 : 2 : 0]	1.9	
119 [1 : 5 : 0 : 2]	2.4		117 [1 : 5 : 0 : 0]	1.9	
137 [1 : 7 : 0 : 2]	2.2		81 [1 : 1 : 0 : 0]	1.7	
15.4%			10.8%		
Afternoon (12–17 h)			Night (18–23 h)		
State	Freq. (%)	Representation	State	Freq. (%)	Representation
87 [1 : 1 : 2 : 0]	2.3		146 [2 : 0 : 0 : 2]	3.8	
182 [2 : 4 : 0 : 2]	2.2		137 [1 : 7 : 0 : 2]	2.9	
146 [2 : 0 : 0 : 2]	1.7		110 [1 : 4 : 0 : 2]	2.3	
110 [1 : 4 : 0 : 2]	1.3		209 [2 : 7 : 0 : 2]	1.9	
96 [1 : 2 : 2 : 0]	1.2		182 [2 : 4 : 0 : 2]	1.6	
8.7%			12.5%		

FIGURE 7: First five discrete wind states with the highest occurrence frequencies during the March 2006 time periods of early morning, morning, afternoon, and night.

6.2. *Preliminary Results from the 4-Cell Model.* Within the framework of the 4-cell lattice wind model, the Mexico City area is modeled as a 2D lattice with four identical cells, which represent NE, NW, SW, and SE quadrants of the city. The wind state at each cell is described, as in the 1-cell model, by four parameter (U , θ , γ , and ω), whose values are considered as spatial averages over the cell. The wind state of the system is now represented by four cell wind states:

$$\xi = \begin{bmatrix} (U, \theta, \gamma, \omega)_{NW} & (U, \theta, \gamma, \omega)_{NE} \\ (U, \theta, \gamma, \omega)_{SW} & (U, \theta, \gamma, \omega)_{SE} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

This description, because of the topographic complexity in the region, is particularly useful in the case of Mexico City.

Figure 10 presents the hourly wind states occurred on March 19, 2006. This day is particularly interesting for the purposes of MILAGRO campaign because the DWS describe winds blowing from south of the city, or at least, with flow components from the south, for 21 hours. The wind behavior during that day was classified by Voss et al. [16], based on experimental results obtained with free-floating altitude controlled balloons, as one of the most significant outflow events during MILAGRO field campaign. The DWSs with different wind flow characteristics were those of the morning from 04 to 07 h, which very clearly present convergent features of Mexico City katabatic winds. It is worth mentioning that starting from 07 h up to the end of the day the wind

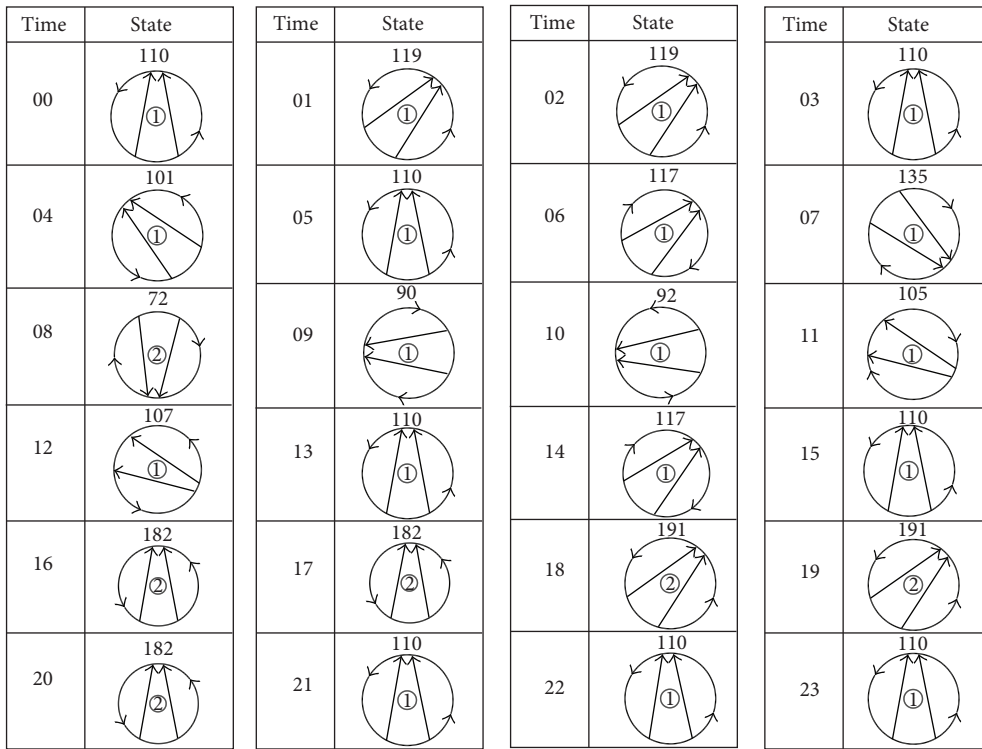


FIGURE 8: The set of discrete wind states occurred on March 9, 2006. Predominance of DWS with a flow component from south is observed.

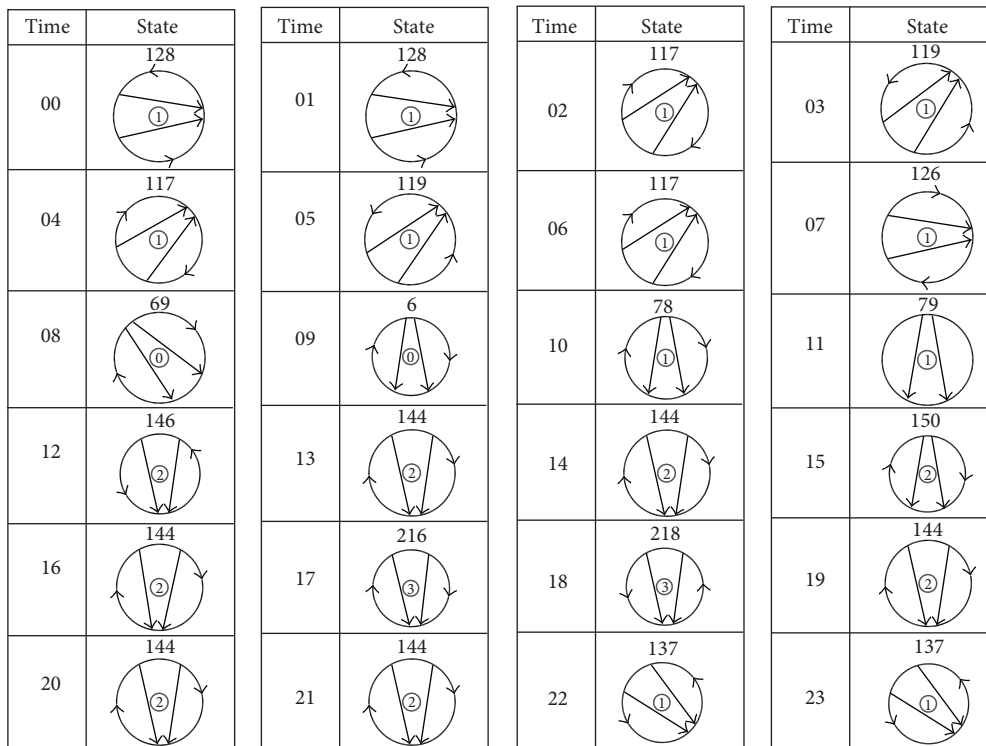


FIGURE 9: The set of discrete wind states occurred on March 5, 2006. Predominance of DWS with a flow component from north is observed.

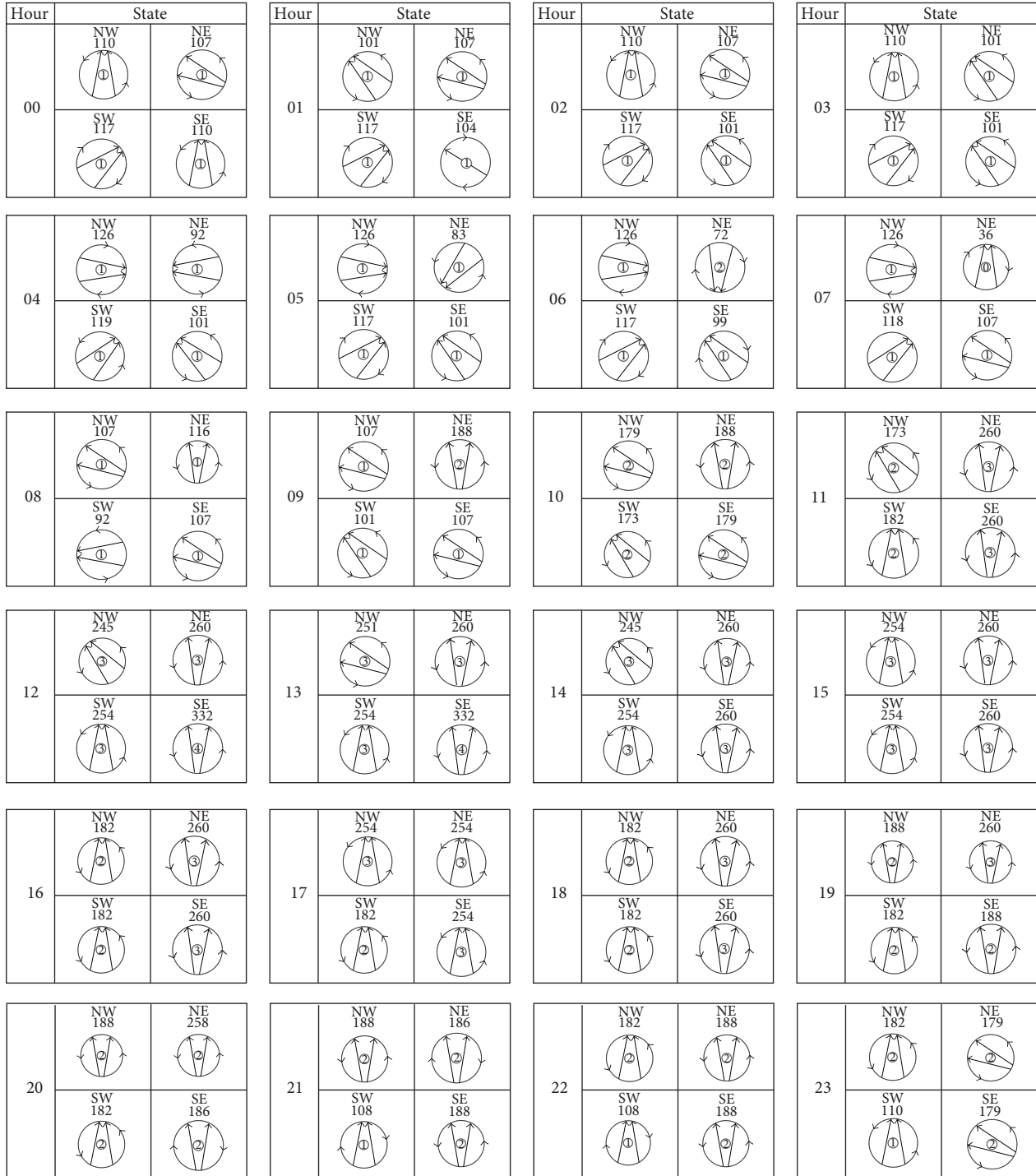


FIGURE 10: Discrete wind states occurred in Mexico City during March 19, 2006. 4-cell model.

state in the SE quadrant of the city represents divergent winds blowing from south or southeast. These features of the DWS at SE quadrant disclose that they correspond to gap winds coming into the city through the mountain gap located between the Sierra Ajusco-Chichinautzin and the Iztaccihuatl volcano. Recognizing the gap winds reveals the convenience of using the 4-cell model for better identifying the Mexico City wind patterns.

7. Conclusions

In this work, we described a lattice wind modeling approach at a meso-β scale proposed by Salcido et al. [1–3]. It was applied for identifying the main characteristics of wind events that prevailed in Mexico City during the MILAGRO field campaign (March 2006). The study was performed with the hourly wind data provided by the meteorological subnetwork

(REDMET) of the official atmospheric monitoring network (SIMAT) of the Mexico City Metropolitan Area. Because of the systematic availability of reliable and high-quality wind data at REDMET, consideration of studies for longer time periods does not imply additional technical problems. This modeling approach has been applied recently for identifying and selecting of meteorological scenarios in air quality assessment studies [18, 19].

Only results from the simplest lattice wind models (those with 1 and 4 lattice cells) were considered in this work. In spite of the conceptual simplicity of the model, its results allowed recognizing of some of the main features of wind circulation in Mexico City during March 2006. In particular, the following features can be underlined.

- (a) Predominance (66%) of wind events with speeds ranging from 0.25 to 1.50 m/s. The wind states with the lowest speeds (0–0.25 m/s) appeared mainly during the early morning and Morning time periods, while the states with the highest speeds (1.50–5.50 m/s) occurred especially during afternoon and night.
- (b) Predominance (20%) of northerly wind events followed by the southerly, southwesterly, and northeasterly wind events, with frequencies of 16%, 15%, and 13%, respectively.
- (c) The presence of winds events driven thermally by combination of mountain-valley effects (derived from the presence of high mountains surrounding the Basin of Mexico), and the urban heat island effects (derived from the large extension of urban surface in the city and the large area of rural soil in the surroundings). The combination of those effects led to the occurrence of convergent winds with a frequency of 75%, with predominance during the nocturnal hours (katabatic winds), but also with considerable presence during the sunlight hours (urban heat island winds).
- (d) A slight prevalence of wind events with cyclonic (positive) vorticity (55%). Mexico City wind events revealed the existence of a diurnal cycle in wind vorticity, where the anticyclonic wind states presented an hourly distribution accumulated around the sunrise, while the hourly distribution of cyclonic wind states appeared accumulated around midnight.
- (e) The presence of gap winds at southeast sector of the city as a consequence of the mountain gap 22 km long located between the Ajusco-Chichinautzin and the Iztaccihuatl mountains. The main feature of wind states associated to the gap winds was the presence of divergent wind states in the SE quadrant of the city representing divergent local winds blowing from south or southeast. This class of winds was identified within the framework of the 4-cell lattice wind model.
- (f) Divergence and vorticity of the Mexico City wind reflected the effect of the diurnal cycle of incoming solar radiation, which is revealed by the main Fourier

component (having a 24 h period) of their time series. The time series of wind divergence, in addition, reveals also an important Fourier component with a 12 h period, which presumably is induced by the presence of a heat island phenomenon in the city.

Acknowledgments

Enlightening comments and helpful suggestions from Sasha Madronich (National Center for Atmospheric Research, USA) are acknowledged. Collaboration of M. I. Saavedra (CCA-UNAM, Mexico) and R. Villegas-Martínez (IIE, Mexico) in organizing and preparing the REDMET-SIMAT meteorological data for the modeling purposes is also acknowledged.

References

- [1] A. T. Celada and A. Salcido, "The Mexico City 2006 wind direction states," in *Proceedings of the 20th IASTED International Conference on Modelling and Simulation*, pp. 51–58, Banff, Canada, July 2009.
- [2] A. Salcido and A. T. Celada, "A lattice gas approach to the Mexico City wind field estimation problem," in *Modelling, Simulation and Optimization*, G. Romero Rey and L. M. Muneta, Eds., pp. 385–416, InTech, Vienna, Austria, 2010.
- [3] A. Salcido, A. T. Celada, and T. Castro, "A meso- β scale description of surface wind events in Mexico City during MILAGRO 2006 campaign," in *Proceedings of the 2nd IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering*, pp. 820–827, Banff, Canada, July 2010.
- [4] E. Jáuregui, "Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin," *Atmósfera*, vol. 1, no. 3, pp. 131–140, 1988.
- [5] E. Jáuregui, "Heat island development in Mexico City," *Atmospheric Environment*, vol. 31, no. 22, pp. 3821–3831, 1997.
- [6] J. E. Bossert, "An investigation of flow regimes affecting the Mexico City region," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 36, no. 2, pp. 119–140, 1997.
- [7] J. D. Fast and S. Y. Zhong, "Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin," *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no. 15, pp. 18927–18946, 1998.
- [8] J. C. Doran, S. Abbott, J. Archuleta et al., "The IMADA-AVER boundary layer experiment in the Mexico City Area," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79, no. 11, pp. 2497–2508, 1998.
- [9] A. Salcido, A. T. Celada, R. Villegas-Martínez, H. Salas-Oviedo, R. Sozzi, and T. Georgiadis, "A micrometeorological data base for the Mexico City Metropolitan Area," *Il Nuovo Cimento C*, vol. 26, no. 3, pp. 317–355, 2003.
- [10] A. Salcido, R. Sozzi, and T. Castro, "Least squares variational approach to the convective mixing height estimation problem," *Environmental Modelling and Software*, vol. 18, no. 10, pp. 951–957, 2003.
- [11] B. de Foy, E. Caetano, V. Magaña et al., "Mexico City basin circulation during the MCMA-2003 field campaign," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 5, no. 8, pp. 2267–2288, 2005.
- [12] J. D. Fast, B. de Foy, F. Acevedo-Rosas et al., "A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 7, no. 9, pp. 2233–2257, 2007.

- [13] B. de Foy, J. D. Fast, S. J. Paech et al., “Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8, no. 5, pp. 1209–1224, 2008.
- [14] A. Salcido, “A non local equilibrium model for the constitutive equations of a non-uniform simple fluid,” in *Proceedings of the 2nd IASTED International Symposium on Modern Nonlinear Theory (MNT’08)*, pp. 339–344, usa, November 2008.
- [15] Secretaría del Medio Ambiente and Gobierno del Distrito Federal, *Informe Climatológico Ambiental de la Cuenca del Valle de México*, 2001.
- [16] P. B. Voss, R. A. Zaveri, F. M. Flocke et al., “Long-range pollution transport during the MILAGRO-2006 campaign: a case study of a major Mexico City outflow event using free-floating altitude-controlled balloons,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, no. 15, pp. 7137–7159, 2010.
- [17] Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), “Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno de la Ciudad de México,” <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/>, 2011.
- [18] D. Salcedo, T. Castro, L. G. Ruiz-Suárez et al., “Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state),” *Science of the Total Environment*, vol. 414, pp. 417–432, 2012.
- [19] O. Peralta, T. Castro, M. Durón et al., “H₂S emissions from Cerro Prieto geothermal power plant, Mexico, and air pollutants measurements in the area,” *Geothermics*, vol. 46, pp. 55–65, 2013.

A BRIEF CLUSTERING ANALYSIS OF THE MEXICO CITY LOCAL WIND STATES OCCURRED DURING THE MILAGRO CAMPAIGN

Alejandro Salcido, Susana Carreón-Sierra and Ana-Teresa Celada-Murillo

Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Energías Alternas
Reforma 113, Col. Palmira, 62490-Cuernavaca, Morelos, México. E-mail: salcido@iie.org.mx

ABSTRACT

A clustering analysis of the Mexico City local wind events that occurred during the MILAGRO field campaign was carried out for identifying their main characteristics and patterns. This study was performed with the hourly wind data provided by the official atmospheric monitoring network for March 2006. The local winds of the period were described with a meso- β scale lattice wind model endowed with a wind state concept defined by the wind velocity horizontal components and the wind's divergence and vorticity. The wind states produced by the lattice wind model were analyzed through their occurrence frequencies and hierarchical cluster analysis. This procedure revealed wind patterns very similar to those already described by other authors. However, new and interesting features were also revealed such as a strongly stable cluster composed by wind states befallen from sunrise to midafternoon, and that the 4-group clustering revealed itself as the more stable wind states organization, while those with 6 and 8 clusters resulted the less stable ones. A Fourier transform analysis of the wind states time series evidenced wind patterns driven by the diurnal cycle of incoming solar radiation, and other patterns that may be associated with the urban heat island phenomenon.

KEY WORDS

Mexico City, MILAGRO, local wind patterns, meso- β scale wind states, cluster analysis.

1. Introduction

The knowledge of the Mexico City local wind circulation events and their possible organization in groups and patterns are important for understanding the air pollution behavior. Mexico City is surrounded by high mountains and it happens frequently that air pollutants remain trapped inside the basin for several days; however, the height of the atmospheric boundary layer may reach values up to 2600 m (or even higher) above ground [1] and, during some wind circulation scenarios, it favors the air pollution exportation towards the surrounding urban settlements, such as the cities of Morelos State [2]. In addition, the urban morphology of Mexico City has changed significantly in the last decade due to construction of vehicular corridors, skyscrapers, and other buildings, producing an important reduction of the ecological reserve per year [3]. These modifications produce mechanical and thermal phenomena

that change the Mexico City local wind circulation and may increase the adverse effects of the heat island phenomenon.

The general characteristics of the Mexico City local winds and its relations with air pollution and urban climate have been reported from more than two decades ago. Jaúregui in 1988 and 1997 analyzed the interactions between the local winds and air pollution and the heat island development in Mexico City [4, 5]. Bossert in 1997 studied the flow regimes affecting the Mexico City region [6], and in 1988, Fast & Zhong [7] and Doran et al. [8] studied the meteorological factors associated with the air pollution, and particularly with the ozone concentrations, within the Mexico City basin. In 2003, Salcido et al. reported the first long-term micrometeorological campaign in surface carried out in the MCMA [9], and also a brief analysis of the statistical behavior of the convective mixing height in this region [1]. De Foy et al. in 2005 reported results of the Mexico City basin wind circulation during a short-term campaign carried out in 2003 [10]. More recently, Fast et al. in 2007 reported a meteorological overview of the MILAGRO 2006 field campaigns [11]; de Foy et al. in 2008 reported a basin-scale study of the wind transport and its comparison to climatology using cluster analysis also for the period of the MILAGRO campaign [12]; and Salcido et al. [13] and Celada et al [14], described the main characteristics of the Mexico City local wind events occurred during the MILAGRO campaign within the framework of a lattice wind model at a meso- β scale.

In this paper, it is reported a clustering analysis of the local wind events observed in Mexico City during March 2006 (MILAGRO). It was carried out within the framework of a lattice wind modeling approach (LWMA) [13, 14], where Mexico City was represented by a lattice domain with a finite number of identical cells, each one endowed with an extended wind state variable defined by the horizontal components of wind velocity and the wind's divergence and vorticity. The hourly wind data reported by the official atmospheric monitoring network (REDMET-SIMAT) of the MCMA during the period were used to obtain the set of the city wind states under the view of the LWMA. A hierarchical cluster analysis of the 1-cell model wind states was performed assuming a Euclidean distance measure between any pair of wind states and the Ward's proximity criterion [15]. The identification of the different wind states that occurred in Mexico City throughout the study period, so as the recognizing of the main wind patterns and their

characteristics were carried out through the densities of discrete wind states of the wind states clusters.

The two cluster organization of the wind states started at a Ward distance of 62, finishing at a Ward distance of 47. One of these two clusters resulted strongly stable with respect the Ward's distance parameter. It remained unchanged up to a Ward distance close to 10, and was composed by wind states occurred between sunrise and midafternoon. The second cluster, which was composed mainly by wind states occurred during late afternoon and nighttime, started to break down into smaller clusters at a Ward distance of 47, approximately. The densities of discrete wind states were determined and analyzed for each cluster organization, allowing the identification of the different wind states that occurred in Mexico City throughout the study period, and also the recognizing of the main wind patterns and their characteristics. The results were in agreement with the wind patterns already described by de Foy et al [12] and other authors. However, the lattice wind modeling approach was able also to provide more detailed descriptions of the wind circulation events and to make evident new characteristics which emerged as a consequence of including the wind properties of divergence and vorticity as additional wind state variables. A more detailed and complete report will be published elsewhere.

2. Theoretical Framework

As the spatial domain of interest it is considered a region of atmosphere extending from ground up to a given height H which is assumed sufficiently small so that the horizontal movement of the air masses can be described properly by wind velocity measurements at surface meteorological stations. The lattice wind modeling approach [13, 14] represents this region by a 2D lattice domain made up of a given number ($N = N_x \times N_y$) of identical rectangular cells, each invested with a *wind state* (WS) variable that describe local wind conditions inside the cell in terms of a quartet (u, v, γ, ω) , where (u, v) denotes the horizontal components of wind velocity, and γ and ω denote the divergence and vorticity of wind (as they are defined in meteorology). If U denotes wind speed and θ denotes wind direction, the quartets $(U, \theta, \gamma, \omega)$ and (u, v, γ, ω) are equivalent each other. The values of the state parameters are understood as spatial averages over the lattice cell. The inclusion of divergence and vorticity as additional wind state variables endows the model with a slightly non-local character and allows recovering some of the wind behavior information lost by the filtering due to the spatial averaging process of the wind velocity over each cell. Thus, besides the mean velocity, its tendencies of rotation and divergence inside each cell will be known. From the point of view of the local equilibrium hypothesis (LEH) of linear fluid mechanics, the LWM is over-determined in the limits $N_x, N_y \rightarrow \infty$. This is not the case, however, within the theoretical framework of the extended theories of non-linear thermomechanics, where the LEH is relaxed to admit additional state variables (such as the gradients of the velocity field) in the definition

of the phase space of the system [16]. Under the view of a LWM, the spatial complexity of the wind velocity is mapped into a $N_x \times N_y$ matrix defined by the cell wind states $(u, v, \gamma, \omega)_{ij}$. This matrix represents the wind state of the whole system.

In the phase space of the wind states, a Euclidean distance between any two wind states \mathbf{S}_1 and \mathbf{S}_2 can be defined as follows

$$D = \sqrt{\Lambda^2[(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2] + \Gamma^2(\Delta \gamma)^2 + \Omega^2(\Delta \omega)^2} \quad (1)$$

Here, Λ , Γ and Ω are convenient normalizing factors, such as the maximum of wind speed and the maxima of the absolute values of divergence and vorticity during the study period. The normalizing factors allow that all the four state parameters have contributions equally relevant in the distance calculation. This Euclidean distance can be used as one similarity criterion for analyzing the clustering of the wind states in the phase space (u, v, γ, ω) .

Each wind state can be identified by a non-negative integer number ε given by

$$\varepsilon = \omega + 3[\gamma + 3(\theta + 8U)] \quad (2)$$

when the quartet $(U, \theta, \gamma, \omega)$ has been chosen for describing the wind state and the parameters are expressed in terms of discrete scales, such as the Beaufort wind speed scale, the 8 sectors scale of wind direction (N=0, NE=1, E=2, SE=3, S=4, SW=5, W=6, NW=7), and 3-level scales for wind divergence (0 = convergent, 1 = parallel, and 2 = divergent flow) and wind vorticity (0 = anticyclonic, 1 = nil, and 2 = cyclonic rotation).

The wind states are referred as *discrete wind states* (DWS) when they are expressed in terms of finite and discrete scales. Another useful concept is that of a *wind direction state* (WDS). It can be defined if the 4-cells LWM is being used. The WDS is a reduced version of the DWS that is defined by the four mean wind directions θ_{NE} , θ_{NW} , θ_{SW} , and θ_{SE} at the cells NE, NW, SW and SE of the lattice domain, respectively. It can be identified by a four digits octal number (or its decimal equivalent) when the wind directions are expressed in terms of the 8 sectors scale.

Not all the possible wind states can be observed at the region of interest. This depends on the topographical features and on the particular wind driving forces existing in the region. The frequency distribution of the wind states, referred as the density of wind states (DOWS), constitutes a convenient way for quantifying the probability of occurrence of each wind state under given conditions.

3. The Study Area

The air pollution problem at Mexico City is strongly related (besides emissions) to its geographical setting, regional orography, topography, and meteorology, especially to local wind circulation. Mexico City lies inside a tropical basin located at the middle region of the Neovolcanic Axis, between the 19.05 and 19.60 degrees of north latitude and the 98.95 and 99.35 degrees of west longitude, with an average altitude of 2240m.

Mexico City is almost completely surrounded by high mountains, as shown in Figure 1. A topographic profile following the bordering mountains around the Mexico City basin is shown in Figure 2. This profile shows that the main ventilation possibilities of Mexico City are associated with the wind channel crossing the Mexico Basin south-north at the east side, which may favor the northerly, northeasterly and southerly winds. Moreover, due to the mountain-valley system of Mexico City, drainage winds, converging to the valley center, can be found frequently during nighttime.



Figure 1. Topographic features surrounding Mexico City. Political division in Delegations is also shown.

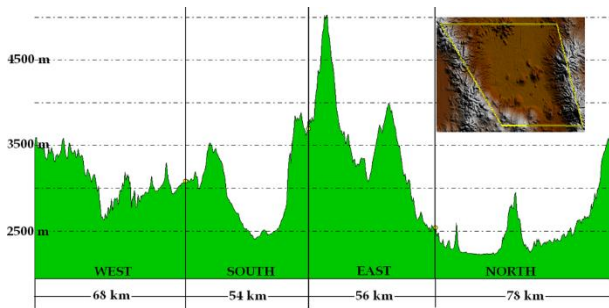


Figure 2. Topographic profile following the bordering mountains around Mexico City.

For lattice wind modeling purposes, the spatial domain was the Mexico City region located at latitudes from 19.30°N to 19.57°N and longitudes from 99.00°W to 99.27°W . This area was considered as a single cell in the 1-cell lattice wind model, and divided in quadrants NE, NW, SW and SE for the purposes of the 4-cell lattice wind model, as it is shown in Figure 3. These quadrants are defined by the west-east and south-north axis of the reference frame whose origin was set at the geometric center of the stations positions of the Mexico City atmospheric monitoring network. This point (intersection of dotted lines) is 2 km at the NE of the Mexico City Zócalo, very close to the crossing of the Circunvalación and Eje 2 OTE avenues. The geographic coordinates of the geometric centers of the lattice cells (the city quadrants) were: (19.499°N , 99.067°W) for the NE cell, (19.499°N , 99.200°W) for the NW cell, (19.366°N , 99.200°W) for the SW cell, and (19.366°N , 99.067°W) for the SE cell. The cell dimensions were $L_{WE} = 14.0$ km (in the west-east direction) and $L_{SN} = 18.5$ km (in the south-north direction).

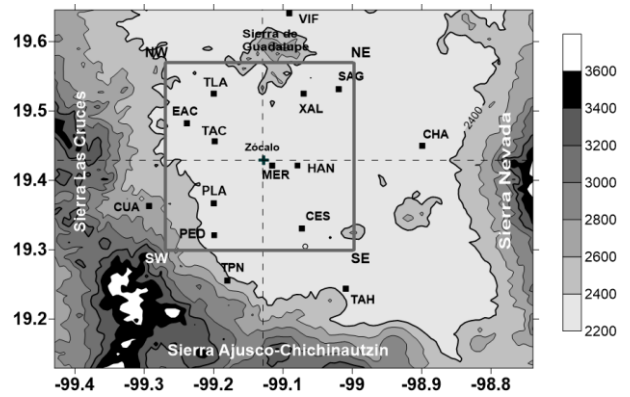


Figure 3. Topographic features of the Mexico City area. Lattice domains used in the 1-cell (solid line rectangle) and the 4-cell (solid line rectangle divided by dotted lines) lattice wind models are shown. Positions of the stations of the meteorological network (REDMET-SIMAT) are shown also (small solid squares).

4. The Wind Data

The MILAGRO field campaign was carried out in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) in March 2006. It was an international scientific collaborative effort focused on the study of the local, regional and global impact of air pollution in a megacity, using as a case study the MCMA and its surrounding areas [11, 12, 17, 18]. MCMA was selected as a case study because it has tropical latitude similar to other megacities, it receives a large amount of incoming solar radiation all year long making its atmosphere extremely active photochemically, which helps to determine the transformation of atmospheric pollutants; but also because the existence of reliable urban and air quality measurement records, which the official air quality and meteorological monitoring networks provide systematically each hour.

The MCMA atmospheric monitoring system (SIMAT) has 36 stations: 24 located in Mexico City and 12 at the State of Mexico. The local meteorological conditions (wind speed, wind direction, temperature, and relative humidity) are measured by 15 stations that constitute the meteorology network (REDMET) of SIMAT. Their positions are shown in Figure 3.

The database we used for carrying out the study comprises the hourly reports of wind speed and wind direction provided by REDMET throughout March 2006. This is a database with 744 hourly events that describe the local meteorology conditions which prevailed at the MCMA during the MILAGRO campaign. In this period, the average performance of the REDMET was 90% with respect availability of wind data.

5. Results and Discussion

The 1-hour average data of wind speed and wind direction provided by the REDMET were used for estimating the wind velocity components (u , v), the wind divergence γ , and the wind vorticity ω , at the geometric centers of the cells of the 1-cell and 4-cell lattice wind models of Mexico City. In general terms, the procedure was as follows: for each hour of the study period, the wind velocity

components at each site of a 8×8 grid (covering the study domain) were estimated by means of a Krigging type boundary constrained interpolation technique applied to the average data of wind speed and wind direction of all the REDMET stations; then the results were used to calculate the spatial averages of the wind state parameters (u , v , γ , ω) over each cell of the lattice wind model. The corresponding sets of discrete wind states (DWS) and wind direction states (WDS), and their respective frequency distributions, were calculated for the period of interest.

5.1. Time Series of the Mexico City Wind States

The area of Mexico City was considered as a single cell and its local wind conditions were described by spatial averages of state parameters over the region. The time series of the wind state parameters (u , v , γ , ω) for the study period, and their respective fast Fourier transforms, are shown in Figure 4. From the left column of plots we can observe that this period was characterized, in average, by low intensity northerly convergent cyclonic winds.

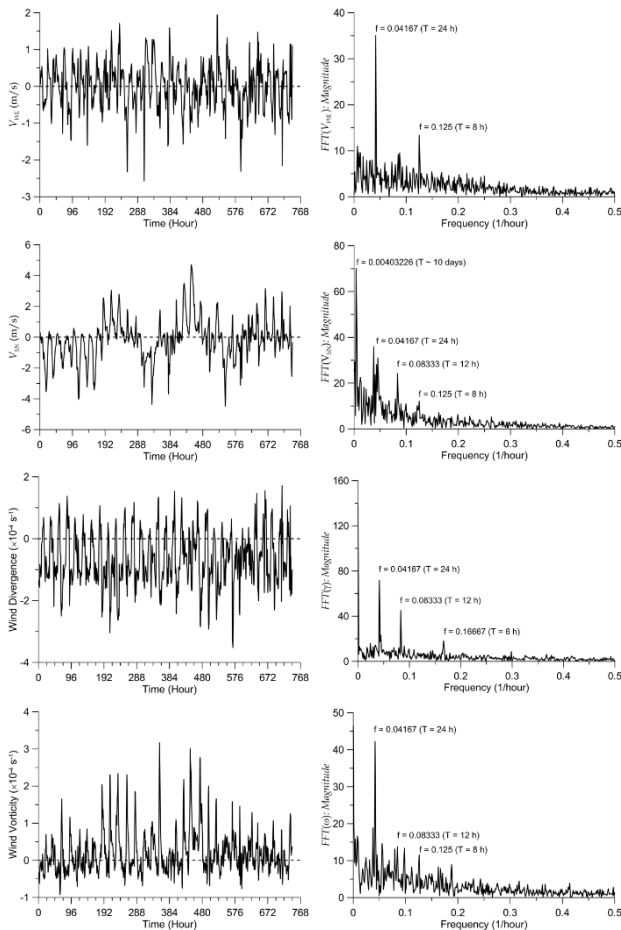


Figure 4. Results of the 1-cell lattice wind model applied to Mexico City. Time series of the wind state parameters (left column) and their fast Fourier transforms (right column) for March 2006. For all the wind state parameters, an important Fourier component with a 24 hours period is observed.

Some remarkable details of the main characteristics of the Mexico City wind behavior during this period were the following:

a) The south-north velocity component was negative during 54% of the hours of the study period, indicating a dominance of winds with a northerly flow component.

b) The west-east wind velocity component revealed two important Fourier components: one with a 24 h period and the other one with an 8 h period. The south-north wind velocity component showed a low frequency oscillation, which drove a switching of this wind velocity component between south and north each ten days, and two oscillations, with periods of 24 h and 12 h, superposed.

c) The time series of wind divergence oscillated around a mean value of $-0.66 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, ranging from -3.5×10^{-4} to $1.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, approximately. The order of magnitude of wind divergence (10^{-4}) is consistent with the estimation by Jaureguí in 1988 [4]. This time behavior indicates that wind divergence was negative (convergent winds) for the majority (75%) of the hours of the study period, and shows that convergent flow prevailed not only during the nighttime hours (driven by the mountain-valley system) but was also present during many of the daylight hours (50% of them), when it would be expected that turbulent mixing would tend to weaken the heat-island induced flow [4]. Moreover, the time behavior of wind divergence revealed the existence of three main Fourier components with periods of 24, 12 and 6 hours, in decreasing order of importance.

d) The wind vorticity oscillated around $0.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, from -9.2×10^{-5} to $3.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. It was positive for the 55% of the study-period hours, revealing the dominance of winds with cyclonic features. The wind vorticity had a main Fourier component with a 24 h period clearly defined. Several other important higher frequency components were identified also, but with considerably smaller magnitudes.

e) All the wind state parameters had a time behavior with an important Fourier component with a 24 h period, suggesting the existence of wind state patterns driven by the diurnal cycle of incoming solar radiation. A Fourier component with a 12 h period was also present, although it was particularly evident only for the south-north wind velocity component and for the wind divergence. This feature could be closely related to the urban heat island phenomenon.

5.2. Occurrence Frequencies of Discrete Wind States

Figure 5 shows that the wind events observed in Mexico City during March 2006 are represented by DWS between 0 and 215, in according to the numbering scheme given by the equation (2). The speeds of these states were basically distributed over the Beaufort levels 0, 1, and 2, with populations of 8.2%, 65.7%, and 23.8%, respectively; the maximum speed in the period was around 3.5 m/s. The first ten DWS with the highest relative occurrence frequencies comprised the 49.3% of the 744 hourly wind events. The main characteristics of these DWS are described in Table 2. It is also interesting to observe that 75% of the discrete wind states were convergent and that 55% of them represented winds with cyclonic (positive) vorticity.

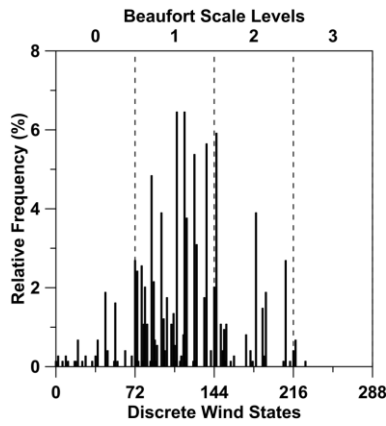


Figure 5. The Mexico City Density of Discrete Wind States for March 2006.

Table 2. The first ten discrete wind states with the highest frequencies.

State	Freq (%)	WSP (m/s)	WDR	WDIV	WVOR
110	6.45	$0.25 \leq v < 1.5$	S	< 0	> 0
117	6.45	$0.25 \leq v < 1.5$	SW	< 0	< 0
146	5.91	$1.5 \leq v < 3.5$	N	< 0	> 0
137	5.65	$0.25 \leq v < 1.5$	NW	< 0	> 0
126	5.38	$0.25 \leq v < 1.5$	W	< 0	< 0
87	4.84	$0.25 \leq v < 1.5$	NE	> 0	< 0
96	3.90	$0.25 \leq v < 1.5$	E	> 0	< 0
182	3.90	$1.5 \leq v < 3.5$	S	< 0	> 0
119	3.76	$0.25 \leq v < 1.5$	SW	< 0	> 0
128	3.09	$0.25 \leq v < 1.5$	W	< 0	> 0

Notation: WSP: wind speed, WDR: wind direction, WDIV: wind divergence, WVOR: wind vorticity.

Figure 6 shows the partial densities of discrete wind states for the time periods of 00-07 hours (early morning), 08-15 hours (morning and early afternoon), and 16-23 hours (late afternoon and night). Mexico City local time is considered. The hour ID (00, 01, 02 ...) indicates the beginning of a 1h period. The frequency of a DWS is the percentage of the total number of wind events of March belonging to the 8h-period where the wind state was observed ($8 \times 31 = 248$). In Table 3, the first five DWS with the highest frequencies are described for each 8 hour period.

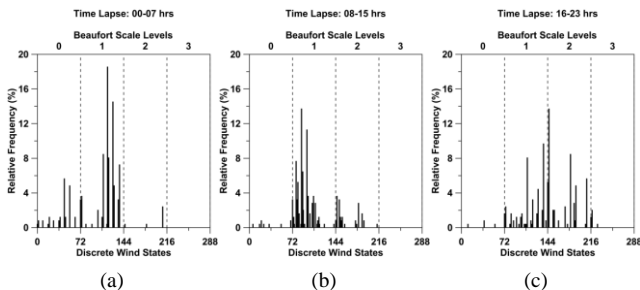


Figure 6. Partial densities of DWS for periods of (a) 00-07 h (early morning), (b) 08-15 h (morning and early afternoon), and (c) 16-23 h (late afternoon and night), local time. Frequencies are relative to the number of states of the given 8h-period of March 2006.

In Table 4, for each 8h-period of the day, the percentages of DWS with character convergent, anticyclonic, and of belonging to the first four Beaufort levels are presented. We observed that in absence of sun light (nocturnal hours)

the DWS were dominantly convergent (99% during early morning and 92% during late afternoon and night), but during the daylight hours the divergent DWS comprised the 68% of the states of the period. From midnight up to early afternoon, the anticyclonic states were slightly dominant (~57%) over the cyclonic ones; but its occurrence was reduced to the 21% during late afternoon and night. During early morning, morning, and early afternoon (00-15h) the DWS with speeds in the second level (B=1) of Beaufort scale dominated with occurrences larger than 75%; but during late afternoon and night, the states with speeds in the third level (B=2) of Beaufort scale dominated with an occurrence frequency close to 50%.

During the study period, the main characteristics of the Mexico City wind events were as follows:

(a) *Early morning*: low intensity and convergent winds with a slightly dominant anticyclonic vorticity, and with a flow component from west.

(b) *Morning and early afternoon*: low intensity divergent winds blowing mainly from northeast and north, with a slightly dominant anticyclonic vorticity. It is interesting to observe that during this 8h-period an important percentage (32%) of the states were convergent, reflecting the effect of the heat island phenomenon on the Mexico City winds.

(c) *Late afternoon and night*: low intensity (but higher than in the other 8h-periods) convergent and cyclonic winds, blowing mainly from northwest and south.

The effect of the mountain-valley system is evident as a thermal forcing of the Mexico City nighttime winds.

Table 3. First five DWS with the highest frequencies for the day periods 00-07h (early morning), 08-15h (morning and early afternoon), and 16-23h (late afternoon and night).

Day Period	State	Freq (%)	WSP (m/s)	WDR	WDIV	WVOR
00-07	117	18.55	$0.25 \leq v < 1.5$	SW	< 0	< 0
	126	14.52	$0.25 \leq v < 1.5$	W	< 0	< 0
	110	8.47	$0.25 \leq v < 1.5$	S	< 0	> 0
	119	8.06	$0.25 \leq v < 1.5$	SW	< 0	> 0
	137	7.26	$0.25 \leq v < 1.5$	NW	< 0	> 0
08-15	87	13.71	$0.25 \leq v < 1.5$	NE	> 0	< 0
	96	11.29	$0.25 \leq v < 1.5$	E	> 0	< 0
	78	7.66	$0.25 \leq v < 1.5$	N	> 0	< 0
	89	6.45	$0.25 \leq v < 1.5$	NE	> 0	> 0
	81	5.24	$0.25 \leq v < 1.5$	NE	< 0	< 0
16-23	146	13.71	$1.5 \leq v < 3.5$	N	< 0	> 0
	137	9.68	$0.25 \leq v < 1.5$	NW	< 0	> 0
	182	8.47	$1.5 \leq v < 3.5$	S	< 0	> 0
	110	8.06	$0.25 \leq v < 1.5$	S	< 0	> 0
	209	5.65	$1.5 \leq v < 3.5$	NW	< 0	> 0

Table 4. Fractions (%) of the DWS with a character of convergent, anticyclonic, and of belonging to the first levels of the Beaufort scale for 8h-periods of the day. Percentages are relative to the total number of wind events of the 8h-period throughout the month.

8h-Period	Convergent States	Anticyclonic States	B=0 States	B=1 States	B=2 States	B=3 States
00-07	99.60	56.85	19.35	77.42	3.23	0
08-15	31.85	57.26	3.63	75.81	18.55	2.02
16-23	92.74	20.97	1.61	43.95	49.60	4.84

5.3. Cluster Analysis of the Mexico City Wind States

For the cluster analysis, the database was the set of Mexico City wind states (WS) obtained with the 1-cell LWM. It contains the quartets (u, v, γ, ω) estimated with the model for the 744 hours of the period.

First, the hourly quartets (u, v, γ, ω) were normalized with the maximum values of wind speed, absolute wind divergence, and absolute wind vorticity for expressing the parameters values in the interval $[-1, 1]$:

$$(u, v) \rightarrow \frac{(u, v)}{WSP_{max}}, \quad \gamma \rightarrow \frac{\gamma}{|\gamma|_{max}}, \quad \omega \rightarrow \frac{\omega}{|\omega|_{max}} \quad (3)$$

This normalization assures that each parameter participates with the same weight than any other in the distance calculation between wind states. As similarity criterion between wind states, it was considered the Euclidean distance defined in terms of the normalized parameters, as described in Section 2. Then the set of normalized wind states was taken as input data for carrying out a clustering analysis.

The cluster analysis of the Mexico City wind states was carried out in practice with the software *DataLab* (version 3.511), which was kindly provided to the authors by Hans Lohninger [21]. This software was configured for using the Ward's method for linkage, the Euclidean distance measure, and the option of no scaling of data (the data set was previously normalized as indicated above). Figure 7 shows the dendrogram produced by DataLab, showing the possible organizations of the Mexico City wind states in clusters according to the Euclidean distance between wind states given by Eq. (1) and the Ward's proximity criterion between clusters.

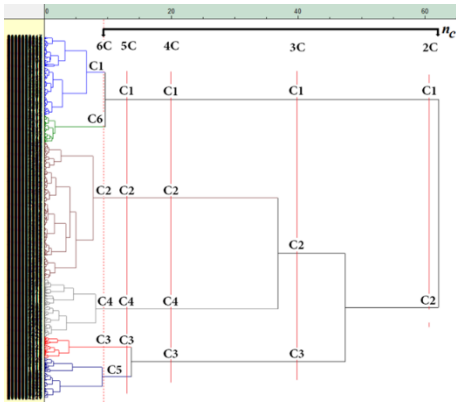


Figure 7. Dendrogram of the clustering of the Mexico City wind states. Each cluster is referred as $mC-Cn$, where m is the number of clusters we are considering and n is a natural number used to identify the particular cluster. So, the clusters of the two cluster organization are 2C-C1 and 2C-C2.

In this figure, the wind states organizations with 2, 3, 4, 5 and 6 clusters have been highlighted. It is observed that, when the number of clusters n_c is less than 6, the wind states organizations in n_c clusters are relatively stable with respect of decreasing of Ward distance; that is, there is a relatively wide interval of Ward distance values for which a given organization of the wind states in n_c clusters is

found. In particular, the first wind states cluster (2C-C1), which is located at the top of the dendrogram, did not split until $n_c = 6$. The rest of the wind states belong initially to one cluster (2C-C2) that split itself, relatively fast, in 2, 3 and 4 clusters, as the similarity distance is being diminished, to form the 3, 4 and 5 cluster organizations. It is observed also that the more stable cluster organization is that of 4 clusters, it persists for Ward distances from 13.65 to 36.71; the less stable, otherwise, are those of 6 and 8 clusters, they live from 9.18 to 9.53 and from 7.76 to 8.12 units of Ward distance, respectively. Here we will discuss only those cluster organizations with $n_c = 6$. The results of this cluster organization of the wind states are described below and shown in Figure 8.

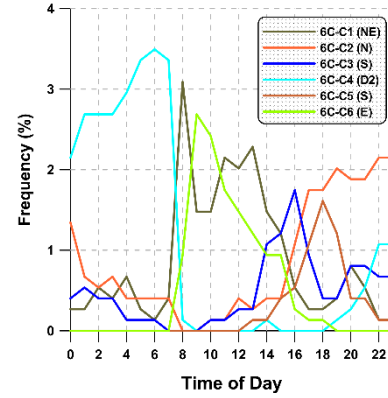


Figure 8. Six cluster organization of the Mexico City wind states occurred during the MILAGRO campaign. The plots give the occurrence frequency of each cluster of the arrangement for every hour of the day.

The characteristics of the first twelve DWS with the highest frequencies are described below and in Tables 5 to 10 for each cluster of the six cluster organization.

Cluster 6C-C1. The wind states of this cluster occurred predominantly in the time period from sunrise to sunset, centered on noon; this cluster, however, contains also wind states that occurred during the night period. Its main wind states (Table 5) represent low intensity winds ($0.25 < v < 1.5$ m/s) predominantly with a northerly flow component (5 from N and 2 from NE). No predominant divergence neither vorticity were observed in this cluster. As a whole, the occurrence frequency of the main wind states was close to 66% of the 158 states it contains (14% of the total of 744 wind events of the study period).

Cluster 6C-C2. This cluster contains wind events which occurred during late afternoon and night, with its highest relative population around midnight. Its main wind states (Table 6) represent convergent, low intensity ($v < 3.5$ m/s) winds with a flow component from north, and dominance of cyclonic vorticity (8/12 WS). These wind events may be driven by the thermal interaction between the Mexico basin and the Mexican plateau through the opening on the north boundary. The cyclonic vorticity of these local wind conditions may be a consequence of the Mexico City topography, especially because of the presence of the Sierra de las Cruces and the Sierra del Ajusco-Chichinautzin that surround Mexico City at the west and south sides.

Cluster 6C-C3. Its main wind states (Table 7) represent low intensity winds ($v < 3.5$ m/s), convergent (12/12) and cyclonic (11/12), blowing chiefly from the south sectors (7/12), although it also comprises states representing winds blowing from the north sectors (3/12) and from W and E. The hourly distribution of the wind states of this cluster is populated exclusively from noon to midnight, with a peak around the hour 18 (sunset).

Cluster 6C-C4. This cluster contains wind events which occurred during nighttime, mainly during early morning and night. Its population fell down suddenly at sunrise, between hours 7 and 8. The main wind states of this cluster (Table 8) represent convergent, very low intensity ($v < 1.5$ m/s) winds, blowing chiefly from the west cardinal sectors (NW, W, and SW), with dominance of anticyclonic vorticity (8/12 WS). Its states represent the katabatic winds produced by the mountain-valley systems of Mexico City.

Cluster 6C-C5. As shown in Table 9, the main wind states of this cluster represent low intensity winds ($v < 3.5$ m/s) with a flow component from south (11/12), chiefly convergent (10/12) and cyclonic (9/12). The hourly distribution of the wind states of this cluster disclose a peak around the hour 16, although some states of this cluster occurred close to midnight and during the first hours of early morning. The convergent character of the wind states of the clusters 6C-C3 and 6C-C5 is closely related to the nocturnal thermal effect derived from the mountain-valley system of Mexico City, which produces katabatic winds. The wind states of this cluster are also predominantly cyclonic and take place around the sunset period.

Cluster 6C-C6. The wind states of this cluster occurred only during daylight hours, from sunrise to sunset, with a peak at the hour 9. Its main wind states (Table 10) represent very low intensity, divergent winds with dominant anticyclonic vorticity (9/12 WS). Eight of the main states of this cluster had an easterly flow component (3 from NE, 3 from E, and 2 from SE). The occurrence frequency of these twelve states embodies the 95% of the 96 states of the cluster (12% of the total of 744 wind events of the study period).

6. Conclusions

The lattice wind modeling approach at a meso- β scale proposed by Salcido et al. [13, 14] and hierarchical cluster analysis were applied to identify the main characteristics and patterns of the wind events that prevailed in Mexico City during the MILAGRO field campaign (March 2006).

The study was carried out using hourly wind data provided by the meteorological network of the official atmospheric monitoring system of the Mexico City Metropolitan Area. The systematic availability of high quality wind data at this network makes possible to perform studies for longer time periods with no additional technical problems.

The conceptual simplicity of this modeling approach allows its application also for such a practical goals as identifying and selecting of meteorological scenarios in air quality assessment studies [2, 20].

This work made possible to recognize the following characteristics and patterns of the Mexico City wind events occurred during March 2006:

a) All the wind state parameters (horizontal velocity components, divergence and vorticity) disclosed a time behavior with an important 24h period Fourier component, suggesting the existence of wind state patterns driven by the diurnal cycle of incoming solar radiation. A 12h period Fourier component was also found; this was particularly evident for the south-north wind velocity component and for wind divergence. This last feature could be closely related to the urban heat island phenomenon. In fact, wind divergence was negative for the 75% of the study period hours, showing that convergent flow prevailed not only during the nighttime hours (driven by the mountain-valley system) but was also present during many of the daylight hours (50% of them).

b) Wind speed had a mean value of 1.14 m/s and a maximum of 4.80 m/s. The speeds of the discrete wind states were found, chiefly, in the second level of the Beaufort scale ($0.25 \leq v < 1.5$ m/s), with a population of 65.7%. In addition, the 75% of the discrete wind states represented convergent winds, and the 55% of them represented winds with cyclonic vorticity.

c) During early morning (00-07h) prevailed low intensity (77% in B=2) and convergent (99%) winds with a slightly dominant anticyclonic vorticity (57%) and a westerly flow component. During the morning and early afternoon (08-15h) prevailed low intensity (77% in B=2) and divergent (68%) winds, blowing mainly from northeast and north, with a slightly dominant anticyclonic vorticity (57%). And during the late afternoon and night period (16-23h) prevailed low intensity (but higher than in the previous 8h-periods), convergent (93%) and cyclonic (79%) winds, blowing mainly from northwest and south.

d) There was found a strongly stable wind states cluster that contains the 34% of the wind states of the period and remains as a whole for wide interval of the Ward distance (from 9.53 to 62.12). This cluster (2C-C1) contains wind states that basically took place during the daylight hours. The main states that belong to this cluster represent low speed ($0.25 \leq v < 1.5$ m/s) winds, blowing mainly from north, northeast and east, divergent in their majority, and with a slightly dominant anticyclonic vorticity. The second cluster (2C-C2) of the 2-cluster organization contains mainly the nighttime wind states of the study period. The more stable cluster organization was that of 4 clusters, persisting for Ward distances from 13.65 to 36.71, and the less stable ones were those of 6 and 8 clusters, which persisted from 9.18 to 9.53 and from 7.76 to 8.12 units of Ward distance, respectively.

e) The six cluster organization revealed strong similarities with results of other authors. In fact, the clusters 6C-C1 to 6C-C6 correspond, respectively, to the clusters referred as NORTHEAST, NORTH, SOUTH, DRAIN2, SOUTH and EAST by de Foy et al. [12]. Note that the clusters 6C-C3 and 6C-C5, together, correspond to the SOUTH cluster of de Foy et al.

Table 5. Cluster 6C-C1.

State	(U, θ , γ , ω)	Occurrences	Relative Frequency (%)	Absolute Frequency (%)	WSP	WDR	WDIV	WVOR
78	(1, 0, 2, 0)	14	8.86	1.88	$0.25 < v < 1.5$	N	Divergent	Anticyclonic
81	(1, 1, 0, 0)	13	8.23	1.75	$0.25 < v < 1.5$	NE	Convergent	Anticyclonic
110	(1, 4, 0, 2)	11	6.96	1.48	$0.25 < v < 1.5$	S	Convergent	Cyclonic
87	(1, 1, 2, 0)	9	5.70	1.21	$0.25 < v < 1.5$	NE	Divergent	Anticyclonic
107	(1, 3, 2, 2)	9	5.70	1.21	$0.25 < v < 1.5$	SE	Divergent	Cyclonic
72	(1, 0, 0, 0)	8	5.06	1.08	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergent	Anticyclonic
80	(1, 0, 2, 2)	8	5.06	1.08	$0.25 < v < 1.5$	N	Divergent	Cyclonic
150	(2, 0, 2, 0)	8	5.06	1.08	$1.5 < v < 3.5$	N	Divergent	Anticyclonic
101	(1, 3, 0, 2)	7	4.43	0.94	$0.25 < v < 1.5$	SE	Convergent	Cyclonic
74	(1, 0, 0, 2)	6	3.80	0.81	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergent	Cyclonic
116	(1, 4, 2, 2)	6	3.80	0.81	$0.25 < v < 1.5$	S	Divergent	Cyclonic
90	(1, 2, 0, 0)	5	3.16	0.67	$0.25 < v < 1.5$	E	Convergent	Anticyclonic

Table 6. Cluster 6C-C2 (4C-C2).

State	(U, θ , γ , ω)	Occurrences	Relative Frequency (%)	Absolute Frequency (%)	WSP	WDR	WDIV	WVOR
146	(2, 0, 0, 2)	41	25.95	5.51	$1.5 < v \leq 3.5$	N	Convergent	Cyclonic
137	(1, 7, 0, 2)	27	17.09	4.95	$0.25 < v \leq 1.5$	NW	Convergent	Cyclonic
209	(2, 7, 0, 2)	20	12.66	3.67	$1.5 < v \leq 3.5$	NW	Convergent	Cyclonic
128	(1, 6, 0, 2)	11	6.96	2.02	$0.25 < v \leq 1.5$	W	Convergent	Cyclonic
144	(2, 0, 0, 0)	11	6.96	2.02	$1.5 < v \leq 3.5$	N	Convergent	Anticyclonic
155	(2, 1, 0, 2)	8	5.06	1.47	$1.5 < v \leq 3.5$	NE	Convergent	Cyclonic
135	(1, 7, 0, 0)	7	4.43	1.28	$0.25 < v \leq 1.5$	NW	Convergent	Anticyclonic
72	(1, 0, 0, 0)	6	3.80	1.10	$0.25 < v \leq 1.5$	N	Convergent	Anticyclonic
218	(3, 0, 0, 2)	5	3.16	0.92	$3.5 < v \leq 5.5$	N	Convergent	Cyclonic
74	(1, 0, 0, 2)	4	2.53	0.73	$0.25 < v \leq 1.5$	N	Convergent	Cyclonic
153	(2, 1, 0, 0)	4	2.53	0.73	$1.5 < v \leq 3.5$	NE	Convergent	Anticyclonic
83	(1, 1, 0, 2)	3	1.90	0.55	$0.25 < v \leq 1.5$	NE	Convergent	Cyclonic

Table 7. Cluster 6C-C3 (5C-C3).

State	(U, θ , γ , ω)	Occurrences	Relative Frequency (%)	Absolute Frequency (%)	WSP	WDR	WDIV	WVOR
182	(2, 4, 0, 2)	14	30.43	1.88	$1.5 < v < 3.5$	S	Convergent	Cyclonic
191	(2, 5, 0, 2)	10	21.74	1.34	$1.5 < v < 3.5$	SW	Convergent	Cyclonic
110	(1, 4, 0, 2)	4	8.70	0.54	$0.25 < v < 1.5$	S	Convergent	Cyclonic
173	(2, 3, 0, 2)	4	8.70	0.54	$1.5 < v < 3.5$	SE	Convergent	Cyclonic
137	(1, 7, 0, 2)	3	6.52	0.40	$0.25 < v < 1.5$	NW	Convergent	Cyclonic
119	(1, 5, 0, 2)	2	4.35	0.27	$0.25 < v < 1.5$	SW	Convergent	Cyclonic
189	(2, 5, 0, 0)	2	4.35	0.27	$1.5 < v < 3.5$	SW	Convergent	Anticyclonic
38	(0, 4, 0, 2)	1	2.17	0.13	$0 < v < 0.25$	S	Convergent	Cyclonic
56	(0, 6, 0, 2)	1	2.17	0.13	$0 < v < 0.25$	W	Convergent	Cyclonic
74	(1, 0, 0, 2)	1	2.17	0.13	$0.25 < v < 1.5$	N	Convergent	Cyclonic
83	(1, 1, 0, 2)	1	2.17	0.13	$0.25 < v < 1.5$	NE	Convergent	Cyclonic
92	(1, 2, 0, 2)	1	2.17	0.13	$0.25 < v < 1.5$	E	Convergent	Cyclonic

Table 8. Cluster 6C-C4 (4C-C4).

State	(U, θ , γ , ω)	Occurrences	Relative Frequency (%)	Absolute Frequency (%)	WSP	WDR	WDIV	WVOR
117	(1, 5, 0, 0)	48	24.12	6.45	$0.25 < v \leq 1.5$	SW	Convergent	Anticyclonic
126	(1, 6, 0, 0)	38	19.10	5.11	$0.25 < v \leq 1.5$	W	Convergent	Anticyclonic
119	(1, 5, 0, 2)	21	10.55	2.82	$0.25 < v \leq 1.5$	SW	Convergent	Cyclonic
45	(0, 5, 0, 0)	14	7.04	1.88	$0 < v \leq 0.25$	SW	Convergent	Anticyclonic
54	(0, 6, 0, 0)	12	6.03	1.61	$0 < v \leq 0.25$	W	Convergent	Anticyclonic
137	(1, 7, 0, 2)	12	6.03	1.61	$0.25 < v \leq 1.5$	NW	Convergent	Cyclonic
128	(1, 6, 0, 2)	11	5.53	1.48	$0.25 < v \leq 1.5$	W	Convergent	Cyclonic
74	(1, 0, 0, 2)	7	3.52	0.94	$0.25 < v \leq 1.5$	N	Convergent	Cyclonic
72	(1, 0, 0, 0)	6	3.02	0.81	$0.25 < v \leq 1.5$	N	Convergent	Anticyclonic
135	(1, 7, 0, 0)	6	3.02	0.81	$0.25 < v \leq 1.5$	NW	Convergent	Anticyclonic
63	(0, 7, 0, 0)	3	1.51	0.40	$0 < v \leq 0.25$	NW	Convergent	Anticyclonic
108	(1, 4, 0, 0)	3	1.51	0.40	$0.25 < v \leq 1.5$	S	Convergent	Anticyclonic

Table 9. Cluster 6C-C5 (5C-C5).

State	(U, θ , γ , ω)	Occurrences	Relative Frequency (%)	Absolute Frequency (%)	WSP	WDR	WDIV	WVOR
110	(1, 4, 0, 2)	32	36.78	4.30	$0.25 < v \leq 1.5$	S	Convergent	Cyclonic
182	(2, 4, 0, 2)	15	17.24	2.02	$1.5 < v \leq 3.5$	S	Convergent	Cyclonic
188	(2, 4, 2, 2)	11	12.64	1.48	$1.5 < v \leq 3.5$	S	Divergent	Cyclonic
254	(3, 4, 0, 2)	7	8.05	0.94	$3.5 < v \leq 5.5$	S	Convergent	Cyclonic
101	(1, 3, 0, 2)	5	5.75	0.67	$0.25 < v \leq 1.5$	SE	Convergent	Cyclonic
119	(1, 5, 0, 2)	5	5.75	0.67	$0.25 < v \leq 1.5$	SW	Convergent	Cyclonic
191	(2, 5, 0, 2)	4	4.60	0.54	$1.5 < v \leq 3.5$	SW	Convergent	Cyclonic
162	(2, 2, 0, 0)	2	2.30	0.27	$1.5 < v \leq 3.5$	E	Convergent	Anticyclonic
173	(2, 3, 0, 2)	2	2.30	0.27	$1.5 < v \leq 3.5$	SE	Convergent	Cyclonic
99	(1, 3, 0, 0)	1	1.15	0.13	$0.25 < v \leq 1.5$	SE	Convergent	Anticyclonic
108	(1, 4, 0, 0)	1	1.15	0.13	$0.25 < v \leq 1.5$	S	Convergent	Anticyclonic
179	(2, 3, 2, 2)	1	1.15	0.13	$1.5 < v \leq 3.5$	SE	Divergent	Cyclonic

Table 10. Cluster 6C-C6.

State	(U, θ , γ , ω)	Occurrences	Relative Frequency (%)	Absolute Frequency (%)	WSP	WDR	WDIV	WVOR
87	(1, 1, 2, 0)	27	28.13	3.63	$0.25 < v < 1.5$	NE	Divergent	Anticyclonic
96	(1, 2, 2, 0)	25	26.04	3.36	$0.25 < v < 1.5$	E	Divergent	Anticyclonic
89	(1, 1, 2, 2)	12	12.50	1.61	$0.25 < v < 1.5$	NE	Divergent	Cyclonic
98	(1, 2, 2, 2)	8	8.33	1.08	$0.25 < v < 1.5$	E	Divergent	Cyclonic
105	(1, 3, 2, 0)	6	6.25	0.81	$0.25 < v < 1.5$	SE	Divergent	Anticyclonic
78	(1, 0, 2, 0)	5	5.21	0.67	$0.25 < v < 1.5$	N	Divergent	Anticyclonic
69	(0, 7, 2, 0)	2	2.08	0.27	$0 < v < 0.25$	NW	Divergent	Anticyclonic
114	(1, 4, 2, 0)	2	2.08	0.27	$0.25 < v < 1.5$	S	Divergent	Anticyclonic
6	(0, 0, 2, 0)	1	1.04	0.13	$0 < v < 0.25$	N	Divergent	Anticyclonic
17	(0, 1, 2, 2)	1	1.04	0.13	$0 < v < 0.25$	NE	Divergent	Cyclonic
24	(0, 2, 2, 0)	1	1.04	0.13	$0 < v < 0.25$	E	Divergent	Anticyclonic
33	(0, 3, 2, 0)	1	1.04	0.13	$0 < v < 0.25$	SE	Divergent	Anticyclonic

References

- [1] A. Salcido; R. Sozzi; and T. Castro. "Least squares variational approach to the convective mixing height estimation problem". *Environmental Modelling & Software*, 18, 951–957, 2003.
- [2] D. Salcedo; T. Castro; L. G. Ruiz-Suárez; A. García-Reynoso; R. Torres-Jardón; A. Torres-Jaramillo; B. E. Mar-Morales; A. Salcido; A.T. Celada; S. Carreón-Sierra; A.P. Martínez; O. A. Fentanes-Arriaga; E. Deustúa; R. Ramos-Villegas; A. Retama-Hernández; M.I. Saavedra; M. Suárez-Lastra. "Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state)". *Science of the Total Environment*, 414, 417-432, 2012.
- [3] Informe de Trabajo 2007, Secretaria de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI), Gobierno del Distrito Federal, 2007.
- [4] E. Jáuregui. "Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin". *Atmósfera*, 1, 131-140, 1988.
- [5] E. Jáuregui. "Heat Island Development in Mexico City". *Atmospheric Environment*, 31, 3821-3831, 1997.
- [6] J. E. Bossert. "An investigation of flow regimes affecting the Mexico City region," *J. Appl. Meteorol.* 36, 119-140, 1997.
- [7] J.D. Fast; S.Y. Zhong. "Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin". *J. Geophys. Res.*, 103, 18927-18946, 1998.
- [8] J.C. Doran; S. Abbott; J. Archuleta; X. Bian; J. Chow; R.L. Coulter; R.L. de Wekker; S. Edgerton; S. Elliott; A. Fernandez; J.D. Fast; J.M. Hubbe; J.M. King; D. Langley; J. Leach; J.T. Lee; T. J. Martin; D. Martinez; J.L. Martinez; G. Mercado; V. Mora; M. Mulhearn; J.L. Pena; R. Petty; W. Porch; C. Russell; R. Salas; J.D. Shannon; W.J. Shaw; G. Sosa; L. Tellier; B. Templeman; J.G. Watson; R. White; C.D. Whiteman; D. Wolfe. "The IMADA-AVER boundary layer experiment in the Mexico City Area". *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 2497-2508, 1998.
- [9] A. Salcido; A.T. Celada; R. Villegas; H., Salas; R., Sozzi; and T., Georgiadis, "A micrometeorological database for the Mexico City Metropolitan Area". *Il Nuovo Cimento*, 26C, 317-355, 2003.
- [10] B. de Foy; E. Caetano; V. Magaña; A. Zitácuaro; B. Cárdenas; A. Retama; R. Ramos; L.T. Molina; and M.J. Molina. "Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2267-2288, 2005.
- [11] J.D. Fast; B. de Foy; F. Acevedo-Rosas; E. Caetano; G. Carmichael; L. Emmons; D. McKenna; M. Mena; W. Skamarock; X. Tie; R.L. Coulter; J.C. Barnard; C. Wiedinmyer; and S. Madronich. "A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 2233–2257, 2007.
- [12] B. de Foy; J.D. Fast; S.J. Paech; D. Phillips; J.T. Walters; R.L. Coulter; T.J. Martin; M.S. Pekour; W.J. Shaw; P.P. Kastendeuch; N.A. Marley; A. Retama; and L.T. Molina. "Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 1209-1224, 2008.
- [13] A. Salcido; A.T. Celada; and T. Castro. "A meso-scale description of surface wind events in Mexico City during MILAGRO 2006 campaign". *IASTED Technology Conferences. Proceedings of the Second IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering EME 2010* (M. Saif, Editor), Banff, Alberta, Canada, (July 15–17, 2010), 820-827. ISBN: 978-0-88986-852-6.
- [14] A.T. Celada-Murillo; S. Carreón-Sierra; A. Salcido; T. Castro; O. Peralta; and T. Georgiadis. "Main Characteristics of Mexico City Local Wind Events during MILAGRO 2006 Campaign within a Meso- β Scale Lattice Wind Modeling Approach". *ISRN Meteorology*, 2013(2013), ID 605210, 14 pag. ISSN: 2090-7524 (Online). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/605210>.
- [15] M.S. Aldenderfer; R.K. Blashfield. *Cluster Analysis*. SAGE Publications, Inc.: Newbury Park CA, USA, 1984; Fifth Printing 1988.
- [16] A. Salcido. "A Non local equilibrium model for the constitutive equations of a non-uniform simple fluid". *Proceedings of the 2nd IASTED International Symposium Modern Nonlinear Theory* (A.M. Harb, Editor), Orlando, Florida, USA, (November 2008), 339-344. ISBN: 978-0-88986-774-1.
- [17] L.T. Molina; S. Madronich; J.S. Gaffney; E. Apel; B. de Foy; J. Fast; R. Ferrare; S. Herndon; J.L. Jimenez; B. Lamb; A.R. Osornio-Vargas; P. Russell; J.J. Schauer; P.S. Stevens; R. Volkamer; and M. Zavala. "An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 8697-8760, 2010.
- [18] P.B. Voss; R.A. Zaveri; F.M. Flocke; H. Mao; T.P. Hartley; P. de Amicis; I. Deonandan; G. Contreras-Jiménez; O. Martínez-Antonio; M. Figueroa Estrada; D. Greeberg; T.L. Campos; A.J. Weinheimer; D.J. Knapp; D.D. Montzka; J.D. Crouse; P.O. Wennber; E. Apel; S. Madronich; and B. de Foy. "Long-range pollution transport during the MILAGRO-2006 campaign: a case study of a major Mexico City outflow event using free-floating altitude-controlled balloons". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 7137-7159, 2010.
- [19] SIMAT. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/>
- [20] O. Peralta; T. Castro; M. Durón; A. Salcido; A.T. Celada-Murillo; R. Navarro-González; C. Márquez; J. García; J. de la Rosa; R. Torres; R. Villegas-Martínez; S. Carreón-Sierra; M. Imaz; A. Martínez-Arroyo; I. Saavedra; M.L. Espinosa; and A. Torres-Jaramillo. "H₂S emissions from Cerro Prieto geothermal power plant and air pollutants measurements in the área". *Geothermics*, 46, 55–65, 2013.
- [21] H. Lohninger. Epina GmbH, 3013 Pressbaum, Austria, <http://www.lohninger.com/datalab/>