

ACERCA DE LAS CAUSAS DE LAS ELEVADAS CONCENTRACIONES DE OZONO EN LA ATMÓSFERA DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA EN OCTUBRE DE 1996

Irina E. Tereshchenko y Anatoliy E. Filonov

Depto. de Física, CUCEI, Universidad de Guadalajara, A.P. 4-079, Guadalajara 44421, Jalisco, México.

E-mail: itereshc@udgserv.cencar.udg.mx

RESUMEN

Se analizan las condiciones sinópticas y locales del tiempo, en los días con elevadas concentraciones de ozono en la atmósfera de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México, que se presentaron en octubre de 1996. Para el análisis se utilizaron datos de los registros sobre el ozono y los parámetros meteorológicos de ocho estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico pertenecientes a la Comisión Estatal de Ecología, Jalisco (COESE), así como datos de radiosondeo, mediciones de la visibilidad horizontal y radiación solar realizadas en el Observatorio Colomos, perteneciente a la Comisión Nacional del Agua (CNA). Se muestra que la principal causa de la formación del smog fotoquímico, en los periodos del 14 al 17, 19 y del 21 al 23 de octubre, fueron las condiciones de estabilidad en la atmósfera sobre la ciudad, caracterizadas por un tiempo en calma y despejado, lo que permitió una intensa afluencia de radiación solar y el incremento de las temperaturas máximas en la superficie.

INTRODUCCIÓN

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), la segunda más grande en México, es una metrópoli compuesta por la conurbación de cuatro ciudades: Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque y Tonalá. La superficie total que ocupa la ZMG es superior a 26 mil hectáreas, y su población es mayor a 4 millones de habitantes. Geográficamente, la ZMG se sitúa en la zona tropical, a una latitud cercana a los 21°N, al SW de la Meseta Mexicana y con una altitud superior a los 1500 m sobre el nivel medio del mar (la marca geodésica de la altura del barómetro de mercurio en el Observatorio Colomos, CNA es de 1551 m sobre el nivel medio del mar).

La cuenca atmosférica de la ZMG, como cualquier metrópoli grande, se ve afectada por la contaminación antropogénica. Observaciones sobre su contaminación han sido realizadas desde mediados de los años 70 con equipo manual. En diciembre de 1993, se instaló en la ZMG la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) perteneciente a la COESE. Dicha red está compuesta por ocho estaciones situadas, de manera relativamente uniforme, en la ZMG (Figura 1). Esta Red de Monitoreo realiza, cada hora, mediciones de los cinco principales contaminantes de la atmósfera: partículas suspendidas totales (PST) o partículas menores de 10 micras (PT10), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO₂ y NO) y ozono (O₃), además de algunos parámetros meteorológicos: temperatura, humedad relativa del aire así como dirección y velocidad del viento. Las mediciones que se realizan cada hora están dadas con base en el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), definido como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica, de acuerdo con las concentraciones en ppm o mg/m³ mostradas en la Tabla 1 (COESE, 1994).

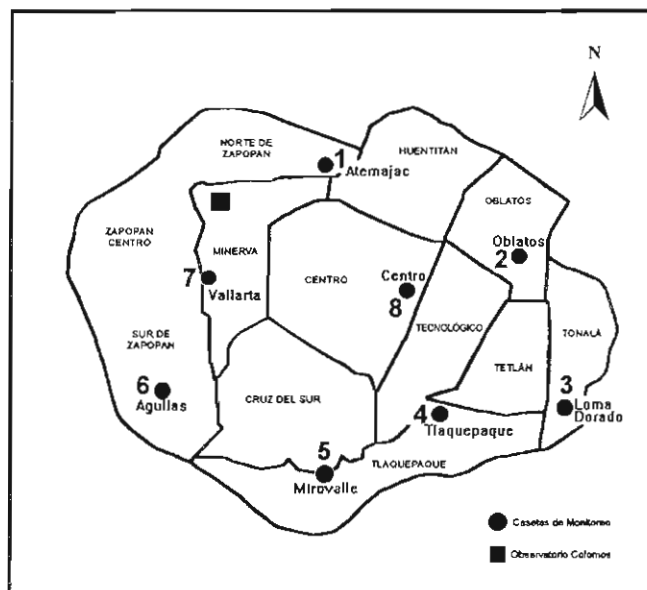


Figura 1. División administrativa de la Zona Metropolitana de Guadalajara, mostrando la localización de las casetas de monitoreo de la RAMA y el Observatorio Colomos.

Tabla 1. Relación de la concentración de ozono expresada en diferentes unidades de medición.

IMECA	ppm	µg/m ³
0-100	0-0.110	0-0.216
101-200	0.111-0.232	0.217-0.422
201-300	0.233-0.355	0.423-0.645
≥301	≥0.356	≥0.647

Al problema de la contaminación por ozono en las ciudades tropicales, han sido dedicados muchos trabajos (Murao *et al.*, 1990; Chung-Ming *et al.*, 1990; Massambani Andrade, 1993;

Bravo *et al.*, 1996). Sin embargo, entre ellos no existe ninguno que analice las causas del surgimiento de los smogs fotoquímicos en una metrópoli tan grande como la ZMG. Durante los años 1994 y 1995, las más altas concentraciones de ozono registradas en una hora fueron: mayo 7, 1994 con 250 IMECA; abril 7, 1995 con 320 IMECA y noviembre 13, 1995 con 280 IMECA. En comparación con las normas internacionales para dicho parámetro, el límite permisible es $0.216 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cuya equivalencia es 0.11 ppm o 100 IMECA (CENICA, 1996).

MATERIAL UTILIZADO

De acuerdo con la información generada por la RAMA, el contaminante con la más alta concentración detectado para la ZMG es el ozono. Durante todo el tiempo de las mediciones la concentración superior a 100 IMECA se presentó con mayor frecuencia en las estaciones de Atemajac, Vallarta y Centro en el periodo octubre-febrero, así como en las estaciones de Miravalle, Tlaquepaque y Centro, en abril y mayo.

Del 14 al 17 de octubre de 1996, en la ZMG se registró un caso de smog fotoquímico. En estos días, la concentración de ozono fue superior a los $0.293 \text{ mg}/\text{m}^3$ y se registró en el 50% de la red de estaciones de monitoreo, manteniéndose durante 2 a 3 horas después del mediodía. En todas las estaciones se registraron las concentraciones máximas de ozono con 2 horas de anticipación a la hora de la máxima temperatura del aire, lo cual, en la ZMG ocurre normalmente entre 4 y 5 p. m. de la hora del Este.

Una situación análoga se repitió en el periodo del 21 al 23 de octubre, aunque con una menor concentración horaria de ozono. El valor máximo absoluto de la cantidad de ozono registrado en la Estación Miravalle el 17 de octubre de 1996 (Figura 3) fue de $0.610 \text{ mg}/\text{m}^3$ (264 IMECA), cuando internacionalmente el valor límite permisible es de $0.216 \text{ mg}/\text{m}^3$ (CENICA, 1996).

Para realizar el presente trabajo se utilizaron las mediciones horarias de ozono, temperatura, velocidad y dirección del viento registradas durante el mes de octubre de 1996 por la RAMA y la COESE en la ZMG. También se analizaron los datos diarios de radiosondeo, las mediciones horarias de un piroheliógrafo que registra la radiación solar y la distancia de la visibilidad horizontal en el Observatorio Colomos (N76612-CNA) (Figura 1). Finalmente, se utilizaron cartas sinópticas de superficie para los niveles obligatorios, informes meteorológicos y el resumen climatológico (CNA, 1996) para el mes citado.

SITUACIÓN SINÓPTICA EN MÉXICO EN OCTUBRE DE 1996

En la primera mitad de octubre de 1996, los procesos sinópticos en la región de la ZMG fueron los normales para esta época del año. A partir del 14 de octubre una potente cresta

anticiclón del Pacífico Oriental, la cual generalmente se establece en esta época del año en el noreste del Océano Pacífico, comenzó a propagarse al sureste, alcanzando el 16 de octubre la costa occidental de México, en las cercanías de Manzanillo y Colima. El centro del anticiclón se localizó en las coordenadas 45°N y 125°W , con una presión en el centro superior a los 1028 hPa. En la periferia oriental de la cresta, a lo largo de la latitud 20°N , se inició una débil advección de calor en la costa y en el interior del continente. En este periodo del año, las temperaturas de la superficie del océano son más altas que el resto del año. Como consecuencia, se originó un fuerte calentamiento de la capa de aire cercana a la superficie del agua hasta la superficie isobárica H_{700} (CNA, 1996).

Para el 17 de octubre, el centro del anticiclón se desplazó hasta los 30°N (90 - 95°W) y su cresta, se propagó hacia el SE, en dirección de la porción SW de la Meseta Mexicana, alcanzando la ZMG. En este mismo tiempo, y propagándose desde el oriente del Golfo de México, penetró una cresta de alta presión a las costas del Golfo de México, surgiendo así una situación semejante a la de un cinturón de alta presión en la zona tropical, que en parte, fue también favorecido por el obstáculo natural de la orografía de la zona, como lo son las montañas de la Sierra Madre Occidental. En la Figura 2a, se muestra la condición superficial sinóptica del 17 de octubre como la más típica para el proceso descrito, la cual provoca una débil advección de calor desde el Oeste, que fue registrada por las estaciones meteorológicas de la ZMG. La advección se manifestó en el incremento de las temperaturas promedio diarias en 1 - 2°C , del 14 al 18 de octubre. En los días siguientes, 19 y 20 de octubre, se conservó en la región de la ZMG la influencia de la cresta del anticiclón del Océano Pacífico.

En el campo de presión de gran escala cercano a la superficie durante el 18 de octubre, se identificaron pequeñas variaciones de la circulación, las cuales fueron originadas por

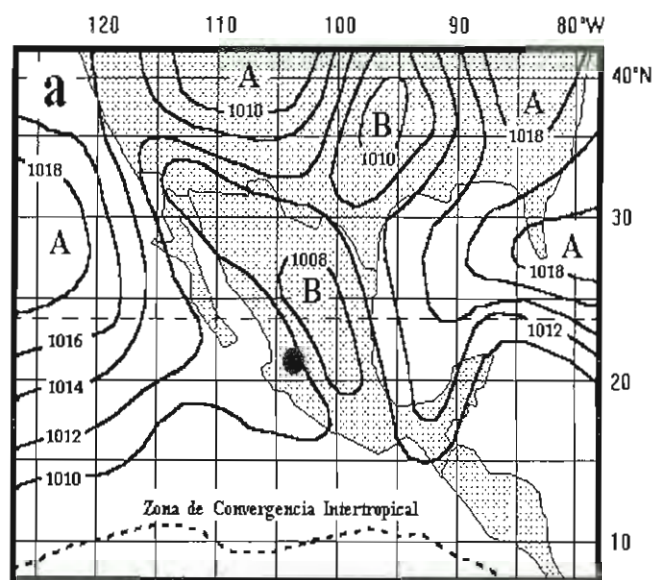


Figura 2a. Situación sinóptica del 17 de octubre de 1996 en la capa cercana a la superficie terrestre (análisis de superficie).

el debilitamiento en la intensidad de la cresta del anticiclón del Océano Pacífico. Ésto a su vez, conllevó a un pequeño incremento en la diferencia de presión atmosférica (AP) entre los océanos Atlántico y Pacífico (Figura 2b). Estas variaciones en AP corresponden a una débil restructuración del campo de presión, ya que el 19 de octubre la AP de nuevo disminuyó, y el día 20 se incrementó.

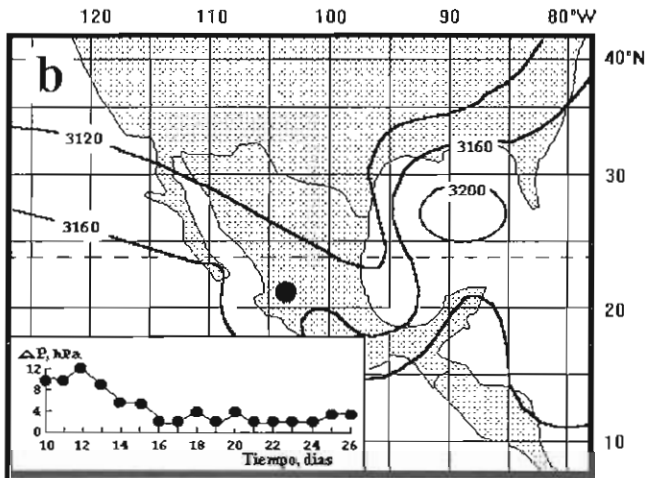


Figura 2b. Situación sinóptica del 17 de octubre de 1996 en la superficie isobárica H_{700} . En la parte inferior de la figura se ilustra la curva de la diferencia de la presión atmosférica (AP) en el nivel del mar en la latitud de 20°N entre el Océano Atlántico (90°W) y el Pacífico (110°W).

Finalmente, el 21 de octubre termina la restructuración del campo de presión, cuando en la región se establece de nuevo el tipo anticiclónico del campo de presión en toda la tropósfera inferior. En otras palabras, se inició un nuevo periodo sinóptico análogo al periodo del 16 al 20 de octubre. Ambos periodos se caracterizan por el carácter anticiclónico de la circulación.

Del análisis de los procesos descritos, se concluye que, aún con un incremento poco significativo de AP en la superficie de la tierra, entre los océanos Atlántico y Pacífico (Figura 2b), se origina una intensificación del macrotraslado en toda la capa de la tropósfera inferior. Ésto se observa claramente en las cartas de la topografía barométrica H_{700} del 18 al 20 de octubre. Todo lo anterior muestra la acción dominante de la circulación de gran escala en los procesos espaciales de escalas menores, lo cual se ve claramente en el campo de viento en la ZMG (Tabla 2), en donde el 18 y 20 de octubre se dio un pequeño incremento en la intensidad del viento.

Con la intensidad del viento se ventiló la ZMG y se produjo una disminución de la concentración del ozono a menos de 150 IMECA (Figura 3), lo cual corresponde a un estado satisfactorio de la calidad del aire. Es importante mencionar que para evaluar el campo de viento en la ZMG es necesario tomar en cuenta la influencia de las construcciones urbanas, las cuales introducen variaciones importantes, tanto en el campo de la velocidad, como en el de la dirección del viento.

TABLA 2. Magnitudes de velocidad del viento a las 3 p.m. (tiempo del Este) en las casetas de monitoreo de la RAMA, del 17 al 21 de Octubre, 1996.

Estaciones	Días				
	17	18	19	20	21
Atemajac	0.5	2.4	2.8	3.0	1.3
Oblatos	--	--	--	--	--
Loma Dorada	3.1	1.7	4.1	--	--
Tlaquepaque	0.7	2.8	0.7	2.0	1.2
Miravalle	1.4	4.2	1.4	3.0	2.9
Las Águilas	1.5	6.8	0.9	1.0	1.4
Vallarta	0.6	7.9	2.2	5.0	2.4
Centro	2.7	6.0	1.4	5.0	2.2

Para el 21 de octubre, el anticiclón ingresó a la región central de la Meseta Mexicana y se unió con el núcleo del anticiclón que se desplazaba desde el Norte. Como resultado, en la atmósfera se formó un nuevo sistema con dos centros de alta presión, con una presión 1030 hPa. Posteriormente, conforme este sistema se trasladó al Sureste, en la región Noreste del Océano Pacífico, sobre la latitud 40°N , surgió el anticiclón consecutivo, con una presión en el centro 1030 hPa y su cresta se propagó nuevamente al Este-Sureste, originando así una región de alta presión en la ZMG. Posterior a estos eventos, la situación sinóptica permaneció hasta finales de octubre. El surgimiento reiterativo del smog fotoquímico en la ZMG se registró en el periodo del 21 al 23 de octubre, aunque su concentración, comparada con la concentración horaria de ozono en el periodo del 14 al 17 de octubre de 1996, fue dos órdenes de magnitud menor (Figura 3).

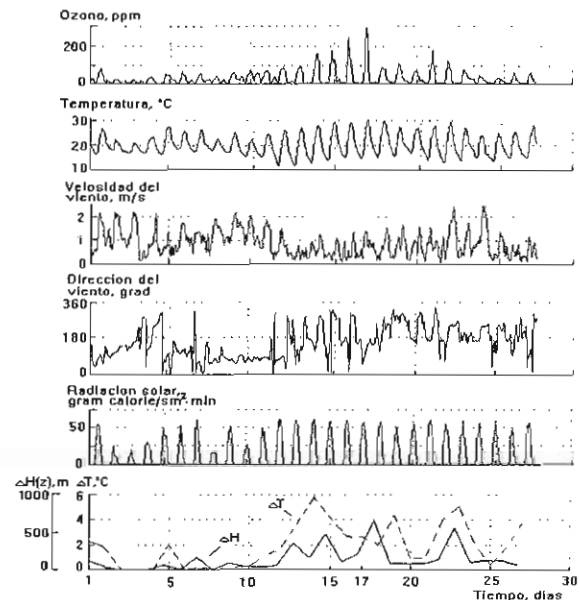


Figura 3. Series de tiempo de la distribución de ozono y de las características meteorológicas en la estación Miravalle en octubre de 1996. También se muestra el comportamiento temporal de la radiación solar, el grosor de la capa de la inversión térmica ($\Delta H(z)$) y la diferencia de temperatura entre la superficie y la altura de la frontera superior de la inversión (ΔT) basados en las mediciones del observatorio Colomos, CNA.

CONDICIONES DEL TIEMPO Y SMOG FOTOQUÍMICO EN LA REGIÓN DE LA ZMG DEL 14 AL 17 DE OCTUBRE DE 1996

La situación sinóptica sobre México, descrita anteriormente, provocó un tiempo despejado con viento muy débil en la región de la ZMG. Estas condiciones en la capa límite de la atmósfera condujeron a la formación de niebla de radiación-advección en las primeras horas matutinas del 16, 17 y 18 de octubre. Durante la noche y en las primeras horas del día, la velocidad del viento en la capa cercana a la superficie, fue cero o menor a 1 m/s. Sólo después del medio día y debido a la influencia del calentamiento de la superficie terrestre, de las irregularidades de las construcciones urbanas y de las particularidades de la topografía de la ZMG, la velocidad de viento se incrementó un poco, sin llegar a superar los 3 m/s (Figura 4c). Esto originó la presencia de la llamada circulación topográfica (Jáuregui, 1988). El tiempo de calma surgió debido a que el gradiente de presión fue casi cero a lo largo de los 20°N, tanto en el nivel de superficie, como en el nivel H_{700} (Figura 2b) y en donde la velocidad del viento sobre la ZMG no superó los 5 m/s.

Debido a la ausencia total de nubosidad, el enfriamiento complementario del aire caliente en la capa cercana a la superficie conllevó a la saturación de su humedad y a la condensación de los excedentes del vapor de agua, originándose de esa manera la niebla que se registró en todas las estaciones meteorológicas urbanas y suburbanas. La dispersión de la niebla se inició 2-3 horas después de la salida del sol.

En estos días, debido al enfriamiento del aire caliente y al débil intercambio turbulento sobre la ZMG, se formaron inversiones de temperatura (Figura 3). Esto ocurrió debido a que el mayor desprendimiento del calor de condensación tuvo lugar muy cerca de la superficie, y por lo tanto, el enfriamiento del aire situado a mayor altura provocó la formación de inversiones de temperatura a unos cientos de metros por encima de la superficie (Figura 3). Estas inversiones se observan claramente en los datos de radiosondeo de la Estación Colomos (CNA) los días 16 y 17 de octubre; las alturas de la base de los estratos de inversión fueron de 383 y 273 m sobre la superficie. Las condiciones del tiempo del 14 al 17 de octubre, causaron la estabilidad atmosférica en la ZMG, pero tan sólo durante las primeras horas de la mañana. Bajo la influencia del calentamiento del aire en un cielo despejado, se inició la formación de procesos convectivos en la capa límite, dando lugar a un incremento del grosor de la capa de mezcla, al rompimiento de la estabilidad y a una rápida destrucción de las inversiones térmicas. De esta manera, al mediodía, las condiciones atmosféricas contaminantes sobre la ZMG se desvanecieron, pero no así las condiciones para una intensa acumulación y formación de ozono, debido a las condiciones descritas.

Es bien conocido que los motores de combustión interna utilizados en el transporte urbano de cualquier metrópoli, son la causa principal de la formación de ozono en la capa de la

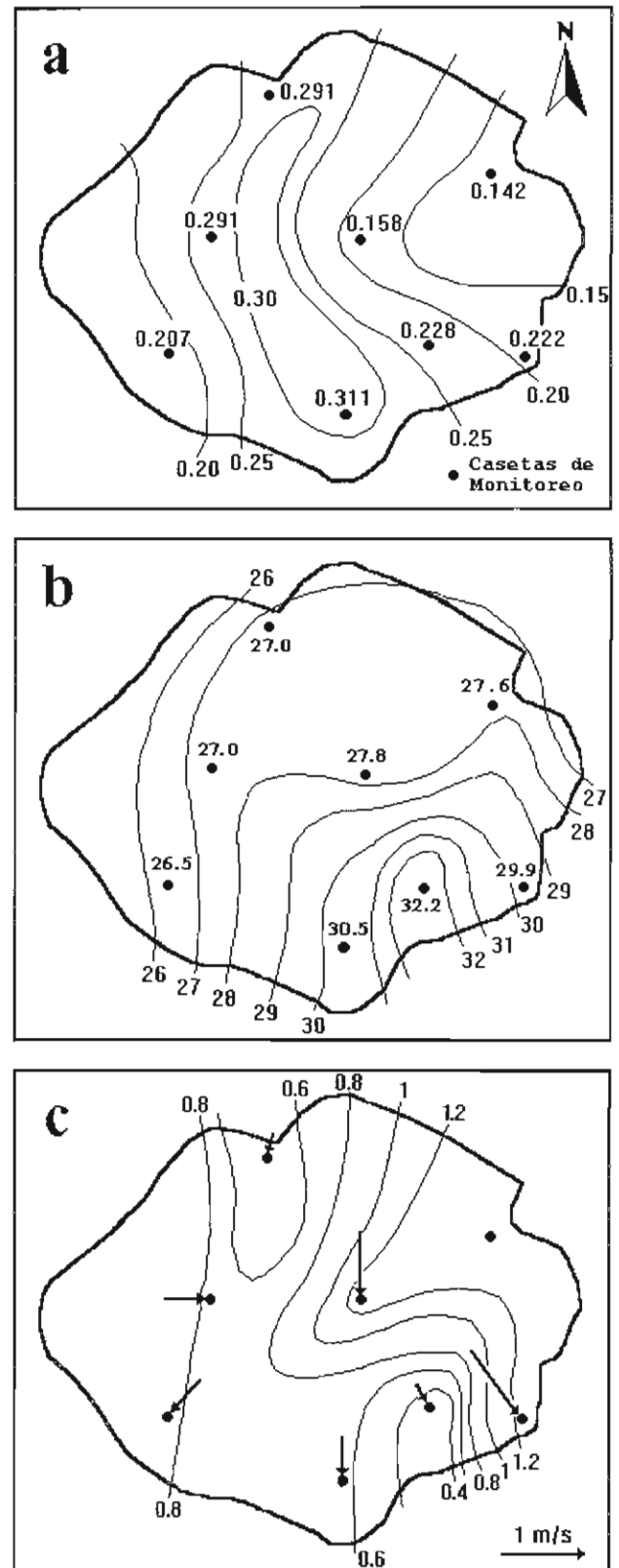


Figura 4. (a) Distribución espacial promedio del ozono, de las 14 a las 16 hrs; (b) Distribución espacial promedio de la temperatura del aire de las 17 a las 18 hrs; (c) Distribución espacial promedio del viento en la atmósfera de las 14 a las 17 hrs en la ZMG el 17 de octubre de 1996.

atmósfera cercana a la superficie. Los gases de escape producen una reacción fotoquímica con el aire, en la que su intensidad depende de la radiación solar y de la temperatura. La ausencia total de nubosidad en los días mencionados, permitió una intensificación de la radiación solar hacia la superficie terrestre, así como la conservación diaria de altas temperaturas del aire. Por otra parte, del 14 al 17 de octubre, la intensidad del flujo vehicular en la ZMG fue similar en las partes central y occidental de la mancha urbana. Esto formó un smog fotoquímico que se acumuló sobre la ciudad de acuerdo al patrón de la dirección del viento (Figura 4), con concentraciones horarias del ozono superiores a 0.172 ppm o 0.320 mg/m³, el cual se mantuvo así durante 2 a 3 horas después del mediodía. También es necesario señalar que en las zonas de concentración del smog se encuentran las avenidas principales y por lo tanto, con mayor flujo vehicular. Inmediatamente después de la puesta del Sol, la concentración de ozono disminuyó bruscamente, alcanzando valores de cero durante la noche en las regiones de mayor tráfico de la ZMG.

Hay que hacer notar que un aspecto importante y necesario a considerar en el estudio de las causas de la variación de la concentración de ozono en la ZMG, es el ciclo semanal de la intensidad del movimiento vehicular (diferencia entre los días laborales y no laborales). En la Figura 5 se muestran los espectros energéticos de las oscilaciones del contenido de ozono, de la temperatura del aire y la coherencia entre ellas. Estas se calcularon con base en series de tiempo con discretización de una hora en la estación Miravalle. Se observa que en el espectro de las oscilaciones del ozono, al mismo tiempo que el armónico diurno y semidiurno, existen picos evidentes de densidad espectral en los periodos de 7 y 2 días. Una situación semejante se describe en el trabajo de Fumiaki (1987), sin embargo, el espectro de las oscilaciones de temperatura no mostró picos y por lo tanto, la coherencia entre estos dos espectros para los periodos de 7 y 2 días no es significativo (Figura 5). De esta forma, es evidente que la máxima disminución de las concentraciones horarias de ozono el día 20 de octubre, está relacionada no sólo con el cambio de la situación sinóptica en la región de la ZMG, sino que también con la mínima intensidad del tráfico vehicular durante el domingo.

En los días con intenso smog fotoquímico se registró la formación de un segundo mínimo (el primero fue en las primeras horas del día debido a la neblina matutina) en la distancia de la visibilidad horizontal, la cual se iniciaba después de las 3 a 4 p.m. de la hora del Este.

CONCLUSIONES

1. La causa principal de la formación de las elevadas concentraciones de ozono en la ZMG en octubre de 1996 fueron las marcadas condiciones de estabilidad en los procesos atmosféricos. Estas condiciones fueron originadas por las regiones de alta presión establecidas sobre el territorio del centro de México. En toda la tropósfera inferior se registraron

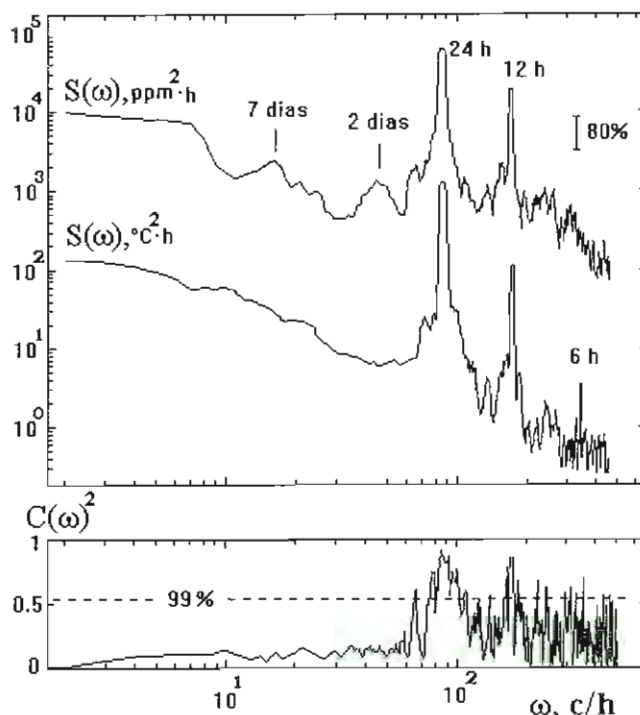


Figura 5. Espectros energéticos de las oscilaciones de la concentración de ozono, de la temperatura del aire y el cuadrado de la coherencia entre los mismos, con base a las mediciones de la estación Miravalle en octubre de 1996. Para los espectros, la línea vertical muestra el 80% del intervalo de confianza y con línea punteada se muestra el 99% del intervalo de confianza de la coherencia cero.

gradientes horizontales de presión con un valor cercano a cero y hasta el nivel H₇₀₀, en tanto que la velocidad del viento no superó los 5 m/s.

2. La situación sinóptica dada originó condiciones en la superficie terrestre acompañadas por un tiempo despejado total, con calma durante la noche y en la primera mitad del día, y con vientos topográficos muy débiles inferiores a los 3 m/s en la otra mitad. En conjunto, estas condiciones provocaron el incremento en la intensidad de la radiación solar y de la temperatura máxima del aire, y consecuentemente, originaron la formación del smog fotoquímico en la atmósfera de la ZMG, con concentraciones horarias máximas de 0.610 mg/m³, que fueron registradas después del medio día.

3. En el futuro, para pronosticar los casos de elevadas concentraciones de ozono es necesario, en primer lugar, estudiar y clasificar las situaciones sinópticas que dan lugar a condiciones de estabilidad en la atmósfera de la ZMG. En segundo lugar, es necesario analizar, con series de tiempo de periodos más largos, la relación entre la concentración de ozono y la intensidad del tráfico en los días laborales y de fin de semana, lo que permitirá encontrar una relación cuantitativa que pueda ser incorporada en los modelos de pronóstico.

4. Para lograr una disminución efectiva de la concentración de ozono en la atmósfera de la ZMG, en situaciones sinópticas

desfavorables, es necesario utilizar la experiencia de las grandes ciudades de la zona tropical, llevando a cabo diversas acciones para este fin. Estas acciones deberán estar orientadas hacia el mejoramiento del régimen de trabajo del transporte urbano, extensión de las líneas de trolebuses y del tren ligero, limitación de la utilización del transporte particular, verificación de los motores y la prohibición del movimiento de automóviles en condiciones mecánicas deficientes, tal como se describe en el trabajo de Lyons *et al.* (1990).

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a los colaboradores de la RAMA de la COESE. En particular al Ing. Ramón Limón, así como al Ing. Salvador Tinoco Gutiérrez (CNA). De misma forma expresar también nuestro agradecimiento al Eliazar Ochoa Vargas, encargado de radio sondeo y a los colaboradores del observatorio Colomos por toda la ayuda en la obtención y análisis de los datos registrados.

BIBLIOGRAFÍA

- Bravo, J.L., Díaz, M.T., Gay, G. and Fagardo, J., 1996. A short term prediction model for surface ozone at southwest part of Mexico valley. *Atmósfera*, N 9, p. 33-45.
- CENICA, 1996, Memoria del primer coloquio binacional México-Japón sobre gestión ambiental: Contaminación Atmosférica. México, 25-26 enero, 85 pp.
- Chung-Ming, L., Shaw, C.L. and Shih-Hong S., 1990. A study of Taipei ozone problem. *Atmospheric Environment*, Vol. 24A, N 6, p. 1461-1472.
- CNA, 1996, Resumen Climatológico del mes de octubre de 1996, Gerencia Estatal, Jalisco, México.
- COESE, 1994, Procedimientos utilizados en la determinación de la calidad del aire (IMECA) en la Zona Metropolitana de la ciudad de México. septiembre 1994, México, D.F.
- Fumiaki, F., 1987. Weekday-weekend differences of urban climates. Part 1. *Journal Meteorological Society of Japan*, Vol. 65, N. 6, p. 923-929.
- Informe Meteorológico. Octubre de 1996. N 4.1.566-4.1.598. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional.
- Jáuregui, I., 1988. Local wind and air pollution interaction in the México basin. *Atmósfera*, N 1, p. 131-140.
- Lyons, T.J., Kenworthy, J.R. and Newman, P.W.G., 1990. Urban structure and air pollution. *Atmospheric Environment*, Vol. 24B, N. 1, p. 43-48.
- Massambani, O. and Andrade, F., 1993. Tropospheric ozone in metropolitan San Paulo. WMO/TD-N 538, WCA SP-24, p. 38-40.
- Murao, N., Ohta, S., Furuhashi, N. and Mizogushi, I., 1990. The causes of elevated concentrations of ozone in Sapporo. *Atmospheric Environment*, Vol. 24A, N. 6, p. 1501-1507.