

RELACIONES ENTRE LA MAGNITUD DEL VALOR MÁXIMO DE OZONO, LA RADIACIÓN SOLAR Y LA TEMPERATURA AMBIENTE EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

José Luis BRAVO¹, María Magdalena NAVA² y Agustín MUHLIA¹

¹ Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 D.F., México

² Instituto Mexicano del Petróleo, Gerencia de Ciencias del Ambiente, Eje Central Lázaro Cárdenas 152, Apartado postal 14-805, D.F. 07730 México

(Recibido enero 1999, aceptado enero 2000)

Palabras clave: ozono troposférico, distribuciones espacial y temporal, Ciudad de México, radiación solar

RESUMEN

Se estudian los efectos de la temperatura ambiente y de la radiación solar sobre los valores máximos diarios de concentración del ozono troposférico en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). El objetivo es definir cuál de los parámetros mencionados y en qué momento del día pronostica mejor la intensidad del valor máximo de ozono. Se encontró que la radiación solar medida entre las 10 y las 12 h es un parámetro adecuado para el pronóstico. Se analiza también la cronología de la ocurrencia e intensidad de los máximos en las diferentes áreas de la ZMCM, se nota que ocurren primero en el NE y después en el SW y su intensidad es mayor en el SW. Se clasifican los máximos según su intensidad hallándose distribuciones bimodales que sugieren la existencia de dos conjuntos de fenómenos meteorológicos: uno que causa máximos de ozono de valores grandes y otro que causa máximos de ozono de valores pequeños.

Key words: tropospheric ozone, temporal and spacial distributions, Mexico City, solar radiation

ABSTRACT

The effect of environmental temperature and solar radiation on daily maximum tropospheric ozone concentrations was studied in the Metropolitan Zone of Mexico City (ZMCM). The objective was to define the parameters and time of the day to better predict the daily ozone maximum. It was found that solar radiation measured between 10 and 12 hours is a better parameter than ambient temperature to do this forecast. The chronology and magnitude of the ozone maximum in the ZMCM was also studied; the maximum occurred first in the NE and the later in the SW and its magnitude was highest in the SW area. The maximums were classified according to their magnitude. The distributions of these maximum classifications are bimodal suggesting the existence of two groups of meteorological phenomena: one that causes high ozone maximum and another that causes low ozone maximum.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es establecer cuál de las dos variables, radiación solar o temperatura ambiente, es más útil para modelar el valor máximo de ozono en la

Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y establecer la mejor hora de observación para este propósito, además se estudian las relaciones en tiempo y espacio entre la temperatura ambiente, el valor máximo diario de la concentración de ozono en la superficie para

10 estaciones de la Red Automática de Monitoréo Atmosférico (RAMA) y la radiación solar global medida en el Observatorio de Radiación Solar en el *campus* de la Ciudad Universitaria de la UNAM. Esto se hace debido a que las condiciones meteorológicas tienen gran influencia en las concentraciones de ozono que se miden en la atmósfera al nivel de superficie y con mucha frecuencia se emplea la temperatura ambiente como parámetro independiente para explicar sus variaciones. La temperatura se considera en ocasiones como una variable subrogada de otras, tales como la estabilidad atmosférica o la radiación solar (Rao y Zurbenco 1994, Rao *et al.* 1995a, b).

La radiación solar con longitudes de onda entre 0.280 mm y 0.430 mm es la fuente de energía que disocia en la atmósfera a las moléculas de bióxido de nitrógeno (NO_2) en oxígeno en estado atómico (O) y en una molécula de NO (Seinfeld 1989). El átomo libre de oxígeno da origen al ozono (O_3) a través de una reacción de choque de tres cuerpos con una molécula de oxígeno y una molécula cualquiera en el aire. El ozono formado en este proceso se destruye reaccionando con las moléculas de NO alcanzándose un equilibrio en el cual las concentraciones de ozono son bajas. Cuando estas reacciones se llevan a cabo en presencia de hidrocarburos reactivos el NO reacciona con ellos dejando libre al ozono en la atmósfera e incrementa su concentración. El tiempo de vida del ozono urbano depende de la abundancia de compuestos con los que reaccione, tal como el NO, pero en general es del orden de minutos pues en ausencia de luz solar la concentración de ozono disminuye rápidamente.

Sin la presencia de la radiación solar no sería posible la disociación del bióxido de nitrógeno y en consecuencia de la formación de ozono, como sucede durante las noches. En la tarde, el ozono originado en las horas de mayor actividad fotoquímica reacciona oxidando todo tipo de materiales o con otros compuestos atmosféricos disminuyendo su concentración.

De esto se puede deducir que la intensidad de la radiación solar tiene gran influencia en las concentraciones de ozono que se observan durante el día. La primera condición para la constitución de ozono en la atmósfera es la presencia de oxígeno atómico, producido en este caso por la radiación solar de longitud de onda adecuada.

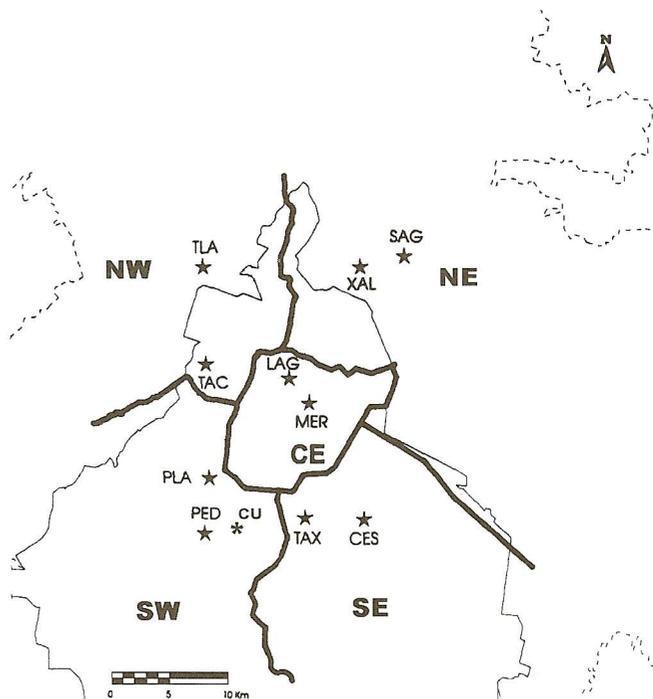
En las mañanas frías, cuando durante la noche hubo enfriamiento del suelo por emisión de radiación infrarroja, se suelen presentar las llamadas inversiones térmicas en las cuales la atmósfera tiene gradientes verticales de temperatura que causan condiciones de estabilidad atmosférica. En estas situaciones las emisiones de precursores a la atmósfera se quedan atrapadas en las capas inferiores. A la salida del sol, al ser iluminada la atmósfera, se inicia la formación de ozono y al mismo tiempo el calentamiento del suelo y con ello los procesos de convección que dispersan y transportan las emisiones.

Los coeficientes de las velocidades de las reacciones

fotoquímicas involucradas en la formación y destrucción del ozono dependen de la temperatura, de modo que la concentración de ozono depende, por una parte, de la cantidad de átomos libres de oxígeno, o sea de la intensidad de la radiación solar y de la abundancia de precursores, y por otra parte, de la temperatura que afecta la velocidad de las reacciones involucradas.

Datos y sitios de observación

Se han empleado los promedios horarios de temperatura y concentración de ozono de 10 estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), dependiente del Gobierno del Distrito Federal durante el año de 1996. Las estaciones fueron las siguientes: Xalostoc (XAL), San Agustín (SAG), Tlalnepantla (TLA), Tacuba (TAC), Merced (MER), Lagunilla (LAG), Taxqueña (TAX), Cerro de la Estrella (CES), Pedregal (PED) y Plateros (PLA), cuya localización se muestra en la **figura 1**. Se escogieron estas estacio-



Zona	Simb.	Est. de Muestreo
NW	TLA	Tlalnepantla
NW	TAC	Tacuba
NE	XAL	Xalostoc
NE	SAG	San Agustín
CE	LAG	Lagunilla
CE	MER	Merced
SW	PLA	Plateros
SW	PED	Pedregal
SW	CU	Campus UNAM
SE	TAX	Taxqueña
SE	CES	Cerro de la Estrella

Fig. 1. Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

nes porque hay dos de ellas en cada una de las áreas en las que se divide la ZMCM para el reporte de la contaminación que ofrece la RAMA. Los datos, que están muy completos, se tomaron de la base de datos SOMOD (IMP 1992) y del sistema computacional SIMEDA (IMP 1995). Se usaron además los valores de las integrales horarias de radiación solar global en el espectro visible y en el ultravioleta cercano ($0.300 \text{ mm} < \lambda < 0.700 \text{ mm}$) determinadas en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica en el *campus* de la Ciudad Universitaria, cuya localización se muestra también en la **figura 1**. Las determinaciones se hicieron con un piranómetro Kipp & Zonnen referenciado periódicamente contra un pirheliómetro estándar Eppley. El sitio de observación de la radiación se encuentra cercano a las estaciones Pedregal y Plateros, a distancias menores de 4 y 6 km, respectivamente.

Ozono y temperatura

Horas de ocurrencia del valor máximo de ozono y de la temperatura ambiente

Se obtuvieron para las 10 estaciones mencionadas las horas en las cuales se presentaron los máximos diarios de los promedios horarios para ozono. Los mismos valores se consiguieron para la temperatura en 8 de las estaciones, ya que ésta no se reportó para las estaciones Lagunilla y Taxqueña. Con dichos valores se calculó la diferencia siguiente:

$$\Delta t_{O_3} = \text{Hor. (max. de temp.)} - \text{Hor. (max. de ozono)}$$

En donde Hor. (máx. de temp) y Hor. (máx. de ozono) son las correspondientes horas del máximo de temperatura y ozono. Los valores promedio de estas diferencias para cada estación se muestran en la **tabla I**. En promedio, el máximo de temperatura se presenta 1.90 horas después que el máximo de ozono. Las estaciones con menor retraso del máximo de temperatura con respecto a la hora del máximo de ozono son las del Oeste de la ZMCM y en especial las del Suroeste: Pedregal y Pla-

teros. El hecho de que en promedio el máximo de temperatura se presente 1.90 horas después que el máximo de ozono lo descarta como variable que explique el máximo de ozono. Una hipótesis más aceptable es la contraria, que el valor máximo de ozono es la variable que explica el máximo de temperatura, o bien, existe una variable que es

TABLA I. TIEMPOS PROMEDIO DE DIFERENCIA (horas) ENTRE LOS MÁXIMOS DE OZONO Y LOS DE TEMPERATURA Y COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE ELLOS EN DIVERSAS ESTACIONES

Estación	Diferencia entre los máximos	Coef. de correlación entre los máximos	intervalo de 0.05 de confianza
PED	1.57	0.270	± 0.104
PLA	1.69	0.258	± 0.104
TLA	1.81	0.228	± 0.108
TAC	1.84	0.292	± 0.107
CES	1.94	0.284	± 0.109
SAG	2.00	0.366	± 0.107
MER	2.04	0.348	± 0.109
XAL	2.29	0.194	± 0.107
PROMEDIO	1.90		

causa común de la temperatura y del ozono, por ejemplo, la radiación solar. El valor máximo de ozono podría considerarse como una variable muy relacionada con "la concentración de la contaminación" y en consecuencia con la transparencia del aire. De modo que "la contaminación" es uno de varios factores que controlan el valor de la temperatura máxima a través de la absorción de la radiación en el aire y su consiguiente calentamiento (Bravo y Muhlia 1984). Esta hipótesis se refuerza al calcular los coeficientes de correlación entre el valor máximo diario de ozono y el de la temperatura, que se muestran en la **tabla I** y que fueron todos estadísticamente significativos. Las estaciones Pedregal y Plateros son las que presentan el máximo de ozono más tardíamente mientras que Merced y Xalostoc lo muestran más temprano.

TABLA II. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES MÁXIMOS DIARIOS DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO Y LOS VALORES MEDIOS DE LA TEMPERATURA A VARIAS HORAS DEL DÍA EN DIVERSAS ESTACIONES

Temperatura	PED	TAC	TLA	XAL	SAG	CES	PLAT	MER
7 y las 8	-0.132±0.104	-0.218±0.107	-0.162±0.107	-0.301±0.107	0.009±0.106	-0.076±0.108	-0.127±0.104	-0.095±0.107
8 y las 9	-0.100±0.104	-0.153±0.107	-0.123±0.108	-0.259±0.107	0.034±0.106	-0.081±0.108	-0.053±0.103	-0.083±0.107
9 y las 10	-0.019±0.104	-0.079±0.107	-0.007±0.108	-0.150±0.107	0.105±0.106	-0.047±0.108	0.003±0.104	-0.022±0.107
10 y las 11	0.043±0.104	0.023±0.107	0.081±0.108	0.003±0.107	0.155±0.106	0.001±0.108	0.069±0.103	0.063±0.107
11 y las 12	0.125±0.104	0.103±0.107	0.142±0.108	0.122±0.106	0.216±0.106	0.056±0.108	0.145±0.103	0.178±0.107
12 y las 13	0.184±0.104	0.202±0.107	0.211±0.108	0.203±0.107	0.283±0.106	0.133±0.108	0.165±0.104	0.261±0.107
13 y las 14	0.244±0.104	0.273±0.107	0.235±0.108	0.244±0.106	0.265±0.106	0.187±0.107	0.225±0.104	0.307±0.108
14 y las 15	0.271±0.104	0.296±0.107	0.253±0.108	0.250±0.107	0.328±0.106	0.252±0.107	0.268±0.104	0.339±0.107
15 y las 16	0.305±0.104	0.308±0.107	0.247±0.107	0.224±0.107	0.307±0.106	0.292±0.108	0.268±0.104	0.347±0.107
16 y las 17	0.298±0.104	0.276±0.107	0.197±0.107	0.207±0.107	0.360±0.106	0.289±0.107	0.230±0.104	0.353±0.108

TABLA III. FRECUENCIAS CON LAS QUE SE PRESENTA CADA ESTACIÓN EN LA SECUENCIA DIARIA DE OCURRENCIA EN EL TIEMPO DE LOS MÁXIMOS DE OZONO

	PRIMERA	SEGUNDA	TERCERA	CUARTA	QUINTA	SEXTA	SÉPTIMA	OCTAVA	NOVENA	DÉCIMA
XAL	140	67	74	55	43	40	40	30	41	28
TAC	119	89	67	58	51	48	48	34	20	8
CES	97	55	59	55	67	44	44	36	41	53
TLA	63	82	75	59	38	48	48	53	39	46
SAG	42	87	55	79	53	31	31	43	41	74
TAX	37	64	62	58	63	69	69	56	44	40
PED	19	24	45	56	44	53	53	68	104	64
MER	17	38	42	48	75	83	83	69	60	51
LAG	7	20	35	40	54	74	74	73	73	79
PLA	6	21	33	39	59	57	57	85	84	104
HORA MEDIA	12.73	13.18	13.53	13.81	14.03	14.29	14.58	14.89	15.29	15.83

Correlación entre el valor máximo de ozono y la temperatura ambiente durante el día

Se obtuvo el coeficiente de correlación entre el valor máximo de la concentración de ozono y la temperatura a diferentes horas del día en cada una de las estaciones. Puede verse en la **tabla II** que el coeficiente de correlación se incrementa desde valores negativos, para las temperaturas de las primeras horas de la mañana, hasta valores positivos presentándose un valor máximo entre las 15 y 17 horas, posterior a la hora del máximo de ozono. Los coeficientes de correlación negativos en las primeras horas de la mañana son significativos en todas las estaciones, a excepción de la estación San Agustín e indican que al haber temperaturas bajas durante la mañana se presentarán altas concentraciones de ozono. Esto puede deberse a que las temperaturas bajas durante la mañana indican, probablemente, inversiones térmicas que impiden la dispersión rápida de contaminantes.

Secuencia de ocurrencia de los máximos

Las estaciones se ordenaron diariamente según la hora de ocurrencia del máximo, después se contó el número

de veces que cada estación ocupó el primer lugar, el segundo lugar, etc. El resultado se muestra en la **tabla III**. Las estaciones Xalostoc, Tacuba, Cerro de la Estrella, Tlalnepantla y San Agustín son las que presentan el mayor número de veces el máximo primero que todas las demás. Estas estaciones se localizan, a excepción de Cerro de la Estrella, en la parte Norte de la ZMCM. Las estaciones que muestran el mayor número de veces el máximo más tardíamente son las de la parte Sur: Plateros, Lagunilla, Merced, Pedregal y Taxqueña. Esto sugiere que la emisión de precursores ocurre primero en la parte Norte de la ZMCM y a medida que transcurre el día se transportan hacia la parte Sur, en donde se presentan los máximos más tardíos. El hecho de que la zona industrial se encuentre mayormente en la parte Norte refuerza esta hipótesis.

En la **figura 2** se muestran 10 histogramas, el primero (A) es la frecuencia en que ocurre en cada estación el máximo en primer lugar en el tiempo. El segundo histograma (B) representa la frecuencia en que ocurre en cada estación el máximo en segundo lugar y así para el resto de los histogramas (C-J). El patrón de los histogramas se invierte, es decir en el histograma A las

TABLA IV. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DEL VALOR MÁXIMO DIARIO DE OZONO CON EL DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL CAMPUS DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA (intervalo de confianza del 95%, ± 0.104)

	Entre 7 y 8	Entre 8 y 9	Entre 9 y 10	Entre 10 y 11	Entre 11 y 12	Entre 12 y 13	Entre 13 y 14	Entre 14 y 15	Entre 15 y 16	Entre 16 y 17
PED	0.17	0.26	0.33	0.37	0.36	0.27	0.16	0.10	-0.05	-0.12
PLA	0.16	0.25	0.31	0.33	0.30	0.20	0.08	0.02	-0.09	-0.17
TAX	0.12	0.23	0.29	0.34	0.32	0.23	0.18	0.12	0.01	-0.04
CES	0.04	0.12	0.17	0.22	0.27	0.21	0.16	0.08	-0.02	-0.09
SAG	0.33	0.38	0.39	0.34	0.35	0.24	0.18	0.17	0.12	0.17
XAL	0.04	0.19	0.23	0.21	0.26	0.21	0.17	0.20	0.15	0.09
TLA	0.07	0.19	0.23	0.22	0.23	0.13	0.07	0.08	0.09	0.00
TAC	0.05	0.18	0.22	0.24	0.24	0.14	0.09	0.06	-0.01	-0.11
MER	0.19	0.30	0.34	0.34	0.34	0.23	0.16	0.13	0.01	-0.08
LAG	-0.03	0.12	0.16	0.19	0.19	0.12	0.08	0.04	-0.07	-0.16

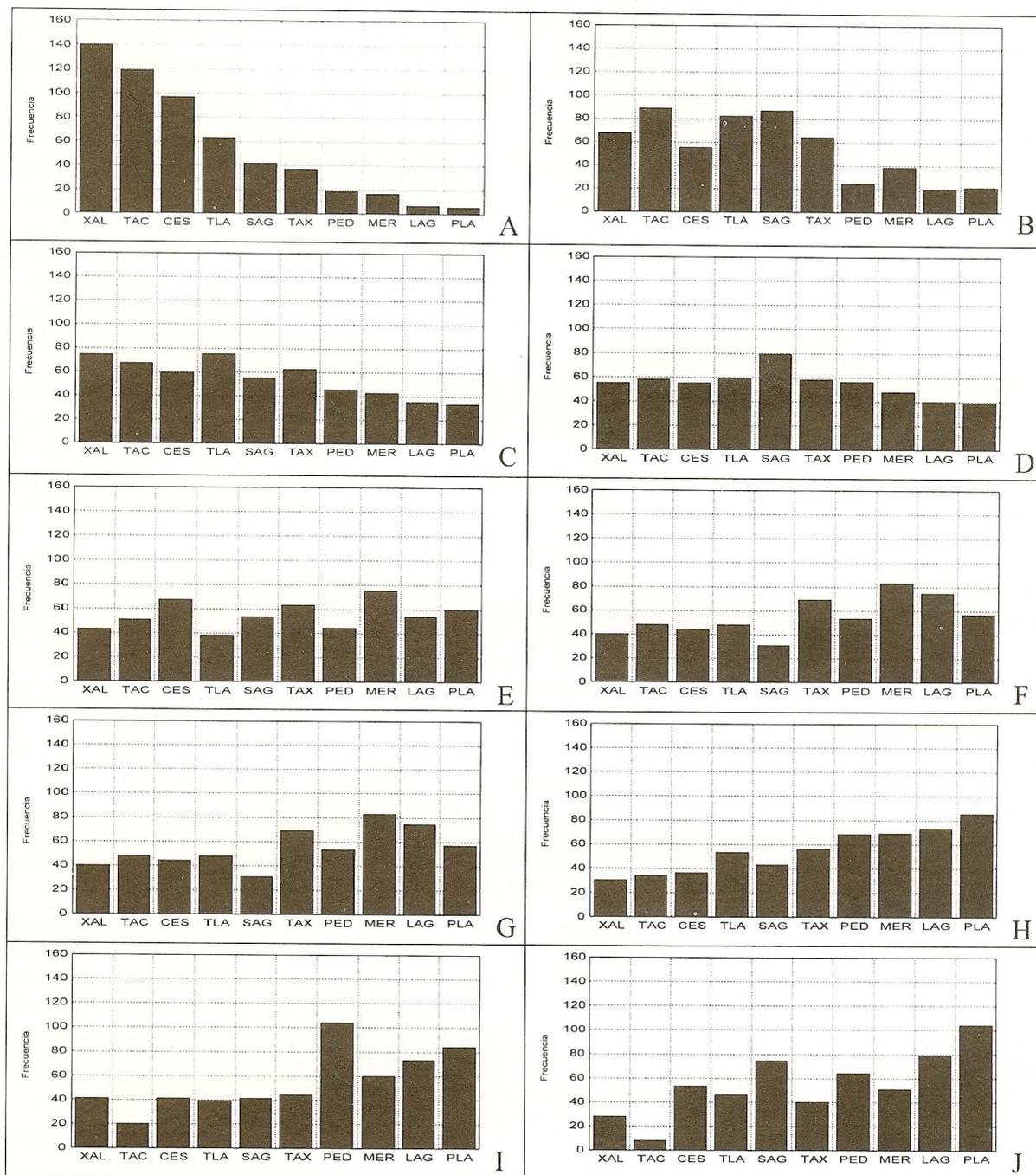


Fig. 2. Frecuencia con la que ocurre el máximo de ozono: A en primer lugar, B en segundo, C en tercero, D en cuarto, E en quinto, F en sexto, G en séptimo, H en octavo, I en noveno y J en décimo

estaciones XAL, TAC, CES, TLA y SAS presentan el mayor número de veces el valor máximo más temprano, con los histogramas sesgados a valores más grandes del lado izquierdo. El sesgo se desplaza, y en el histograma J, las estaciones TAX, PED, MER, LAG y PLA muestran el valor máximo más tardíamente el mayor número de veces.

Ozono y radiación solar

Coficiente de correlación de la radiación solar con el valor máximo de ozono

Se obtuvo el coeficiente de correlación entre el valor máximo diario de la concentración de ozono y la radiación solar global horaria medida en el Observatorio de Radiación Solar. Los resultados se muestran en la **tabla IV**.

TABLA V. DIFERENCIAS TEMPORALES EXPRESADAS EN HORAS ENTRE LOS MÁXIMOS DE OZONO Y LOS DE LA RADIACIÓN SOLAR. VALORES MEDIOS PARA CADA ESTACIÓN

XAL	1.69
CES	1.83
MER	1.86
TAX	1.91
LAG	1.93
TAC	1.94
SAG	2.05
TLA	2.09
PLA	2.23
PED	2.35
MÁXIMO DE OZONO	2.29

Los valores con correlación máxima corresponden a momentos entre las 10 y las 12 horas, este coeficiente de correlación es significativo en todos los casos para esos tiempos. Al transcurrir el día, el coeficiente de correlación disminuye y finalmente para la tarde, entre las 15 y 17 horas, toma valores negativos significativos en algunas estaciones como Pedregal, Plateros, Tacuba y Lagunilla. Esto indica la disminución de la transparencia atmosférica en el Observatorio de Radiación Solar cuando en esas estaciones los máximos de ozono son intensos. Lo contrario sucede para las estaciones San Agustín y Xalostoc, cuanto más intensos son sus máximos, más radiación se transmite en el Observatorio de Radiación Solar. Esto podría ser causado por los días en los que el transporte se invierte y los precursores no viajan en la dirección Sur permaneciendo en la zona Norte de la ZMCM.

Diferencia temporal entre los máximos de ozono y de la radiación solar

Se calculó la diferencia temporal diaria entre la hora de ocurrencia de los máximos de ozono y de la radiación solar, los valores promedio se muestran en la **tabla V**. Puede

verse que el máximo de ozono se presenta en promedio entre 1.69 y 2.35 horas después de la hora del máximo de radiación.

Coefficiente de correlación

Con objeto de determinar cuál de las variables, la radiación solar o la temperatura ambiente, está más relacionada con el valor máximo de ozono, se calculó el coeficiente de correlación entre el valor máximo de ozono con la temperatura ambiente a las 13 horas y con la radiación que incidió hasta las 13 horas en el Observatorio de Radiación Solar. Los resultados se muestran en la **tabla VI**.

TABLA VI. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA AMBIENTAL A LAS 13 H, RADIACIÓN SOLAR QUE INCIDIÓ HASTA LAS 13 H Y EL VALOR MÁXIMO DIARIO DE OZONO EN LA ESTACIÓN PEDREGAL (intervalo de confianza del 95% \pm 0.107)

	Temp. ambiental a las 13 h	Radiación solar que incidió hasta las 13 h	Valor máximo de la media horaria de ozono
Temp. ambiental	1	0.685	0.191
Radiación solar que incidió hasta las 13 h	0.685	1	0.340
Valor máximo de la media horaria de ozono	0.191	0.340	1

La radiación está muy correlacionada con la temperatura, como es de esperarse. La correlación entre el valor máximo diario de ozono y la radiación solar que incidió hasta las 13 h es significativa y la correlación entre la temperatura ambiente a las 13 h y el valor máximo de ozono, aunque también es significativa, es menor que la existente

TABLA VII. FRECUENCIAS CON LAS QUE CADA ESTACIÓN OCUPA EL LUGAR INDICADO ESTANDO LAS ESTACIONES ORDENADAS SEGÚN LA MAGNITUD DEL MÁXIMO

	lugar 1	lugar 2	lugar 3	lugar 4	lugar 5	lugar 6	lugar 7	lugar 8	lugar 9	lugar 10
PED	145	67	47	31	25	19	12	16	2	2
PLA	49	121	76	34	24	15	15	15	11	6
TAC	47	66	69	47	41	39	37	10	7	3
TLA	44	20	18	29	26	32	39	84	45	29
CES	32	18	40	34	46	40	50	27	22	57
LAG	25	32	50	59	63	51	39	19	15	13
TAX	11	23	34	58	53	59	50	38	31	9
SAG	7	4	5	8	11	22	32	46	101	130
XAL	5	8	6	20	15	19	32	56	94	111
MER	1	7	21	46	62	70	60	55	38	6
Promedio de los valores de ozono	0.177	0.160	0.146	0.135	0.124	0.115	0.105	0.095	0.083	0.065

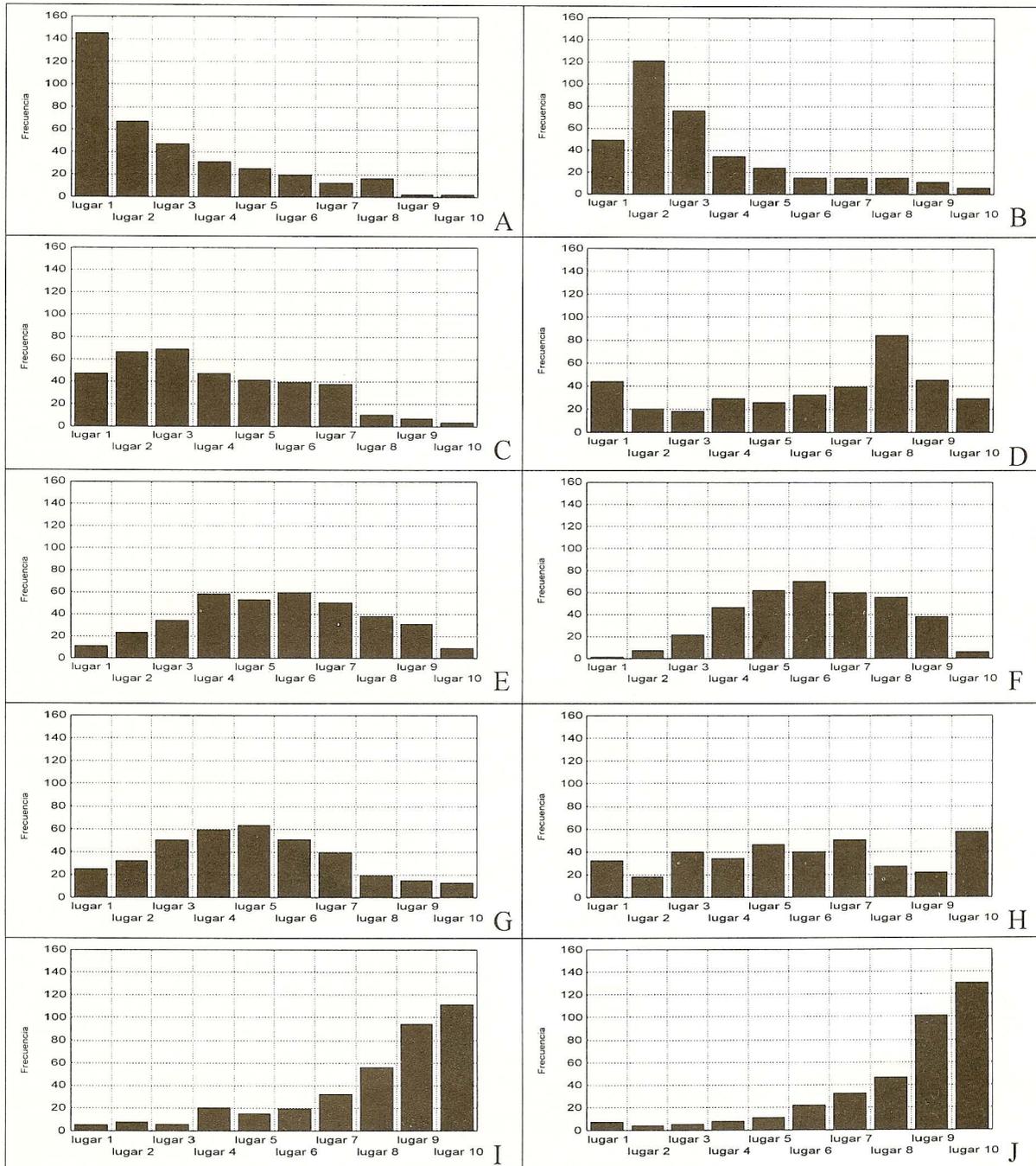


Fig. 3. Frecuencia de la ocupación por las estaciones del sitio indicado, según las magnitudes de los máximos. A Pedregal, B Plateros, C Tacubaya, D Tlalnepantla, E Taxqueña, F Merced, G Lagunilla, H Cerro de la Estrella, I Xalostoc y J San Agustín

entre el valor máximo de ozono y la radiación solar. Esto indica que la radiación solar es una mejor variable para la predicción a corto plazo del valor máximo de ozono.

Frecuencia de ocurrencia de máximos y mínimos

Se ordenaron diariamente las 10 estaciones según la magnitud del máximo de ozono en cada una de ellas, en el primer lugar de ese día se colocó la estación que presentó el valor más alto del máximo y en el último la

estación que tuvo el valor máximo más pequeño del día. Esta ordenación se realizó para todos los días de 1996, se contó la cantidad de veces que cada estación ocupó el primer lugar, el segundo, etc. El resultado se muestra en la **tabla VII**. Con estos valores se construyó la **figura 3**, en la que se muestran los 10 histogramas correspondientes. En las estaciones Pedregal y Plateros se muestran con más frecuencia los primeros y segundos valores más altos del máximo diario y en las estaciones

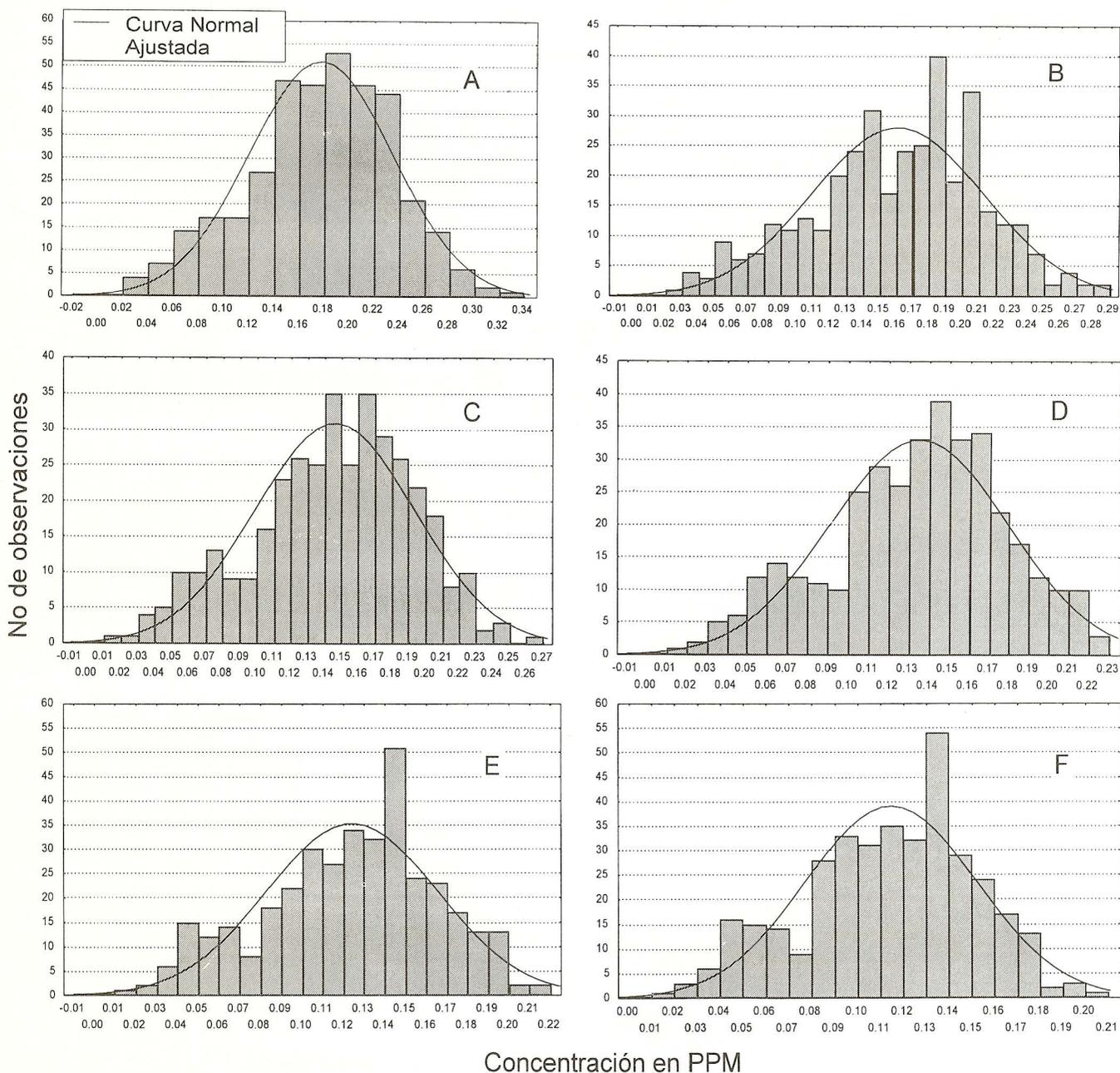


Fig. 4. Histogramas de las concentraciones de los máximos relativos de ozono. Se aprecia la bimodalidad de las distribuciones. A primer máximo, B segundo, C tercero, D cuarto, E quinto, F sexto (continúa en la página 53)

San Agustín y Xalostoc ocurre más frecuentemente el máximo de menor valor. Se tabularon también los valores que corresponden a los máximos más grandes, a los segundos valores más grandes de los máximos, etc., hasta los valores más pequeños y con estos valores se construyeron los histogramas que se muestran en la **figura 4**, que presentan un sesgo estadísticamente significativo de signo negativo para las primeras 8 distribuciones. Este sesgo se invierte para el décimo histograma.

Se puede apreciar una clara bimodalidad, que podría indicar la presencia de dos conjuntos de fenómenos involucrados en la dispersión de los contaminantes, un conjunto que lleva a la formación de máximos de valores grandes y otro que lleva a la formación de máximos de valores pequeños. El sesgo positivo en el décimo histograma indica que la moda principal cambió de las concentraciones altas de ozono a las bajas para los máximos de valores más pequeños de las estaciones.

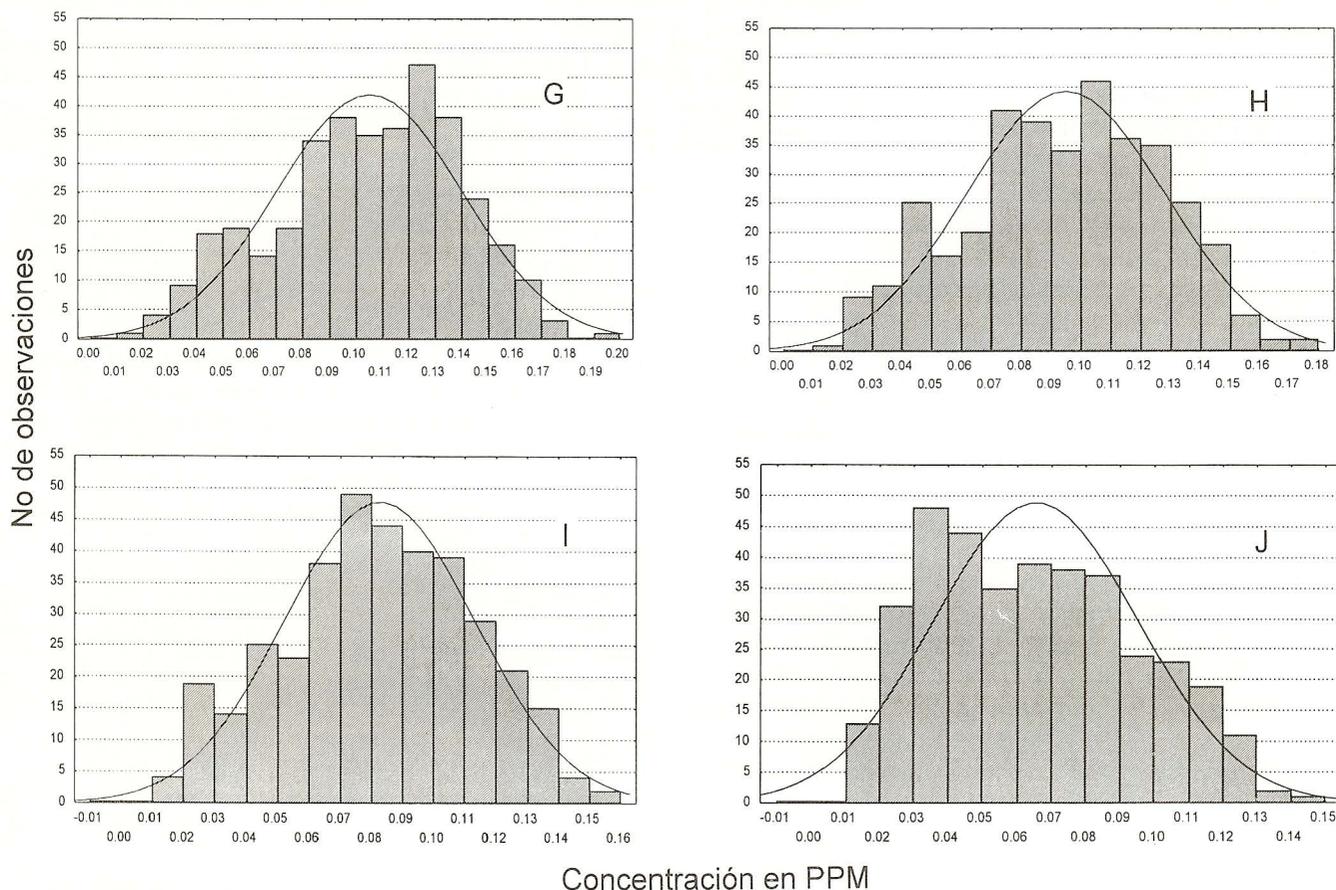


Fig. 4. (Continuación) Histogramas de las concentraciones de los máximos relativos de ozono. Se aprecia la bimodalidad de las distribuciones. G séptimo, H octavo, I noveno, J décimo

CONCLUSIONES

El máximo de temperatura se presenta en promedio 1.9 h después del máximo de ozono, siendo así poco útil como variable para predecir a corto plazo el valor máximo de la concentración de ozono. Una hipótesis más aceptable es que el valor máximo de ozono puede ser una variable que explica el máximo de temperatura o que la radiación solar es la causa común para la variación de ambos parámetros.

Los coeficientes de correlación entre el valor máximo diario de ozono y la temperatura durante las primeras horas de la mañana son negativos. Esto puede deberse al hecho de que las temperaturas bajas durante la mañana indican, probablemente, inversiones térmicas que impiden la dispersión rápida de contaminantes, esta variable podría ser útil para el pronóstico del valor máximo diario del ozono.

Las estaciones que presentan primero el valor máximo de ozono durante el día son de la parte Norte de la ZMCM y las estaciones más tardías son de la parte

Sur. Esto sugiere procesos de emisión temprana de precursores en la parte Norte, que es donde se encuentra mayormente la zona industrial y el transporte de las emisiones hacia la parte Sur a lo largo del día.

La radiación solar global medida en el Observatorio de Radiación Solar entre las 10 y 12 h está correlacionada positiva y significativamente con el valor máximo de la concentración de ozono en las estaciones estudiadas. Lo contrario sucede para las estaciones San Agustín y Xalostoc, cuanto más intenso es el máximo más radiación solar se transmite en el Observatorio de Radiación Solar. Esto podría indicar la presencia de días en los que el transporte se invierte y los precursores no viajan en la dirección Sur permaneciendo, quizá, en la parte Norte de la ZMCM.

El hecho de que el máximo de la radiación solar se presente antes que el máximo de ozono, la existencia de un coeficiente de correlación significativo de la radiación entre 10 y 12 h y el valor máximo de ozono y el hecho que la incidencia de radiación solar hasta las 13 h esté más correlacionada con el valor máximo de ozono que la tem-

peratura a la misma hora, sugieren que la radiación solar es una variable que explica el fenómeno de manera aceptable.

Hay una clara bimodalidad en los histogramas de los valores máximos de ozono, de los segundos valores, etc. Esto podría indicar la presencia de dos conjuntos de fenómenos involucrados en la dispersión de los contaminantes, un conjunto que lleva a la formación de máximos de valores grandes y otro a la de máximos de valores pequeños. Los fenómenos podrían ser el transporte al Sur o al Norte, como lo sugiere el coeficiente de correlación del máximo de ozono con la radiación solar en las estaciones San Agustín y Xalostoc.

AGRADECIMIENTOS

Los datos meteorológicos y de ozono fueron proporcionados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Gobierno del Distrito Federal. Los datos de radiación solar fueron facilitados por el equipo técnico del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, UNAM: Ernesto Jiménez de la Cuesta, Vidal Valderrama, Rogelio Montero, Luis Galindo y Emilia Velazco. Este trabajo se realizó en la Gerencia

de Ciencias del Ambiente del Instituto Mexicano del Petróleo.

REFERENCIAS

- Bravo J. L. y Muhlia A. (1984). Heating rates due to direct solar radiation in an atmospheric model. *Z. Meteor.* 34 2, 86-99.
- IMP (Instituto Mexicano del Petróleo). (1992). Sistema objeto multinodal orientado a disco (SOMOD). Programa de cómputo con registro público de derecho de autor No. 19366/92, México D. F.
- IMP (Instituto Mexicano del Petróleo). (1995). Sistema estadístico para el manejo de datos aerométricos de la ZMCM (SIMEDA). Programa de cómputo con registro público de derecho de autor No. 60523/1995. Informe técnico GCA95-13. IMP/STRP/GCA. Inédito, México D.F.
- Seinfeld J.H. (1989). Urban air pollution: state of the science. *Science* 243, 745-752.
- Rao S.T. y Zurbenco I.G. (1994). Detecting and tracking changes in ozone air quality. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 44, 1089-1092.
- Rao S.T., Zalewsky E. y Zurbenco I. G. (1995a). Determining temporal and spatial variations in ozone air quality. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 45, 57-61.
- Rao S.T., Zurbenco I. G. y Henry R. F. (1995b). Mapping ozone in the eastern United States. *Environ. Manag.* 1, 24-30.