

# ANÁLISIS DEL VIENTO Y SU INFLUENCIA EN LA DISPERSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL ÁREA URBANA DE GUADALAJARA, JALISCO, MÉXICO

*\*García M, \*Ulloa H, \*Ramírez H, \*\*Fuentes M, \*\*\*Arias S, \*García O, \*Meulenert A y \*Alcalá J.*

\*Instituto de Astronomía y Meteorología - División de Ciencias Básicas / Departamento de Física.

\*\*Laboratorio de contaminación ambiental / Departamento de química. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. \*\*\*Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño. Universidad de Guadalajara. Tel: (33) 36164937, Fax: (33) 36159829, Ext. 115; E-mail: megarcia@astro.iam.udg.mx

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento de los vientos en superficie y su influencia en la dispersión de los contaminantes atmosféricos en el Área Urbana de Guadalajara (AUG) durante el periodo 2001-2010. La metodología consistió en adquirir la información del viento (rapidez y dirección) recurriendo a las ocho estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio ambiente para el Desarrollo Sustentable del Gobierno de Estado de Jalisco. Similarmente, se obtuvo la información de los registros promedio horario de los contaminantes atmosféricos criterio: partículas menores a 10 micras ( $PM_{10}$ ), ozono ( $O_3$ ), bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) monóxido de carbono (CO) y bióxido de azufre ( $SO_2$ ). Los resultados muestran que el comportamiento del viento se caracteriza, en su mayoría, por un dominio de calmas, siendo más significativas por la madrugada y mañana. Esta característica, en conjunción con el continuo crecimiento del área, el relieve y la quema de combustibles fósiles, generan emisiones que contaminan el aire en las zonas más vulnerables particularmente, al *sur*, *sur-sureste*, *sureste*, *este-sureste* y *este* del AUG. El contaminante más significativo son las  $PM_{10}$  seguido del  $O_3$ ,  $NO_2$ , CO y  $SO_2$ .

**Palabras clave:** *Vientos dominantes, contaminantes atmosféricos Área Urbana de Guadalajara.*

## INTRODUCCIÓN

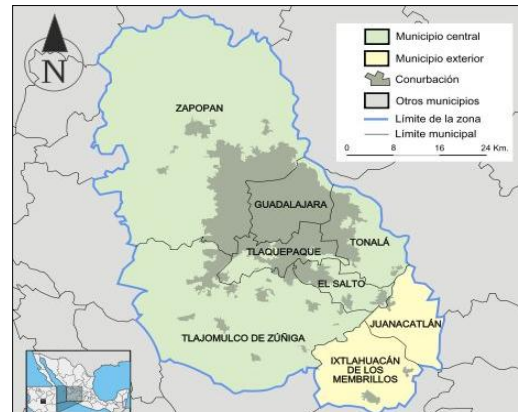
La contaminación de la atmósfera se manifiesta de forma diversa y afecta la vida de las comunidades. Una variable importante es la *velocidad de los vientos*, pues las condiciones dominantes de flujo atmosférico transportan los contaminantes sin respetar límites físicos locales, regionales, nacionales e internacionales. El impacto que un contaminante puede tener - ya sea local, regional o global- depende del tiempo de permanencia en el aire y la distancia que viaja desde su origen. Sin embargo, genera un deterioro irreversible en extensas áreas geográficas y daña a los animales, a la vegetación, a los cuerpos de agua y a la salud humana. Diversos trabajos han reportado que la meteorología tiene gran influencia en la acumulación y dispersión de contaminantes desde su fuente de emisión. Tanto el entorno natural (*geografía y topografía*), como la urbanización (*infraestructura urbana, vialidad, industria, transporte*, entre otros), afectan la calidad del aire de las grandes ciudades al prevalecer concentraciones elevadas de contaminantes. Otros agentes son la demografía, la industrialización y desarrollo

socio económico. Estos problemas adquieren importancia debido a que el crecimiento proyectado para la población urbana del mundo, aumenta tanto las fuentes de contaminación como el número de personas expuestas a los contaminantes nocivos. Algunos estudios reportan que las fuentes móviles son el origen primario de la contaminación del aire en las grandes ciudades; en la mitad de ellas constituye la más importante (*Molina y Molina 2005*). Un estudio realizado por la *CEPAL*, reportó que la ubicación geográfica del Área Metropolitana de Santiago de Chile sumada a factores meteorológicos, explican el deterioro de la calidad del aire. El área está rodeada por montañas (de 100 a 3000 m de altitud) que son factor limitante para la dispersión de los contaminantes emitidos en la misma. A esto se suma la *velocidad de los vientos* y la existencia de limitaciones a la dispersión vertical por efecto de *inversiones térmicas* que también dificultan la difusión de contaminantes (*Nicod y Iizuka 2000*). Igualmente, *Céspedes (2005)* reporta que la meteorología influye en la concentración de contaminantes, en este caso, transporte, turbulencia y limitaciones de dispersión vertical por inversión térmica. En México, los trabajos sobre deterioro ambiental datan de 1980, enfocados en ciudades como México D.F y Toluca Estado de México. La Ciudad de México incluye una elevada densidad poblacional, vehicular e industrial traducida en un acelerado desarrollo tecnológico; su deterioro ambiental más notorio es la contaminación del aire (*Molina y Molina 2005*), por tanto, no es novedad el padecimiento de problemas ambientales que conduzcan a la práctica de severas medidas para prevenir la acumulación de niveles inaceptables de contaminantes nocivos. El *objetivo* de este trabajo es analizar el comportamiento de los vientos en superficie y su influencia en la dispersión de contaminantes atmosféricos en el Área Urbana de Guadalajara, Jalisco, México, en el periodo 2001-2010. La meta fue determinar los vientos dominantes y el comportamiento en la concentración de contaminantes mediante una red de estaciones.

## METODOLOGÍA

### Caso de estudio: Área Urbana de Guadalajara (AUG)

El AUG tiene aproximadamente 4.5 millones de habitantes y 2 millones de vehículos en circulación diaria. Así, el problema de su calidad del aire se relaciona con el desarrollo urbano y tecnológico (*Ramírez et al. 2009*). Las fuentes contaminantes a la atmósfera son transporte (73.5 %), industria (1.1 %), servicios (4.2 %) y vegetación-suelo (21.2 %) (*SEMARNAP/GEJ/SS 1997*). Otros factores aunados han sido el deterioro de las áreas verdes por cambios de uso del suelo y los incendios forestales en los bosques urbanos (Bosque La Primavera, entre otros). El AUG se ubica al centro del Estado de Jalisco, en la región centro-occidente del país (*Figura 1*); sus coordenadas extremas son: latitud norte 20°46'00'', latitud sur 20°32'08'', longitud oriental 103°12'30'' y longitud occidental 103°29'00'' aproximadamente, con una altitud promedio de 1,540 msnm. Enmarca áreas de los Municipios de Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan.



**Figura 1.** Caso de estudio: AUG

En referencia a su *orografía*, la ciudad de Guadalajara se sitúa en la Cuenca del Valle del Río Grande de Santiago, en los Valles de Atemajac y la Planicie de Tonalá; entre las zonas

montañosas de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico. Las montañas que circulan el área son: al noroeste la Sierra de San Esteban; al sureste, la Serranía de San Nicolás y los conjuntos montañosos Cerro Escondido-San Martín y El Tapatío-La Reina; al sur, El Cerro del Cuatro-Gachupin-Santa María; y al oeste, la Sierra de la Primavera. Este relieve constituye parcialmente una barrera física natural para la circulación del viento impidiendo el transporte y dispersión de los contaminantes en el aire desde su fuente de emisión hacia fuera de la Ciudad (SEMARNAP/SS/GEJ 1997). El AUG está sujeto a la influencia de sistemas anticiclónicos, generados tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico. Estos sistemas causan gran estabilidad atmosférica impidiendo la mezcla vertical del aire. Además, por su latitud recibe abundante radiación solar haciendo que su atmósfera sea altamente fotoreactiva.

Para conocer el estado actual de la calidad del aire y de algunas magnitudes meteorológicas, la Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Jalisco opera una Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) con ocho estaciones distribuidas en el AUG (Figura 2), que miden los contaminantes atmosféricos criterio: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>). Además, esta red dispone de equipos que miden las variables meteorológicas precipitación, viento, temperatura, presión, entre otras. Así, mediante una solicitud fue posible obtener la información y realizar este trabajo.

**Periodo de evaluación.** Se construyó una base de datos de los vientos correspondiente al período 2001-2010; los datos fueron procesados y reportados mediante *Rosa de los Vientos* diaria, mensual, anual y para todas las estaciones. Se obtuvieron vientos promedios dominantes, máximos y mínimos. Igualmente, con la información de concentración de contaminantes atmosféricos adquirida a través de la misma red, se construyeron bases de datos, obteniendo tendencias medias, máximas y mínimas diarias, por año, por estación y el comportamiento en todo el periodo para cada contaminante. Se delimitó el área de estudio en base al que opera la RAMA (radio de influencia de 2 km) entre cada estación.

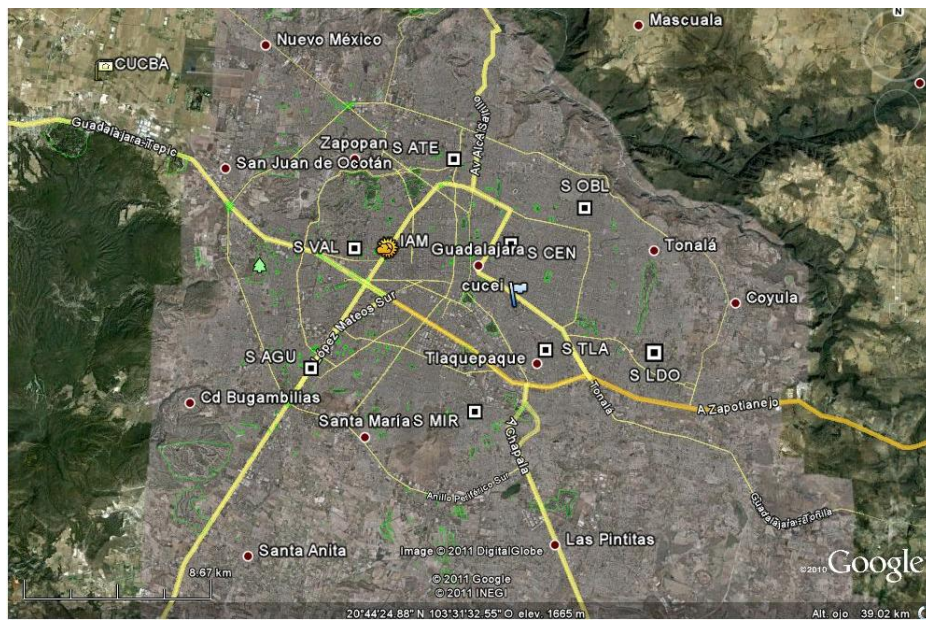
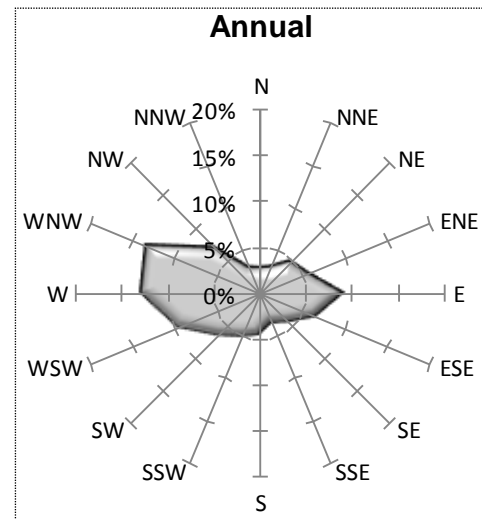


Figura 2. Distribución de las estaciones de la RAMA (2001-2010)

## RESULTADOS

### Comportamiento del viento en el AUG: Dirección

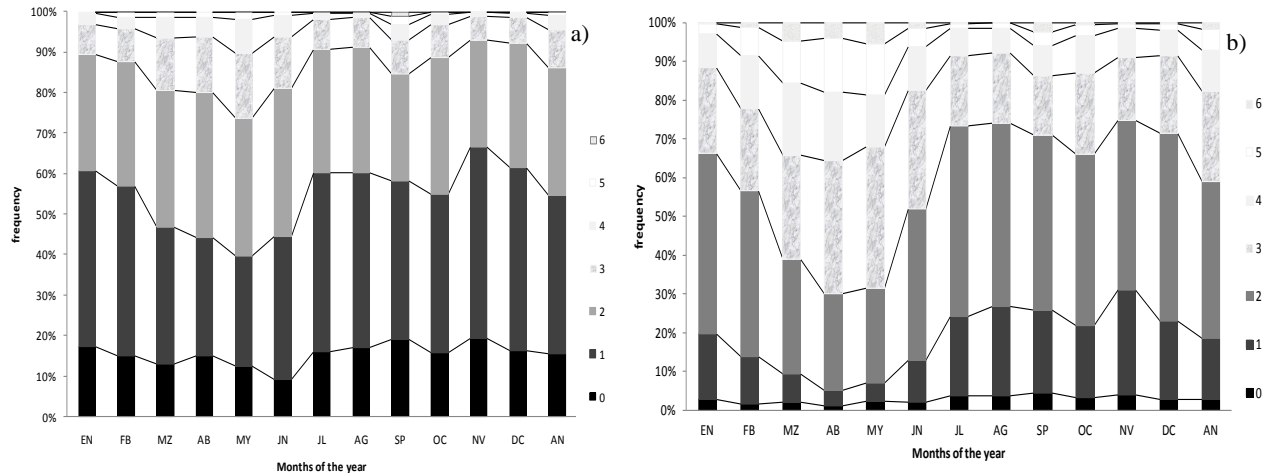
En el periodo analizado 2001-2010, se encontró que el viento dominante proviene del *oeste-noroeste*, *oeste* y *oeste-suroeste* con 13.17, 12.72 y 9.43% respectivamente; en ese orden, le siguen los vientos del *este-noreste*, *este* y *este-sureste* con 5.62, 9.06 y 6.53%. En ambos casos, sus velocidades son de 6 a 19 km/h y, en forma temporal de 20 a 38 km/h. Asimismo, una influencia menor se identifica en dirección *norte-noroeste*, *norte* y *norte-noreste* con 2.94, 2.66 y 2.97% respectivamente. Por su parte, las direcciones *sur-suroeste*, *sur* y *sur-sureste* se comparte el 4.96, 4.39 y 3.43% de la frecuencia total. Finalmente, las direcciones *noreste* con 4.76%, *sureste* con 4.31%, *suroeste* con 6.30% y *noroeste* con 6.75% completan el 100%. Durante el periodo invierno-primavera, el viento manifiesta una circulación característica que representa una frecuencia total de 24.08% con flujos de vientos occidentales con direcciones *oeste-suroeste*, *oeste* y *oeste-noroeste*. Mientras que, en el periodo verano-otoño el viento manifiesta una circulación característica que representa una frecuencia total de 16.2% con flujos de vientos orientales con direcciones *noreste*, *este-noreste*, *este*, *este-sureste* y *sureste*. Por su parte, los vientos del *norte* y *sur* comparten el 8.33% de la frecuencia total, incidiendo de manera poco significativa en la circulación local (*Figura 3*); las frecuencias restantes corresponden a las demás direcciones.



**Figura 3.** Vientos dominantes

### Comportamiento del viento en el AUG: Rapidez

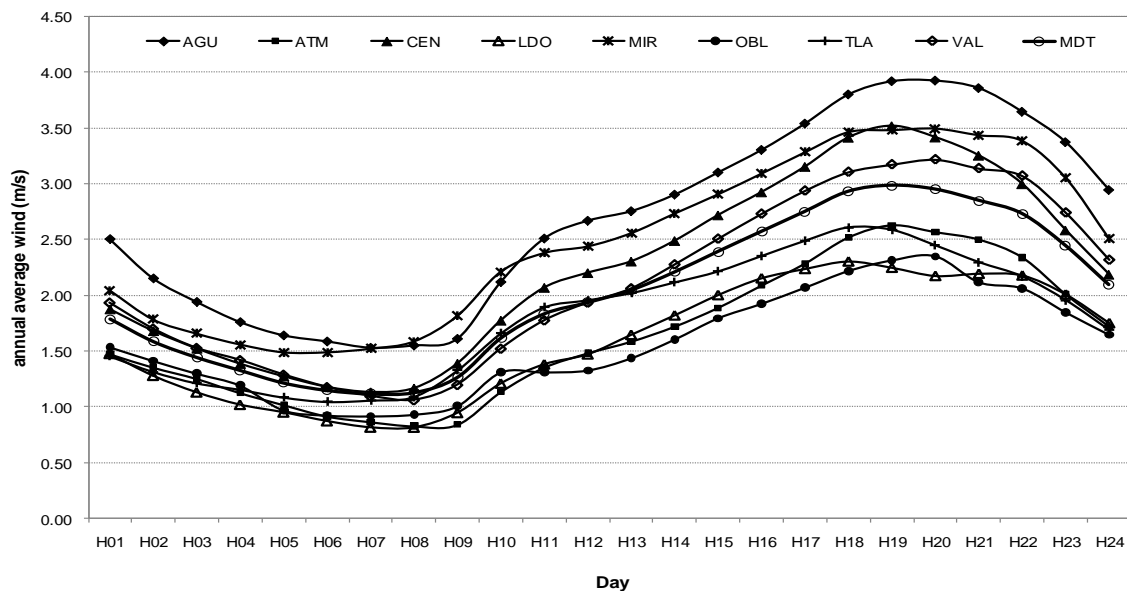
En cuanto al comportamiento de la rapidez de los vientos en el AMG en el mismo periodo, estos se caracterizaron por un dominio de periodos de calmas (escala Beaufort: 0-1: ausencia de viento y/o vientos débiles menores a 5 km/h); es decir, una frecuencia promedio de 38.57%. Esta situación se manifiesta en el gran potencial de acumulación y concentración de contaminantes en el área por la falta de ventilación que favorezca la dispersión de los mismos. La frecuencia mensual dominada por calmas ocurre en el intervalo de octubre a enero, donde se identifican periodos de 38.56%, 46.04%, 43.92% y 41.81% respectivamente. Los meses entre junio y agosto presentan frecuencias de calmas elevadas; sin embargo, la presencia de humedad y las precipitaciones limpian la atmósfera al diluirse los contaminantes. El periodo característico de disminución de calmas ocurre entre febrero y junio. Se realizó una clasificación de frecuencias por intervalos diarios: madrugada (00:01-06:00), mañana (06:01-12:00), tarde (12:01-18:00) y noche (18:01-24:00), observándose los periodos de calma significativos en la madrugada y la mañana con más del 50%, contrario a la tarde y noche, donde incide el mayor flujo del viento (*Figura 4*).



**Figura 4.** Frecuencia en la escala Beaufort para velocidad del viento: a) madrugada; b) noche

**Rapidez del viento por año.** Los máximos de los vientos sostenidos se registraron en los años 2001, 2002 y 2003 con 34.15, 27.36 y 44.47 km/h respectivamente, mientras que, en los últimos 3 años se presentaron las máximas mínimas (7 y 8 km/h). La máxima media osciló de 3.74 a 9.56 km/h y la media de 1.82 a 4.47 km/h. Esta tendencia es consecuencia de la orografía del área en adición a la acelerada urbanización (*Glynn y Heinke 1999*).

**Viento diario promedio (2001-2010).** La figura 5 muestra la gran presencia de calma durante la madrugada y la mañana, intensificándose paulatinamente los vientos sostenidos a partir de 8 y 9 horas en vínculo con la radiación solar. Se observan vientos significativas entre las 18 y 22 horas, luego, se observa un decremento por enfriamiento de la superficie (atmósfera estable).

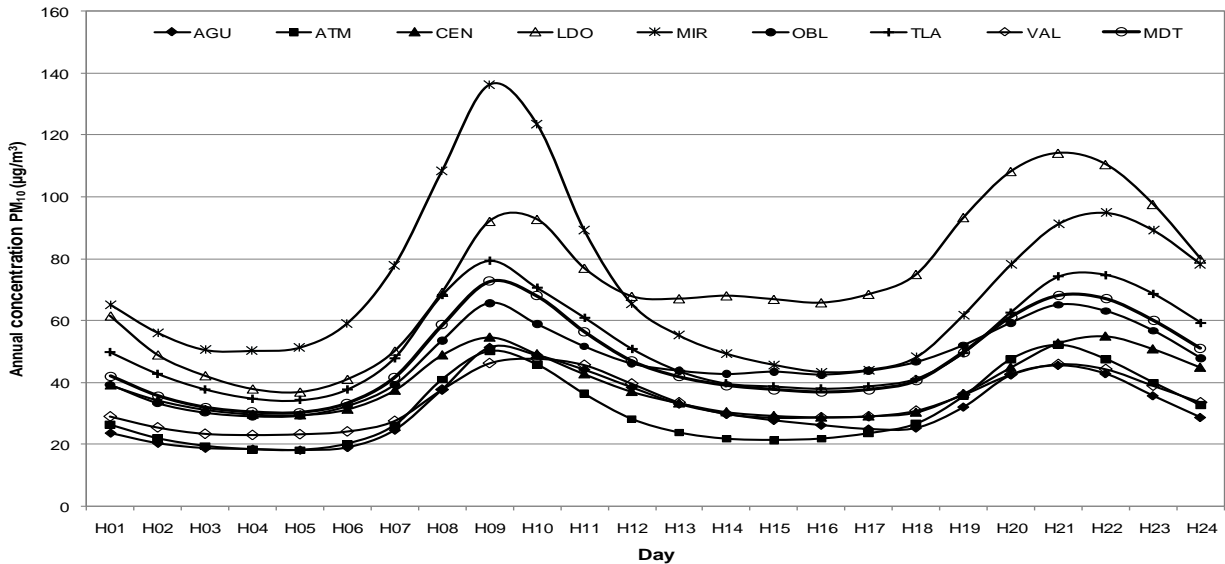


**Figura 5.** Viento diario promedio. 2001-2010

## Comportamiento de los contaminantes atmosféricos en el AUG

### Partículas menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>): NOM-025-SSA1-1993 y DOF-26/09/2005 (120 µg/m<sup>3</sup>)

**Comportamiento diario.** Las concentraciones promedio diarias de PM<sub>10</sub> más elevadas se observaron en las estaciones MIR, LDO y TLA (arriba de la norma EPA: 50 µg/m<sup>3</sup> y picos arriba de la NOM). Las máximas ocurren de 7 a 11 y de 19 a 23 horas, con descenso intermedio entre las 12 y 18 horas (*Figura 6*). Esto es debido a la influencia de la estabilidad de la atmósfera local y de las emisiones contaminantes por fuentes móviles y fijas en los rangos mencionados.



**Figura 6.** Comportamiento promedio diario de PM<sub>10</sub>, 2001-2010

**Comportamiento por estación.** Todas las estaciones manifestaron concentraciones extremas de PM<sub>10</sub>, remarcando la tendencia anual y por estación. Las estaciones más afectadas son MIR, LDO, OBL y CEN (499.9 µg/m<sup>3</sup>); 4 veces por arriba de la NOM y 10 arriba de la EPA. Las concentraciones máximas medias oscilaron de 77 a 193 µg/m<sup>3</sup> y las medias de 31 a 72 µg/m<sup>3</sup>.

**Comportamiento mensual en el periodo.** Las concentraciones máximas estuvieron fuera de la NOM y EPA en todo el periodo (de 140 a 500 µg/m<sup>3</sup>). Los máximos promedio fueron de 43 a 188 µg/m<sup>3</sup> y las medias de 20 a 95 µg/m<sup>3</sup>. Las PM<sub>10</sub> es el contaminante con las concentraciones más elevadas. Por tanto, son un problema de contaminación del aire y factor de riesgo para la población del AUG. Se localizaron los episodios más extremos al *sur* y *sureste* del área.

### Ozono (O<sub>3</sub>) –NOM-020-SSA1-1993: 0.11ppm (DOF-23/12/1994)– Modificación DOF-30/10/2002

**Comportamiento diurno.** El comportamiento promedio de O<sub>3</sub> define sus concentraciones máximas entre las 12 y 19 horas debido a la mayor presencia de radiación solar, siendo factor determinante en las reacciones químicas para la generación de este contaminante secundario. Las mínimas ocurren en la madrugada y la mañana. Su comportamiento promedio diario está dentro de las normas EPA (0.09 ppm) y NOM durante los 10 años analizados (*Figura 7*).

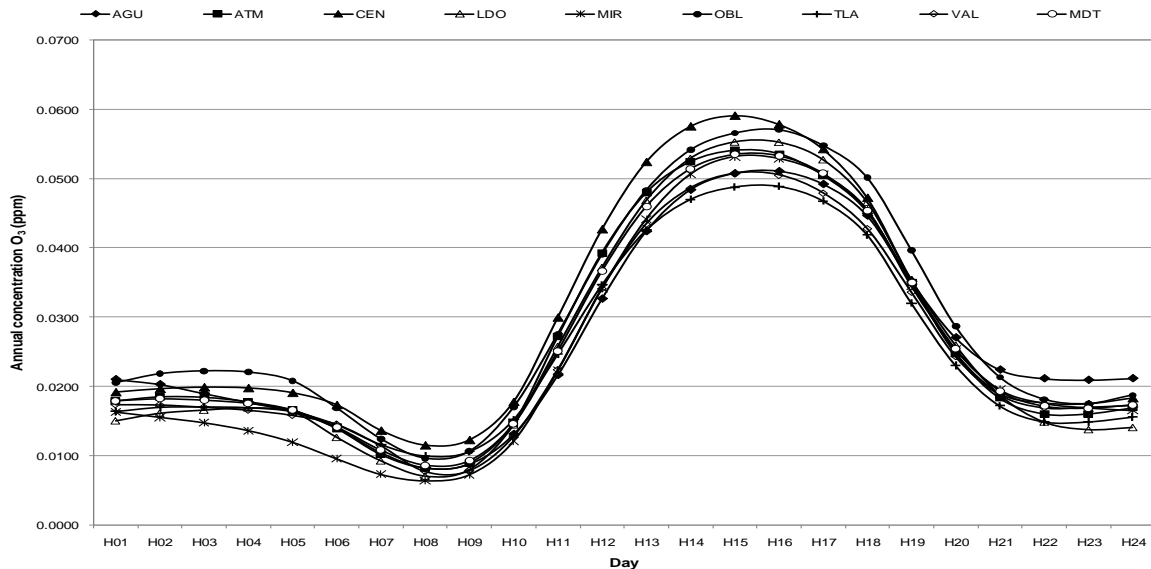


Figura 7. Comportamiento promedio diario de  $O_3$ , 2001-2010

**Comportamiento por estación.** Las ocho estaciones mostraron concentraciones de  $O_3$  fuera de las normas EPA y NOM. Las máximas se presentaron en MIR (0.2870 ppm), VAL (0.2810 ppm) y TLA (0.2420 ppm); 2.6 veces superiores a la NOM y 3.2 arriba de la EPA. Las máximas medias predominaron de 0.0559 a 0.0677 ppm y las medias se mantuvieron entre 0.0251 y 0.0297 ppm. Este contaminante tiene mayor influencia hacia el *centro* y *sureste* del AUG, de tal manera que, se presenta como un factor de riesgo para la población, particularmente, cuando la atmósfera es altamente fotoreactiva.

**Comportamiento mensual durante el periodo.** En la figura 9 se observa que prácticamente en todo el periodo analizado se rebasaron las normas EPA y NOM en los niveles extremos. Las concentraciones máximas oscilaron desde 0.0950 hasta 0.2870 ppm. Las máximas promedio varían de 0.0364 a 0.1110 ppm; mientras que, las medias mensuales presentaron rangos de 0.0171 a 0.0520 ppm. En suma, las concentraciones medias expresan variaciones estacionales con un comportamiento constante durante todo el periodo, aunque con una ligera tendencia positiva en los últimos años, siendo más notorio el 2010. Los picos máximos de  $O_3$  se observan en los intervalos de estiaje y en verano, caracterizados por mayor radiación solar en el área y las reacciones químicas con los contaminantes primarios.

### Monóxido de Carbono (CO) –NOM-021-SSA1-1993: 11 ppm– (DOF-23/12/1994)

**Comportamiento diario.** El CO promedio diario presenta dos picos de concentraciones máximas; el primero, entre las 7 y 11 horas (ATE, TLA y LDO) y el segundo, entre las 20 y 24 horas, con un descenso intermedio entre las 12 y 19 horas. Aunque el área más afectada se localiza al *norte*, *centro* y *sureste* del AUG, es posible observar que la contaminación por CO es significativa durante la ocurrencia de picos máximos (Figura 8). Este contaminante se mantiene dentro de la normatividad EPA (9 ppm) y NOM en su promedio diario.

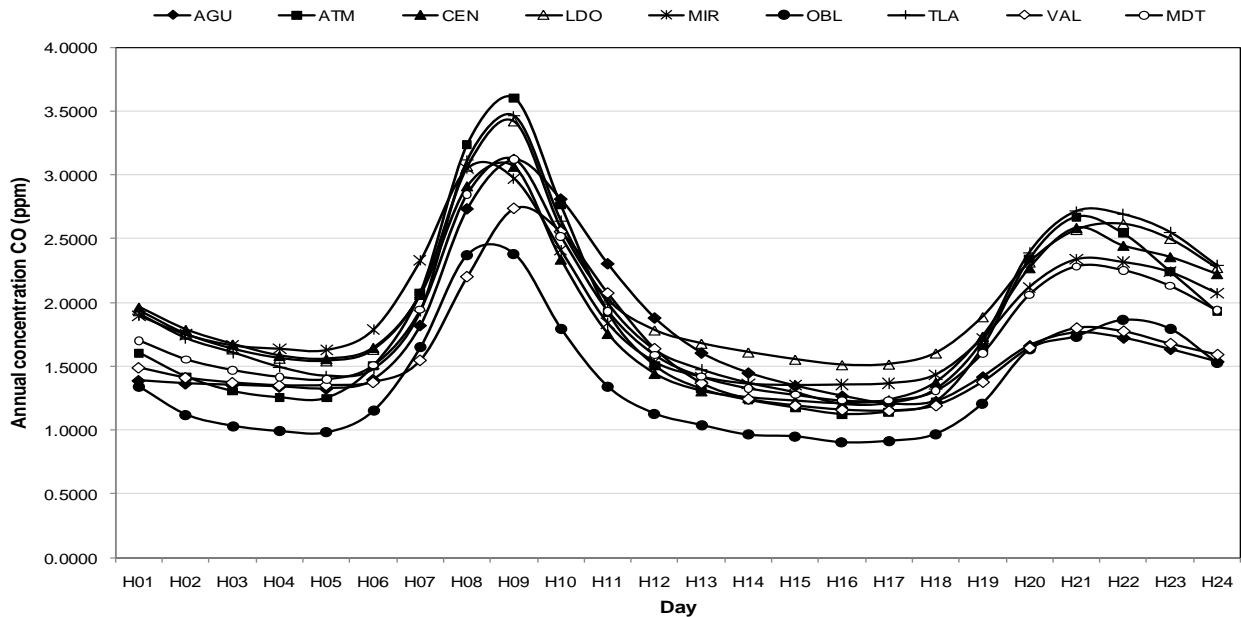


Figura 8. Comportamiento promedio diario de CO. 2001-2010

**Comportamiento por estación.** Las ocho estaciones mostraron concentraciones de CO fuera de norma. Las máximas extremas ocurrieron en las estaciones OBL (53.50 ppm), VAL (47.20 ppm), TLA (44.80 ppm) y MIR (44.20 ppm); 4.8 veces por arriba de la NOM y 5.9 arriba de la EPA. Las medias máximas oscilaron de 3.3881 a 4.5966 ppm; mientras que, las medias ocurrieron de 1.4130 a 2.0274 ppm. De hecho, la mayor afectación ocurre hacia el sur-sureste al este-noreste del AUG.

**Comportamiento mensual durante el periodo.** Las concentraciones máximas del CO rebasaron la NOM en un 50% y la EPA en un 75%. Las máximas oscilaron de 4.50 a 53.50 ppm. Estos equivalen a 4.8 veces la NOM y 6 veces la EPA, por lo que estos representan factores de riesgo para la población. Los eventos se registraron en los periodos secos (marzo, abril, mayo, junio) del año. Las máximas promedio varían de 2.1167 a 7.3849 ppm y las medias mensuales en rangos de 0.9031 a 2.9734 ppm.

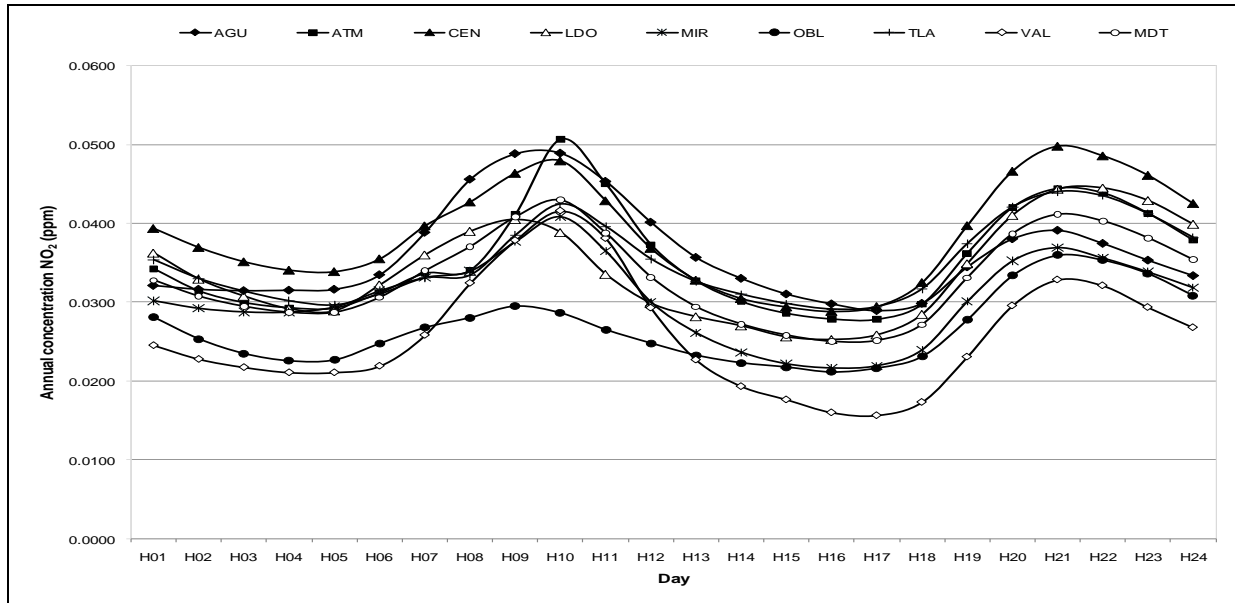
#### **Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) –NOM-023-SSA1-1993: 0.21 ppm– (DOF-23/12/1994)**

**Comportamiento diario.** El NO<sub>2</sub> manifiesta dos crestas de concentraciones máximas; la primera, de las 7 a las 12 y la segunda, entre las 20 y 24 horas, con un descenso intermedio entre las 13 y 19 (Figura 9). Las áreas más afectadas se localizan al *norte*, *centro* y *sur* (ATE, CEN y AGU). Se observaron concentraciones promedio dentro de la normatividad EPA (0.05 ppm) y 0.21 ppm.

**Comportamiento por estación.** Toda el AUG experimentó concentraciones máximas de NO<sub>2</sub> fuera de norma. Estas máximas ocurrieron en las estaciones VAL (0.5230 ppm), OBL (0.5210



ppm), LDO (0.4960 ppm) y ATE (0.4800 ppm); 2 veces arriba de la NOM y 10 arriba de la EPA. Las máximas medias oscilaron de 0.0447 a 0.0653 ppm y las medias de 0.0259 a 0.0387 ppm.



**Figura 9.** Comportamiento promedio diario de  $\text{NO}_2$ . 2001-2010

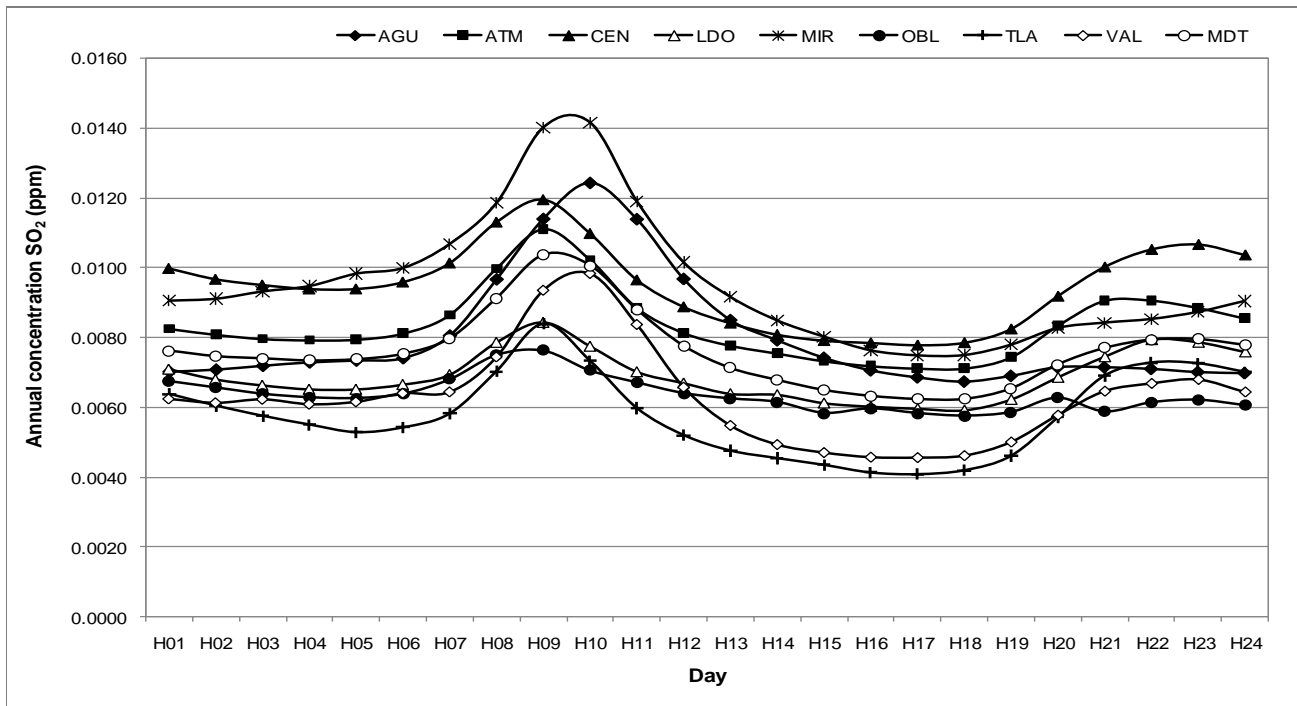
**Comportamiento mensual durante el periodo.** Las concentraciones máximas del  $\text{NO}_2$  rebasan la norma de la EPA y la NOM en un 32% aproximadamente. Los valores extremos oscilaron desde 0.0630 hasta 0.5230 ppm; estos últimos, representan factores de riesgo para la población. Las máximas promedio varían de 0.0290 a 0.0951 ppm y las medias mensuales en rangos de 0.0155 a 0.0513 ppm. El análisis de todo el periodo define un ligero descenso tanto en las concentraciones máximas como en las promedio (sin considerar la ausencia de información); sin embargo, a finales del año 2010 comienza a manifestarse nuevamente una tendencia positiva.

#### **Bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) –NOM-022-SSA1-1993: 0.13 ppm– (DOF-23/12/1994)**

**Comportamiento diario.** Las concentraciones promedio del  $\text{SO}_2$  en los 10 años analizados muestran picos máximos entre las 8 y 12 horas; esto ocurre en todas las estaciones, siendo un comportamiento característico del periodo. Los valores más elevados se observan al *centro* (CEN), *sur* (AGU) y *sur-sureste* (MIR) del AMG (Figura 10). Estos resultados se localizan dentro de la normatividad oficial mexicana (NOM: 0.13 ppm) y de la EPA (0.03 ppm).

**Comportamiento por estación.** Se observa que prácticamente todas las estaciones manifestaron concentraciones máximas de  $\text{SO}_2$  fuera de norma. En OBL (0.5340 ppm), VAL (0.5330 ppm), MIR (0.5150 ppm) y AGU (0.4120 ppm) se identificaron los niveles extremos. Las máximas medias oscilaron entre 0.0100 y 0.0204 ppm; por su parte, el rango de medias varió de 0.0058 a 0.0097 ppm.

**Comportamiento mensual durante el periodo.** Se observa que aproximadamente el 28% de las concentraciones extremas del SO<sub>2</sub> rebasan la NOM; este porcentaje sumado al 64%, rebasa la norma de la EPA y solo el 8% es satisfactorio. Las máximas oscilaron desde 0.020 hasta 0.5240 ppm; estos últimos, representan factores de riesgo para la población solo en intervalos de tiempo muy cortos. Las máximas promedio varían de 0.0024 a 0.0321 ppm y las medias mensuales en rangos de 0.0015 a 0.0134 ppm. Del año 2001 a la primera mitad del 2006 se localizan los niveles más significativos, seguidos de una tendencia negativa; sin embargo, a finales del año 2010 se concibe nuevamente una tendencia positiva. La zona más afectada se localiza al *centro, sur y sureste* del AUG.



**Figura 10.** Comportamiento promedio diario de SO<sub>2</sub>. 2001-2010

## DISCUSIÓN

El comportamiento mensual de los vientos dominantes en el AUG en el periodo 2001-2010, permitió identificar la dirección y rapidez característica del área; se observa que la ubicación geográfica y la orografía inhiben el mezclado vertical del aire, influyendo en la dinámica local y acentuando los problemas de concentración de contaminantes debido a la inversión térmica.

La concentración de contaminantes atmosféricos observó un comportamiento variable, no obstante, las PM<sub>10</sub> mostraron las concentraciones máximas, siguiéndole el O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y SO<sub>2</sub>. Las zonas más afectadas correspondieron al *sur-sureste, sureste y este-sureste*; aquí se localizan las estaciones más recurrentes y donde un porcentaje importante de días superan la NOM. De abril a mayo se muestran elevadas concentraciones de O<sub>3</sub> y CO; mientras que, de diciembre a marzo se observa aguda concentración de PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y SO<sub>2</sub>. Un factor implícito para que esto suceda es la ocurrencia frecuente de bajas temperaturas en el área que acentúan

la duración de inversiones térmicas; además de la poca humedad del entorno, situación desfavorable para el transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos.

El O<sub>3</sub>, no observa una tendencia negativa, más bien, ocurre lo contrario; situación que se puede agudizar debido a la gran influencia de la radiación solar, sumado al continuo incremento de fuentes móviles contaminantes y al urbanismo.

El análisis del CO define un ligero descenso en los valores medios en los primeros ocho años; sin embargo, en los últimos dos años se observa tendencia positiva. El continuo crecimiento urbano, vehicular e industrial es un factor potencial que incide en los problemas de contaminación por CO en el corto plazo, ya que es el contaminante que más se emite.

El NO<sub>2</sub> reporta que los valores máximos pueden presentarse tanto en invierno como en verano; es decir, un contaminante con frecuencia constante producto principal de las fuentes móviles. Aunque es posible observar una ligera tendencia negativa en los primeros 7 años, al final del periodo se revierte esa tendencia. En prácticamente todas las estaciones se presentaron máximos extremos de NO<sub>2</sub>, de tal manera que se puede inferir que la contaminación generada por este contaminante es grave y un problema en toda el área de estudio.

El SO<sub>2</sub> es un contaminante con procedencia principal de fuentes fijas y aunque su tendencia es constante, muestra una ligera disposición negativa en sus niveles medios, particularmente en los últimos años. La mayoría de emisiones contaminantes provienen de fuentes móviles (SEMARNAP/GEJ/SS 1997); esto se manifiesta en los resultados promedios obtenidos. Por ello, el SO<sub>2</sub> puede considerarse como un contaminante de poca influencia nociva a la población. La SEMARNAP/SS/GEJ (1997) realizó un estudio sobre los vientos en la ciudad de Guadalajara en el periodo 1985-1990. Reportaron un viento dominante del oeste con 15.5% de la frecuencia total, seguido de vientos del este (7.5%); ambos con rapidez de 5 a 20 km/h y, en forma temporal de 21 a 35 km/h. Los periodos de calma (ausencia de viento y vientos débiles menores a 4 km/h) mostraron una frecuencia del 44.3%. Los vientos del norte y sur se comparten el 5% de la frecuencia total, representando incidencia poco importante en la circulación local. Sin embargo, este análisis no reporta una tendencia que incluya toda el área y no se menciona la cantidad de estaciones analizadas. Otro factor es la ausencia de un análisis en los últimos 20 años, periodo donde el AUG ha tenido un crecimiento urbano importante.

## CONCLUSIONES

Se observan periodos de calma (ausencia de viento y/o vientos débiles menores a 5 km/h) con frecuencia de 38.57%. Este dominio en la escala Beaufort (0 y 1), se manifiesta en el gran potencial de concentración de contaminantes en el área por falta de ventilación que propicie la dispersión a distancia. Los periodos de estabilidad más significativos ocurren por la madrugada y la mañana con más del 50%, contrario a la tarde y noche donde incide un aumento en el flujo de los vientos. Además, es muy probable que en este comportamiento influyan las condiciones orográficas del AUG y la urbanización, tal como lo reportan *Glynn y Heinke 1999*, *Barry y Chorley 1999*. Si se suman factores de relieve, viento calma y urbanización intensiva, es posible que estas condiciones acentúen la concentración de contaminantes en el área.

Los niveles elevados de PM<sub>10</sub> son consecuencia de la influencia de grandes periodos de estabilidad de la atmósfera local y de las emisiones contaminantes por fuentes móviles y fijas. Es el contaminante más significativo con las concentraciones más elevadas; esto es, un

problema de contaminación y factor de riesgo nocivo para la población. En los últimos 3 años se percibe una ligera tendencia negativa pero no característica de una posible mejoría.

El O<sub>3</sub> tiene mayor influencia al *centro* y *sureste* del AUG; se distingue como un factor de riesgo para la población, particularmente, cuando la atmósfera es altamente fotoreactiva. Las concentraciones medias expresan variaciones estacionales con un comportamiento constante en el periodo, aunque con ligera tendencia positiva en los últimos años. Los máximos de O<sub>3</sub> se observan durante los intervalos de estiaje y en verano, caracterizados por mayor radiación solar en el área y mayor reacción química con los contaminantes primarios.

Los problemas de contaminación atmosférica por NO<sub>2</sub> siguen agudizándose; la información del periodo analizado así lo evidencia, particularmente en sus máximos. Las causas principales son el continuo crecimiento urbano, vehicular e industrial, además de la ausencia de planes de reducción de emisiones y de generación de inventarios. La falta de métodos de prevención y mitigación del riesgo ante eventos de calidad del aire nociva es otro factor influyente. Aunado a ello, este contaminante es clave en la generación de contaminantes secundarios (uno de ellos el O<sub>3</sub>) y, por tanto, un contaminante de riesgo potencial en el AUG.

En relación al SO<sub>2</sub>, la gran diferencia entre concentraciones máximas extremas, máximas medias y medias, permite afirmar que los primeros solo se presentan en intervalos de tiempo breves y que la contaminación por este contaminante no es todavía un problema grave en el área. En suma, el crecimiento urbanístico del AUG no muestra alguna tendencia de planeación y control en el corto plazo; por tanto, es muy probable que las emisiones de SO<sub>2</sub> aumenten y contribuyan a agudizar los problemas de calidad del aire que actualmente existen.

## REFERENCIAS

1. Cespedes R. (2005). Impacto de la contaminación atmosférica en la salud (ICAS). Proyecto Aire Limpio: Evaluación del efecto de la contaminación atmosférica en la salud de la población del Municipio Cercado Cochabamba – Bolivia. Páginas 4 de 25.
2. Glynn H.J. y Heinke G.W., (1999). Ingeniería ambiental. Pearson Educación - Prentice Hall. México. ISBN: 970-17-0266-2. 778 páginas (Pp. 216-17).
3. Molina L. T., Molina M. J. (2005). La calidad del aire en la megaciudad de México. Un enfoque integral. FCE, 2005. ISBN: 968-16-7580-0. 463 págs. Méx.
4. Nebel B. J., Wright R. T. (1999). Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible. Pearson – Prentice Hall. ISBN: 970-17-0233-6. 720 páginas. México.
5. Nicod Chantal y Iizuka Michiko (2000). Consultoras de la División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos, en el marco del Proyecto “*Conciencia ciudadana y contaminación atmosférica en América Latina*”, con el auspicio del Gobierno de Japón. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Organismo dependiente de la ONU y responsable de promover el desarrollo económico y social de la región. Págs. 35 (7-8).
6. Ramírez H., Andrade M., Bejaran R., García M., Wallo, A., Pompa A. and De la Torre O. (2009). *The spatial-temporal distribution of the atmospheric polluting agents during the period 2000–2005 in the Urban Area of Guadalajara, Jalisco, Mexico*. Journal of Hazardous Materials. Vol. 165, Issues 1-3, 15 June 2009, Pages 1128-1141.
7. Roger G. Barry, Richard J. Chorley (1999). Atmósfera, tiempo y clima. Omega S.A., Barcelona, España. 441 páginas. ISBN: 84-282-1182-5.
8. SEMARNAP/SS/GEJ (1997). Secretaría del medio ambiente, recursos naturales y pesca - Secretaría de Salud - Gobierno del Estado de Jalisco. Programa para el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMG, 1997-2001, 240 p.