



Concentraciones *in situ* de ozono en bosques de la Cuenca de México e influencia de la altitud

Dionicio Alvarado-Rosales^{1*}

Luz de Lourdes Saavedra-Romero¹

Tomás Hernández-Tejeda²

Roger W. Cox³

John. W. Malcolm³

¹Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. México.

³Canadian Forestry Service. Fredericton, New Brunswick, Canadá.

*Autor por correspondencia, correo-e: dionicio@colpos.mx

Resumen:

La presencia de contaminantes fotoquímicos en la Cuenca de México es una realidad, y el daño que causan a la salud humana y a la vegetación es evidente. La falta de datos sobre concentraciones de ozono en los bosques de la Cuenca fue la principal razón para realizar el presente estudio en tres áreas boscosas: El Ajusco (AJU), Desierto de los Leones (DDL) e Izta-Popocatépetl (IZP). Se utilizaron monitores pasivos *CanOxy Plate*TM con períodos de exposición de tres semanas,

durante un lapso de 14 meses (noviembre, 2004 a enero, 2006), en nueve sitios de monitoreo (tres en cada área), ubicados a diferente altitud y exposición. Los valores registrados en las tres variaron entre 15.41 a 53.8 ppb. Se identificaron puntos de alta concentración de ozono, uno en agosto y otro en noviembre, 2005. La concentración promedio en cada área fue de 32.87 ppb para AJU, 28.34 para DDL y 28.60 ppb para IZP. Al DDL e IZP les correspondieron las más bajas, a pesar de la cercanía a la fuente de emisión; debido a que dos de los sitios de monitoreo se ubicaron en sotavento; es decir, no estuvieron expuestos a los vientos contaminados de la Ciudad de México. Para el IZP, los resultados fueron similares a los del DDL; destacan la importancia que tiene la dirección de los vientos. Las concentraciones de ozono fueron mayores en la medida que la altitud se incrementó. Se comprobó el papel que juega la exposición a las masas de aire contaminado, el viento y la altitud.

Palabras clave: Ajusco, contaminante fotoquímico, Desierto de Los Leones, Iztapopocatépetl, monitoreo pasivo, ozono.

Fecha de recepción/Reception date: 3 de junio de 2016

Fecha de aceptación/Acceptance date: 17 de abril de 2017.

Introducción

El ozono presente en la estratósfera proporciona protección a los seres vivos contra la radiación solar ultravioleta de onda corta, en la troposfera; sin embargo, es un contaminante fotoquímico y de efecto invernadero (Booker *et al.*, 2009). De los numerosos oxidantes existentes en atmósferas contaminadas de todo el mundo, el ozono (O_3) fue uno de los primeros contaminantes identificados como responsables de ocasionar daños en cultivos agrícolas (Ashmore, 2005). Treshow y Stewart (1973), determinaron los umbrales de daño por este

compuesto químico en 70 especies herbáceas, arbustivas y leñosas, indicaron que la mayor parte de ellas mostraron daños a concentraciones de 15 ppmh. Miller (1992) y Miller *et al.* (1963, 1992), también detectaron daños por ozono en los bosques de *Pinus ponderosa* Douglas ex. C. Lawson en Estados Unidos de América, especialmente en taxa sensitivos. En la Costa Mediterránea, Naveh *et al.* (1980) y Alonso *et al.* (2003) citaron daños en *Pinus halepensis* Mill.

Por lo que respecta a México, los primeros registros de daño por ozono en especies forestales datan de la década de 1980 en *Pinus hartwegii* Lindl. (Bauer *et al.*, 1985; Hernández-Tejeda y Bauer, 1986) y en *P. montezumae* (Hernández-Tejeda y Bauer, 1982; Hernández-Tejeda y Bauer, 1984) en las zonas boscosas del sur y suroeste de la Cuenca de México. En estudios posteriores, se confirmó el daño por ozono en diversos taxa vegetales del Valle de México (Bauer y Krupa, 1990; Bauer y Hernández-Tejeda, 2007). Al mismo tiempo, una mortalidad sin precedente en *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. & Cham. se documenta en la misma región (Vázquez, 1987; Alvarado *et al.*, 1991, 1993; Alvarado y Hernández-Tejeda, 2002), desafortunadamente, no se contaba con datos provenientes de monitores de ozono durante aquellos años, pero se tenía evidencia de que este contaminante estaba implicado (Bauer y Krupa, 1990). Actualmente, el ozono es reconocido como el contaminante atmosférico más importante en el área urbana y rural, ya que afecta la salud humana y los bienes materiales (Ashmore, 2005).

Entre los daños que provoca el ozono en la vegetación sobresalen la alteración de procesos bioquímicos como la fotosíntesis y la respiración (Guderian, 1985; Fumagalli *et al.*, 2001); biológicos, como la reproducción (Wolters y Martens, 1987; Hernández-Tejeda *et al.*, 2001; Hernández-Tejeda, 2014); así como estructurales (degradación cuticular) Grulke *et al.*, 2004).

Una gran cantidad de evidencias, por lo general de estudios con plántulas, indican que el ozono puede impactar el crecimiento de árboles forestales (Kolb *et al.*, 1997). Bajo condiciones de campo son pocas las investigaciones documentadas, y entre los principales daños que se citan están: la defoliación (Zierl, 2002; Paoletti,

2006; Ferreti *et al.*, 2007a, 2007b) y la disminución del crecimiento radial (Peterson *et al.*, 1991; Somers *et al.*, 1998). Otras investigaciones señalan efectos sobre el desarrollo del follaje de árboles de bosques templados; por ejemplo, clorosis foliar, caída prematura de acículas, seguido de un proceso de senescencia prematura, el cual culmina con la muerte parcial o total de los individuos en extensas áreas forestales (Miller *et al.*, 1994; Grulke y Lee 1997; Skelly *et al.*, 1997; Somers *et al.*, 1998; Krupa, 1999; Hernández-Tejeda, 2014).

En Estados Unidos de América, se estiman enormes pérdidas en cultivos debido al ozono (US EPA, 1996), desafortunadamente, se desconocen para el caso de especies leñosas (Chappelka y Samuelson, 1998).

En la mayoría de los estudios citados, los efectos por los contaminantes y en particular por el ozono, son cualitativos (London, 1985). Tradicionalmente, la medición de las concentraciones de ozono se realiza utilizando medios automatizados, y aunque, su precisión es alta, resultan caros y requieren de un lugar especial para su ubicación, con el fin de protegerlos contra el vandalismo y de las condiciones climáticas; además, se debe contar con una fuente de energía eléctrica permanente para su adecuado funcionamiento.

Lo anterior, hizo evidente la necesidad de un sistema práctico para cuantificar el ozono en áreas remotas, especialmente, en el microclima que domina dentro del dosel. Sistema que emplea monitores pasivos, cuyas ventajas son su bajo costo y que no llaman la atención, por sus pequeñas dimensiones y lo más importante no requieren de alimentación eléctrica constante (Krupa y Nosal, 2001). Todo ello, permite una elevada resolución espacial y los hace muy adecuados para estudios de contaminación atmosférica, con la posibilidad de abarcar grandes superficies de terreno. Por esos atributos, los monitores pasivos se han convertido en una opción atractiva para estimar las concentraciones de ozono en áreas boscosas (Cox y Malcolm, 1999).

No obstante, también existen desventajas, entre ellas su reducida resolución temporal, por lo que no son recomendables en periodos de exposición mensuales o mayores

(Ferreti *et al.*, 2007), los límites de detección son aproximados, aunque confiables y el tiempo de análisis en el laboratorio es prolongado.

Uno de dichos monitores, de bajo costo, es el denominado *Can Oxy Plate*TM (Cox y Malcolm, 1999). El uso de esta tecnología hace posible cuantificar el ozono troposférico en áreas forestales, con el propósito de obtener información real y fehaciente sobre sus concentraciones *in situ*.

Cabe señalar que el monitoreo de los síntomas desarrollados por la presencia del ozono en la vegetación es de utilidad para determinar el estado actual, los cambios y las tendencias del daño foliar, así como en el desarrollo y crecimiento óptimo de las especies vegetales (Stolte, 1996).

En México, el monitoreo pasivo de ozono en áreas forestales es muy escaso, aunque reciente (González *et al.*, 2010; Hernández-Tejeda, 2014). La información registrada con este tipo de monitores en algunos bosques de la Cuenca, no ha sido publicada formalmente, por lo que hace falta información al respecto, motivo por el cual, se decidió llevar a cabo esta publicación con datos obtenidos hace aproximadamente 10 años.

Con base en que la contaminación atmosférica por ozono ha sido una de las hipótesis para explicar la declinación de los bosques de oyamel y pino en la Cuenca de México (Alvarado *et al.*, 1991, 1993; Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda, 2002; Alvarado y Saavedra, 2007), la presente investigación tuvo como objetivos determinar las concentraciones de ozono troposférico *in situ* en bosques de oyamel (*Abies religiosa*) y pino (*Pinus sp.*) de tres áreas boscosas de la Cuenca de México: Desierto de los Leones, Ajusco e Izta-Popocatépetl; además de, conocer la influencia de la altitud, distancia y exposición de las áreas de estudio a la fuente de emisión de los precursores de ozono.



Materiales y Métodos

Áreas de estudio

Fisiográficamente, la Cuenca de México constituye el sur de la Altiplanicie Mexicana, a una altitud de 2 250 a 2 400 m. Rodeada por cadenas montañosas del Eje Neovolcánico que alcanzan alturas de hasta 5 465 metros sobre el nivel de la misma y posee una forma elíptica de norte a sur (125 km) y de oeste a este (90 km), con un área de 8 050 km². La Cuenca está formada por la Ciudad de México (1 503 km²) y por las regiones sur del estado de Hidalgo, suroeste de Tlaxcala y noreste del Estado de México (Gio-Argáez *et al.*, 1989), en ella se ubica uno de los complejos urbanos más grandes del mundo, donde los problemas por contaminación atmosférica se han agudizado en los últimos años. Dentro de esta extensión se seleccionaron tres áreas boscosas con el fin de monitorear las concentraciones de ozono: El Parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones, El Ajusco y el Parque Izta-Popocatepetl (Figura 1).

Fuente: Modificado de Marín *et al.*, 2002.

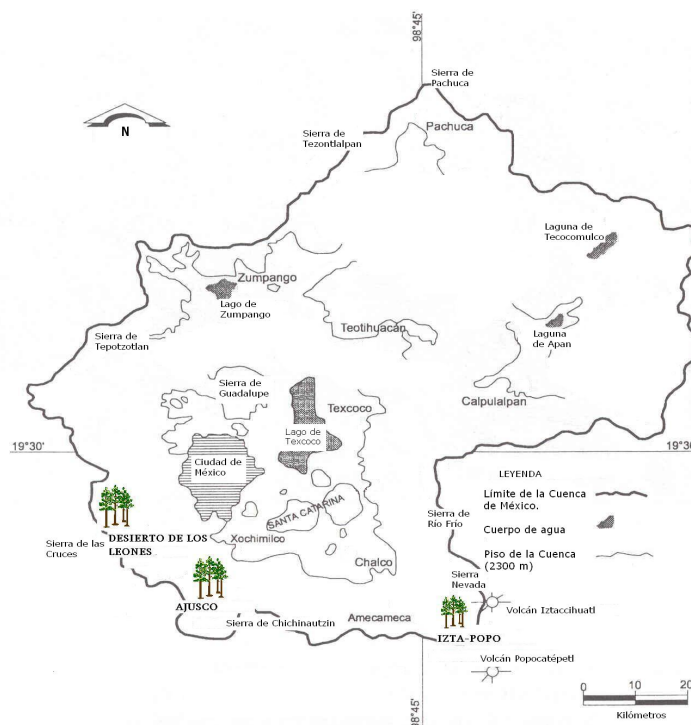


Figura 1. Localización de las áreas boscosas donde se llevó a cabo el monitoreo de las concentraciones de ozono *in situ*.

El Ajusco (AJU). Bosque que se yergue 38 km al sur del centro de la Ciudad de México y culmina con el Pico del Águila a 3 930 m de altitud, cuya superficie es de 920 hectáreas. El clima depende de su latitud ($19^{\circ}12'30''$ N) y de la altitud del grupo de picos que la conforman y, localmente, de la presencia de otras grandes cumbres como la Sierra de Las Cruces. Los climas dominantes son Cw, templado con lluvias en verano; Cf, templado con lluvias todo el año en las regiones altas; y Et, (clima de tundra que predomina en las zonas más elevadas (3 000 m), con precipitación media anual superior a 1 200 mm y temperatura media de 13°C (White *et al.*, 1990; Reyes, 1981).

Desierto de los Leones (DDL). Parque que se localiza a 25 km, al suroeste de la Ciudad de México, entre las coordenadas $19^{\circ}20'18''$ y $19^{\circ}15'40''$ latitud norte, $99^{\circ}17'45''$ y $99^{\circ}20'00''$ longitud oeste y cuenta con una superficie de 1 529 ha (Conanp-Semarnat, 2006). Su intervalo altitudinal es de 2 700 a 3 700 m. Predomina un clima templado, frío y húmedo con lluvias en verano. La modificación realizada por García (2004), lo agrupa en un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual oscila entre 7 y 15°C (Alvarado *et al.*, 1991), y la precipitación promedio anual es de 1 200 mm (Cibrián, 1989). Por efecto de la insolación, el período con mayores temperaturas se presenta de abril a junio (Melo, 1978).

Parque Izta-Popocatepetl (IZP). Área que se ubica en el Eje Neovolcánico, a 70 km al sureste de la Ciudad de México. Se localiza geográficamente entre las coordenadas $18^{\circ}59'00''$ - $19^{\circ}16'25''$ latitud norte y $98^{\circ}34'54''$ - $98^{\circ}42'08''$ longitud oeste y posee una superficie de 25 679 ha (UACH-Semarnat, 1999). La altitud varía de los 2 600 a 3 600 m hasta el sitio Paso de Cortés, pero existen puntos de mayor altura (>5000). La zona cuenta con dos tipos de clima: a) muy frío con lluvias en verano y temperatura media anual menor de -2°C ; y b) semifrío subhúmedo con temperatura media anual de 5 a 12°C y el mes más frío de 3 a 18°C . La precipitación media anual es de 928 mm, y el área ocupa parte de varios municipios de los estados de Puebla, Estado de México y Morelos (Melo, 1977).

Monitoreo pasivo

Las mediciones de ozono se llevaron a cabo en tres sitios a diferentes altitudes sobre el nivel del mar durante un período de 14 meses, comprendido del 10 de noviembre de 2004 al 20 de enero de 2006, en las tres áreas boscosas seleccionadas (DDL, AJU e IZP). Los monitores pasivos de ozono empleados fueron *CanOxy Plate*TM (Cox y Malcolm, 1999). En cada área, se establecieron tres sitios permanentes de monitoreo ubicados a diferentes altitudes (alta, media y baja) y diversas exposiciones a los vientos procedentes de la Ciudad de México (Cuadro 1).

Cuadro 1. Área boscosa, paraje, altitud y exposición de los nueve sitios de monitoreo de ozono, en la Cuenca de México.

Área boscosa	Sitio de monitoreo y acrónimo	Altitud (m)	Exposición a la Ciudad de México
Ajusco (AJU)	El Jacalito (EJ)	2 927	Barlovento
	km. 19 (K19)	3 143	Barlovento
	Valle del Tezontle (VT)	3 432	Barlovento
Desierto de los Leones (DDL)	El Pantano (EP)	3 060	Sotavento
	Presas Oyameles (PO)	3 265	Sotavento
	Cruz de Coloxtitla (CC)	3 590	Barlovento
Izta-Popocatepetl (IZP)	La Plantación (LP)	2 888	Barlovento
	La Curva (LC)	3 356	Sotavento
	Paso de Cortés (PC)	3 685	Barlovento

Cada monitor (uno por sitio) se colocó a una altura de 2 m dentro del dosel, con remplazo cada tres semanas. Para evitar sesgos por oxidación natural (no atribuible al ozono) del reactivo usado en los monitores, se expusieron monitores pasivos testigo, completamente sellados; así, los valores obtenidos en los monitores

expuestos en campo se ajustaron con base en los valores registrados en los sellados.

Se colocaron un total de 252 monitores durante el desarrollo del estudio. Todos los colectados en campo se transportaron y almacenaron en bolsas de plástico cerradas herméticamente, que contenían carbón activado en una bolsita de malla. El análisis de los monitores pasivos, tanto testigos como expuestos se realizó en el laboratorio del Dr. Roger M. Cox, en Fredericton, New Brunswick, Canadá.

Análisis de la variación espacial y estacional en la concentración de ozono

Los datos de ozono registrados, se analizaron con el paquete estadístico SAS (versión 9.4), mediante el procedimiento de análisis de varianza de medidas repetidas (Moser *et al.*, 1990; Gumpertz y Brownie, 1993); esto es, mediciones en diferentes fechas, en los mismos sitios considerando localidad (L) y altitud (E), con el modelo propuesto por Hernández-Tejeda (2014):

$$Y_{ijkl} = \mu + L_i + E_{j(i)} + \alpha_{k(ij)} + F_l + (F*L)_{li} + F*E(L)_{li(j)} + \beta_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} = Valor observado en la l -ésima fecha en la k -ésima repetición en la j -ésima elevación de la i -ésima localidad

$\mu + L_i + E_{j(i)} + \alpha_{k(ij)}$ = Representan los efectos entre localidades, con

μ = Media de la concentración de ozono

L_i = Efecto de la i -ésima localidad

$E_{j(i)}$ = Efecto de la j -ésima elevación dentro de la i -ésima localidad

$\alpha_{k(ij)}$ = Error asociado a la k -ésima repetición en la j -ésima elevación dentro de la i -ésima localidad

$F_l + (F*L)_{li} + F* E(L)_{li(j)} + \beta_{ijkl}$ = Representan los efectos dentro de sujetos (localidades) asociados a la concentración de ozono, con

F_l = Efecto de la l -ésima fecha de monitoreo;

$(F*L)_{li}$ = Efecto de la interacción de la l -ésima fecha de monitoreo con la i -ésima localidad

$F* E(L)_{li(j)}$ = Efecto de la interacción de la l -ésima fecha de monitoreo con la j -ésima altitud dentro de la i -ésima localidad

β_{ijkl} = Error de muestreo asociado a cada fecha de monitoreo

Se decidió utilizar este modelo estadístico, debido a la necesidad de determinar si hubo diferencias en las concentraciones de ozono registradas entre y dentro de las tres localidades consideradas. El modelo contempla las fechas de monitoreo y las altitudes donde se hizo el monitoreo pasivo de ozono.

Se calculó la concentración mínima y máxima de ozono durante el período de estudio. Con las concentraciones medias, se definió el área boscosa y la época con las mayores concentraciones, a lo largo de los 14 meses de evaluación. Por medio del programa estadístico SAS® (*Statistical Analysis System*), Versión 9.4, se obtuvieron las concentraciones de ozono totales, máximas, mínimas, promedio y otros estadísticos descriptivos para las 21 fechas de monitoreo, en las tres áreas boscosas, con el fin de determinar si había o no diferencias significativas entre ellas. Además, de acuerdo a su exposición a los vientos procedentes de la Cd. de México, se compararon las concentraciones promedio de ozono para cada uno de los nueve sitios de monitoreo. Por último, con el fin de conocer el papel de la altitud y distancia a la fuente de emisión de los precursores de ozono, se compararon las concentraciones de ozono para cada uno de los nueve sitios de monitoreo.

Resultados y Discusión

Concentraciones de ozono durante el período de estudio

En todas las fechas de monitoreo, se registró la presencia de ozono. Las concentraciones máximas, mínimas y medias de ozono (ppb), y otros estadísticos para el período comprendido entre noviembre 2004 a enero 2006, con valores mínimos y máximos que oscilaron entre 15.41 y 53.8 ppb, respectivamente (Cuadro 2). Las concentraciones promedio de ozono fluctuaron entre 21.05 y 40.36 ppb.

Cuadro 2. Principales estadísticos descriptivos de las concentraciones de ozono (ppb) registradas en las diferentes fechas de monitoreo (noviembre 10, 2004-enero 20, 2006).

Fecha	n	Media	E.E. ¹	CV ²	Mínimo	Máximo
Nov 10, 04	9	30.14	2.0	19.89	21.66	39.52
Dic 03, 04	8	24.11	2.02	23.70	17.85	34.56
Dic 20, 04	8	22.37	1.30	16.44	15.41	26.40
Ene 11, 05	9	30.67	1.27	12.40	24.72	37.32
Feb 03, 05	8	25.82	1.65	18.05	17.55	33.96
Feb 22, 05	9	21.05	1.12	15.91	15.87	28.01
Mar 15, 05	9	24.89	0.85	10.27	21.74	29.84
Abr 07, 05	9	32.89	1.71	15.61	24.65	40.29
Abr 27, 05	9	33.78	1.24	10.97	26.70	38.61
May 17, 05	7	35.44	20.9	15.60	27.77	41.42
Jun 07, 05	7	28.45	1.91	17.81	21.07	35.09
Jun 27, 05	9	27.03	2.18	24.24	20.83	36.32
Jul 19, 05	8	28.88	2.20	21.55	22.73	36.86
Ago 11, 05	8	29.48	4.35	41.76	15.95	47.62

Sep 01, 05	7	30.26	5.96	52.16	16.17	53.80
Sep 20, 05	9	26.96	2.11	23.44	16.62	33.49
Oct 11, 05	8	39.27	2.08	14.96	32.89	47.38
Nov 15, 05	9	40.36	3.69	27.41	18.23	53.80
Dic 07, 05	9	29.10	1.26	13.01	22.81	34.26
Dic 28, 05	9	26.55	1.31	14.83	22.65	32.81
Ene 20, 06	9	39.54	1.86	14.08	29.92	47.32

¹E.E. = Error estándar; ²CV = Coeficiente de variación.

Se observaron dos picos de máxima concentración en El Ajusco, uno en agosto (47.64 ppb) y otro en noviembre, ambos del 2005 (50.28 ppb); sin embargo, los valores registrados en las otras dos áreas boscosas, también fueron considerables en fechas cercanas (Figura 2).

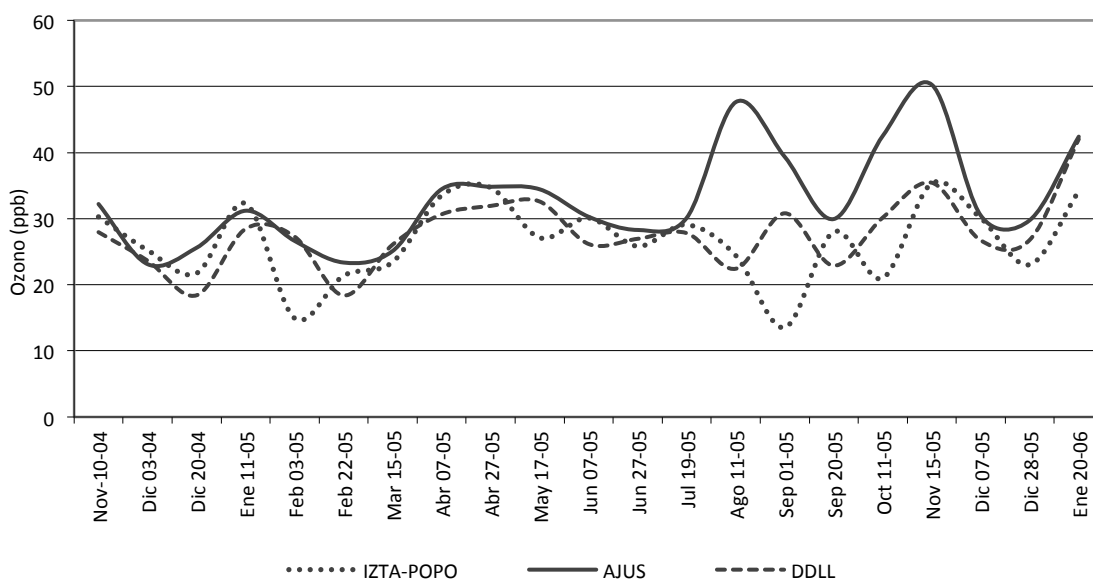
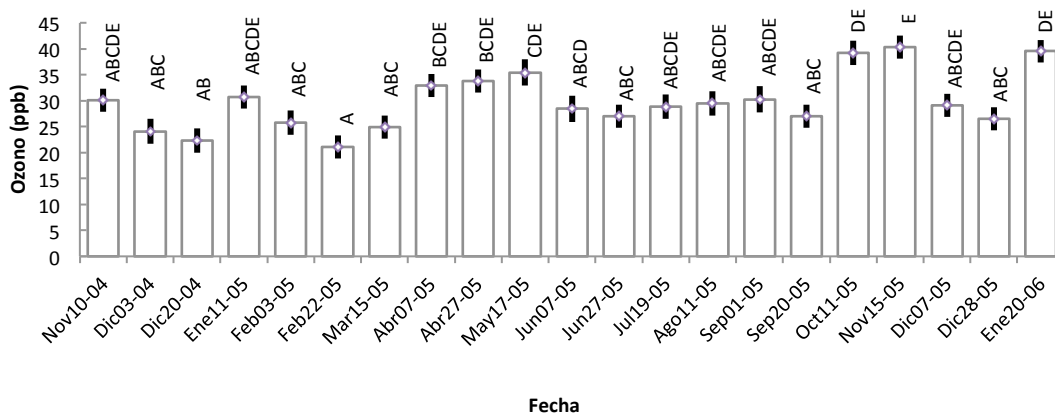


Figura 2. Concentraciones promedio de ozono registradas en las diferentes fechas de monitoreo para las tres áreas boscosas (noviembre 2004-enero 2006).

Las concentraciones de ozono correspondientes a las fechas de octubre-noviembre del 2005 y enero del 2006 resultaron ser significativamente mayores al resto ($p < 0.0001$) (Figura 3).



(Letras distintas indican diferencias significativas con $p < 0.0001$).

Figura 3. Concentraciones promedio de ozono y error estándar asociado a las diferentes fechas de monitoreo (noviembre 10, 2004-enero. 20, 2006).

Los niveles de ozono *in situ* concuerdan con los registros que indican altos niveles de este contaminante para la región de El Ajusco y Desierto de los Leones, especialmente durante el invierno, cuando los eventos de lluvia son menos frecuentes (Miller *et al.*, 1992), y en la estación seca cuando la temperatura del aire es alta y la radiación solar es más intensa, como ocurre en la capital del país (noviembre - abril) (Schreffler y Evans, 1982; Jáuregui, 1993b). Jáuregui (1971) señala que en la Ciudad de México predomina la atmósfera oxidante en los meses de abundante insolación, mientras que en los meses de lluvia (mayo-octubre) se incrementan los agentes reductores sobre los oxidantes.

Concentraciones de ozono promedio por área boscosa e influencia de la exposición

La concentración promedio de ozono de las tres áreas boscosas estuvo por arriba de 28 ppb (Cuadro 3).

Cuadro 3. Principales estadísticos descriptivos de las concentraciones de ozono en ppb registradas en las tres áreas boscosas de la Cuenca de México.

Área boscosa	n	Media	D.E. ¹ .	Mínimo	Máximo
AJU	56	32.87a	8.56	19.46	53.80
DDL	62	28.34b	9.00	15.41	53.80
IZP	59	28.60b	6.13	16.17	41.42

AJU = Ajusco; DDL = Desierto de los Leones; IZP = Izta-Popocatepetl; ¹D.E. = Error estándar

Estadísticamente, las concentraciones del AJU fueron superiores ($p < 0.0001$) a las otras dos localidades. Hernández-Tejeda (2014) determinó, en esa misma área, un valor más alto (49 ppb), con el mismo tipo de monitores, de julio de 1997 a noviembre de 1998. Existe la posibilidad de que con la mejora en la calidad de las gasolinas, así como con algunas acciones del Gobierno de la Ciudad de México en favor del ambiente, se hayan reducido las concentraciones de ozono en dicha localidad. Sin embargo, la sintomatología que muestran los pinos del área, específicamente *Pinus hartwegii*, es una evidencia más de que los niveles de ozono registrados son la principal causa del daño foliar.

En el DDL, a pesar de que las concentraciones fueron más bajas que en El Ajusco, estudios como el de González *et al.* (2010) apoyan la hipótesis de que la declinación del oyamel se debe, en gran medida, a los niveles crónicos de ozono. Desafortunadamente, este es el único estudio que se ha realizado en el Desierto de

los Leones con monitores pasivos que se intercambiaban cada 2 o 3 semanas en 31 sitios de monitoreo, durante el periodo de agosto 2001 a enero 2003; los autores citan una media de 18 ppb. En el presente trabajo, las medias para las tres áreas boscosas de la Cuenca variaron entre 20 y 40 ppb, los cuales son ligeramente superiores a las documentadas por González *et al.* (2010).

En el DDL las concentraciones no fueron tan altas como las del AJU, la principal razón para explicar esto es la exposición de dos de los tres sitios de monitoreo (El Pantano y Presa Oyameles), ambas ubicadas en sotavento (Figura 4); es decir, no recibían directamente los vientos de aire contaminado procedentes de la Ciudad de México. Sin embargo, Miller *et al.* (1994), con medios electrónicos automatizados registraron concentraciones de ozono del orden de 16 a 88 ppb promedio por hora, de mayo de 1990 a abril de 1991 en el DDL.

Para el caso del IZP se carece de publicaciones previas.

Influencia de la altitud y distancia de la fuente de emisión

En todos los sitios de monitoreo se obtuvieron concentraciones de ozono promedio por arriba de 24 ppb. Los principales estadísticos por sitio se presentan en el Cuadro 4. Al comparar los valores de los nueve sitios de monitoreo, se observó una influencia del gradiente altitudinal, ya que las concentraciones de ozono fueron mayores en la medida que este se incrementó. Dicho comportamiento se evidenció en los tres sitios localizados a mayor altitud de las tres áreas boscosas, donde al menos dos de los sitios de monitoreo localizados a menor altitud (El Pantano y La Plantación) tuvieron concentraciones significativamente inferiores a dos de los sitios con más altitud (Cruz de Coloxtitla y Valle del Tezontle) (Figura 4). Se ha indicado que esta variable es determinante para una mayor producción de ozono troposférico, pues de acuerdo con Miller *et al.*, (1994) y Jáuregui (1993b) a una altitud superior existe más cantidad de luz ultravioleta en la atmósfera, a

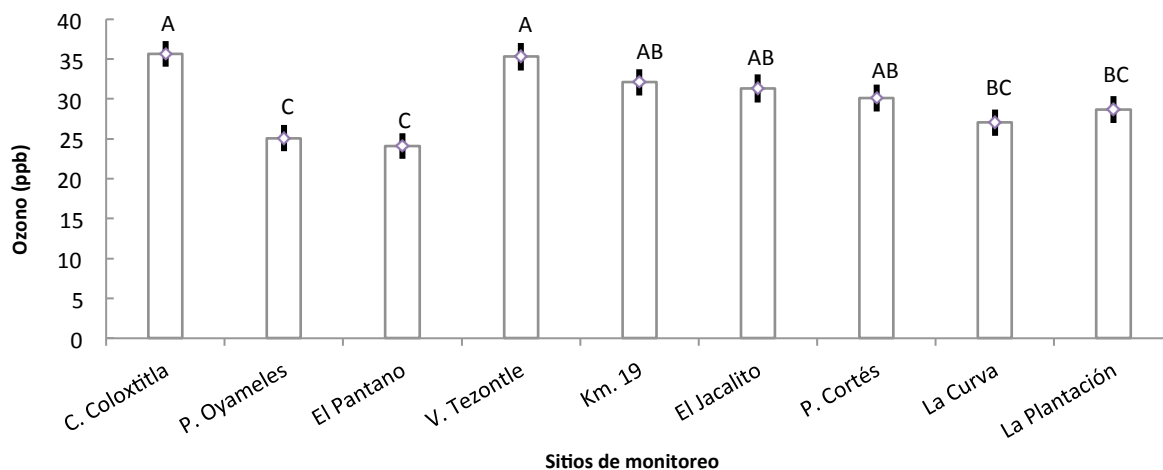
disposición para que las moléculas por absorción aumenten su reactividad fotoquímica (flujo actínico).

Es importante destacar que los niveles de ozono medidos en los sitios de monitoreo de IZP fueron semejantes a los de DDL, a pesar de su lejanía de la Ciudad de México (70 km). Se ha demostrado que las características meteorológicas y la presencia de numerosas fuentes de emisión tienen una fuerte influencia sobre la formación y transporte de O₃, y es común que las masas de aire con los más altos niveles de oxidantes fotoquímicos se localicen viento abajo de la fuente original de emisión (Corona y Calva, 1989; Treshow y Anderson, 1989; Bauer y Hernández-Tejeda, 1986). También, se ha evidenciado que el ozono puede ser transportado a cientos de millas de las áreas donde se ubican los precursores originales (Miller *et al.*, 1994; US EPA, 1984).

Cuadro 4. Principales estadísticos descriptivos de las concentraciones de ozono promedio registradas en los nueve sitios de monitoreo localizados a diferentes altitudes en la Cuenca de México (noviembre 10, 2004-enero 20, 2006).

Área boscosa	Sitios de monitoreo (Nombre del paraje)	Altitud (m)	n	Media	E.E. ¹	C.V. ²	Mínimo	Máximo
AJU	Valle del Tezontle	3432	18	35.30	1.73	20.77	24.72	51.66
	km. 19	3143	20	32.10	2.03	28.33	20.99	51.66
	El Jacalito	2927	18	31.31	2.13	28.86	19.46	53.80
DDL	Cruz de Coloxtitla	3590	21	35.65	2.01	27.87	15.41	53.80
	Presa Oyameles	3265	20	25.10	1.51	26.82	15.95	40.51
	El Pantano	3060	21	24.11	1.26	24.03	15.87	39.98
IZP	Paso de Cortés	3685	19	30.14	1.44	20.81	20.21	41.42
	La Curva	3356	20	27.06	1.32	21.75	16.17	35.47
	La Plantación	2888	20	28.67	1.38	21.50	19.92	39.92

AJU = Ajusco; DDL = Desierto de los Leones; IZP = Izta-Popocatépetl; ¹E.E = Error estándar; ²C.V = Coeficiente de variación.



Letras distintas indican diferencias significativas con $p < 0.0001$.

Figura 4. Análisis estadístico de las concentraciones promedio de ozono (\pm error estándar) registradas en los nueve sitios de monitoreo localizados a diferente altitud en la Cuenca de México.

Con base en los resultados obtenidos, es evidente que la altitud y el patrón de vientos dominantes que circulan de nor-noreste a sur-suroeste en la Cuenca de México (Jáuregui *et al.*, 1981; Jáuregui, 1993a; Miller *et al.*, 1994; Bravo y Díaz, 1996; Raga *et al.*, 1999; Bravo *et al.*, 2001; Jáuregui, 2002) desempeñan un papel crucial en la concentración e incremento de los niveles de ozono en el área bajo estudio (Jáuregui *et al.*, 1981; Jáuregui, 1993a; Miller *et al.*, 1994; Bravo y Díaz, 1996; Raga *et al.*, 1999; Bravo *et al.*, 2001; Jáuregui, 2002).

Conclusiones

Las concentraciones de ozono registradas en las tres áreas boscosas incluidas en el presente estudio, varían de 15.41 a 53.8 ppb, con dos periodos de alta concentración: agosto y noviembre, 2005.

En el Ajusco, se presentan las concentraciones superiores y las más bajas en Izta-Popocatépetl y Desierto de los Leones.

En Izta-Popocatépetl, a pesar de su lejanía de la Ciudad de México, las concentraciones de ozono son similares a las del Desierto de los Leones, ello demuestra la importancia de la dirección del viento en el acarreo de sus precursores.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento al Dr. Roger M. Cox y al Dr. John Malcolm del Servicio Forestal Canadiense en Fredericton, New Brunswinck quienes facilitaron los monitores pasivos de ozono y su laboratorio para realizar la cuantificación de dicho contaminante.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Dionicio Alvarado-Rosales: revisión bibliográfica, fase de campo y análisis de resultados; Luz de Lourdes Saavedra-Romero: revisión bibliográfica, fase de campo y análisis de datos y resultados; Tomás Hernández-Tejeda: fase de campo y análisis de resultados; Roger W. Cox: cuantificación de las concentraciones de ozono en laboratorio; John. W. Malcolm: cuantificación de las concentraciones de ozono en laboratorio.

Referencias

- Ashmore M., R. 2005. Assessing the future global impact of ozone on vegetation. *Plant, Cell and Environment* 28:949-964.
- Alonso R., M., S. Elvira, R. Inclán, V. Bermejo, F. J. Castillo and B. S. Gimeno. 2003. Responses of Aleppo pine to ozone. *In: Karnosky, D. F., E. Percy K., H. Chappelka A., C. Simpson and J. Pikkarainen (eds.). Air Pollution, global change and forests in the New Millennium. Chapter 9. Elsevier Science. Kidlington, Oxford. UK. pp. 211-230.*
- Alvarado R., D., L. I. Bauer y J. Galindo. 1991. Declinación y muerte del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Valle de México. *Agrociencia* 1(3):123-143.
- Alvarado R., D., L. I. Bauer and J. Galindo. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental Pollution* 80:115-121.
- Alvarado-Rosales, D. and T. Hernández-Tejeda. 2002. Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park. *In: Fenn, M., L. I. Bauer and T. Hernández-Tejeda (eds.). Urban air pollution and forests: resources at risk in the Mexico City air basin. Springer-Verlag. New York, NY USA. pp. 243-260.*
- Alvarado R., D. y L. de L. Saavedra R. 2007. Declinación del oyamel/Fir decline. *In: Cibrián T., D., R. D. Alvarado y S. E. García D. (eds.). Enfermedades Forestales en México/Forest diseases in Mexico. Universidad Autónoma Chapingo; CONAFOR-SEMARNAT, México; Forest Service USDA, EUA; NRCAN Forest Service, Canadá y Comisión Forestal de América del Norte, COFAN, FAO. Chapingo, Edo. de Méx., México. pp. 444-447.*
- Bauer, L. I. y T. Hernández-Tejeda. 1986. Contaminación: Una Amenaza para la Vegetación en México. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de Méx., México. 84 p.
- Bauer, L. I., T. Hernández-Tejeda and W. J. Manning. 1985. Ozone causes needle injury and tree decline in *Pinus hartwegii* at high altitudes in the mountains around Mexico City. *Journal of the Air Pollution Control Association* 35 (8):838.

- Bauer, L. I. and S. Krupa V. 1990. The Valley of Mexico: summary of observational studies on its air quality and effects on vegetation. *Environmental Pollution* 65: 109-118.
- Bauer, L. I. and T. Hernández-Tejeda. 2007. A review of ozone-induced effects on the forests of central Mexico. *Environmental Pollution* 147(3): 446-453.
- Booker, F., R. Muntifering, M. MacGrath, K. Burkey, D. Decoteau, E. Fiscus, W. Manning, S. Krupa, A. Chappelka and D. Grantz. 2009. The ozone component of global change: potential effects on agricultural and horticultural plant yield, product quality and interactions with invasive species. *Journal of Integrative Plant Biology* 51(4):337-351.
- Bravo, J. L. y T. Díaz M. 1996. Un modelo de regresión para la concentración de ozono en la zona sureste del Valle de México. *In: Contaminación atmosférica. El Colegio Nacional. México, D.F., México. pp. 139-144.*
- Bravo, J. L., M. Valdés y N. Alatorre N. 2001. Distribución Vertical del ozono en la Ciudad de México. *In: García C., L. y J. R. Varela (eds.). Contaminación Atmosférica III. El Colegio Nacional. México, D.F., México. 382 p.*
- Chappelka, A. H. and L. J. Samuelson. 1998. Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States: A review. *New Phytologist* 139:91-108.
- Cibrián T., D. 1989. Air pollution and forest decline near Mexico City. *Environmental Monitoring and Assessment* 12: 49-58.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Conanp-Semarnat). 2006. Plan de conservación y manejo. Parque Nacional Desierto de los Leones, México. México, D.F., México. 170 p.
- Corona B., R. y G. Calva V. 1989. Contaminación atmosférica en la Ciudad de México: causas, concentraciones y efectos. *Tópicos de Investigación y Postgrado* 1(1):10-21.
- Cox, R. M. and J. Malcolm M. 1999. Passive ozone monitoring for forest health assessment. *Water, Air and Soil Pollution* 116:339-344.

- Ferreti, M., F. Bussotti, V. Calatayud, M. Schaub, N. Kräuchi, B. Petriccione, G. Sánchez P., J. Sanz M. and E. Ulrich. 2007a. Ozone and forest in South-Western Europe. -What have we learned? *Environmental Pollution* 145: 652-655.
- Ferretti, M., M. Calderisi and F. Bussotti. 2007b. Ozone exposure, defoliation of beech (*Fagus sylvatica* L.) and visible foliar symptoms on native plants in selected plots of South-Western Europe. *Environmental Pollution* 145: 644-651.
- Fumagalli, I., B. Gimeno S., D. Velissariou, L. De Temmerman and G. Mills. 2001. Evidence of ozone-induced adverse effects on crops in the Mediterranean region. *Atmospheric Environment* 35: 2583-2587.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Adaptación a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México. 98 p.
- Gio-Argáez, R., I. Hernández R. y E. Saíñz H. 1989. Aspectos climáticos de la Cuenca del Valle de México. Ed. Sociedad Mexicana de Historia Natural. México, D.F., México. pp. 25-39.
- González M., R. E., M. Mendoza B. y D. Alvarado-Rosales. 2010. Exposición a ozono en relación a vitalidad en un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham). *Madera y Bosques* 16(4): 7-19.
- Grulke, N. E. and E. Lee H. 1997. Assessing visible ozone-induced foliar injury in ponderosa pine. *Journal of Canadian Forest Research* 27(10): 1658-1668.
- Grulke, N. E., R. Alonso, T. Nguyen, C. Cascio and W. Dobrowolski. 2004. Stomata open at night in pole-sized and mature ponderosa pine: implications for O₃ exposure metrics. *Tree Physiology* 24: 1001-1010.
- Guderian, R. 1985. Air pollution by photochemical oxidants. -Formation, transport, control and effects on plants. *Ecological Studies – Analysis and Synthesis*. Springer-Verlag. Berlin, Germany. 346 p.
- Gumpertz, M. L. and C. Brownie. 1993. Repeated measures in randomized block and split-plot experiments. *Canadian Journal of Forest Research* 23:625-639.

Hernández-Tejeda, T. y L. I. Bauer. 1982. Daño por gases oxidantes en pinos y avena, reconocimiento y evaluación en el Ajusco D.F. *Revista Chapingo* 33-34:19-28.

Hernández-Tejeda, T. y L. I. Bauer. 1984. Evolución del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *P. montezumae* var. *Lindleyi* en el Ajusco, D.F. *Agrociencia* 56:183-194.

Hernández-Tejeda, T. and L. I. Bauer. 1986. Photochemical oxidant damage on *Pinus hartwegii* at the "Desierto de los Leones", D.F. *Phytopathology* 76 (3): 377.

Hernández-Tejeda, T., M. Cox R., J. Malcolm., L. I. Bauer., H. Vargas J., A. Velázquez M. y D. Alvarado-Rosales. 2001. Impacto del ozono sobre el polen de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Ciencia Forestal en México*. 26(89): 5-18.

Hernández-Tejeda, T. 2014. Monitoreo e impacto del ozono atmosférico en follaje y polen de *Pinus hartwegii* Lindl. del Valle de México. Tesis de Doctorado. Botánica, Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de Méx., México. 79 p.

Jáuregui O., E. 1971. Contaminación atmosférica. Mesomicroclima de la Ciudad de México. Imprenta Universitaria. Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F., México. pp. 56-68.

Jáuregui O., E., D. Klaus and W. Lauer. 1981. An estimation of SO₂ transport in Mexico City. *Geofísica Internacional* 20:55-79.

Jáuregui O., E. 1993a. Algunas consideraciones del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 9(3):12-24.

Jáuregui O., E. 1993b. La contaminación. *Ciencia y Desarrollo* 19(109):53-60.

Jáuregui O., E. 2002. The climate of the Mexico City air basin: its effects on the formation and transport of pollutants. *In*: Fenn M., L. I. Bauer and T. Hernández-Tejeda (eds.). *Urban air pollution and forests: resources at risk in the Mexico City air basin*. Springer-Verlag. New York, NY USA. pp. 86-117.

Kolb, T. E., S. Fredericksen T., C. K. Steiner K. and J. M. Skelly. 1997. Issues in scaling tree size and age response to ozone: a review. *Environmental Pollution* 98(2):195-208.

Krupa, S. V. and M. Nosal. 2001. Relationships between passive sampler and continuous ozone (O₃) measurement data in ecological effects research. *The Scientific World* 1:593-601.

Krupa, S. V. 1999. *Polución, población y plantas*. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de Méx., México. 184 p.

London, J. 1985. Distribution of atmospheric ozone. *In*: Whitten, R. C. and S. S. Prasad (eds.). *Ozone in the free atmosphere*. Van Reinhold Company. New York, NY USA. pp. 11-80.

Machín, T. 1991. *Plagas y enfermedades forestales en América Central: Guía de campo*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 185 p.

Marín L., M., O. Escobedo F. and A. Trinidad S. 2002. Physical geography, hydrogeology, and forest soils of the basin of Mexico. *In*: Fenn M., L. I. Bauer and T. Hernández-Tejeda (eds.). *Urban air pollution and forests: resources at risk in the Mexico City air basin*. Springer-Verlag. New York, NY USA. pp. 44-67.

Melo G., S. C. 1977. *Desarrollo de parques nacionales mexicanos*. Instituto de Geografía, UNAM. *Serie Varía I* (3):58-154.

Melo G., S. C. 1978. *Ensayo metodológico para la planificación del Parque Nacional Desierto de los Leones, D.F.* Tesis de maestría. Facultad de Filosofía y Letras. Colegio de Geografía, UNAM. México, D.F., México. 163 p.

Miller, P. R., R. Parmeter J., O. Taylor C. and E. Cardiff. 1963. Ozone injury to the foliage of *Pinus ponderosa*. *Phytopathology* 53:1072-1076.

Miller, P. R. 1992. Mixed conifer forests of the San Bernardino Mountains, California. *In*: Olson, R. K., D. Binkley and M. Böhm (eds.). *The response of western forests to*

air pollution. Ecological Studies 97. Springer-Verlag, New York, NY USA. pp. 461-497

Miller, P. R., L. I. Bauer., A. Quevedo N. and T. Hernández-Tejeda. 1992. Comparison of ozone exposure characteristics in forested regions near Mexico City and Los Angeles. *In: Proc. 85th Annual Meeting and Exhibition Air and Waste Management Association. Paper 92-71.02. June 21-26. Kansas, MO USA. n/p.*

Miller, P. R., L. I. Bauer., A. Quevedo N. and T. Hernández-Tejeda. 1994. Comparison of ozone exposure characteristics in forested regions near Mexico City and Los Angeles. *Atmospheric Environment* 28: 141-148.

Moser, E. B., A. M. Saxton and S. R. Pezeshki. 1990. Repeated measures analysis of variance: application to tree research. *Canadian Journal of Forest Research* 20:524-535.

Naveh, Z., H. Steinberger E., S. Chaim and A. Rotmann. 1980. Photochemical oxidants-A threat to Mediterranean forest and upland ecosystems. *Environmental Conservation* 7: 301-309.

Paoletti, E. 2006. Impact of ozone on Mediterranean forests: a review. *Environmental pollution* 144(2): 463-474.

Peterson, D. L., M. Arbaugh J. and L. J. Robinson. 1991. Growth trends of ozone-stressed ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) in the Sierra Nevada of California, USA. *The Holocene* 1:50-61.

Raga, G. B., D. Baumgardner, G. Kok and I. Rosas. 1999. Some aspects of boundary layer evolution in Mexico City. *Atmospheric Environment* 33: 5013-5021.

Reyes, A. 1981. Ajusco mirador de México. DDF, CORENADER. México, D.F., México. 25 p.

Schreffler, J. and R. Evans. 1982. The surface ozone record from the regional air pollution study 1975-1976. *Atmospheric Environment* 16:1311-1321.

Skelly, J. M., E. Savage, L. I. Bauer and D. Alvarado-Rosales. 1997. Observations of ozone-induced foliar injury on black cherry (*Prunus serotina* var. *capuli*) within the Desierto de los Leones National Park, Mexico City. *Environmental Pollution* 95: 155-158.

Somers, G. L., H. Chappelka A., P. Rosseau and R. J. Renfro. 1998. Empirical evidence of growth decline related to visible ozone injury. *Forest Ecology and Management* 104: 129-137.

Stolte, K. 1996. Symptomatology of ozone injury to pine foliage. *In*: Miller, R. H., K. W. Stolte, D. M. Duriscoe and J. Pronos (eds.). Evaluating ozone air pollution effects on pines in the Western United States. Pacific Southwest Research Station. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-155. Albany, CA USA. pp. 11-18.

Treshow, M. and K. F. Anderson. 1989. Plant stress from air pollution. John Wiley and Sons. Great Britain, UK. 283 p.

Treshow, M. and D. Stewart. 1973. Ozone sensitivity of plant in natural communities. *Biological Conservation* 5(3):209-214.

Universidad Autónoma Chapingo-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (UACH-Semarnat). 1999. Atlas forestal de México. Chapingo, Edo. de Méx., México. 105 p.

United States - Environmental Protection Agency (US EPA). 1984. National air quality and emissions trends report. 1983. US EPA Office of air quality planning and standards. EPA Rept. No. EPA 450/4-B4-029. Research Triangle Park, NC USA. 214 p.

United States - Environmental Protection Agency (US EPA). 1996. Air quality criteria for ozone and related photochemical oxidants, Vol. II. Office of Research and Development. Washington, DC USA. <http://www.epa.gov/ncea/ozone.htm> (7 de octubre de 2010).

Vázquez, J. 1987. El saneamiento y la limpia forestales en el Desierto de los Leones. Departamento del Distrito Federal. Comisión Coordinadora para el Desarrollo Rural. México, D.F., México. pp. 1-24.

White, E. S., M. Reyes C., J. Ortega R. y S. Valastro. 1990. El Ajusco: geomorfología volcánica y acontecimientos glaciales durante el pleistoceno superior y comparación con las series glaciales mexicanas y las de las montañas rocallosas. Serie Arqueología. INAH. México, D.F., México. 77 p.

Wolters, J. H. and M. J. Martens. 1987. Effects of air pollutants on pollen. *The Botanical Review* 53:372-414.

Zierl, B. 2002. Relations between crown condition and ozone and its dependence on environmental factors. *Environmental Pollution* 119(1): 55-68.