



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**“DISTRIBUCIÓN ESPACIAL E IMPACTO DE AEROPOLUANTES EN LA
SALUD DEL BOSQUE DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL”**

YOLANDA FRANCO ISLAS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO
2014

La presente tesis titulada: “**Distribución espacial e impacto de aeropoluantes en la salud del bosque de conservación del Distrito Federal**”; realizada por la alumna **Yolanda Franco Islas**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

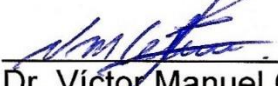
DOCTORA EN CIENCIAS
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJERO:



Dr. Miguel Ángel López López

ASESOR:



Dr. Víctor Manuel Cetina Alcalá

ASESOR:



Dr. Dionicio Alvarado Rosales

ASESOR:



Dr. Miguel Jorge Escalona Maurice

ASESOR:



Dra. Rocío Macarena Alonso del Amo

Montecillo, Texcoco, Edo. de México, marzo del 2014

AGRADECIMIENTOS

A los millones de mexicanos (as) que pagan impuestos, quienes a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Colegio de Postgraduados, han financiado mi formación profesional.

A los integrantes de mi Consejo Particular por el esfuerzo, dedicación, tiempo y apoyo que han proporcionado para la realización de esta investigación.

A los Docentes, compañeros, amigos y familia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Colegio de Postgraduados, Postgrado Forestal a través del proyecto 120593, "Evaluación del impacto de la contaminación del aire en las zonas boscosas y agrícolas, urbanas y rurales del Distrito Federal.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL E IMPACTO DE AEROPOLUANTES EN LA SALUD DEL BOSQUE DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL

Yolanda Franco Islas, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

Estudios y observaciones desarrollados por más de 30 años indican que las concentraciones de gases oxidantes que son emitidos diariamente a la atmósfera en la Ciudad de México, producen daños a la vegetación. La defoliación prematura, el moteado y el bandeo clorótico del follaje, son los primeros síntomas de declinación de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*. El objetivo de esta investigación fue evaluar la distribución espacial y efectos de la contaminación atmosférica en el bosque de conservación del Distrito Federal. El muestreo se realizó por estrato forestal: Bosque de oyamel, pino, encino y mixto, en las épocas seca-fría 2011 y cálido-seca 2012. Se establecieron 62 sitios circulares de 0.1 ha, se colocó un muestreador pasivo Radiello por contaminante (O_3 y NO_2) por sitio y época de muestreo. En cada sitio de muestreo se tomaron las variables ambientales, variables del indicador de copa y agentes de daño del arbolado. Para el análisis de distribución y concentración de contaminantes se utilizó geoestadística y se representaron en un sistema de información geográfica. Se determinó el indicador de salud forestal, índice ajustado de composición foliar (Z_B) e índice de severidad de daño (ISD) del arbolado por especie y estrato forestal. Los contaminantes evaluados presentaron una tendencia estacional, mayor concentración de O_3 (186.15 ppb) en la época cálido-seca 2012 y mayor concentración de NO_2 (217.01 ppb) época seca-fría 2011. El 95% del arbolado evaluado presentó un índice $Z_B > 0.25$ y el ISD fue $> 15\%$ con mayor incidencia de daño en el tronco de los árboles. Las especies con un ISD severo fueron *Alnus firmifolia*, *Pinus hartwegii*, *P. montezumae* y *Quercus castanea*. Las variables correlacionadas con el índice Z_B fueron: fierro, calcio, índice de radiación solar, humedad relativa, pH, NO_2 y O_3 . Se determinó que la mayoría del arbolado evaluado en el bosque de conservación del Distrito Federal presentó una condición de copa pobre o no saludable, asociada a factores edáficos, climáticos y contaminantes atmosféricos como el O_3 y NO_2 .

Palabras clave: ozono, indicador de salud forestal, índice ajustado de composición foliar, índice de severidad de daño.

SPATIAL DISTRIBUTION AND IMPACT OF AIRPOLLUTANTS IN THE HEALTH OF CONSERVATION FOREST OF DISTRITO FEDERAL

ABSTRACT

Studies and observations carried out during the last 30 years show that concentrations of oxidant gases that are emitted every day into the atmosphere in Mexico City damage the vegetation. Early loss of foliage, chlorotic mottling and banding of foliage are the first symptom of decline of *Abies religiosa* and *Pinus hartwegii*. The objective of this research was to assess the spatial distribution and effects of the atmospheric pollution in the conservation forest of Distrito Federal, Mexico. Sampling was carried out by forest stratum: sacred-fir, pine, oak and mixed-species forest, during the dry-cold 2011 and warm-dry 2012 periods. 62 of 0.1 ha circular sampling sites were established and, a Radiello passive sampler by pollutant (O_3 and NO_2), site and period of sampling was installed. In each sampling site, environmental variables, crown indicator variables and tree-injury agents were evaluated. Geostatistics was used for the analysis of distribution and concentration of pollutants and they were represented in a geographic information system. Forest health indicator, adjusted index of foliage composition (Z_B) and damage severity indicator (ISD) of trees by species and forest stratum were determined. The pollutants assessed showed a seasonal trend, higher concentration of O_3 (186.15 ppb) during the warm-dry 2012 period and higher concentration of NO_2 (217.01 ppb) during the dry-cold 2011 period. 95% of trees assessed showed a Z_B index > 0.25 and the ISD was $> 15\%$ with highest damage incidence on tree trunks. Tree species with severe ISD were *Alnus firmifolia*, *Pinus hartwegii*, *P. montezumae* and *Quercus castanea*. The variables that correlated with Z_B index were: iron, calcium, solar radiation index, relative humidity, pH, NO_2 and O_3 . It was determined that most trees assessed in the conservation forest of Distrito Federal, Mexico, presented a poor or unhealthy crown condition associated with edaphic and climatic factors as well as atmospheric pollutants like O_3 y NO_2 .

Key words: Ozone. Forest health indicator, adjusted index of foliage composition, damage severity index

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	vii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Planteamiento del problema	3
2. Objetivos	4
3. Hipótesis	4
4. Revisión de literatura	5
5. Literatura citada	7
I. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y CONCENTRACIÓN DE O₃ Y NO₂ EN EL BOSQUE DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL, MÉXICO	9
1.1 Resumen.....	9
1.2 Abstract.....	10
1.3 Introducción.....	11
1.4 Materiales y métodos	12
1.5 Resultados y discusión	15
1.6 Conclusiones.....	29
1.7 Literatura citada	31
II. CONDICIÓN DE COPA Y DAÑOS DEL ARBOLADO EN EL BOSQUE DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL	37
2.1 Resumen.....	37
2.2 Abstract.....	38
2.3 Introducción.....	39
2.4 Materiales y métodos	40
2.5 Resultados	43
2.6 Discusión	53
2.7 Conclusiones.....	59
2.8 Literatura citada	61

III. EFECTOS DEL O₃ Y NO₂ EN EL BOSQUE DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL	
3.1 Resumen.....	65
3.2 Abstract.....	66
3.3 Introducción.....	67
3.4 Materiales y métodos	68
3.5 Resultados	73
3.6 Discusión	80
3.7 Conclusiones.....	86
3.8 Literatura citada	88
CONCLUSIONES GENERALES	93
ANEXO	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Área forestal de conservación del Distrito Federal.....	13
Figura 1.2	Concentración y distribución espacial del O ₃ en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011.....	17
Figura 1.3	Concentración y distribución espacial de NO ₂ en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011.....	19
Figura 1.4	Concentración y distribución espacial de O ₃ en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido-seca 2012	24
Figura 1.5	Concentración y distribución espacial de NO ₂ en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido-seca 2012	26
Figura 2.1	Sitios de muestreo en el bosque de conservación del Distrito Federal	40
Figura 2.2	Mapa del Índice de proporción de copa en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	44
Figura 2.3	Mapa del Índice de densidad de copa del arbolado en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	46
Figura 2.4	Mapa del Índice de Transparencia de copa en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	47
Figura 2.5	Mapa del Índice de Muerte regresiva en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	48
Figura 2.6	Mapa del Índice ajustado de composición foliar del arbolado por sitio de muestreo, en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	50
Figura 2.7	Mapa del Índice de Severidad de Daño del arbolado por sitio de muestreo en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	52
Figura 3.1	Sitios de muestreo en el bosque de conservación del Distrito Federal.	69
Figura 3.2	Mapa de Índice de composición foliar del arbolado por sitio de muestreo, en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	74
Figura 3.3	Mapa de tipos de vegetación y ubicación de sitios en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	76
Figura 3.4	Árbol de regresión para el índice ajustado de composición foliar Z_{β} , por sitio.....	79

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1	Parámetros del semivariograma ajustado para determinar la concentración y distribución espacial de O ₃ , NO ₂ y variables ambientales, en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011.....	16
Cuadro 1.2	Análisis del Modelo Lineal Generalizado con Suavizamiento para O ₃ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011.....	20
Cuadro 1.3	Análisis del Modelo Lineal Generalizado con Suavizamiento para NO ₂ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011.....	20
Cuadro 1.4	Parámetros del semivariograma ajustado para determinar la concentración y distribución espacial de O ₃ , NO ₂ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido-seca 2012.	22
Cuadro 1.5	Análisis del Modelo Lineal Generalizado con Suavizamiento para O ₃ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido-seca 2012.....	27
Cuadro 1.6	Análisis del Modelo Lineal Generalizado para NO ₂ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido-seca 2012.	28
Cuadro 2.1	Análisis de varianza de los índices Prc, DnC y TrC para todos árboles evaluados, por clasificación de especies, tipo de vegetación y especie, en el bosque de conservación del Distrito Federal.	43
Cuadro 2.2	Análisis de varianza de los índices ExpL, Mreg y Z _B para todos árboles evaluados, por clasificación de especies, tipo de vegetación y especie, en el bosque de conservación del Distrito Federal.	49
Cuadro 2.3	Índices promedio del Indicador de copa e índice Z _B en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	94
Cuadro 2.4	Índices promedio del Indicador de copa e índice Z _B por especie, en el bosque de conservación del Distrito Federal.	94
Cuadro 2.5	Media del índice de severidad de daño para todo el arbolado, por clasificación de especies y tipo de vegetación, en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	95

Cuadro 2.6	Media del Índice de severidad de daño por especie en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	100
Cuadro 3.1	Análisis de varianza de los índices Z_B e ISD por sitio en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	73
Cuadro 3.2	Índice ajustado de composición foliar Z_B por sitio en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	103
Cuadro 3.3	Índice de severidad de daño ISD por sitio en el bosque de conservación del Distrito Federal.....	105

INTRODUCCIÓN GENERAL

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM), se ubica en una cuenca semicerrada a una altitud de 2240 m sobre el nivel medio del mar (nmm). La gran población de la ZMVM 20 millones de personas, 35,000 industrias, 3.5 millones de vehículos, topografía compleja, y meteorología causan altos niveles de contaminación. Las montañas, junto con las frecuentes inversiones térmicas, atrapan los contaminantes; además la alta elevación y la intensa luz solar también contribuyen a procesos fotoquímicos que crean O₃ y otros contaminantes secundarios (Molina y Molina, 2004).

Se han realizado esfuerzos por parte de las autoridades por disminuir las emisiones de algunos contaminantes atmosféricos como el bióxido de azufre y plomo; sin embargo otros contaminantes atmosféricos como el ozono, cuyos precursores son los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, siguen presentando altas concentraciones.

Los contaminantes emitidos a la atmósfera impactan a los ecosistemas forestales urbanos y suburbanos principalmente en la disminución de tasas de crecimiento de los árboles, la mortalidad y susceptibilidad de las especies y producen cambios en la composición, proporción, función y estructura de éstos. Los contaminantes atmosféricos especialmente el ozono, los óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, han mostrado efectos considerables sobre la fisiología de la vegetación (Hernández *et al.*, 1982; Hernández y Bauer, 1984; Bauer y Hernández, 1986; Lange *et al.*, 1987).

El clima de la Cuenca de México, tiene una influencia importante en el comportamiento y distribución de la contaminación a lo largo del año. Se definen tres temporadas climáticas: seca-fría, seca-caliente y lluvias. La temporada seca-fría se caracteriza por escasa precipitación y bajas temperaturas, entre los meses de noviembre a febrero. La temporada seca-caliente, de marzo a mayo, prevalecen

días calurosos y altas temperaturas. La temporada de lluvia y la humedad relativa alta, inicia a mediados de mayo y es más evidente entre junio y octubre, ocasionando que desciendan los niveles de algunos contaminantes. En la temporada seca-fría de noviembre a febrero la temperatura desciende y es frecuente la formación de inversiones térmicas, favoreciendo la acumulación de contaminantes primarios (SMADF, 2012).

En el primer capítulo de esta investigación se determinó la concentración y distribución espacial de ozono y bióxido de nitrógeno en el bosque de conservación del Distrito Federal y las variables ambientales que los determinan. Los contaminantes evaluados presentaron un comportamiento estacional mayor concentración de O₃ en la época cálido-seca y mayor concentración de NO₂ en la época seca-fría; las variables ambientales correlacionadas fueron temperatura, humedad relativa, radiación solar e índice de radiación ultravioleta.

En el segundo capítulo se determinó la condición de salud del arbolado, mediante los indicadores de condición de copa e índice de severidad de daño por estrato forestal y por especie. A través del Índice ajustado de composición foliar (Z_B), se determinó que el 95% del arbolado evaluado presentó una condición de copa no saludable y el 55% de éste presentó un índice de severidad de daños >15%, presentando mayor incidencia de daño en el tronco.

En el tercer capítulo se relacionaron los índices de concentración de O₃ y NO₂, variables ambientales e índices ajustado de composición foliar Z_B. Las variables correlacionadas con el incremento del índice Z_B fueron: fierro, calcio, pH, índice de radiación solar, porcentaje de humedad relativa, concentración de NO₂ y O₃. A través de este estudio se determinó que la mayor parte del arbolado en el bosque de conservación del Distrito Federal, México, presentó una condición de copa no saludable asociada a factores edáficos, climáticos y contaminantes atmosféricos.

1. Planteamiento del problema

Bajo condiciones de menor concentración de contaminantes atmosféricos, los ecosistemas forestales funcionan como sumideros para la contaminación ambiental. Cuando la dosis es intermedia los árboles pueden ser afectados o predispuestos a estrés por factores bióticos, abióticos o antropogénicos, llegando a afectar desde el proceso fotosintético hasta la sobrevivencia de los mismos. En condiciones de altas concentraciones los impactos pueden ocasionar la declinación de una especie, simplificación de estructuras en el ecosistema forestal, alteración en los sistemas asociados a éste y el reemplazamiento de especies por vegetación secundaria. En virtud de que los contaminantes atmosféricos como el ozono, cuyos precursores son los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, siguen presentando altas concentraciones en la Ciudad de México y que han mostrado efectos considerables sobre la fisiología de la vegetación, a través de esta investigación se pretende conocer la distribución espacial del ozono y el bióxido de nitrógeno y determinar los efectos de los contaminantes atmosféricos, variables ambientales y variables edáficas sobre la condición de salud del bosque de conservación del Distrito Federal.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general:

Evaluar la distribución espacial e impacto de aeropoluantes en la salud del bosque conservación del Distrito Federal.

2.2 Objetivos particulares:

- Analizar la distribución espacial y concentración de O_3 y NO_2 y variables ambientales que los condicionan en el bosque de conservación del Distrito Federal.
- Determinar los índices de salud del arbolado en el bosque de conservación del Distrito Federal.
- Relacionar los índices de salud del arbolado con la distribución espacial del O_3 y NO_2 y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal.

3. Hipótesis

Ho: La concentración y distribución espacial de los contaminantes atmosféricos no tiene relación con la salud del bosque de conservación del Distrito Federal.

Ha: La concentración y distribución espacial de al menos un contaminante atmosférico tiene relación con la salud del bosque de conservación del Distrito Federal.

4. Revisión de literatura

En el quinto informe del Programa de Cooperación Internacional para la Evaluación y Seguimiento de los Efectos de la Contaminación Atmosférica en los Bosques (CEC-CEPE, 1995), se manifestó que la contaminación atmosférica predispone al deterioro de los árboles en zonas muy extensas, aunque la amplitud de los efectos sigue siendo incierta y que la sequía y los posteriores ataques de insectos barrenadores son factores principales, junto con la prematura defoliación (Pardos, 2006).

Una definición apropiada de contaminantes atmosféricos es la de materiales (sólidos, líquidos y gaseosos) presentes en la troposfera en concentraciones superiores a las normales. Sus fuentes son tanto de naturaleza antropogénica como naturales. Metales pesados, sales inorgánicas (sulfatos, nitratos, cloruros, compuestos de amonio y compuestos orgánicos, en forma de partículas y contaminantes gaseosos, tales como óxidos de nitrógeno, azufre y carbono, ozono, haluros, compuestos PAN (peroxiacilnitratos), forman parte de los contaminantes de importancia potencial en los ecosistemas forestales (Smith, 1990).

A principios de los años 80's, De la Isla de Bauer y colaboradores reportaron la presencia de síntomas de declinación de la vegetación en el Parque Nacional Desierto de Leones, ubicado al oeste de la ciudad de México (López, 1996), sugiriendo que el ozono es un factor causal posible. Hasta la fecha varios estudios han tratado entender y determinar los factores causales de disminución de las masas arboladas, puntualizado que las múltiples causas incluyen la contaminación del aire, las plagas y enfermedades, la extracción del agua y las pobres prácticas de manejo forestal y la sucesión natural (Sierra *et al.*, 1998).

Hoy en día, existe un consenso general de que la causa principal de la declinación del oyamel puede ser la contaminación, especialmente el ozono atmosférico originado en la Ciudad de México y que es transportado hacia el suroeste del Valle

de México (Hernández y Bauer, 1984; Ciesla and Macías, 1987; Cibrián, 1989; López, 1996, 1997; Alvarado y Hernández, 2002).

Aunque no se han efectuado estudios específicos del ozono como factor causal de disminución del volumen de *Abies religiosa*, los datos disponibles demuestran que el ozono es uno de los contaminantes del aire que excede los estándares de calidad de aire en el suroeste del Valle de México (Bravo y Torres, 2002).

Aparentemente, los contaminantes originados en el norte de la Ciudad de México son dispersados y transportados por los vientos dominantes de dirección noreste-suroeste (Bravo y Torres, 2002). Asimismo, la alteración de la química de la lluvia en estas zonas puede ocasionar daño foliar, deficiencia nutrimental y la lixiviación de constituyentes foliares, principalmente cationes básicos (calcio, potasio, magnesio y sodio), como ocurre en otras regiones del mundo (Lovett *et al.*, 2009; López *et al.*, 2006).

La vegetación urbana, particularmente el arbolado, puede influir de forma directa o indirecta en la calidad ambiental y el bienestar humano, ya que mejora la calidad del aire, provee sombra y modera la temperatura y el microclima disminuyendo el consumo de energía y reduciendo las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y a la vez aumenta el valor patrimonial (Escobedo *et al.*, 2008; Nowak *et al.*, 2006).

A pesar de que no se ha establecido un vínculo claro entre el deterioro forestal y el depósito atmosférico de contaminantes (Skelly *et al.*, 1997), se reconoce que éstos y en particular la lluvia ácida, es un factor que predispone a los árboles al estrés, debilitándolos y haciéndolos vulnerables a factores como insectos defoliadores, hongos, sequía, provocando desde la muerte de ramas en árboles débiles hasta la muerte del árbol (Hinrichsen, 1986; Ciesla, 1989).

5. Literatura citada

- Alvarado, R. D., Hernández, T. T. 2002. Decline of sacred-fir in the Desierto de los Leones National Park. *In: Fenn M. E., L. I. de Bauer, Hernández-Tejeda T. (Eds.) Urban air pollution and forests. Resources at risk in the Mexico City air basin.* Springer. New York, USA. pp: 243-260.
- Bravo, A. H., and Torres, J. R. 2002. Air pollution levels and trends in the Mexico City Metropolitan Area. *In: Fenn M. E., LI de Bauer, T. Hernández-Tejeda. (Eds.) Urban air pollution and forests. Resources at risk in the Mexico City air basin.* Springer. New York, USA. Pp. 121-159.
- CEC-CEPE, 1995. Estado de los Bosques en Europa. Informe 1996. 56 p.
- Cibrían, T. D. 1989. Air pollution and forest decline near Mexico City. *Env. Monit. Assess.* 12:49-58.
- Cielsa, W. M., y Macías, S. J. E. 1987. Desierto de los Leones: A forest in crisis. *Amer. For.* 93: 29-31.
- Cielsa, W. M. 1989. Aerial photos for assessment of forest decline-a multinational overview. *J. For.* 87:37-41.
- Bauer, L. I. de, y Hernández, T. T. 1986. Contaminación. Una amenaza para la vegetación en México. Chapingo, Estado de México, México. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México. 78 p.
- Escobedo, F. J., Wagner, J. D. Nowak, Maza C. J. L. de la, Rodríguez, M. M., Crane, D. F. 2008. Analyzing the cost-effectiveness of Santiago Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal Environment. Manag.* 86:148-157.
- Hernández, T. T., Bauer, L. I. de., y Krupa, V. S. 1982. Daño por gases oxidantes en pinos y avena, reconocimiento y evaluación en el Ajusco, D. F. *Revista Chapingo (33-34):*19-28.
- Hernández, T. T. y Bauer, L. I. de. 1984. Evolución del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *P. montezumae* var. *Lindleyi* en el Ajusco, D. F. *Agrociencia* 6:183-194.
- Hinrichsen, D. 1986. Multiple pollutants and forest decline. *Ambio.* 15:258-265.
- Lange, O. L., Zeliner, H., Gebel, J., Schramel, P., Östner, B., and Czygan, F. C. 1987. Photosynthetic capacity, chloroplast pigments and mineral content of previous years spruce needles with and without the new flush: analysis of the forest decline phenomenon of eddle bleaching. *Oecologia (Berl)* 73:351-357.

- López, L. M. A. 1996. Declinación del oyamel del Desierto de los Leones, D.F.: Un modelo del proceso. *In: De la I. de Bauer M. L., Rodríguez, H. C., Tijerina, C. L., Carvallo, C. A., Palacios, V. E., Escobedo, C. F. (Eds.) Memorias del II Simposio Internacional y III Reunión Nacional sobre Agricultura Sostenible: Una contribución al Desarrollo Agrícola Integral.* Colegio de Postgraduados. México. pp: 425-431.
- López, L. M. A. 1997. Efectos del ambiente aéreo y del suelo sobre el desarrollo de síntomas de declinación de oyamel. *Terra* 15:287-293.
- López, L. M. A., Velázquez, M. A., Acosta, M. J. y Estañol, B. E. 2006. Biomass distribution in declining sacred-fir seedlings. Colegio de Postgraduados. Interciencia. México. 32(6)451:455.
- Lovett, G. M., Ear, T. H., Evers, S. E. G., Findlay, J., Cosby, J. K., Dunscomb, C. C., Riscoll, T. and Wathersa, K. C. 2009. Effects of air pollution on ecosystems and biological diversity in the eastern united states. *In: The ear ecology and conservation biology.* Ann. N. Y. Acad. Sci. 1162:9-135.
- Molina, M. J. y Molina, L. T. 2004. Megaciudades y contaminación atmosférica. Estudio crítico. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. *Journal of the Air & Waste Management Association.* 54 p.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., and Stevens, J. C. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forest. Urban Green.* 4:115-123.
- Pardos, J. A. 2006. La contaminación atmosférica y los ecosistemas forestales. ETS de Ingenieros de Montes UPM. España. pp: 55-70.
- Sierra, P. A., Rodríguez, T. D. A., Bonilla A. V. O., Flores R. V., González R. M. A., Olguín, C.C., Acosta D. M., Ruíz H. P., Valladares M. R., y Gómez, S. R. 1988. Estructura y dinámica del bosque de oyamel afectado por la declinación forestal en el Desierto de los Leones. COCODER. México. 36 p.
- Skelly, J. M., Savage, J. E., Bauer, L. I. de and Alvarado, R. D. 1997. Observations of ozone-induced foliar injury on black cherry (*Prunus serotina*, var. *capuli*) within the Desierto de los Leones National Park, Mexico City. *Environ Pollut.* 95(2):155-158.
- SMADF. 2012. Programa general de ordenamiento ecológico del Distrito Federal. [En línea]. <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=61> 22/02/2013
- Smith, W. H. 1990. Air Pollution and Forests. Springer- Verlag, 2nd edit., 618 p.

I. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y CONCENTRACIÓN DE O₃ Y NO₂ EN EL BOSQUE DE CONSERVACION DEL DISTRITO FEDERAL, MÉXICO

1.1 Resumen

México enfrenta problemas de calidad del aire, siendo el Distrito Federal el caso más ampliamente conocido y documentado. El objetivo del presente estudio fue analizar la distribución espacial y concentración de Ozono (O₃) y bióxido de nitrógeno (NO₂) en el bosque de conservación del Distrito Federal y las variables ambientales que los condicionan. El muestreo se realizó por estrato forestal (Bosque de oyamel, pino, encino y mixto), en las épocas: seca-fría 2011 y cálido-seca 2012. Se establecieron 62 sitios circulares de 0.1 ha y se colocó un muestreador pasivo Radiello por contaminante y sitio de muestreo. Para el análisis de la distribución y concentración de los contaminantes se aplicó geoestadística y se representó en un Sistema de Información Geográfica. Se utilizaron modelos aditivos generalizados con suavizamiento y prueba de medias por contaminante y estrato forestal. Las variables ambientales significativas que explicaron la concentración y distribución de O₃ y NO₂ en ambas épocas de muestreo fueron: temperatura, humedad relativa, radiación solar e índice de radiación UV. Los contaminantes evaluados presentaron un comportamiento estacional, mayor concentración de O₃ en la época cálido-seca 2012 (186.15 ppb) y se distribuyó espacialmente al sur-suroeste y mayor concentración de NO₂ en la época seca-fría 2011 (217.01 ppb) y se distribuyó en la zona norte. No se encontraron diferencias significativas en la concentración de O₃ en los estratos forestales por época de muestreo. Las concentraciones de NO₂ fueron significativamente diferentes: época seca-fría 2011 (114.69 ppb, $p = 0.0001$) y época cálido-seca 2012 (59.8 ppb, $p = 0.0001$) en el bosque de encino.

Palabras clave: Ozono, bióxido de nitrógeno, Geoestadística, Sistemas de Información Geográfica.

1.2 Abstract

Mexico faces air quality problems, being the Mexico City the most widely known and documented case. The objective of present study was analyzing the spatial distribution and concentrations of ozone (O₃) and nitrogen dioxide (NO₂), in the conservation forest of Mexico City, and the environmental variables conditioning them. Sampling was carried out by forest strata (sacred-fir, pine, oak and mixed forests) during the 2011 dry-cold and 2012 warm-dry periods. Sixty-two 0.1 ha circular sampling sites were located and one Radiello passive sampling device for each air pollutant was installed at each sampling site. For pollutant spatial distribution and concentration analysis, geostatistics techniques were used, and results were represented in a Geographic Information System. Additive generalized models with smoothing and means tests were used to analyzing data by air pollutant and forest strata. The significant environmental variables that explained both concentration and distribution of O₃ and NO₂, in both sampling periods were: temperature, relative humidity, solar radiation, UV radiation index. The air pollutants studied showed a seasonal behavior; higher O₃ concentration during the 2012 warm-dry period (186.15 ppb), and was spatially distributed to the South-Southwest zone, and higher NO₂ concentration during the 2011 dry-cold period (217.01 ppb) and was distributed in the north zone. No significant differences in O₃ concentration were found among forest strata by sampling period. NO₂ concentrations were significantly different: 2011 dry-cold period (114.69 ppb, p=0.00041) and 2012 warm-dry 2012 period (59.8 ppb, p=0001) in the oak forest.

Key words: ozone, nitrogen dioxide, Geostatistics, Geographic Information System.

1.3 Introducción

El Distrito Federal, se ubica en una cuenca semicerrada al suroeste del Valle de México, el entorno montañoso que la rodea constituye una barrera natural, que dificulta la circulación del viento y la dispersión de contaminantes atmosféricos (Zuk *et al.*, 2007). Los contaminantes atmosféricos afectan a los ecosistemas directamente, tendrán efectos a largo plazo influenciados por su contenido y concentración, intensidad de la radiación solar, temperatura y precipitación (Wenger *et al.*, 1971).

El ozono (O_3) es uno de los mayores contaminantes atmosféricos en las grandes ciudades, sus altas concentraciones son producidas a través de procesos fotoquímicos (Tle *et al.*, 2010), en presencia de luz solar, estabilidad atmosférica y contaminantes precursores como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y diversos compuestos orgánicos volátiles (Espinosa, 2007; Jaimes *et al.*, 2010; SMADF, 2012a). El bióxido de nitrógeno (NO_2) pertenece a los Óxidos de nitrógeno (NO_x) (Zuk *et al.*, 2007), las mayores concentraciones se originan por la combustión a altas temperaturas de combustibles fósiles en industrias y vehículos, y en la nitración industrial (Jiménez, 2006), en presencia de la luz ultravioleta es la principal fuente de ozono troposférico (Espinosa, 2007).

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, mide las concentraciones de contaminantes ambientales en la zona metropolitana y comúnmente en el bosque de conservación no se registran (García, 2009). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar la concentración y distribución espacial de O_3 y NO_2 , en el bosque de conservación del Distrito Federal (Delegaciones Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Álvaro Obregón, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco) y los factores ambientales que los condicionan; considerando que las áreas forestales del sur del Distrito Federal están sujetos al más severo estrés oxidante y son afectados en su estructura y composición.

1.4 Materiales y métodos

Ubicación del área de estudio

El Distrito Federal, se localiza en el suroeste de la cuenca del Valle de México y cuenta con una superficie de 149,674 ha. Se divide en suelo urbano 61,232 ha y suelo de conservación 88,442 (59%) constituido por bosques de oyamel, pino, mixto e inducidos, remanentes de bosques de encino, vegetación acuática y matorrales xerófilos (PAOT, 2010), ubicados en la región sur y surponiente en las Delegaciones de Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco (SMADF, 2012b), (Figura 1.1).

Delimitación del área de estudio y procedimientos de muestreo

El área de estudio fue delimitada en el mapa vectorial de uso de suelo y vegetación del Distrito Federal, Escala 1:50000 (CORENA, 2005). Se ubicaron 62 sitios de muestreo, utilizando la aplicación Hawth's Analysis Tools Ver. 3.27 (Beyer H. L., 2006) en ArcGis ver. 9.3 (ESRI, 2008), bajo el diseño de muestreo aleatorio estratificado y generando números de sitios proporcionales al área por tipo de vegetación (BOLFOR *et al.*, 2000), (Figura 1.1).

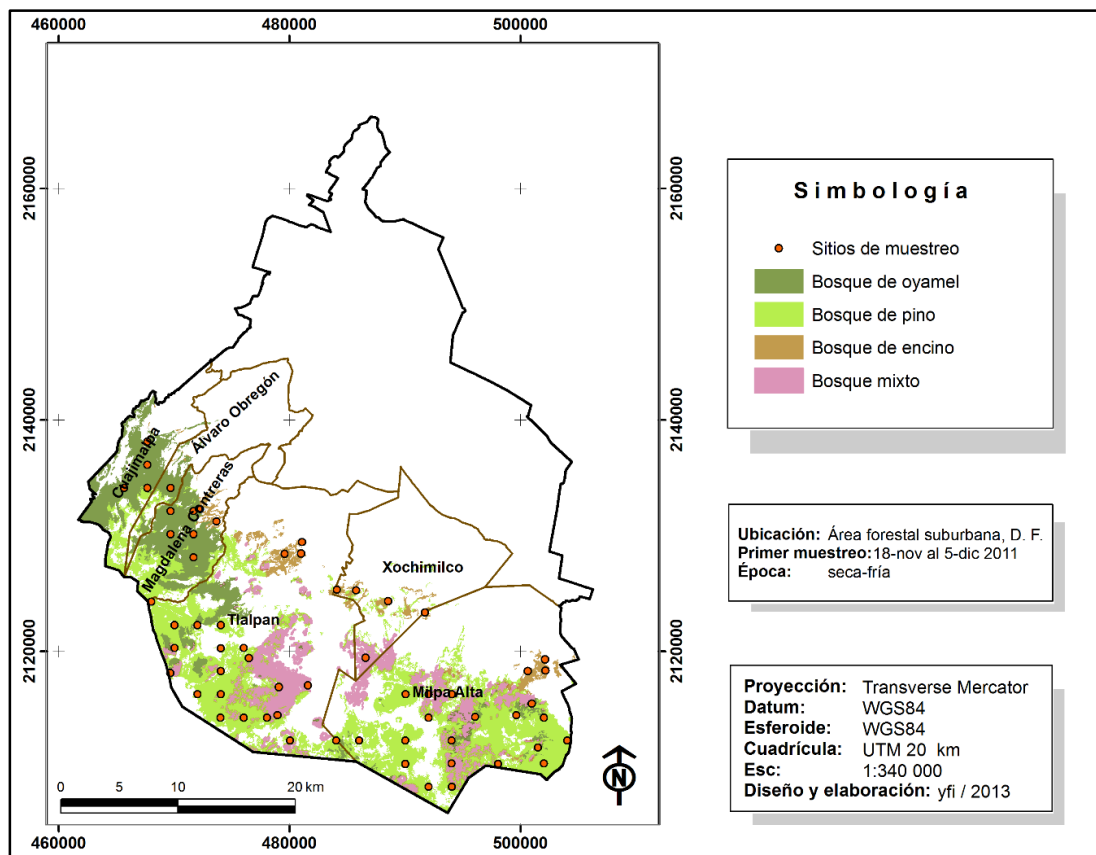


Figura 1.1 Área forestal de conservación del Distrito Federal

Muestreo de Ozono y Dióxido de nitrógeno

El muestreo de contaminantes se realizó en dos épocas del año: seca-fría del 18 de noviembre al 5 de diciembre del 2011 y cálido-seca del 25 de mayo al 15 de junio del 2012. Se tomaron datos de las siguientes variables ambientales por período de muestreo: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), radiación solar (W m^{-2}), índice de radiación ultravioleta (IUV), velocidad del viento (m s^{-1}) y dirección del viento ($^{\circ}$ Azimut), de la red de estaciones meteorológicas del Distrito Federal (REDMET), PEMBU (Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario, UNAM) y Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

Para la determinación de la distribución espacial y concentración de O_3 partes por billón (ppb) y NO_2 ppb; en cada sitio de muestreo de 0.1 hectárea (ha) se

georreferenció, se determinó la pendiente (%) y la altitud (msnm) y se colocó un muestreador pasivo Marca Radiello para O₃ y uno para NO₂, en la parte media lateral de la copa del árbol a 7 m de altura aproximada, en donde se presentara libre circulación del viento, durante 14 días en las dos épocas de muestreo establecidas (Oliva *et al.*, 2001; Radiello, 2006; Espinosa, 2007).

Para la calibración de los muestreadores pasivos, se colocaron dos para NO₂ y dos para O₃, para saturación a 7 y 14 días, del 2 al 26 de septiembre del 2011, en la estación meteorológica Santa Úrsula del SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico de Ciudad de México). El análisis de concentración de NO₂ y O₃ se llevó a cabo de acuerdo al protocolo de laboratorio y se utilizó el factor de corrección de temperatura por altitud (Radiello, 2006).

El análisis de datos de concentración de NO₂ y O₃, y variables ambientales, se realizó con geoestadística (Isaaks and Srivastava, 1989; Emery X., 2007; GS, 2008), mediante el Software SAS Ver. 9.3, (SAS, 2008a), la representación gráfica de la distribución espacial y concentración de los contaminantes y variables ambientales, se realizó en Geostatistical Analyst, ArcGis Ver. 9.3 (ESRI, 2008). Se definió el variograma, como función de correlación espacial (Cely *et al.*, 2002; ESRI, 2008; Moreno, 2008; Gutiérrez, 2011)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (x_i - y_i)^2$$

Donde: $\gamma(h)$ es el variograma teórico y $n(h)$ es el número de puntos x_i, y_i separados a una distancia $h = |x_i - y_i|$

Para determinar las principales variables ambientales que explican la concentración y distribución espacial del O₃ y NO₂, se aplicó el procedimiento no paramétrico GAM-Loess (Modelos aditivos generalizados con suavizamiento), (SAS ver. 9.3) (SAS, 2008b), (Hastie and Tibshirani 1986; Bloomfield *et al.*, 1996; Thompson *et al.*, 1999,

2001; Pearce *et al.*, 2011), (Ecuación 1). Se utilizaron por considerar la tendencia espacial en la concentración del O₃ y NO₂ y las variables ambientales que los condicionan (Carslaw and Beevers, 2007).

$$\text{Ecuación 1: } E(Y|X) = \beta_0 + \beta_1(x_1) + s_1(x_1) + \beta_2(x_2) + s_2(x_2) + \dots + \beta_{p2}(x_p) + s_p(x_p)$$

Donde: $E(Y|E)$ = Esperanza de Y dado los valores de X, β_0 =Ordenada al origen, β_1, \dots, β_p =Coeficientes de regresión del modelo lineal paramétrico; $s_1(x_1), \dots, s_p(x_p)$ =Función de suavizamiento no paramétrico, x_1, x_2, \dots, x_p = Variables independientes.

En la determinación de la concentración de O₃ y NO₂ por estrato forestal y época de muestreo, se realizó un Análisis de Varianza Multivariado y prueba de medias de Tukey con un 95% de confiabilidad (SAS ver. 9.3, SAS 2008c).

1.5 Resultados y discusión

Época seca-fría 2011

Los contaminantes en la Ciudad de México presentan un comportamiento estacional típico; es decir, altas concentraciones de O₃ se presentan en la época cálido-seca (marzo a mayo), primavera y principios del verano y altas concentraciones de NO₂ en la época seca-fría (SMADF, 2012a).

A través del análisis geoestadístico, se determinó la distribución espacial y concentración de O₃ y NO₂ y las variables ambientales que los condicionan. Se obtuvieron los parámetros del semivariograma del modelo ajustado para cada variable y validación cruzada (ESRI, 2008; Moreno, 2008). Los parámetros de validación cruzada indican que la media estandarizada para los contaminantes y las

variables ambientales son 0 y el error cuadrático medio estandarizado es 1, indicando un buen ajuste de los datos a los modelos seleccionados (ESRI, 2008; Moreno, 2008), (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1 Parámetros del semivariograma ajustado para determinar la concentración y distribución espacial de O₃, NO₂ y variables ambientales, en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011

Variable	Mod	Tendencia direccional	Áng (°)	Variograma				Errores de Predicción	
				Efecto pepita	Escala	Rango mayor	Rango menor	ME	RMSE
O ₃	Exp	Isotropía		0.217	0.934	36303		0.005	1.001
NO ₂	Shp	Anisotropía	90	0.237	0.034	11794	11696	-0.011	1.328
Temperatura Hum. Relativa	Shp	Anisotropía	165	0.001	0.005	20430	20408	-0.038	1.279
	Exp	Isotropía		3.804	7.531	20397		0.007	1.075
Rad. Solar	Gau	Anisotropía	150	0.112	0.221	20377	20334	0.012	1.359
IUV	Gau	Anisotropía	150	0.033	0.018	20377	20334	0.032	1.092
Dir. Viento	Gau	Anisotropía	150	0.094	0.355	20377	20335	0.006	1.290
Vel. Viento	Shp	Anisotropía	150	0.021	0.031	20377	20335	0.016	0.951

Mod: Modelo ajustado, Exp: Exponencial, Shp: Esférico, Gau: Gaussiano, Ang: Ángulo, ME: Media estandarizada, RMSE: Raíz del Cuadrado Medio del Error.

Moral *et al.*, (2010) encontraron que aunque la variabilidad espacial es más importante durante la primavera-verano, cuando los niveles de ozono son más altos, también es evidente que durante otoño-invierno existen bajas concentraciones. En la época seca-fría 2011, correspondiente a la estación otoño-invierno se tuvo una concentración máxima de O₃ de 135 ppb menor comparada con la época cálido-seca 2012 (186.15 ppb). La NOM-020-SSA1-1993 (SSA, 1993) indica un límite de 0.110 ppm de O₃ promedio horario; por lo que, la máxima concentración de O₃ para la época seca-fría 2011 (135 ppb = 0.135 ppm) rebasa el umbral establecido por ésta norma.

Zuk *et al.*, (2007) señalan que las concentraciones más altas de O₃, se localizan al sur de la ciudad de México y se relacionan con el comportamiento predominante de los vientos que van de noreste al suroeste. En el Informe de calidad del Aire 2011 (SMADF, 2012a), se señala que las Delegaciones Tlalpan y Álvaro Obregón fueron las más afectadas por ozono con una concentración máxima de 184 ppb. De acuerdo a la representación gráfica de la distribución espacial, la mayor

concentración de O₃ (135.24 ppb), se distribuyó hacia el suroeste, ubicándose en las Delegaciones: Tlalpan, Magdalena Contreras y Cuajimalpa. La dirección promedio del viento fue sur-suroeste, con una velocidad promedio de 2.2 m s⁻¹. (Figura 1.2).

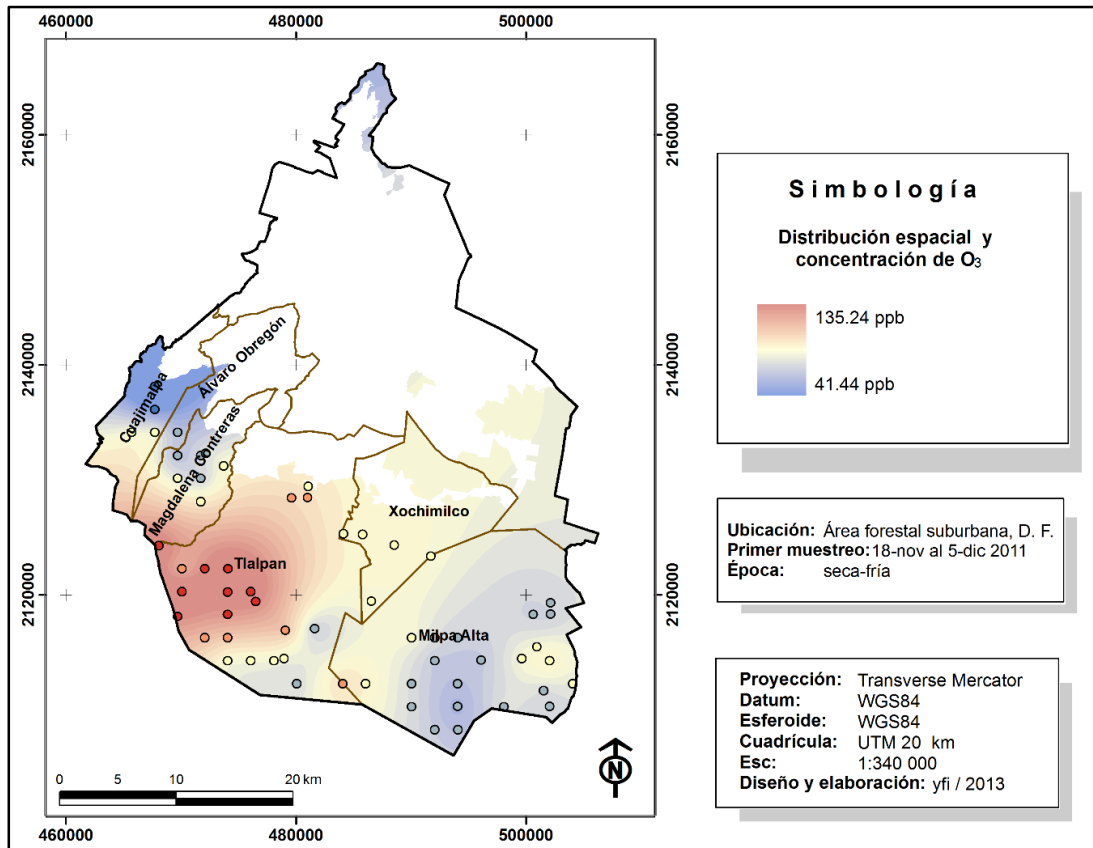


Figura 1.2 Concentración y distribución espacial del O₃ en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011

Borrego *et al.*, (2012) confirmaron la hipótesis de la influencia de la temperatura en la concentración de O₃ en la Ciudad de México. En el año 2011, la temperatura registró un comportamiento estacional, con máximas entre marzo y agosto de 24°C y mínimas en enero y diciembre de 14°C (SMADF, 2012a). El índice promedio de temperatura registrado en la época seca-fría 2011, fue de 13 °C, aún cuando la temperatura fue mínima, ésta determinó la formación de contaminantes secundarios, que de acuerdo con Aldrin and Haff (2005), el O₃ y el NO₂ tienen una respuesta positiva con la temperatura, cuando presenta un rango de 5° a 25°C.

El incremento de la humedad relativa y precipitación son asociadas con bajas concentraciones de O₃ debido a la reducción de la eficiencia fotoquímica (Camalier *et al.*, 2007; Dawson *et al.*, 2007; Di Carlo *et al.*, 2007). En la época seca-fría 2011, el Índice promedio de humedad relativa fue de 52% y la concentración de O₃ de 135 ppb. Los resultados del presente estudio permiten verificar que altos contenidos de humedad relativa, favorecieron la disminución de la concentración de O₃ en el área de estudio.

Alejo *et al.*, (2011) realizaron la cuantificación de NO₂ con captadores pasivos Radiello y mostraron que las concentraciones fluctúan estacionalmente, registrándose mayor índice en el período de invierno. Las concentraciones más altas de NO₂, tienen una distribución temporal con un mínimo en la temporada de lluvia y máximas en invierno (Klaus *et al.*, 2001). En la época seca-fría 2011, se obtuvo la mayor concentración de NO₂ (217.01 ppb), comparada con la época cálido-seca 2012 (94.040 ppb). De acuerdo con Alejo *et al.*, (2011) y SMADF (2012a), la mayor concentración de NO₂ es estacional y en el caso del presente estudio, el mayor índice de concentración de NO₂ se registró en invierno y se distribuyó espacialmente en la zona norte y noroeste del bosque de conservación del Distrito Federal, en las Delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Cuajimalpa (Figura 1.3).

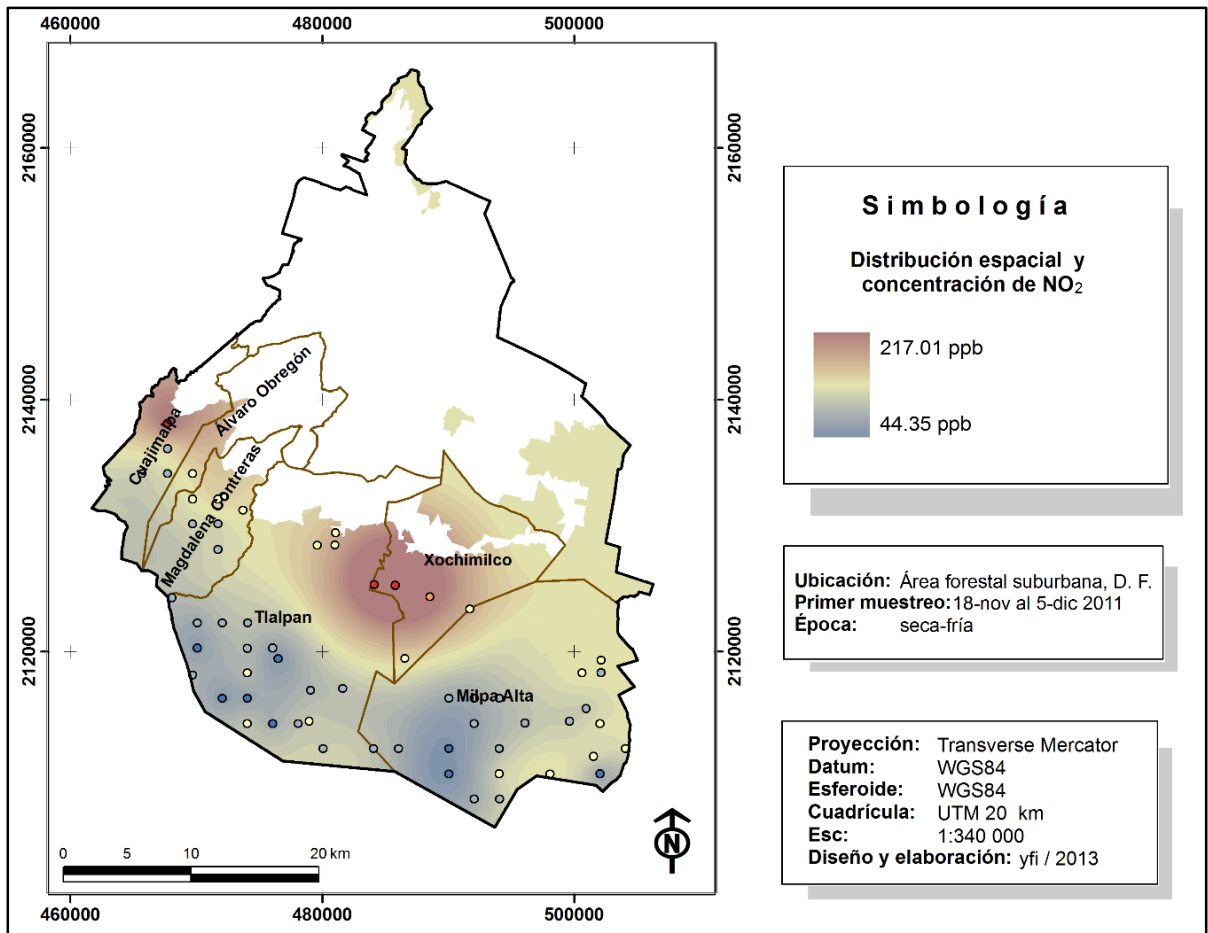


Figura 1.3 Concentración y distribución espacial de NO₂ en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011

La NOM-023-SSA1-1993 (SSA, 1993) indica un límite de 210 ppm de NO₂ promedio horario; por lo que, la máxima concentración de NO₂ para la época seca-fría 2011 (217.01 ppb) encontrándose en el mínimo el umbral establecido por ésta norma.

Las variables climatológicas son el principal factor que condicionan la concentración y distribución de los contaminantes atmosféricos; determinan su relación y comportamiento (Molina y Molina 2004, 2006). A través del análisis (GAM-Loess), se determinaron las variables ambientales que explican la distribución y concentración del O₃ y NO₂ en la época seca-fría 2011. El componente paramétrico (Cuadro 1.2), muestra que la tendencia lineal de las variables temperatura, humedad relativa, radiación solar, IUV y velocidad del viento, son altamente significativas. En el componente no paramétrico (Devianza), las variables significativas son

temperatura e IUV. Por lo tanto las variables que explicaron la concentración y distribución de O₃ en la época seca-fría 2011 en el área de estudio son: temperatura, radiación solar, Índice de radiación UV y velocidad del viento.

Cuadro 1.2 Análisis del Modelo Lineal Generalizado con Suavizamiento para O₃ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011

Parámetro	Componente paramétrico				Aproximación Análisis de Devianza		
	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor t	Pr > t	DF	Valor F	Pr > F
Intercepto	-4.45419E-7	0.08196	-0.00	1.0000			
Altitud	0.21050	0.10701	1.97	0.0576	2.74	2.74	0.0582
Temperatura	-0.71579	0.11742	-6.10	<.0001	3.99	3.99	0.0166
Pendiente	0.13599	0.09858	1.38	0.1770	1.89	1.89	0.1452
Humedad Relativa	0.31502	0.09672	3.26	0.0026	1.39	1.39	0.2633
Radiación solar	-0.65638	0.24953	-2.63	0.0129	1.96	1.96	0.1410
IUV	-1.09026	0.25503	-4.27	0.0002	4.78	4.78	0.0081
Velocidad del viento	-1.18873	0.16434	-7.23	<.0001	2.11	2.11	0.1177

El componente paramétrico y no paramétrico (Cuadro 1.3), indica que las variables temperatura, humedad relativa, radiación solar e IUV, son significativas; siendo la temperatura y la radiación solar las variables que más contribuyeron en la concentración y distribución del NO₂, en el bosque de conservación del Distrito Federal, en la época seca-fría 2011.

Cuadro 1.3 Análisis del Modelo Lineal Generalizado con Suavizamiento para NO₂ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época seca-fría 2011

Parámetro	Componente paramétrico				Aproximación Análisis de Devianza		
	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor t	Pr > t	DF	Valor F	Pr > F
Intercepto	0.00000173	0.08599	0.00	1.0000			
Altitud	-0.20060	0.10362	-1.94	0.0605	3.02889	2.73	0.0573
Pendiente	-0.07902	0.10059	-0.79	0.4371	3.28996	1.33	0.2797
Temperatura	0.67340	0.12317	5.47	<.0001	2.90014	9.73	<.0001
Humedad Relativa	-0.21645	0.10047	-2.15	0.0378	3.02407	2.88	0.0486
Radiación solar	0.71962	0.25756	2.79	0.0082	2.90696	9.48	0.0001
Índice radiación UV	-0.59107	0.25345	-2.33	0.0252	2.82060	3.69	0.0221

La prueba de medias de Tukey para la concentración de O₃ por estrato forestal, mostró que no existen diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre los estratos forestales. El Bosque de pino tuvo 91.54 ppb de O₃, el bosque mixto presentó 89.525 ppb de O₃, el bosque de encino 85.168 ppb de O₃ y el bosque de oyamel 80.850 ppb de O₃.

Las concentraciones de NO₂, por estrato forestal fueron las siguientes: Bosque de encino 114.69 ppb, bosque de oyamel 89.48 ppb, bosque mixto 76.87 ppb y bosque de pino 72.02 ppb de NO₂. Los resultados indican que los bosques de encino presentaron mayor concentración de NO₂ durante la época seca-fría 2011; debido a que éstos se encuentran en los límites de las fuentes de emisión del área urbana y vialidades; así mismo, se infiere que la humedad relativa mayor a 50%, baja temperatura 14°C, bajo índice de radiación solar 189.10 W m⁻², e índice de radiación ultravioleta bajo (IUV=2), (OMS, 2006), propician la reducción de la eficiencia fotoquímica lo que provoca la acumulación de contaminantes precursores como el NO₂.

Época cálido-seca 2012

A través del análisis geoestadístico se determinó la concentración y distribución de O₃ y NO₂ y variables ambientales que los condicionan. Se obtuvo el semivariograma del modelo ajustado y los parámetros de validación cruzada correspondientes (ESRI, 2008, Moreno, 2008) (Cuadro 1.4). De acuerdo con los parámetros de la validación cruzada y para comprobar la validez de los modelos para cada variable, la media estandarizada es próxima a 0 y la raíz del cuadrado medio del error es cercano a 1. Esto indica que los modelos seleccionados se ajustan a los datos.

Cuadro 1.4 Parámetros del semivariograma ajustado para determinar la concentración y distribución espacial de O₃, NO₂ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido-seca 2012.

Variable	Mod	Tendencia direccional	Áng (°)	Variograma				Errores de Predicción	
				Efecto pepita	Esc	Rango Mayor	Rango menor	ME	RMSE
O ₃	Gau	Isotropía		0.013	0.024	20971		0.007	1.161
NO ₂	Shp	Anisotropía	105	0.016	0.888	12134	10049	0.001	1.236
Temperatura	Gau	Isotropía		0.000	0.003	15077		0.002	1.266
Hum. Relativa	Shp	Anisotropía	0	0.001	0.002	20490	20264	0.036	1.070
Rad. solar	Shp	Anisotropía	60	0.000	1.721	22838	14309	0.043	1.249
IUV	Gau	Anisotropía	150	0.076	0.176	20377	20335	0.053	1.040
Dir. Viento	Gau	Anisotropía	165	0.003	0.004	11775	11763	0.007	1.309
Vel. Viento	Shp	Anisotropía	150°	0.010	0.014	20377	20335	0.009	1.143

Mod: Modelo ajustado, Exp: Exponencial, Shp: Esférico, Gau: Gaussiano, Ang: Ángulo direccional, Esc: Escala, ME: Media estandarizada, RMSE: Raíz del Cuadrado medio del error.

García *et al.*, (2009) usando técnicas de modelado de la calidad del aire presentaron un análisis de contaminación atmosférica del 14 al 17 de abril del 2007 en donde la máxima concentración de O₃, fue de 140 ppb. Cerón *et al.*, (2004) en un estudio de variación de las concentraciones de ozono en zonas agrícolas del Valle de México, encontraron máximas concentraciones de O₃ de hasta 200 ppb.

Se puede verificar que la concentración máxima de O₃ (186.15 ppb) para la época cálido-seca 2012, se encuentra entre los valores especificados por García *et al.*, (2009) y Cerón *et al.*, (2004). Así mismo, se puede inferir que el O₃ presenta un comportamiento estacional en el bosque de conservación del Distrito Federal, con mayor concentración en la época cálido-seca, lo que concuerda con lo mencionado por SMADF (2012a), cuyo informe indica que las mayores concentraciones de O₃ se presentan en la época cálido-seca.

La NOM-020-SSA1-1993 (SSA, 1993) establece un límite de 0.110 ppm de O₃ promedio horario; por lo que, la máxima concentración de O₃ para la época cálido-seca 2012 fue de 186.15 ppb = 0.186 ppm; verificándose que este índice es mayor al establecido por ésta Norma.

La producción de altos niveles de ozono está asociada a condiciones soleadas y calurosas (Tarasova and Karpetchko, 2003). Camalier *et al.*, (2007), Banja *et al.*, (2012), indican que el O₃ está asociado con baja humedad relativa y presenta un claro ciclo estacional, atribuido a la radiación solar en el verano. Sanz *et al.*, (2006), determinaron la concentración de O₃ en áreas forestales del suroeste de Europa a través de muestreadores pasivos; encontrando que las máximas concentraciones se presentaron en primavera y verano bajo condiciones climatológicas estables y las mínimas concentraciones se presentaron en invierno.

En función de los resultados obtenidos, los índices promedio de las variables ambientales fueron: temperatura 19 °C, humedad relativa 48%, radiación solar 460 W m⁻², IUV 5 y velocidad del viento 2.5 m s⁻². Se puede verificar que la alta concentración de O₃ en el área de estudio fue atribuida a condiciones soleadas y estables como mencionan Tarasova and Karpetchko (2003) y bajos índices de humedad relativa (Camalier *et al.*, 2007, Banja *et al.*, 2012), así mismo, presentan un comportamiento estacional similar al mencionado en el estudio de Sanz *et al.*, (2006).

Saithan and Mekpariyup (2012) señalan que altas concentraciones de ozono se producen cuando la radiación solar alcanza un rango 48 a 393 W m⁻². En relación a los resultados obtenidos, el índice de radiación solar mínimo fue de 293 W m⁻² y el máximo fue de 460.62 W m⁻², para la época cálido-seca 2012; por lo que los valores especificados se encuentran dentro del rango para la formación de altas concentraciones de O₃.

En el Valle de México las concentraciones más altas de O₃ se localizan al sur de la ciudad y se relacionan con el comportamiento predominante de los vientos que van de noreste a suroeste (Zuk *et al.*, 2007), favoreciendo la acumulación de este contaminante en las montañas circundantes (Klaus *et al.*, 2001). De acuerdo con los resultados y la representación gráfica en el presente estudio, la mayor concentración

de O₃, se ubicó en la zona noroeste, sur, sureste (186.15 ppb) y el menor índice de concentración hacia la zona suroeste (82.30 ppb) (Figura 1.4).

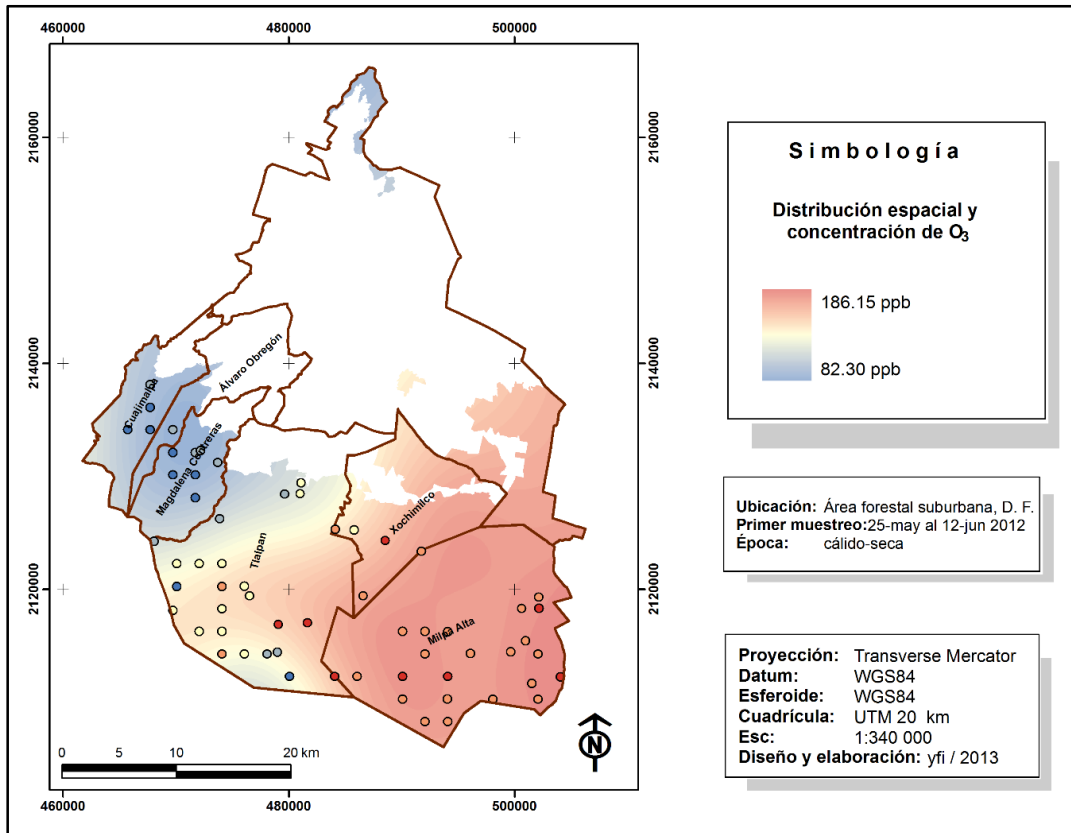


Figura 1.4 Concentración y distribución espacial de O₃ en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido-seca 2012.

Khiem *et al.*, (2010), Pearce *et al.*, (2011) y Meffer *et al.*, (2007), mencionan que altas temperaturas, vientos débiles y alto índice de radiación solar, están asociados a condiciones meteorológicas estables que aceleran la formación, acumulación y dispersión de altos niveles ozono troposférico. Así mismo, Tarasova and Karpetchko (2003), Kovač-Andrić *et al.*, (2009), indican que la variación del O₃ durante el verano es explicado por cambios en la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

De acuerdo con los resultados obtenidos para la época cálido-seca 2012 el máximo promedio de O₃ fue de 186.15 ppb, índice mayor que en la época seca-fría 2011

(135.24 ppb). Las variables ambientales con valores promedio, que se correlacionaron con la concentración de O₃ son: temperatura 19°C, humedad relativa 44%, radiación solar 390 W m⁻², IUV 5, dirección del viento 2.5 m s⁻¹, dirección sur-sureste, sur-suroeste. Por lo tanto, se verifica que bajo condiciones de altas temperaturas, bajo porcentaje de humedad relativa y condiciones estables por días soleados y vientos débiles, favorecieron la mayor concentración de O₃ en el área de estudio.

Elminir (2005) en su estudio encontró que el alto promedio de concentraciones de NO₂ y O₃ ocurren cuando el índice promedio de humedad relativa es menor o igual al 40%. Carslaw and Beevers (2007) a través del análisis GAM, encontraron que las concentraciones de NO_x declinan cuando hay un incremento en la temperatura, este comportamiento es debido a que la temperatura es un indicador de estabilidad atmosférica. Así mismo Pearce *et al.*, (2011) con el uso del análisis GAM, indican que la variable meteorológica más significativa para el ozono fue la temperatura; además, un incremento en la temperatura está asociada con el incremento del ozono.

En la época cálido-seca 2012, se tuvo mayor concentración de ozono (186.15 ppb) y menor concentración de NO₂ (94.040 ppb), la temperatura fue de 19°C y el índice de humedad relativa fue de 48.8%. De acuerdo con Elminir (2005) y Pearce *et al.*, (2011), se demuestra que la concentración de contaminantes secundarios tiende a incrementarse y los contaminantes primarios tiende a disminuir, cuando se presentan temperaturas máximas y el porcentaje de humedad relativa es menor al 50%; este fenómeno acelera la eficiencia fotoquímica sobre los NO_x por acción de la radiación solar originando componentes secundarios como el O₃.

De acuerdo con Carslaw and Beevers (2007) y en relación con los resultados obtenidos, la concentración NO₂ en la época cálido-seca 2012, fue de 94.040 ppb menor a la obtenida en la época seca-fría 2011 217.01 ppb, comprobándose que la concentración de NO₂ tiende a disminuir cuando la temperatura se incrementa.

La NOM-023-SSA1-1993 (SSA 1993) indica un límite de 210 ppm de NO₂ promedio horario, la máxima concentración de NO₂ para la época cálido-seca 2012 fue de 94.040 ppb, en éste período la máxima concentración fue menor al umbral establecido por la norma y se distribuyó espacialmente hacia el norte, sureste y suroeste del bosque de conservación del Distrito Federal, en las Delegaciones Xochimilco, Tlalpan, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Cuajimalpa y Milpa Alta (Figura 1.5).

La distribución espacial del NO₂ para la época cálido-seca 2012, presentó el mismo comportamiento que en la época seca-fría 2011; la mayor concentración (94.040 ppb), se registró en la zona norte y noreste en los bosques de encino.

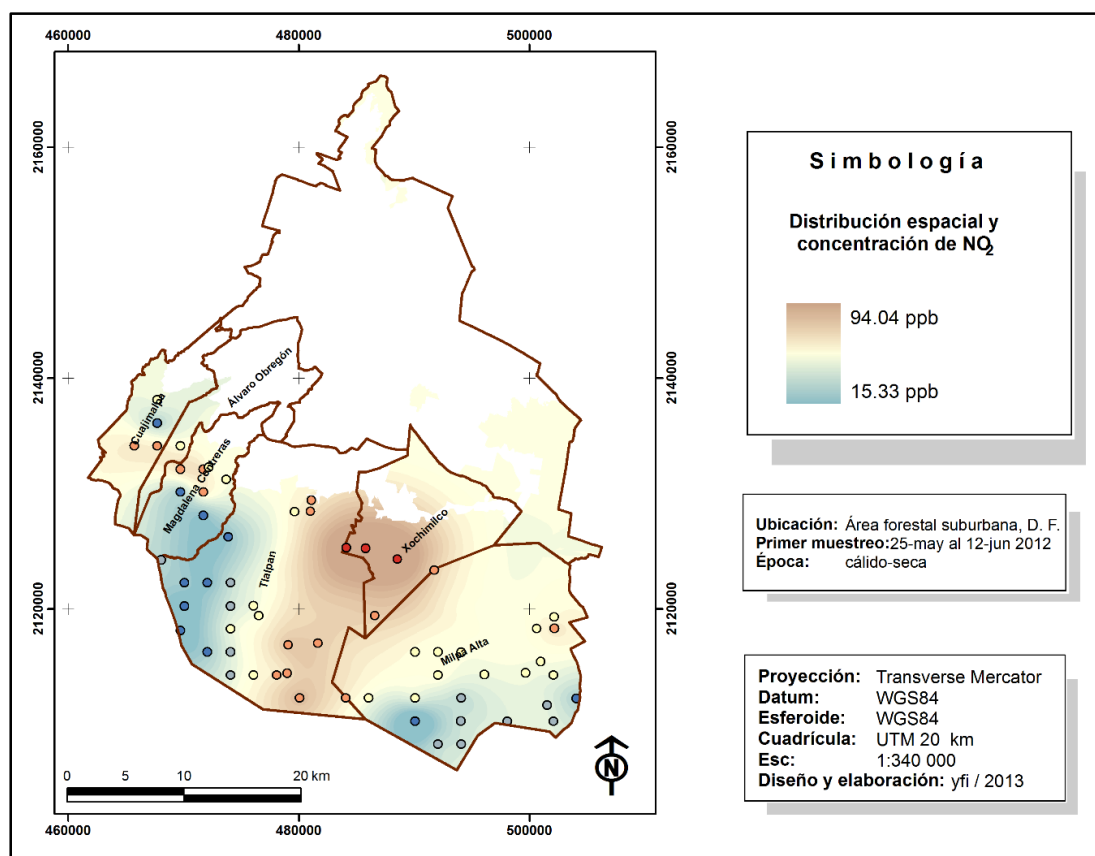


Figura 1.5 Concentración y distribución espacial de NO₂ en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido-seca 2012

La variación en la concentración de ozono está estrechamente relacionada con variables meteorológicas como temperatura (Rojas *et al.*, 2011), radiación solar (Gómez *et al.*, 2006, Ordoñez *et al.*, 2005), dirección y velocidad del viento (Klaus *et al.*, 2001, García *et al.*, 2009) y humedad relativa (Gardner and Dorling, 2000a, b; Thompson *et al.*, 2001, Dueñas *et al.*, 2002), aunado a las características propias de la cuenca (García *et al.*, 2008). De acuerdo con los autores citados y con la aplicación del procedimiento GAM-Loess utilizado en el presente estudio, se determinaron las variables ambientales que explican la distribución y concentración de O₃ y NO₂ en la época cálido-seca 2012.

El componente paramétrico (Cuadro 1.5), indica que las variables de radiación solar y el índice de radiación ultravioleta son linealmente significativas. La Devianza indica que las variables temperatura, humedad relativa y radiación solar, son significativas y conforman el componente no paramétrico. Por lo tanto, las variables ambientales que condicionaron la concentración y distribución del O₃ en la época cálido-seca 2012, en el bosque de conservación del Distrito Federal, son: temperatura alta (19°C), baja humedad relativa (49%), alto índice de radiación solar (460 W m⁻²) e índice de radiación ultravioleta moderado (5) (OMS 2006).

Cuadro 1.5 Análisis del Modelo Lineal Generalizado con Suavizamiento para O₃ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal durante la época cálido-seca 2012.

Parámetro	Componente paramétrico				Aproximación Análisis de Devianza		
	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor t	Pr > t	DF	Valor F	Pr > F
Intercepto	4.778501E-7	0.08706	0.00	1.0000			
Altitud	-0.03974	0.11531	-0.34	0.7321	3.02889	3.15	0.0346
Temperatura	-0.10051	0.13863	-0.73	0.4726	3.07756	6.49	0.0010
Humedad Relativa	-0.03227	0.12110	-0.27	0.7912	3.04000	8.72	0.0001
Radiación solar	-1.01654	0.16361	-6.21	<.0001	3.01661	5.59	0.0026
I UV	0.90559	0.17288	5.24	<.0001	2.93499	1.76	0.1711

En el caso del NO₂ (Cuadro 1.6), en el componente paramétrico las variables significativas son temperatura, humedad relativa, radiación solar e IUV y las variables que contribuyen al componente no paramétrico son temperatura y velocidad del viento. En este período se tuvo una concentración máxima de 94.040 ppb de NO₂, esta concentración es menor que la registrada en la época seca-fría 2011 (217.01 ppb), debido a que los NO_x, reaccionan con la radiación solar formando componentes secundarios como O₃, al mismo tiempo que disminuye la concentración de los contaminantes precursores, la concentración de los contaminantes secundarios aumenta.

Cuadro 1.6 Análisis del Modelo Lineal Generalizado para NO₂ y variables ambientales en el bosque de conservación del Distrito Federal, durante la época cálido seca 2012.

Parámetro	Componente paramétrico				Aproximación Análisis de Devianza		
	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor t	Pr > t	DF	Valor F	Pr > F
Intercepto	4.901E-7	0.08781	0.00	1.0000			
Altitud	-0.028	0.12122	-0.23	0.8172	0.99933	5.27	0.0262
Temperatura	0.764	0.14459	5.28	<.0001	1.00585	6.21	0.0161
Pendiente	-0.008	0.10980	-0.07	0.9422	1.03973	0.55	0.4673
Humedad Relativa	-0.901	0.13217	-6.82	<.0001	1.00315	3.78	0.0577
Radiación solar	0.875	0.23876	3.67	0.0006	0.94564	0.83	0.3619
IUV	-0.939	0.25381	-3.70	0.0006	0.98356	3.07	0.0868
Velocidad del viento	0.195	0.19429	1.00	0.3212	1.00000	8.67	0.0050

Con respecto a la prueba de medias de Tukey, no se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0.05$) para la concentración de O₃, por estrato forestal para la época cálido-seca 2012, el Bosque mixto tuvo una concentración 141.978 ppb, el bosque de pino 132.233 ppb, bosque de encino 128.763 ppb y bosque de oyamel 122.493 ppb. En la prueba de medias de Tukey para la concentración de NO₂ en la época cálido-seca 2012, se obtuvieron diferencias significativas ($\alpha=0.05$): bosque de encino 59.788 ppb, bosque mixto 52.450 ppb, bosque de oyamel 42.511 ppb y bosque de pino 39.109 ppb. La máxima concentración de NO₂ se presentó en los bosques de encino, que se encuentran ubicados en los límites del área urbana del Distrito Federal.

Bauer *et al.*, (2000) indican que la situación de contaminación atmosférica ha llevado a realizar comparaciones entre la calidad del aire de Los Ángeles California (USA) y la Ciudad de México. Miller *et al.*, (1994) encontró que las concentraciones de O₃ fueron más altas en las Montañas San Bernardino durante el verano que en el Parque Nacional Desierto de los Leones ubicado en el Distrito Federal.

Bytnerowicz *et al.*, (2008) señalan que en las Montañas San Bernardino al Sur de California, las concentraciones de O₃ se han elevado alcanzando hasta 600 ppb y promedios estacionales de 60 a 180 ppb, representando los índices más altos reportados para las áreas montañosas en Norte América y Europa. Así mismo, reportan que la concentración de O₃, representa diferencias estacionales, muy bajas en enero y febrero, que gradualmente se incrementan desde marzo hasta julio y disminuyen de noviembre a diciembre.

En el presente estudio, los índices de concentración promedio de O₃ en el bosque de conservación del Distrito Federal fueron de 87.35 ppb para la época seca-fría 2011 y 129.99 ppb para la época cálido-seca 2012. De acuerdo con Bauer *et al.*, (2000) y Miller *et al.*, (1994), se infiere que el O₃, presenta una similitud en el comportamiento estacional y los índices promedio de concentración son relativamente menores comparados con el área de las Montañas San Bernardino, California, señalados por Bytnerowicz *et al.*, (2008).

1.6 Conclusiones

La concentración de O₃ y NO₂, en el bosque de conservación del Distrito Federal, presentaron una tendencia estacional, mayor índice de concentración de O₃ en la época cálido-seca (primavera-verano) y se distribuyó espacialmente en la región sur-suroeste en las Delegaciones Tlalpan, Xochimilco y Milpa Alta. El mayor índice de concentración de NO₂ en la época seca-fría (otoño-invierno) y se distribuyó espacialmente hacia la zona norte-noreste, en las Delegaciones Cuajimalpa, Álvaro

Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan y Xochimilco. La concentración y distribución espacial de estos contaminantes está influenciada por las condiciones climatológicas prevaletientes en la época de muestreo y a las características físicas del sitio de muestreo.

La aplicación de geoestadística fue importante para la predicción de la concentración de los contaminantes y variables ambientales evaluados en el área de estudio y su representación gráfica. Los modelos lineales generalizados con suavizamiento fueron apropiados para evaluar la relación entre contaminantes y variables ambientales debido a que los valores de predicción obtenidos a través de la aplicación de geoestadística presentaron dependencia espacial.

1.7 Literatura citada

- Aldrin, M. y Haff I. H. 2005. Generalized additive modelling of air pollution, traffic volume and meteorology. *Atmos. Environ.* 39, 2145-2155.
- Alejo, S. D., Morales, P. M. C., Van-Espen, P., Torre de la L. J. B., Quintero, A. H., Sosa, R. D., Núñez C. V. 2011. Cuantificación de dióxido de nitrógeno con captadores pasivos Radiello. *Revista Cubana de Química* 2, 66-71.
- Bytneowicz, A., Arbaugh, M., Schilling, S., Fraczek, W. and Alexander, D. 2008. Ozone distribution and phytotoxic potential in mixed conifer forests of San Bernardino Mountains, southern California. *Environ. Pollut.* 155, 398-408.
- Banja, M. D., Papanastasiou, K., Poupkou, A. y Melas, D. 2012. Development of a short-term ozone predictions tool in Tirana area based on meteorological variables. *Atmospheric Pollution Research* 3, 32-38
- Bauer L. I. de, Hernández, T. T. y Skelly, J. M. 2000. Air Pollution Problems in the forested areas of Mexico and Central America. En: *Air Pollution and Forests of Developing and Rapidly Industrializing Regions* (J. L. Innes y A. H. Haron, Eds.) 35-68
- Bloomfield, P. J., Royle, J. A., Steinber, L. J. y Yang, Q. 1996. Accounting for meteorological effects in measuring urban ozone levels and trends. *Atmos. Environ.* 30, 3067-3077.
- BOLFOR., Mostacedo, B. y Fredericksen, T. S. 2000. *Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal*. Editora El País, Santa Cruz, Bolivia. 87 pp.
- Borrego, H. O., Ojeda, R. M. A., García, R. J. A. y Castro, L. C. R. 2012. Interpolación espacial de concentraciones de ozono en la zona metropolitana del Valle de México, basada en métodos de kriging y cokriging. *Facultad de Matemática, Universidad Veracruzana, México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México.* 10 pp.
- Camalier, L., Cox, W., and Dolwick, P. 2007. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends. *Atmos. Environ.* 41, 7127-7137.
- Carslaw, D. C. y Beevers, S. D. 2007. Modelling and assessing trends in traffic related emissions using a generalised additive modelling approach. *Atmos. Environ.* 41, 5289-5299.

- Cely, P. J. W., Siabato, V. W. L., Sánchez, I. A. H., y Rangel, S. A. P. 2002. Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. *Ciencia Investigación Academia Desarrollo* 7, 31-38.
- Cerón, B. J. C., Ramírez, A. J., Cárdenas, G. B., Gutiérrez, A. V. y Blanco, J. N. 2004. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología. México, D. F. 8 pp.
- CORENA. Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal. (2005). Mapa vectorial de vegetación y uso de suelo del Distrito Federal. Esc: 1:50 000.
- Dawson, J. P., Adams, P. J., Pandis, S. N. 2007. Sensitive of ozone to summertime climate in the Eastern USA: a modelling case study. *Atmos. Environ.* 41, 1494-1511.
- Di Carlo, P., Pitari, G., Mancini, E., Gentile, S., Pichelli, E. and Visconti, G. 2007. Evolution of surface ozone in central Italy based on observations and statistical model. *J. Geophys. Res-Atmos.* 10316, 112.
- Dueñas, C. M., Fernández, C., Cañete, S., Carretero, J. y Liger, E. 2002. Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast. *The Science of the Total Environment.* 299, 97-113
- Elminir, H. K. 2005. Dependence of urban air pollutants on meteorology. *The Science of the Total Environment.* 350, 225-237.
- Emery, X. 2007. Apunte de Geoestadística. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Ingeniería de Minas. Universidad de Chile. 144 pp.
- Espinosa, R. M. 2007. Manual de Monitoreo de la Calidad del Aire. México, D. F. 312 pp.
- Environmental Systems Research Institute. ESRI. 2008. ArcGIS 9. Using ArcGIS Geoestatistical Analyst. User Guide. 300 pp.
- García, R. A., Jazcilevich, A., Ruiz, S. L. G., Torres, J. R., Suárez, L. M. and Reséndiz, J. N. A. 2009. Ozone weekend effect analysis in Mexico City. *Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. Atmosfera* 22, 281-297
- García, R. J. A. 2009. Influencia de la meteorología en la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 12, 83-86.

- García, I., Marbán, A., Tenorio, Y. M. y Rodríguez, J. G. 2008. Pronóstico de la concentración de ozono en Guadalajara-México usando redes neuronales artificiales. *Información Tecnológica* 19, 89-96.
- Gardner, M. W. y Dorling, S. R. 2000a. Statistical Surface ozone models: an improved methodology to account for non-linear behavior. *Atmos. Environ.* 34, 21-34.
- Gardner, M. W. y Dorling, S. R. 2000b. Meteorologically adjusted trends in U. K. daily maximum surface ozone concentrations. *Atmos. Environ.* 34, 171-176.
- Gómez, S. J., Martín, G. J. D., Soria, O. E., Villa, F. J., Carrasco, J. L. y Valle, T. S. 2006. Neural networks for analyzing the relevance of input variables in the prediction of tropospheric ozone concentration. *Atmos. Chem. and Phys.* 40, 6173-6180.
- GS. 2008. Geostatistics software. GeoStatistics for the Environmental Sciences. User s Guide Gamma Design Software. Plainwell, Michigan. USA. 172 pp. [En línea]. <http://www.gammadesign.com> 14/05/2012
- Gutiérrez, L. A. G., Ramírez, A., Lebel, T., Santillán, O. y Fuentes, C. 2011. El variograma y el correlograma, dos estimadores de la variabilidad de mediciones hidrológicas. *Rev. Fac. Ing- Univ. Ant.* 59, 193-202
- Hastie, T. and Tibshirani, R. 1986. Generalized Additive Models. *Statistical Science.* 3, 297-318
- Hawthorne, L. B. 2006. Hawth's tools ver. 3.27. Biological Sciences University of Alberta, Canada.
- INEGI. 2012. Perspectiva estadística Distrito Federal. México. 94 pp.
- Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. 1989. Applied Geostatistics. Oxford University Press, Inc. New York. USA. 575 pp.
- Jaimes, P. M. C., Bravo, A. H., Sosa, E. R., y Retama, H. A. 2010. Diseño del monitoreo de precursores oxidantes fotoquímicos en la Ciudad de México y su Área Metropolitana. Fundación MAPFRE. México, D. F. 25 pp.
- Jiménez, C. B. E. 2006. La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería UNAM. Limusa, Noriega Editores. 925 pp.
- Khiem, M., Ooka, R., Huang, H., Hayami, H., Yoshikado, H. y Kawamoto, Y. 2010. Analysis of the relationship between changes in meteorological conditions and the variation in summer ozone levels over the *Central Kanto* area. Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Meteorology.* 349248, 13 pp.

- Klaus, A., Poth A., and Voss, M. 2001. Ozone distributions in Mexico City using principal component analysis and its relation to meteorological parameters, *Atmosfera* 14, 171-188.
- Kovač-Andrić, E., Brana, J. y Gvozdić, V. 2009. Impact of meteorological factor son ozone concentrations modelled by time series analysis and multivariate statistical methods, *Ecological Informatics* 4, 117-122.
- Mefferd, A. D., Morris, G., Clark, C. y Johnson, B. 2007. An analysis of meteorological factors that influence boundary layer ozone concentrations using ozonesonde data from Valparaiso, Indiana, Pellston, Michigan, and Houston, Texas. Dept. of Geography and Meteorology, Valparaiso University. Valparaiso IN. 4 pp.
- Miller, P. R., Bauer, L. I. de, Quevedo, A., y Hernández, T. T. 1994. Comparison of ozone exposure characteristic in forested regions near Mexico City and Los Angeles. *Atmos. Environ.* 28, 141-148.
- Molina, M. J., Molina, L. T. 2004. Megacities and Atmospheric Pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association* 54, 654.
- Molina, L. T. y Molina, M. J. (2006). MILAGRO. Caso de estudio: La zona metropolitana del Valle de México. [En línea]. www.sma.df.gob.mx/simat 24/09/2010
- Moral, G. F. J., Valiente, G. P. and López, R. F. 2010. Geostatistical analysis and mapping of ground-level in a medium sized urban area. *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 2, 72-82
- Moreno, J. A. 2008. Manual de autoaprendizaje con ArcGis. Alfa-Omega, 2ª. Ed. Madrid, España, 754-879.
- Oliva, P., García, K., Cortez, R., Dávila, R., Alfaro, M. R. y Duke, V. 2001. Manual de Laboratorio. Programa Aire Puro para Centro América, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. 102 pp.
- Organización Mundial de la Salud. OMS. 2006. Guía de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Organización Mundial de la Salud. Ginebra, Suiza. 25 pp.
- Ordoñez, C., Mathis, H., Furger, M., Henne, S., Hoglin, C., Staehelin, J., Prevot, A. S. H. 2005. Changes of daily Surface ozone maxime in Switzerland in all seasons from 1992 to 2002 and discussion of summer 2003. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 1187-1203.

- PAOT. 2010. Modelo de análisis tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el suelo de conservación del Distrito Federal. México, D. F. 223 pp.
- Pearce, J. L., Beringer, J., Nicholls, N., Hyndman, R. J. and Tapper, N. J. 2011. Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models. *Atmos. Environ.* 45, 1328-1336
- RADIELLO. 2006. Manual. Fondazione Salvatore Maugeri-Irccs. Centro di Ricerche Ambientali-Padova. 56 pp.
- Rojas, A. D. y Martínez, C J. 2011. Using the bivariate approach to spatial estimation of air pollution by ozone. *Centro de Investigación en Geografía y Geomática. Elsevier. Environ. Sci.* 3, 20-25.
- Saithan, K. and Mekpariyup, J. 2012. Clustering of air quality and meteorological variables associated with high ground ozone concentration in the industrial areas, at the east of Thailand. *International Journal of Pure and Applied Mathematics* 81, 505-515.
- Sanz, M. J. Clatayud, V. y Sánchez P. G. 2006. Measures of ozone concentrations using passive sampling in forests of south western Europe. *Environ. Pollut.* 145, 620-628.
- SAS. Institute Inc. 2008a. The variogram procedure. User's Guide. SAS Institute, Cary, NC. USA.
- SAS. Institute Inc. 2008b. The GAM Procedure. SAS Institute, Cary, NC. USA.
- SAS Institute Inc. 2008c. ANOVA Procedure SAS Institute, Cary, NC. USA.
- SMADF. 2012a. Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2011. México, D. F. 164 pp.
- SMADF. 2012b. Programa general de ordenamiento ecológico del Distrito Federal. [En línea]. <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=61> 22/02/2013
- SSA. 1993. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) de la calidad del aire ambiente. *Diario Oficial de la Federación.* 1° de agosto de 2002.
- SSA. 1993. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) de la calidad del aire ambiente. *Diario Oficial de la Federación.* 1° de agosto de 2002.

- Tarasova, O. A. y Karpetchko, A. Y. 2003. Accounting for local meteorological effects in the ozone time-series of Lovozero (Kola Peninsula). *Atmos. Chem. Phys.* 3, 655-676.
- Thompson, M. L., Reynolds, J., Cox L. H., Guttorp, P. y Sampson, P. D. 1999. A review of statistical methods for the meteorological adjustment of tropospheric ozone. National Research Center for Statistics and the Environment, University of Washington. United States Environmental Protection Agency. Washington, D. C. 38 pp.
- Thompson, M. L., Reynolds, J., Cox, L. H., Guttorp, P. y Sampson, P. D. 2001. A review of statistical methods for the meteorological adjustment of tropospheric ozone. *Atmos. Environ.* 35, 617-630.
- Tle, X., Brasseur, G. and Ying, Z. 2010. Impact of model resolution on chemical ozone formation in Mexico City; application of the WRF-Chem model. *Atmos. Chem. and Phys.* 10, 9801–9838. [En línea]. [http:// www.atmos-chem-phys-discuss.net/10/9801/2010](http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/10/9801/2010) 13/08/2012
- Wenger, K. F., Ostrom C. E., Larson P. R., y Rudolph T. O. 1971. Potential effects of global atmospheric conditions on forest ecosystems. En: "Man's Impact on Terrestrial and Ocean Ecosystems" (W. M. Mathews, F. E. Smith and E.D. Goldberg, Eds). MIT Press. Cambridge Massachusetts, 192-202.
- Xiaopeng, Q., Liang, W., Barker, L., Lekachvili, A. and Xingyou, Z. 2012. Comparison of ArcGIS and SAS Geostatistical Analyst to estimate population-weighted monthly temperature for US counties. *Journal of Resources and Ecology* 3, 220-229.
- Zuck, M., Tzintzun, C. M.G., Rojas, B. L. 2007. Tercer Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas. SEMARNAT, INE. México. 114 pp.

II. CONDICIÓN DE COPA Y DAÑOS DEL ARBOLADO EN EL BOSQUE DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL

2.1 Resumen

La condición de copa es un indicador visual del árbol y la salud del bosque, y son múltiples los factores bióticos, abióticos y antropogénicos que predisponen la condición del árbol. Los efectos de tales factores se manifiestan en la apariencia física de la copa y lesiones en tronco o raíz que afectan su crecimiento, desarrollo y sobrevivencia. El objetivo del presente estudio fue realizar un diagnóstico de la situación actual de la condición de copa y daños del arbolado en el bosque de conservación del Distrito Federal, México. El muestreo se realizó por estrato forestal (Bosque de oyamel, pino, encino y mixto). Se aplicaron modelos lineales de efectos mixtos para el indicador de condición de copa, Índice ajustado de composición foliar (Z_B) e Índice de severidad de daño (ISD). Se utilizó análisis de varianza (ANOVA) Tipo III con efectos fijos. Para todos los árboles evaluados en el bosque de conservación del Distrito Federal, el índice de proporción de copa fue de 44.6%, densidad de copa 49.6%, índice de transparencia de copa 53.03%, índice de muerte regresiva 5.44%, índice Z_B 0.59 e ISD 38.69%. Los factores de daño de mayor incidencia en follaje fueron: ozono, defoliación y enfermedades por hongos. En ramas: muerte, pudrición y canchales causados por hongos; en tronco: fuego, viento, pudrición, descortezado y ocoteo. La mayoría del arbolado presentó una condición de copa "Pobre o no saludable" y el mayor índice de severidad de daño se presentó en el tronco, siendo las especies más afectadas: *Abies religiosa*, *Alnus firmifolia*, *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae*, *Quercus castanea*, *Q. deserticola*, *Q. laurina* y *Q. obtusata*.

Palabras clave: Salud forestal, Índice ajustado de composición foliar, Índice de severidad de daño, ozono.

2.2 Abstract

Crown condition is a visual indicator of tree and forest health, and there are many biotic, abiotic and anthropogenic factors that predispose tree condition. The effects of such factors make evident in the crown physical appearance, injuries in the trunk or root which affect tree growth, performance, and survival. The goal of this study was to do a diagnosis of the current situation of crown condition and tree damage in the conservation forest of Distrito Federal, Mexico. Sampling was carried out by forest stratum (Sacred-fir, Pine, Oak and Mixed-species Forest). Lineal models with mixed effects were applied for the crown condition indicator, adjusted foliage composition index (Z_B) and Damage Severity Index (ISD). TYPE III variance analysis (ANOVA) with fixed effects was used. For all trees assessed in the suburban forest area of Distrito Federal, crown ratio Index was 44.6%, crown density 49.6%, crown transparency 53.03%, crown dieback 5.44%, Z_B 0.59, and ISD Index 38.69. The major injury factors for foliage were: ozone, defoliation and fungal infections. On branches: death, rot and cankers caused by rots; on trunk: fire, wind, rot, bark loss and fire-starting chip extraction. Most trees had a "Poor or Non healthy" crown condition and the highest damage Severity Index occurred on tree trunks. The most affected species were: *Abies religiosa*, *Alnus firmifolia*, *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae*, *Quercus castanea*, *Q. deserticola*, *Q. laurina* and *Q. obtusata*

Key words: Forest health, Adjusted index of foliage composition index, Damage Severity Index, Ozone.

2.3 Introducción

La condición de copa del árbol es un indicador visual importante del árbol y la salud forestal (Randolph and Thompson, 2010). La inherente suposición es que la condición de copa hace referencia sobre la salud del árbol, la relación entre la condición de copa y la vitalidad del árbol (Randolph, 2006). La degradación de la copa del árbol es típicamente el resultado de agentes estresantes (Kenk, 1990) y cuando son de mayor incidencia, puede resultar en la muerte de éste.

Los factores bióticos y abióticos determinan el vigor relativo de los árboles, esto incluye factores fisiológicos y externos tales como la edad, densidad del sitio, genética, problemas de plagas y enfermedades, tendencias climáticas, luz, agua, disponibilidad de nutrientes y prácticas de manejo. Los efectos de estos factores frecuentemente se manifiestan en la apariencia física de las copas de los árboles (Schomaker *et al.*, 2007).

Cuando un estresor natural o antropogénico impacta a un bosque, los primeros signos de deterioro son frecuentemente observados en las copas de los árboles (Schomaker *et al.*, 2007). La evaluación y monitoreo de condición de copa permite determinar cuantitativamente las condiciones actuales de un árbol y proporcionan una medida integrada de las condiciones del sitio, densidad del rodal e influencia externa de estrés (Ferreti, 1997; Alvarado y Saavedra, 2012).

El presente estudio tuvo como objetivo conocer el estado actual de la condición de copa y daños presentes en el arbolado del bosque de conservación del Distrito Federal, a través del Indicador de condición de copa e Indicador de daño.

2.4 Materiales y métodos

Ubicación del área de estudio

El Distrito Federal se localiza en el suroeste de la cuenca de México y cuenta con una superficie de 149,674 ha. Se divide en suelo urbano con una extensión de 61,232 ha y suelo de conservación con 88,442 (59%). El suelo de conservación, limita al norte, este y oeste con el Estado de México y al sur con el Estado de Morelos. El área de estudio se localizó en las Delegaciones: Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco (SMADF, 2012), (Figura 2.1).

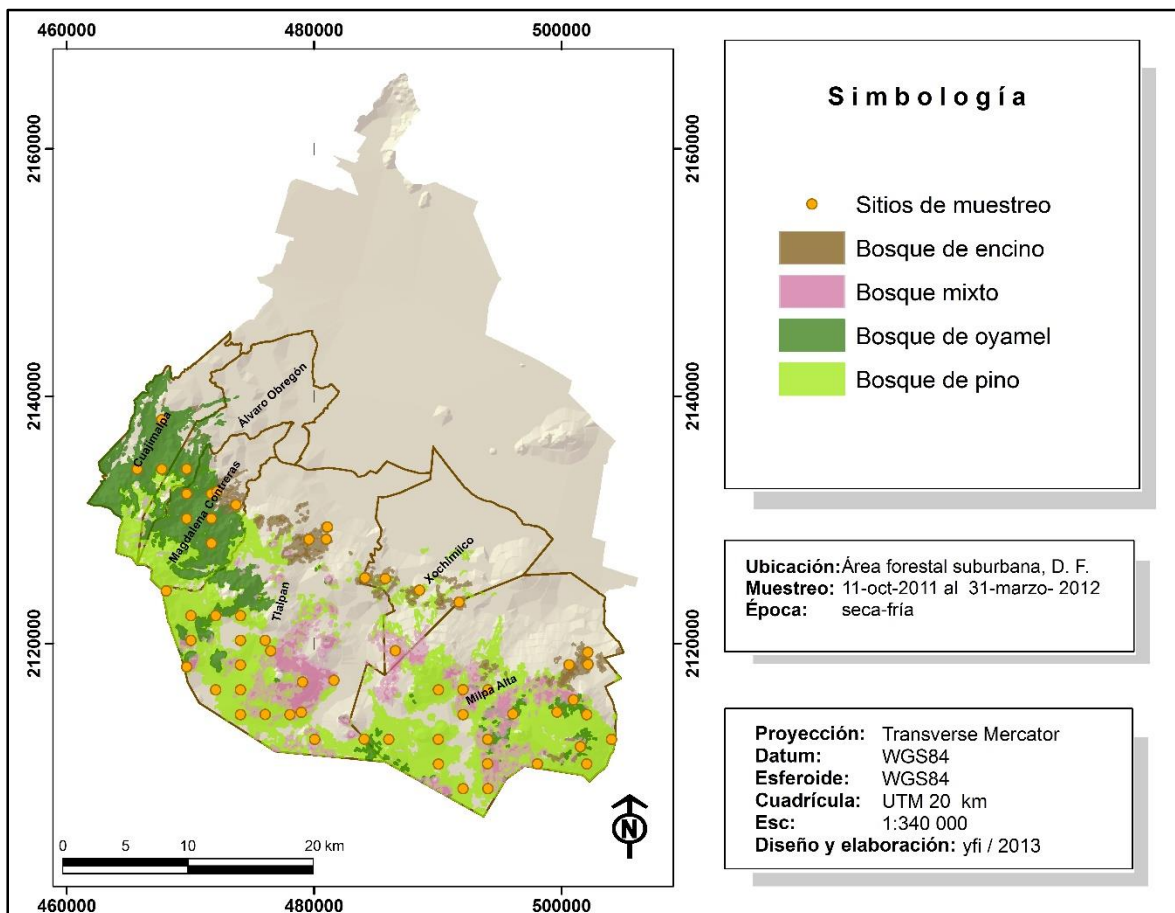


Figura 2.1 Sitios de muestreo en el bosque de conservación del Distrito Federal

Indicador de condición de copa

El muestreo se llevó a cabo en el período de julio del 2011 a febrero del 2012, en 62 sitios de muestreo distribuidos en los tipos de vegetación: Bosque de encino, mixto, oyamel y pino. Cada individuo vivo del estrato arbóreo ≥ 7.5 cm de diámetro normal (dn), en cada sitio de muestreo, se numeró y se tomó los siguientes datos: especie, proporción de copa viva (PrC), posición de copa (PoC), densidad de copa (DnC), transparencia de copa (TrC), muerte regresiva (Mreg), exposición de copa a la luz (ExpL), (Burkman *et al.*, 1995; Betchtold and Radolph, 2007; Eichhorn *et al.*, 2010; Randolph *et al.*, 2010, ICP Forests, 2010, Alvarado y Saavedra, 2012). Los índices de PrC, DnC, Mreg y TrC se evaluaron en rangos de 0 a 99% y se aplicaron las siguientes categorías: DnC y PrC 0-20% “pobre”, 21-50% “promedio”, 51-100% “buena”; Mreg 6-20% “ligera”, 21-50% “moderada”, 51-100% “severa”; TrC 0-30% “normal”, 31-50% “moderada” y 51-100% “severa” (Betchtold and Radolph, 2007). Posición de copa del árbol: dominante (Dom), codominante (Cod), suprimido (Sup) y en claros (Cla) (Schomaker *et al.*, 2007).

Los índices de muerte regresiva y transparencia de follaje (Burkman *et al.*, 1995; Betchtold and Randolph, 2007), se utilizaron para determinar el Índice ajustado de composición foliar para cada árbol (Z_B) (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004), este índice representa la cantidad por la cual el follaje del árbol está reducido comparado con un árbol completamente foliado, un índice de TrC $> 25\%$ indica una pobre condición de copa o copa no saludable (Coulston *et al.*, 2005). El índice de severidad de daño (ISD en %), representa el promedio de múltiples daños, ubicación y severidad de éstos. La evaluación de los factores de daño en el arbolado se realizó en base a síntomas visibles: 1. Parte del árbol afectada, 2. Causa o agente (bióticos, abióticos, antropogénicos y contaminantes), 3. Cuantificación o extensión del síntoma (Cibrián *et al.*, 2007; Eichhorn *et al.*, 2010, ICP Forests, 2010). Un ISD $>15\%$, indica múltiples daños, severos tipos de daño y/o muchos daños en la parte inferior del árbol. ISD $< 15\%$, indica el mínimo daño considerado como normal y cercano a una condición saludable del sitio (Stolte *et al.*, 2002).

Análisis de datos

El índice ajustado de composición foliar (Z_{β}) (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004), se determinó con la siguiente ecuación:

$$Z_{\alpha} = \left[1 \left(1 - \frac{(T-15)}{100} \right) \left(1 - \frac{D}{100} \right) \right] \quad \text{Si } T \geq 15$$

$$Z_{\alpha} = \frac{D}{100} \quad \text{Si } T < 15$$

Donde: T= transparencia de copa (%), D= muerte regresiva (%)

Para determinar la condición de copa del arbolado, índice ajustado de composición foliar (Z_{β}) e índice de severidad de daño (ISD), se aplicaron modelos lineales de efectos mixtos (Randolph and Moser, 2004), debido a que las observaciones presentaron una variabilidad heterogénea y no se ajustaron a distribución normal (Calama y Montero, 2004; Angulo, 2011). Los índices se evaluaron en unidades homogéneas: tipo de vegetación, clasificación de especies (Coníferas y latifoliadas) y especie. Se determinó la media por unidad y ubicación de la copa del árbol (Angulo, 2011), (Shomaker *et al.*, 2007) (Ecuación 1).

Ecuación 1. $\gamma = X\beta + Z + \epsilon$

Los índices del indicador de copa e índice Z_{β} , fueron modelados individualmente como la variable respuesta γ , el tipo de vegetación y especie como el efecto fijo (X) y la ubicación de la copa del árbol (PoC) como efecto-al azar (Z) y ϵ vector de errores. Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) Tipo III de efectos fijos (Poc), para evaluar la hipótesis nula de que la variable (Poc) es igual a 0 y puede ser rechazada a un nivel de significancia $\alpha=0.05$.

La representación gráfica de la distribución espacial de los índices del indicador de copa PrC, DnC, TrC, Mreg, índice Z_{β} e ISD, se realizó en Geostatistical Analyst, ArcGis ver. 9.3 (ESRI, 2008).

2.5 Resultados

Indicador de condición de copa

El indicador de condición de copa fue evaluado en 1784 árboles de 27 especies, de las cuales 14 presentaron 22 o más individuos (Anexo Cuadro 2.3). Del total de árboles muestreados 856 fueron coníferas (47.98%) y 52.02% (928 árboles) latifoliadas. Por tipo de vegetación 817 árboles correspondieron al bosque de encino (45.80%), 194 árboles (10.87%) al bosque mixto, 322 árboles (18.05%) al bosque de oyamel y 451 árboles (25.28%) al bosque de pino (Anexo Cuadro 2.4). Se obtuvo un rango de PrC de 0-99% con una media de 44.6%, para todo el arbolado evaluado. Por clasificación de especies (coníferas y latifoliadas) y tipo de vegetación (bosque de encino, bosque mixto, bosque de pino y bosque de oyamel. En el análisis de varianza para el índice de PrC (en porcentaje) por ubicación de copa del árbol (PoC), los resultados indican que hubo diferencias significativas ($\alpha=0.05$) (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Análisis de varianza de los índices PrC, DnC y TrC para todos árboles evaluados, por clasificación de especies, tipo de vegetación y especie, en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Unidad	Efecto	Prueba de efectos fijos					
		PrC		DnC		TrC	
		Tipo III F	Pr>F	Tipo III F	Pr>F	Tipo III F	Pr>F
Todos los árboles	PoC	3.48	0.0154	6.01	0.0001	5.23	0.0001
Coníferas	Clasif*PoC	5.63	0.0008	13.44	0.0001	19.75	0.0001
Latifoliadas	Clasif*PoC	10.48	0.0001	26.20	0.0001	36.07	0.0001
Bosque de encino	Veg*PoC	7.41	0.0006	18.91	0.0001	31.57	0.0001
Bosque mixto	Veg*PoC	2.32	0.0736	1.56	0.1972	2.41	0.0650
Bosque de oyamel	Veg*PoC	2.26	0.1051	28.85	0.0001	20.99	0.0001
Bosque de pino	Veg*PoC	5.71	0.0007	4.67	0.0030	8.16	0.0001
Especie	Esp*PoC	3.13	0.0001	3.77	0.0001	321.88	0.0001

PrC= Proporción de copa viva, DnC=Densidad de copa, TrC= Transparencia de copa, PoC= Posición de la copa del árbol, Clasif= Clasificación de las especies, Veg=Tipo de vegetación y Esp=Especie

Las especies que presentaron un índice de PrC bueno ($> 51\%$) fueron *Abies religiosa*, árboles en Cla 54.0, *Alnus firmifolia* Cod 65.50, *Cupressus lusitanica* Sup 68.36, *Pinus hartwegii* Cla 90.0, *Pinus montezumae* Cla 75.0, *Pinus rudis* Dom 67.50, *Quercus crassipes* 65.0 y *Quercus rugosa* 52.95. Las especies que tuvieron un índice de PrC Promedio fueron *Quercus Castanea*, árboles Cod 37.12; *Quercus desertícola* árboles Dom 45.65, *Q. laurina* árboles Cod 40.68 y *Q. obtusata* árboles Dom 48.81%.

En la representación gráfica (Figura 2.2), el índice de PrC por sitio, presentó un patrón de tendencia. Se muestra que los sitios ubicados hacia el sur, suroeste que corresponden al bosque de pino, oyamel y mixto, presentaron los mayores índices de PrC. Así mismo, sólo dos sitios presentaron un menor índice de PrC “pobre” y corresponden al bosque de encino.

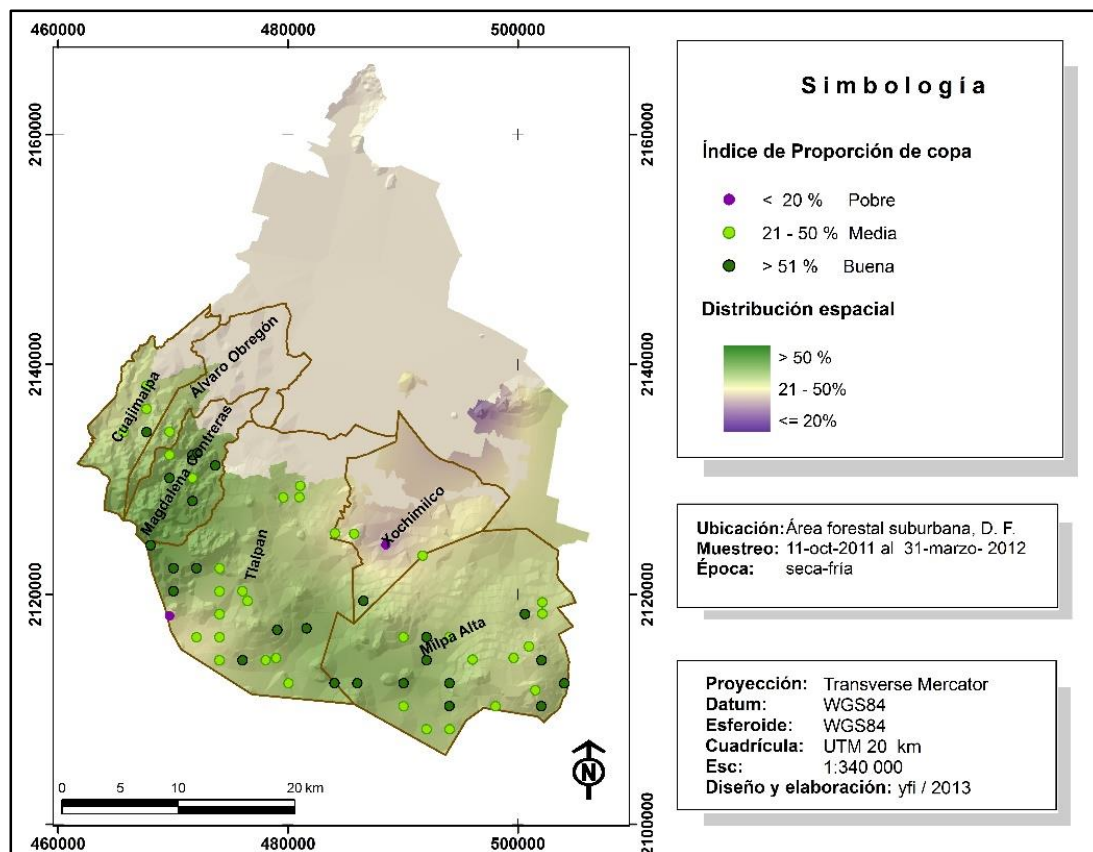


Figura 2.2 Mapa del Índice de proporción de copa en el bosque de conservación del Distrito Federal.

El índice de densidad de copa (DnC en Porcentaje), presentó un rango de 0 a 95% y un índice “promedio” (49.62%), para todo el arbolado evaluado, categorizado por Betchtold and Radolph (2007b). Por grupo de especies en las coníferas el índice DnC fue “bueno” (55.4), en latifoliadas el índice de DnC fue “promedio” (44.3). El análisis de varianza para DnC, mostró que hubo diferencias significativas ($\alpha=0.05$) (Cuadro 2.1).

Los mayores índices de DnC por PoC fueron los siguientes: árboles en claros el índice de DnC fue “buena” y correspondió a *Pinus hartwegii* con 73.33 y *Pinus montezumae* 55.0. Árboles Dominantes con DnC “buena”: *Abies religiosa* 61.06, *Pinus montezumae* 59.86, *Quercus deserticola* 51.88 y *Quercus rugosa* 54.77. Árboles Cod con DnC “buena” correspondieron a las especies *Abies religiosa* 57.43, *Alnus firmifolia* 55.33, *Cupressus lusitanica* 55.87, *Pinus hartwegii* 56.11, *Pinus rudis* 64.29, *Quercus* y *crassipes* 60.42; árboles Cod con DnC “promedio”: *Quercus castanea* 43.73, *Quercus laurina* 46.08 y *Quercus obtusata* 41.49.

En la representación gráfica del índice de DnC del bosque de conservación del Distrito Federal (Figura 2.3), se puede apreciar que los índices de DnC “promedio”, se localizan hacia el área norte – noreste, donde se ubica el bosque de encino ubicados en los límites del área urbana. Así mismo, índices de DnC “buena” se localizan hacia el sur, sureste y suroeste del Distrito Federal, que corresponden a los bosques de oyamel, pino y mixto.

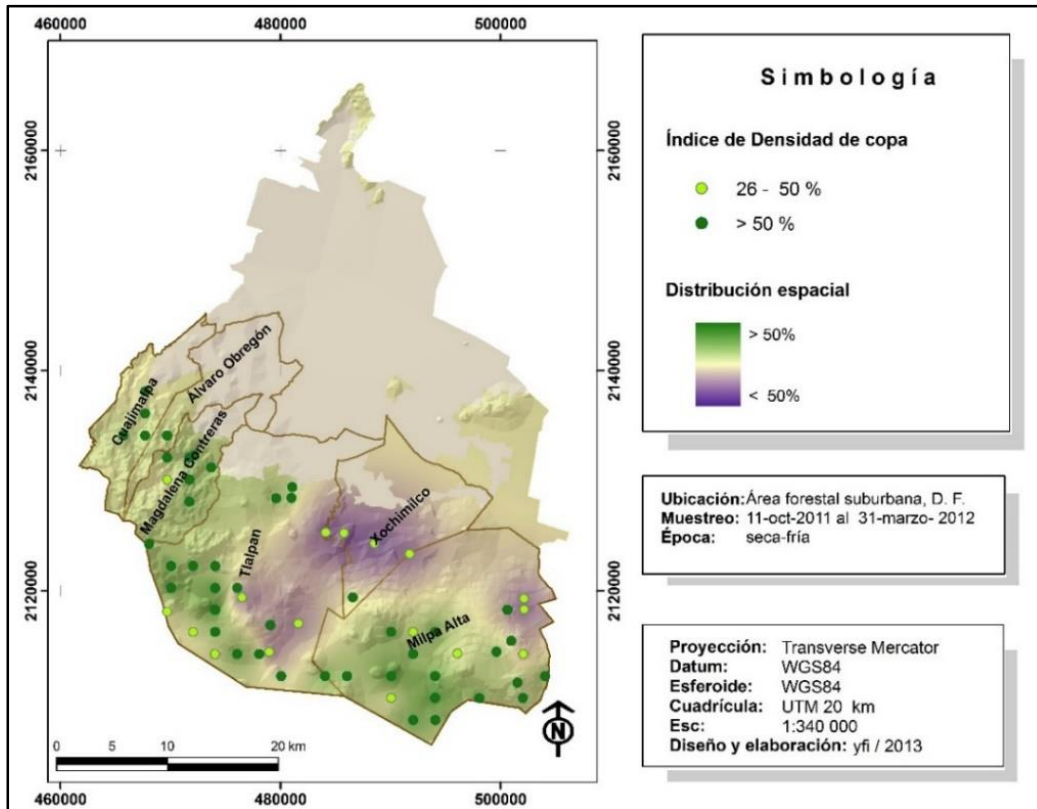


Figura 2.3 Mapa del Índice de densidad de copa del arbolado en el bosque de conservación del Distrito Federal

El índice de transparencia de copa (TrC en Porcentaje), presentó un rango de 0 a 95% y un índice TrC de 53.03% “severa” (Betchtold and Radolph, 2007b), para todo el arbolado muestreado. El análisis de varianza para TrC por ubicación de la copa del árbol, mostró diferencias significativas ($\alpha=0.05$) (Cuadro 2.1).

En el análisis del índice de TrC por especie y ubicación de copa del árbol, el mayor índice de TrC “severa” se presentó en árboles suprimidos en todas las especies evaluadas. *Abies religiosa* 55.34, *Alnus firmifolia* 60.0, *Cupressus lusitanica* 49.73, *Pinus hartwegii* 55.10, *Pinus montezumae* 48.89, *P. rudis* 50.91, *Quercus castanea* 66.81, *Q. crassipes* 56.55, *Q. deserticola* 83.0, *Q. laurina* 76.03, *Q. obtusata* 70.0 y *Q. rugosa* 52.55.

En el mapa del índice de TrC en el bosque de conservación del Distrito Federal, se muestra que los mayores índices de TrC se localizaron hacia el norte y noreste, en los bosques de encino. Así mismo, se puede apreciar que los menores índices de TrC se localizan hacia la zona sur, suroeste del área de estudio y corresponden al bosque mixto, bosque de oyamel y bosque de pino, cuyas especies representativas por tipo de vegetación son perennifolias que presentaron la mayor parte del follaje en la época evaluada (Figura 2.4).

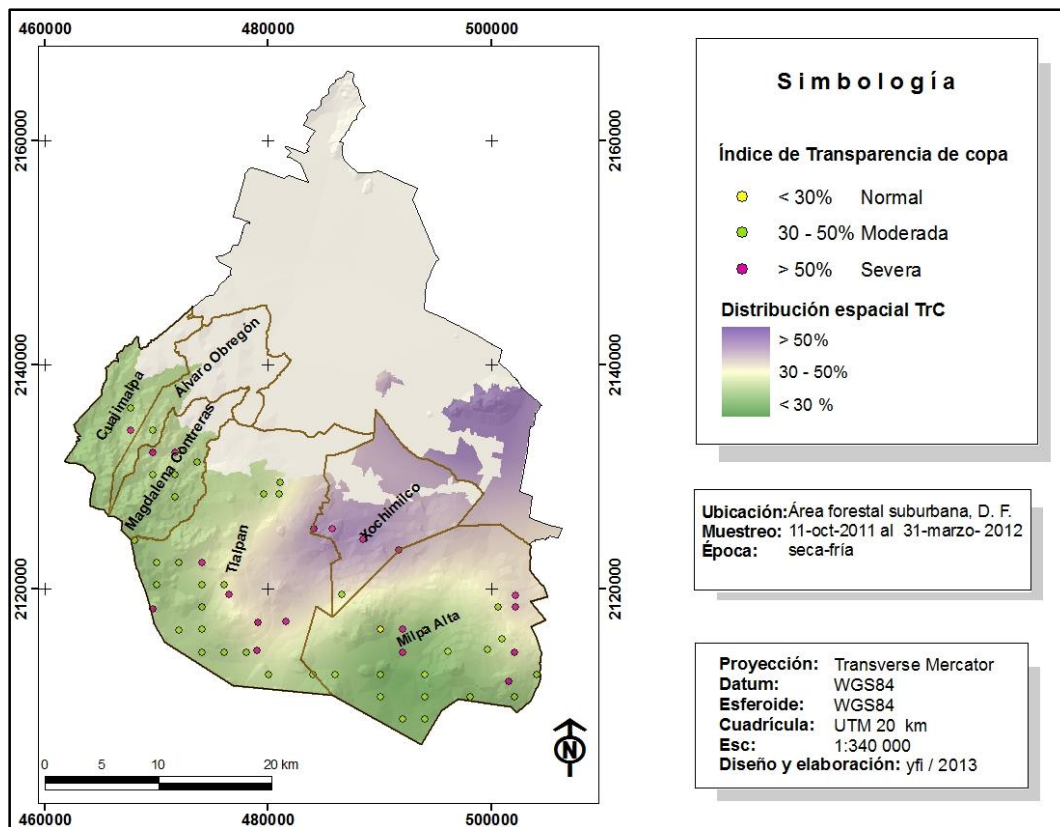


Figura 2.4 Mapa del Índice de Transparencia de copa en el bosque de conservación del Distrito Federal.

En lo referente al índice de exposición a la luz, a través del análisis de varianza se verificó que hubo diferencias significativas ($\alpha=0.05$), por ubicación del árbol (Poc), $\rho=0.0001$ (Cuadro 2.2). En el índice de ExpL por especie fue heterogéneo; las especies *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus montezumae* y *Quercus deserticola* en promedio presentaron 4 a 5 lados expuestos a la luz. *Pinus*

hartwegii, *Pinus rudis*, *Alnus firmifolia*, *Quercus castanea*, *Q. crassipes*, *Q. laurina*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa*, presentaron en promedio de 1 a 2 lados expuestos a la luz.

El índice promedio de Mreg fue de (5.44%) y un rango de 0 a 90%. A través del análisis de Mreg por PoC los resultados del análisis de varianza muestran que no existen diferencias significativas ($\alpha=0.05$), (Cuadro 2.2). Por clasificación de vegetación en coníferas se tuvo un índice de Mreg “normal” (3.9) y en latifoliadas un índice de Mreg “ligero” (7.50), categorizado por Betchtold and Radolph (2007b). En la representación gráfica del índice de Mreg en el bosque de conservación del Distrito Federal, se puede apreciar que dos sitios correspondientes al bosque de encino presentaron un índice de Mreg “Moderada”. Así mismo, se puede observar que el índice Mreg “Ligera” se ubica hacia el lado sur suroeste del Distrito Federal, en donde se ubican los bosques mixtos, de pino y oyamel (Figura 2.5).

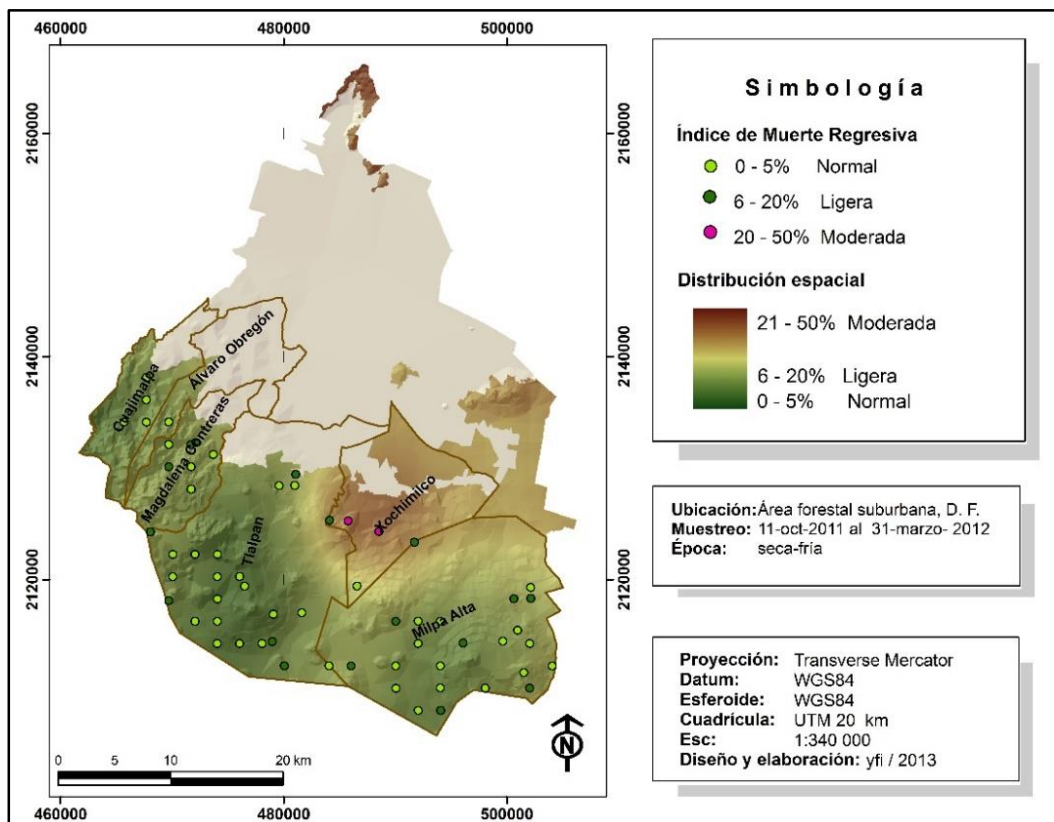


Figura 2.5 Mapa del Índice de Muerte regresiva en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Cuadro 2.2. Análisis de varianza de los índices ExpL, Mreg y Z_B para todos árboles evaluados, por clasificación de especies, tipo de vegetación y especie, en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Unidad	Efecto	Prueba de efectos fijos					
		ExpL		Mreg		Z_B	
		Tipo III F	Pr>F	Tipo III F	Pr>F	Tipo III F	Pr>F
Todos los árboles	PoC	114.22	0.0001	0.27	0.0001	3.09	.
Coníferas	Clasif*PoC	117.13	0.0001	0.28	0.8405	13.06	0.0001
Latifoliadas	Clasif*PoC	64.21	0.0001	15.20	0.0001	28.12	0.0001
Bosque de encino	Veg*PoC	50.14	0.0001	16.64	0.0001	25.16	0.0001
Bosque mixto	Veg*PoC	26.58	0.0001	1.41	0.2380	2.11	0.0966
Bosque de oyamel	Veg*PoC	68.69	0.0001	2.21	0.1104	15.13	0.0001
Bosque de pino	Veg*PoC	53.73	0.0001	0.24	0.8651	5.52	0.0009
Especie	Esp*PoC	49.99	0.0001	2.75	0.0001	2.75	0.0001

ExpL= Número de lados de la copa expuestos a la luz, Mreg=Muerte regresiva, Z_B =Índice ajustado de composición foliar, PoC= Posición de la copa del árbol, Clasif= Clasificación de las especies, Veg=Tipo de vegetación y Esp=Especie.

Índice ajustado de composición foliar (Z_B)

De acuerdo con el Índice ajustado de composición foliar, para todos los árboles evaluados, los índices obtenidos fueron mayores a Z_B 0.25 (Anexo Cuadro 2.4), en general el arbolado presentó una pobre condición de copa o copas no saludables (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004). En el análisis de varianza para el índice de composición foliar (Z_B), con un nivel del significancia de $\alpha=0.05$, hubo diferencias significativas, excepto para el Bosque Mixto $\rho=0.0966$ (Cuadro 2.2).

El índice de composición foliar Z_B , indica que las especies arbóreas evaluadas presentaron una condición de copa pobre o no saludable (Anexo Cuadro 2.3). En el mapa del Índice Ajustado de composición foliar Z_B , no se muestra ninguna tendencia puesto que el menor índice de Z_B por sitio fue de 0.33 y el mayor Z_B 0.88 (Figura 2.6).

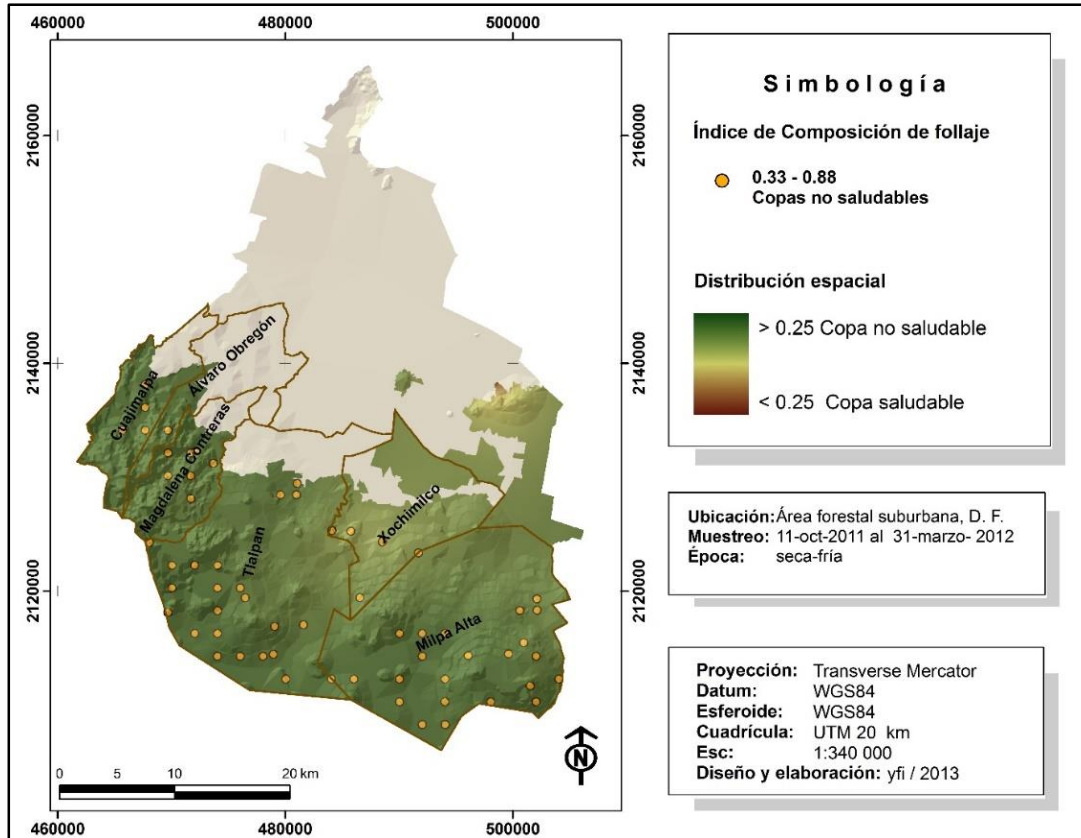


Figura 2.6 Mapa del Índice ajustado de composición foliar del arbolado por sitio de muestreo, en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Agentes de daño

En el análisis de agentes de daño por ubicación, de 1784 árboles evaluados, 147 árboles presentaron daños en el follaje, 210 árboles presentaron daños en ramas y 626 árboles presentaron daños en el tronco. Por tipo de vegetación en el bosque de encino, de un total de 817 árboles el 53.73% del arbolado presentó daños. En el bosque mixto de un total de 194 árboles, el 53.61%. Bosque de Oyamel de un total de 322 árboles, el 39.13%. Bosque de pino de un total de 451 árboles, el 69.62% del arbolado presentó daños. Las especies que presentaron mayor porcentaje de árboles dañados fueron: *Abies religiosa*, *Alnus firmifolia*, *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae*, *Quercus castanea*, *Quercus crassipes*, *Quercus deserticola*, *Quercus laurina* y *Quercus obtusata*. Se tuvo un índice de severidad de daño (ISD%)

promedio de 34.99. Por tipo de vegetación el bosque de encino presentó un ISD de 39.17, bosque mixto ISD 30.56, bosque de oyamel ISD 34.51 y bosque de pino ISD 39.65 (Anexo cuadro 2.5). Todas las especies arbóreas evaluadas presentaron un ISD > 15: *Abies religiosa* ISD 35.0, *Alnus firmifolia* ISD 41.3, *Cupressus lusitanica* ISD 36.2, *Pinus hartwegii* ISD 37.3, *P. montezumae* ISD 42.0, *Quercus castanea* ISD 46.5, *Q. crassipes* ISD 40.1, *Q. rugosa* ISD 43.0, *Q. obtusata* ISD 39.2 *Q. laurina* ISD 35.0, *Q. deserticola* ISD 28.4 y *Pinus rudis* ISD 28.1 (Anexo cuadro 2.6)

En el mapa de Índice de severidad de daño por sitio, se aprecia que los menores índices se ubicaron en el área noroeste y que corresponde a los bosques de oyamel, los ISD más altos se ubican hacia el área sur, suroeste y sureste y corresponde a los bosques de pino, bosque mixto y bosque de encino (Figura 2.7).

Los signos más significativos en coníferas fueron: defoliación ISD 25.56, ramas muertas ISD 41.76, desmoche ISD 46.87, ocoteo ISD 35.33 y pudrición en tronco ISD 37.50. En latifoliadas: brotes epicórmicos ISD 76.11, clorosis ISD 36.21, descortezado ISD 36.67, ramas muertas ISD 27.77, pudrición de ramas ISD 19.82, defoliación ISD 73.75, desmoche ISD 15.0, ramas muertas ISD 27.77 y pudrición en tronco ISD 27.60.

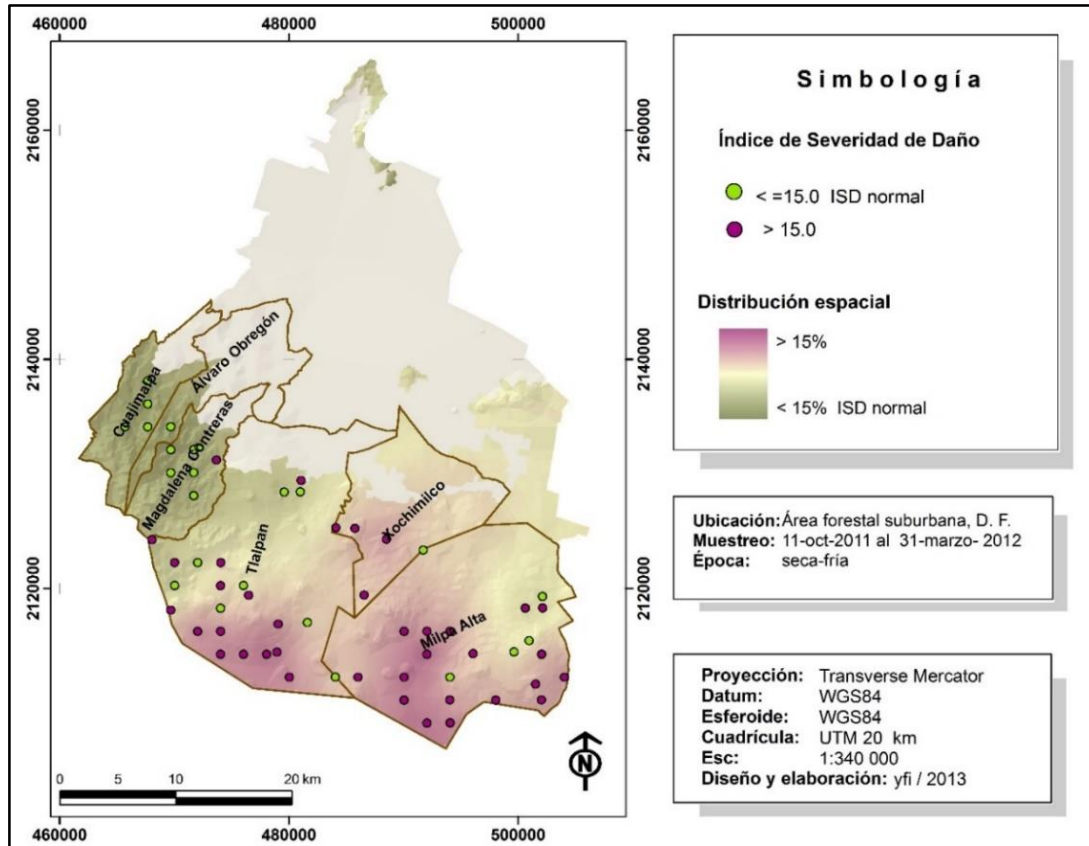


Figura 2.7 Mapa del Índice de Severidad de Daño del arbolado por sitio de muestreo, en el bosque de conservación del Distrito Federal.

En el análisis de varianza para el ISD, por ubicación en el árbol, categoría general y agente, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, hubo diferencias significativas en los conceptos evaluados $p=0.0001$. Los ISD más significativos fueron los siguientes: Para todos los árboles evaluados: en follaje ISD 27.37 por Ozono, ISD 35.91 por *Apiognomonía quercina*, ISD 43.41 por *Pestalotiopsis funerea* e ISD 48.75 por insectos defoliadores. En ramas ISD 27.14 por viento, ISD 28.82 por *Seiridium unicornes*, ISD 19.82 por pudrición, ISD 30.64 por ramas muertas e ISD 62.03 por defoliación. En tronco ISD 48.27 por fuego, ISD 37.02 por viento, ISD 32.69 por descortezamiento, ISD 35.33 por ocoteo, ISD 37.00 por *Phellinus pini*, ISD 29.17 por *Fusarium circinatum*, ISD 74.03 por *Nectria cinnabarina* e ISD 32.11 por insectos que se alimentan de floema.

2.6 Discusión

Indicador de condición de copa

La evaluación de copa tiene en cuenta la valoración cuantitativa de las condiciones actuales del árbol y proporciona una medida íntegra de las condiciones y densidad del sitio e influencia de factores de estrés externos (Betchtold and Randolph, 2007). De acuerdo con el índice ajustado de composición foliar el 95% del arbolado evaluado en el área de estudio presentó una condición de copa pobre o no saludable (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004). Las condiciones de copa promedio se espera varíen por especies debido a las diferencias en la morfología de las hojas y ramas y la tolerancia a la sombra (Randolph and Thompson, 2010). A este respecto el 95% del arbolado evaluado presentó un índice Z_B mayor a 0.25 considerado como condición de copa pobre o no saludable.

Copas densamente foliadas están asociadas con tasas de crecimiento vigoroso; árboles con copas pequeñas, escasamente foliadas pueden estar en un estado de declinación (Schomaker *et al.*, 2007). En relación con los resultados obtenidos las especies que presentaron un índice de DnC “buena” (> 51%), fueron *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *P. rudis*, *Quercus crassipes* y *Q. rugosa*. Las especies que presentaron copas escasamente foliadas en la ubicación suprimida fueron *Quercus castanea*, *Quercus desertícola* y *Q. laurina*. Sin embargo la pérdida de follaje de estas especies puede ser atribuida a la época de muestreo y corresponden a especies caducifolias.

Los árboles con mayor diámetro de copa, densidad de copa, bajo índice de muerte regresiva y transparencia de follaje incrementan el potencial para fijación de carbono, almacenamiento de nutrientes, crecimiento y sobrevivencia (Betchtold and Randolph, 2007; Zarnoch *et al.*, 2004). Las especies que presentaron estos parámetros fueron *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus hartwegii*, *P. montezumae* y *P. rudis*.

Schomaker, *et al.*, (2007), menciona que la posición de copa de un árbol proporciona información acerca de la estructura, competencia y salud del bosque. En este estudio se encontró que los árboles ubicados en claros y dominantes presentaron mayores índices de proporción de copa, densidad de copa, y menores índices de transparencia de copa y muerte regresiva. Al contrario, árboles suprimidos presentaron menores índices de proporción de copa, densidad de copa y mayores índices de transparencia de copa y muerte regresiva.

Anderson y Belanger (1987), reportaron correlaciones positivas entre la densidad de copa y el dn (diámetro normal) para árboles dominantes y codominantes de pino en sitios naturales. De igual manera en el área de estudio, se encontró que las especies clasificadas en coníferas, los árboles dominantes y codominantes presentaron los mayores promedios de diámetro normal de 41 a 53 cm y DnC de 62% a 77%. La densidad de copa de árboles saludables varía por especie, Steinman *et al.*, (2000) mencionan que una densidad de copa $\leq 35\%$ es un indicador conservativo de estrés del árbol (Will-Wolf and Jovan, 2009). Por clasificación de especies, las coníferas en promedio presentaron una DnC “buena” 55.4% y en latifoliadas en promedio presentaron un índice de DnC de 44.3%. Las especies con DnC buena fueron *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *P. rudis*, *Quercus crassipes* y *Q. rugosa*, y las especies que presentaron un índice de DnC Promedio fueron *Alnus firmifolia*, *Quercus castanea*, *Quercus laurina* y *Q. obtusata*.

Cuando un árbol está sujeto a estrés, éste reacciona reduciendo el crecimiento y presentando pérdida de estructuras de la copa, denominada muerte regresiva (Houston, 1981). El total de árboles evaluados en cuanto al índice de Mreg tuvieron un índice de normal a ligero (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004) y las especies que presentaron un índice de Mreg normal fueron: *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *P. rudis*, *Alnus firmifolia*, *Quercus crassipes*, *Quercus laurina* y *Quercus rugosa*. Las especies con un índice de Mreg

“ligero” fueron *Alnus firmifolia*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus montezumae*, *P. rudis*, *Quercus castanea*, *Q. deserticola*, *Q. laurina* y *Q. obtusata*.

Altos índices de muerte regresiva usualmente indican la presencia de agentes defoliantes y en general pérdida de vigor (Zarnoch *et al.*, 2004). A este respecto sólo algunas especies de latifoliadas presentaron un índice de Mreg ligera a moderada *Quercus castanea*, *Q. deserticola*, *Q. laurina* y *Q. obtusata*. Los árboles con un índice mayor o igual al 10% de muerte regresiva indican estrés (Will-Wolf and Jovan, 2009). Del total del arbolado evaluado el 21% de éste presentó un índice de Mreg mayor o igual al 10%, mientras que las especies con un índice de Mreg mayor o igual al umbral (10%), fueron *Quercus castanea* y *Q. obtusata*.

El índice de transparencia de copa es utilizado como medida de defoliación de los árboles (Shomaker, 2007). Las coníferas presentaron un índice de TrC de normal a media y latifoliadas presentaron un índice de TrC de media a severa y por tipo de vegetación el Bosque de encino presentó un índice de TrC severa (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004). A nivel de especie, las que presentaron un índice de TrC severa fueron *Alnus firmifolia*, *Quercus castanea*, *Q. crassipes*, *Q. deserticola*, *Q. laurina* y *Q. obtusata*.

Steiman *et al.*, (2000) determinaron que una transparencia de follaje $\geq 10\%$ es un indicador conservador de árboles estresados. En lo que corresponde a este umbral tanto especies clasificadas como coníferas y latifoliadas, se puede considerar que el arbolado en el bosque de conservación del Distrito Federal está bajo condiciones de estrés, principal factor que contribuye al proceso de declinación especies como *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, ésto es acorde con lo reportado en Bauer y Krupa (1990), Alvarado *et al.* (1993), Hernández (1994), López (1993, 1997), cuyas investigaciones reportan que algunos síntomas del proceso de declinación del oyamel son la presencia de follaje clorótico, defoliación prematura, bandeado clorótico de las hojas y temprana senescencia del follaje.

El Índice de exposición a la luz proporciona información acerca de la estructura del sitio, competencia, vigor del árbol y crecimiento potencial. Si un árbol recibe más luz, tiene menos competencia directa y además incrementa su vigor y crecimiento potencial (Zarnoch *et al.*, 2004). A nivel de sitio, las especies que presentaron de 4 a 5 lados expuestos a la luz corresponden a las indicadoras por tipo de vegetación, conformando el estrato arbóreo del sitio y éstas presentaron los mayores índices de DnC y PrC. *Abies religiosa*, *Alnus firmifolia*, *Pinus montezumae*, *P. rudis*, *Cupressus lusitanica*, *Quercus castanea* y *Q. deserticola*.

Altos valores de densidad de copa, bajos valores de transparencia de follaje y bajos valores de muerte regresiva, típicamente están asociados con los árboles más saludables (Randolph *et al.*, 2010). Bajo estos indicadores, ninguna de las especies evaluadas cumple con estos parámetros, debido a que en promedio el índice de TrC fue de moderado (31-50 %) a severo (> 51%) (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004). Altos niveles de muerte regresiva potencialmente indican serios niveles de declinación en la salud de los árboles, mientras bajos niveles de densidad de copa y altos niveles de transparencia de copa indican grandes cantidades de defoliación y es señal de que un árbol puede tener una reducida capacidad de crecimiento (Randolph, 2009). Considerando estos parámetros, las especies clasificadas como latifoliadas presentaron un índice de DnC “pobre” y un índice TrC “severa”; sin embargo esta característica puede ser atribuida al tipo de especies “caducifolias”, que durante la época en que se realizó el muestreo (seca-fría 2011-2012), la mayoría del arbolado presentó altos índices de defoliación.

Indicador de daño

El Indicador de daño es caracterizado por el tipo, localización en el árbol y la severidad de éste (Stolte *et al.*, 2002). Por localización del daño y tipo, en follaje los agentes con mayor incidencia fueron ozono, *Apiognomonía quercina*, *Pestalotiopsis funerea* e insectos defoliadores. En ramas fueron muerte de ramas, pudrición y

viento, y en tronco los factores de mayor incidencia fueron fuego, ocoteo, pudrición, viento y *Nectria cinnabarina*.

Miller *et al* (2002), a través de su investigación, consideran que el O₃ es el contaminante que más severamente impacta a la vegetación en la zona urbana y los bosques ubicados al Sur – Suroeste de Ciudad de México y la especie más severamente dañada es *Pinus hartwegii*. A través de esta investigación se encontró que las especies que presentaron daños por O₃ en follaje fueron *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae*.

Stolte *et al.*, (2002), mencionan que el daño es considerado más serio cuando se encuentra en las partes bajas del árbol y en áreas grandes que están afectando al árbol, también menciona que un ISD 15.0 es el mínimo daño considerado como normal. De acuerdo, con el autor, el ISD en tronco fue mayor al 30.0 y las especies con mayor ISD fueron *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae*, *Quercus castanea* y *Quercus rugosa*. Así mismo, sólo 24 sitios presentaron un ISD normal y las especies fueron *Abies religiosa*, *Pinus rudis*, *Cupressus lusitanica* y *Quercus obtusata*.

En los Estados Unidos, la condición de copa ha sido usada para predecir la mortalidad del arbolado (Steinman, 2000), y para el reconocimiento de los síntomas de enfermedades (Anderson y Belanger, 1987). A este respecto, el 95% del arbolado presentó copas no saludables de acuerdo al índice Z_B y el 55% del arbolado presentó daños, principalmente en el tronco.

Los insectos nativos y enfermedades son parte natural del ecosistema. Estos factores influyen en la sucesión, productividad y estabilidad del bosque (Castello *et al.*, 1995), En el área de estudio se encontró que los principales agentes de daño en follaje fueron insectos defoliadores, enfermedades causadas por hongos *Apiognomonía quercina*, *Pestalotiopsis funerea*, *Ploioderma lethale* y *Microsphaera*, y royas como *Melampsorella cayophyllacearum* y *Cronartium quercuum*; en ramas,

enfermedades causadas por canchros *Hypoxylon* y *Seiridium unicorne*, hongos que causan pudrición y en tronco insectos que se alimentan de floema, hongos que causan pudrición *Phellinus pini*, *Armillaria* y *Ganoderma*.

La condición de copa ha sido estudiada en relación con los agentes estresores tales como contaminación, plagas y enfermedades (Skelly *et al.*, 1987), y la sequía periódica pueden también reflejar la condición de copa (Lorenz *et al.*, 2001). En lo referente a agentes de daño de mayor incidencia en follaje de coníferas, se identificó daños por ozono y en ramas los agentes de mayor incidencia fueron defoliación, muerte de ramas y daños por viento. En latifoliadas los agentes bióticos fueron los de mayor incidencia en follaje tales como enfermedades por hongos e insectos defoliadores, y en ramas, canchros causados por hongos, pudrición, muerte de ramas y defoliación.

Korb *et al.* (1992), encontraron que los árboles con severos daños tienen significativamente el mayor porcentaje de transparencia de follaje. De acuerdo a lo anterior, las especies *Alnus firmifolia*, *Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *Quercus castanea*, *Q. deserticola*, *Q. laurina* y *Q. obtusata*, presentaron un mayor índice de severidad de daño y también presentaron un índice de transparencia de follaje de moderado a severo.

Horsley *et al.* (2000), indican que además de insectos específicos y enfermedades, los árboles pueden ser afectadas por declinación resultado de la interacción de factores predispuestos como: insectos defoliadores, sequía, daños por frío hielo, pobre calidad de sitio e insectos o enfermedades secundarios tales como: hongos en raíz, canchros e insectos. Considerando el índice de severidad de daño en tronco, los factores que mayor incidencia fueron agentes abióticos: fuego y viento; agentes antropogénicos: desmoche, descortezado, brotes epicórmicos y ocoteo; agentes bióticos: canchros causados por hongos: *Hypoxylon*, *Seiridium unicorne*, *Fusarium circinatum* y *Nectria cinnabarina* y hongos que causan pudrición en tronco y raíz *Phellinus pini*, *Armillaria* y *Ganoderma*.

Alvarado y Hernández (2002), mencionan que los factores incidentes de mayor importancia en la declinación del Oyamel son: contaminación atmosférica, sequía, heladas, insectos defoliadores e insectos que se alimentan de floema, hongos que causan canchales y hongos pudridores. De acuerdo con Alvarado y Hernández (2002), en el presente estudio se determinó que los factores de mayor incidencia en la condición de salud del arbolado en el bosque de conservación del Distrito Federal, fueron contaminantes atmosféricos, hongos pudridores en ramas y tronco; así como daños por incendios, desmoche, descortezado y ocoteo.

Eventos del clima tales como sequía, tormentas de nieve, heladas y eventos de viento, periódicamente influyen en las condiciones de copa del árbol. Junto con estresores bióticos. Éstos factores pueden tener efectos multiplicativos que impactan la condición de copa (Randolph *et al.*, 2010). Los factores abióticos que mayormente influyeron en los altos índices de severidad de daños en ramas y tronco del arbolado muestreado fueron el fuego y el viento, y en menor incidencia daños por rayos principalmente árboles despuntados.

2.7 Conclusiones

El Indicador de condición de copa e Indicador de daño, permiten determinar la condición de salud y los agentes estresores que afectan las condiciones y procesos biológicos en una comunidad forestal. La mayoría de los árboles evaluados en el bosque de conservación del Distrito Federal, presentaron una condición de copa pobre o no saludable y mayor índice de severidad de daño en el tronco. Las especies con un índice de severidad de daño considerado como normal (<15%), fueron *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus rudis*, *Quercus obtusata* y *Quercus rugosa*, y una tercera parte de los sitios muestreados presentaron un índice de severidad de daño normal.

En esta investigación se logró realizar un diagnóstico sobre la condición de salud en el bosque de conservación del Distrito Federal para la época seca-fría 2011 y cálido seco 2012 y establecer la línea base para futuras mediciones; sin embargo, consideramos que es importante llevar a cabo monitoreos consecutivos en cada época del año con el propósito de identificar posibles diferencias entre los índices evaluados y las condiciones de salud de los ecosistemas forestales.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Colegio de Postgraduados, Postgrado de Ciencias Forestales a través del proyecto 120593 del Fondo Mixto CONACYT-GDF 2009. “Evaluación del impacto de la contaminación del aire en las zonas boscosas y agrícolas, urbanas y rurales del Distrito Federal”, por el financiamiento asignado para la realización de esta investigación.

2.8 Literatura citada

- Alvarado, R. D.; Bauer, I. de., M. L., y Galindo, A. J. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental pollution*. 80:115-121.
- Alvarado, R. D., Hernández, T. T. 2002. Decline of sacred-fir in the Desierto de los Leones National Park. In: Fenn M. E, L I. de Bauer, Hernández-Tejeda T. (Eds.) *Urban air pollution and forests. Resources at risk in the Mexico City air basin*. Springer. New York, USA. pp: 243-260.
- Alvarado, R., D. y Saavedra, R. L. de L. 2012. Indicador de condición de copa. Manual de campo. (Colpos-Conafor). 18 pp.
- Ambrose, M.J. 2004. Criterion 3 - maintenance of ecosystem health and vitality: indicator 17: area and percentage of forest land with diminished biological components indicative of changes in fundamental ecological processes and/or ecological continuity. Disponible en: <http://www.fs.fed.us/research/sustain>.
- Ángulo, M. M. 2011. Introducción al uso de modelos de efectos mixtos como técnica estadística para analizar datos agrupados. 21 p.
- Anderson, R. L., and Belanger, R. P. 1987. A crown rating method for assessing tree vigor of loblolly and shortleaf pines. In Comp. Proceedings of the Fourth Biennial Southern Silvicultural Research Conference, 4-6 November 1986, Atlanta, Ga. Edited by D. F. Phillips. U. S. For Serv. Gen. Tech. Rep. SE-42. Pp. 538-543.
- Bechtold W., Randolph, K. 2007. FIA. Crown Analysis Guide. Berryman, A. A. 1986. Forest insects: principles and practice of population management. New York. Plenum Press. 279 pp. [Disponible en:] <http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/27730>. Consultado: 12 de agosto del 2011
- Bauer, L., I. de, and Krupa, S. V. 1990. The Valley of Mexico: Summary of observational studies on its air quality and effects on vegetation. *Environmental pollution*. 65:109-118.
- Burkman, W.; M. Schomaker.; K: W. Stolte, K.W. 1995. Crown condition classification: 1995 version. In: Tallent-Halsell, N.G., ed. Forest health monitoring field methods guide. EPA/620/R-94/027. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency: Section 2:1-23.
- Calama, S. R. y Montero, G. G. 2004. Aplicación de los modelos mixtos a un caso práctico de modelización del crecimiento y producción de las masas forestales. *Cuad. Soc. Esp. Cien, For*. 18:317-321.

- Castello, J. D.; D. j. Leopold, P. J. Smallidge. 1995. Pathogens, patterns and processes in forest ecosystems. *Bioscience*. 45(1): 16-24.
- Cibrián, T., D., Alvarado, R., D., y García, D., S. E. 2007. Enfermedades forestales en México. Universidad Autónoma Chapingo, CONAFOR-SEMARNAT, México; Forest Service, United States USDA; NRCAN Forest Service, Canadá y Comisión Forestal de América del Norte, COFAN, FAO. Chapingo, México. 587 p.
- Coulston, J.W.; Ambrose, M.J.; Riitters, K.H.; Conkling, B.L; and Smith, W.D. 2005. Forest health monitoring: 2003 national technical report. Gen. Tech. Rep. SRS-85. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 97 p.
- Dolph, K. L. 1988. Predicting height increment of young-growth mixed conifers in the Sierra Nevada. U.S. For. Serv. Res. Pap. PSW-191.
- Eichhorn J, Roskams P, Ferretti M, Mues V, Szepesi A, Durrant D, 2010: Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. 49 pp. Manual Part IV. In: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Hamburg. [Disponible en:] <http://www.icp-forests.org/Manual.htm>
- Environmental Systems Research Institute. ESRI. 2008. ArcGIS 9. Using ArcGIS Geoestatistical Analyst. User Guide. 300 pp.
- Ferreti, M. 1997. Forest health assessment and monitoring- issues for consideration. *Environmental Monitoring and Assessment* (48) 45-72.
- Hernández, T. T. 1994. Efecto de los gases oxidants sobre algunas especies del género pinus nativos del Valle de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Fitopatología. Colegio de Postgraduados 109 p.
- Horsley, S. B., Long, R. P., Bailey, S. W. 2000. Factors associated with the decline disease of sugar maple on the Allegheny plateau. *Canadian Journal of Forest Research*. 30(9): 1-14.
- Houston, D.R. 1981. Stress-triggered diseases: the diebacks and declines. Misc. Publ. NE- IN-T-41-81. Broomall, PA: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 36 p.
- ICP Forests. 2010. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Hamburg [http://www.icp-forests.org/Manual.htm]

- Kenk, G. 1990, 'Effects of Air Pollution on Forest Growth in Southwest Germany – Hunting for a Phantom, in: *Proceedings of the IUFRO XIX World Congress, 5–11 August, Montreal, Canada. Montreal: IUFRO: 385–395.*
- Korb, T. E., McCormick, L. H., Simons, E. E., and Jeffery, D. J. 1992. Impacts of pear thrips damage on root carbohydrate, sap, and crown characteristic of sugar maples in a Pennsylvania sugarbush. *For Sci.* 38:381-392.
- López, L., M. A. 1993. Evaluación nutrimental de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones. Tesis de Maestría en Ciencias, Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Estado de México. 101 p.
- López, L., M. A. 1997. Declinación del oyamel del Desierto de los Leones, D. F. In: Memorias del II Simposio Internacional y III Reunión Nacional sobre Agricultura Sostenible. Una contribución al Desarrollo Agrícola Integral. Comisión de estudios ambientales y Campus San Luis Potosí del Colegio de postgraduados. Pp. 425-431
- Lorenz, M., W. Seidling, V. Mues. 2001. Forest condition in Europe: results of the 2000 large-scale survey, 2001 technical report. Hamburg, Germany: Federal Research Centre for Forestry and Forest Products; Geneva and Brussels: United Nations Economic Commission for Europe and European Commission. 103 p.
- Miller, P. R., de Bauer, L. I., and Hernández, T. T. 2002. Oxidant exposure and effects on pines in forests in the Mexico City and Los Angeles, California air basins. In *Urban Air Pollution and Forests: Resources at risk in the Mexico City Air Basin*. Ecol. Stud. Series, eds. M. E. Fenn, L. I. de Bauer, and T. Hernández-Tejeda. New York: Springer-Verlag. 225-243.
- Randolph, K. C., Moser, J. W. Jr. 2004. An Evaluation of Changes in Tree Crown Characteristics to Assess Forest Health in Two Indiana State Parks. *Northern Journal of Applied Forestry.* 21 (1):50-56.
- Randolph, K, C. 2006. Descriptive statistics of tree crown condition in Southern United States. Forest Service. Southern Research Station. United States Department of Agriculture. General Technical Report SRS-94. 24 pp.
- Randolph, K. C. 2009. Crown Condition. In *Forest Health Monitoring 2006*. National Technical Report. Ambrose, M. J. and Conciling B. L. North Carolina State University, Department of Forestry and Environmental Resources, Raleigh, NC. 135 p.

- Randolph, K. C. Morin, R. S. and Steinman, J. 2010. Descriptive statistics of tree crown condition in the North Central United States. Gen. Tech. Rep. SRS-125. Asheville, NC. U. S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station. 28 p.
- Randolph, K. C., and Thompson M. T. 2010. Descriptive Statistics of Tree Crown Condition in the United States Interior West. General Technical Report SRS-127. Asheville, NC. United States Department of Agriculture. Forest Service. Southern Research Station. 17p.
- Schomaker, M. E., Zarnoch, S. J., Bechtold, W. A., Latelle, D. J., Burkman, W. G., y Cox, S. M. 2007. Crown-Condition Classification: A guide to data collection and Analysis. United States Department of Agriculture. Forest Service. Southern Research Station. General Technical Report SRS-102. Asheville, NC. 92 p.
- Skelly J. M.; D. D. Davis, W. Merrill, 1987. Diagnosing injury to Eastern forest trees. Atlanta, U. S. Department of Agriculture Forest Service. University Park, Pennsylvania State University. 122 p.
- SMADF. 2012. Programa general de ordenamiento ecológico del Distrito Federal. [En línea]. <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=61> 22/02/2013
- Steinman, J. 2000. Tracking the health of trees over time on forest health monitoring plots. *In*: Hansen, J. and Burk, T., eds. Integrated tools for natural resources inventories in the 21 st century, 1998. August 16-20; Boise, ID. Gen. Tech. Rep. NC-212. St. Paul, M N: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station. 743 p.
- Stolte, K., Conkling, B., Campbell, S., Gillespte, A. 2002. Forest Health Indicators. Forest Inventory and Analysis Program. United States Department of Agriculture. Forest Service.
- Will-Wolf, S.; Jovan, S. 2009. Lichens, ozone, and forest health—exploring cross-indicator analyses with FIA data. *In*: McWilliams, W.; Moisen, G.; Czuplewski, R., comps. Forest Inventory and Analysis (FIA) Symposium 2008; RMRS-P-56CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 18 p.
- Zarnoch, S.J., W.A. Bechtold, and K.W. Stolte. 2004. Crown condition as an indicator of forest health. Canadian Journal of Forest Research. 34:1057-1070.

III. EFECTOS DEL O₃ Y NO₂ EN EL BOSQUE DE CONSERVACION DEL DISTRITO FEDERAL

3.1 Resumen

La contaminación atmosférica en combinación con factores climáticos, edáficos y antropogénicos, que actúan a diferentes tiempos e intensidades, condicionan el estado de salud de los ecosistemas forestales. El objetivo de esta investigación fue relacionar los índices de salud del arbolado con la concentración de O₃, NO₂ y variables ambientales, en el bosque de conservación del Distrito Federal. El muestreo se realizó por estrato forestal (Bosque de oyamel, pino, encino y mixto), en dos épocas seca-fría 2011 y cálido-seca 2012. Se determinó el índice ajustado de composición foliar (Z_{β}) y se utilizó la técnica de árboles de regresión para correlacionar el índice Z_{β} con las variables climáticas, edáficas y contaminantes. Los resultados indican que el 95% del arbolado presentó un índice $Z_{\beta} > 0.25$, indicando una condición de copa pobre o no saludable. Por grupo de especies, las coníferas tuvieron un índice Z_{β} 0.65 y las latifoliadas Z_{β} 0.53. Las especies que presentaron mayor índice de severidad de daño (ISD en %) por O₃, fueron *Abies religiosa* ISD 34.50%, *Pinus hartwegii* ISD 24.32% y *P. montezumae* ISD 33.33%. Las variables correlacionadas con el incremento del índice Z_{β} fueron: Concentración de fierro en el suelo ≤ 85.00 ppm, calcio en el suelo ≤ 9.87 meq.100, pH del suelo ≤ 4.95 , índice de radiación solar > 323.75 W m⁻², NO₂ > 49.59 ppb y O₃ > 73.91 ppb (millón de millones). Se determinó que la mayoría del arbolado en el bosque de conservación del Distrito Federal presentó una condición de copa no saludable asociada a factores edáficos, climáticos y contaminantes atmosféricos.

Palabras clave: Índice ajustado de composición foliar, condición de copa del árbol, Índice de severidad de daño, Contaminación del aire.

3.2 Abstract

Air pollution combined with climatic, soil, and anthropogenic factors, acting at different times and intensities, condition the health status of forest ecosystems. The aim of this research was to relate tree health index with O₃ and NO₂ concentrations, and environmental variables, in the conservation forest of Distrito Federal. Sampling was carried out by forest stratum (Sacred-fir, pine, oak and mixed-species forest), during the 2011 dry-cold and 2012 warm-dry periods. The index of foliage composite Z_B, was determined, and the regression trees technique was utilized for correlating Z_B Index with climatic and edaphological variables, as well as with air pollutants. The results indicated that 95% of the trees presented a Z_B Index > 0.25, indicating poor or unhealthy crown condition. Analysis by species indicated that conifers Z_B Index was 0.65, while the one for hardwood trees was 0.53. Species with the highest damage severity index (ISD) by O₃, were: *Abies religiosa* ISD 34.50%, *Pinus hartwegii* ISD 24.32%, and *P. montezumae* ISD 33.33%. The variables that correlated with increase in Z_B Index, were: Iron concentration ≤ 85.00 ppm. Soil Calcium ≤ 9.87 meq.100, soil pH ≤ 4.95, solar radiation index > 323.75 W m⁻², NO₂ > 49.59 ppb and O₃ > 73.91 ppb. We determined that most trees in the conservation forest of Distrito Federal presented an “unhealthy” crown condition, associated to edaphic and climatic factors, and air pollutants.

Key words: Adjusted index of foliage composition, tree crown condition, damage severity index, air pollution.

3.3 Introducción

Los contaminantes atmosféricos, incluyendo el incremento a nivel troposférico o de superficie de las concentraciones de ozono (O₃), afectan la salud forestal a escala nacional y multinacional (Percy and Ferreti, 2004). Los estudios del efecto de los contaminantes sobre la vegetación en México los inició Bauer a partir de 1971, quien detectó daños por gases oxidantes en algunas plantas indicadoras. Posteriormente observó que los pinos y otras plantas son afectados por los gases oxidantes producidos en la Ciudad de México y transportados por el viento hacia el suroeste del valle de México. La evidencia indica que las concentraciones de gases oxidantes que se alcanzan diariamente en el área metropolitana de la Ciudad de México, son los causantes de producir daños irreversibles a la vegetación presente en el área y en sus alrededores (Hernández y Bauer, L. I. de, 1984).

En bosques naturales existe poca información entre el nivel de exposición al O₃ y el daño en el arbolado por la dificultad de estimar la concentración de contaminante en entornos altamente variables y de gran extensión (González *et al.*, 2010). Sin embargo las lesiones en hojas y acículas es la única evidencia fácilmente detectable en campo (ICP-Forests, 2011).

Entre las causas relevantes de la degradación de los recursos naturales en el suelo de conservación, pueden citarse: la deforestación por cambio de uso de suelo forestal a agrícola y urbano, deterioro de la salud del bosque originado por un manejo inadecuado que favorece la propagación de plagas y enfermedades, incendios, tala ilegal, contaminación ambiental y pastoreo excesivo (SMADF, 2012). Bauer *et al.* (1990), indican que la mortalidad de *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* ha sido atribuido a altas concentraciones de ozono (> 360 ppb). Alvarado *et al.*, (1993), indican que otros factores incluyendo falta de manejo forestal, excesiva extracción de agua, plagas por insectos, posibles patógenos pueden contribuir y acelerar el proceso de declinación, llevando a la eventual muerte de estas especies. Así mismo

López *et al.* (1998) encontraron que el hierro es el segundo nutrimento más deficiente después del potasio en el follaje de *Abies religiosa*.

Debido a la importancia ambiental y social del bosque de conservación del Distrito Federal, se consideró realizar un estudio para determinar las variables ambientales, edáficas y contaminantes asociadas al Índice ajustado de composición foliar para evaluar la condición de salud del arbolado.

3.4 Materiales y métodos

Ubicación del área de estudio

El Distrito Federal se localiza en el suroeste de la cuenca de México y cuenta con una superficie de 149,674 ha. Se divide en suelo urbano con una extensión de 61,232 ha y suelo de conservación con 88,442 (59%) (PAOT, 2010; SMADF, 2012). El suelo de conservación se localiza en las Delegaciones: Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco (SMADF, 2012), (Figura 3.1).

El suelo de conservación proporciona refugio a más de 2500 especies de flora y fauna, predominan asociaciones vegetales como pastizal o zacatonal, bosque de coníferas, bosque mixto, bosque de encino, bosque de galería, bosque mesófilo, matorral xerófilo, vegetación acuática y subacuática (SMADF, 2012).

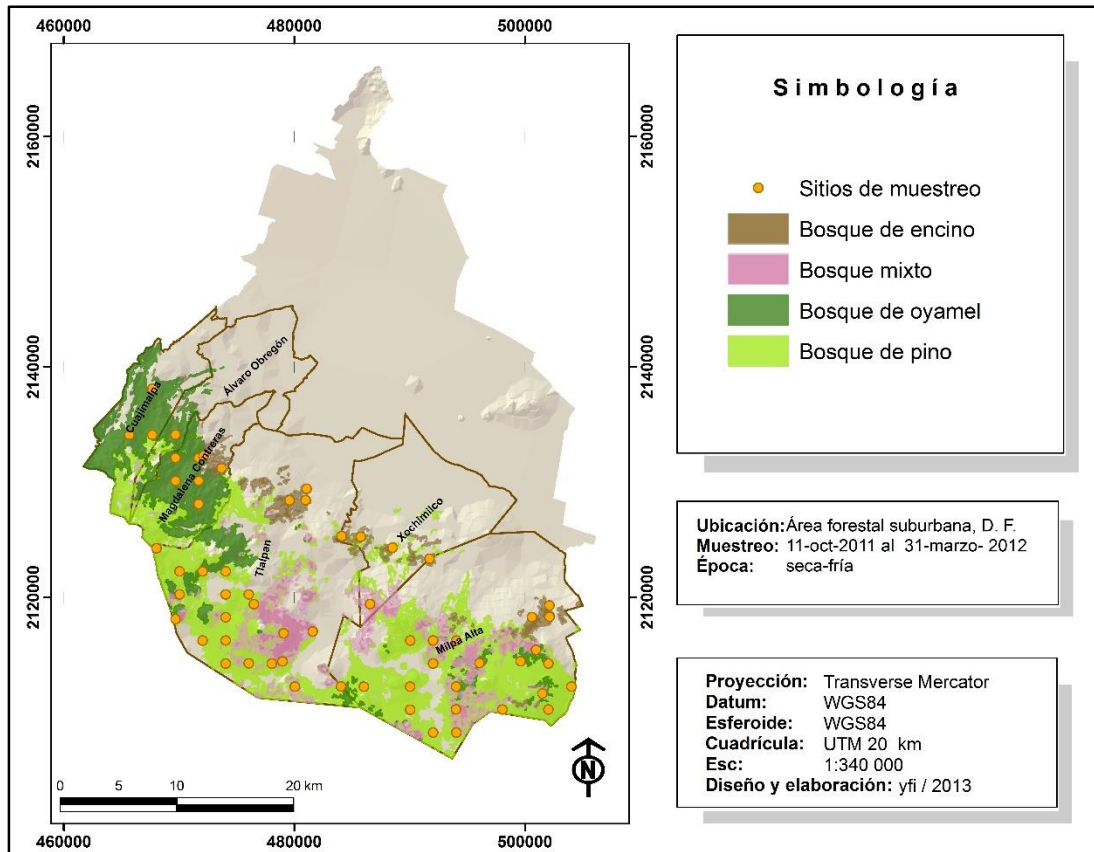


Figura 3.1 Sitios de muestreo en el bosque de conservación del Distrito Federal.

En el suelo de conservación, se generan bienes y servicios ambientales que son imprescindibles para la viabilidad de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Se definen 29 unidades hidrológicas que abastecen casi el 60% del agua que se consume en la ciudad. Sirve como unidad generadora de oxígeno y regulador de la composición química de la atmósfera, clima y ciclo hidrológico (SMADF, 2012).

Delimitación del área de estudio

El área de estudio se delimitó mediante el mapa de uso de suelo y vegetación del Distrito Federal, Escala 1:50000 (CORENA, 2005). Se ubicaron 62 sitios de muestreo, utilizando la aplicación Hawth's Analysis Tools Ver. 3.27 (Beyer, H. L. 2006) en ArcGis ver. 9.3 (ESRI, 2008), utilizando el diseño de muestreo aleatorio estratificado por tipo de vegetación (BOLFOR *et al.*, 2000).

Índices de concentración de O₃, NO₂ y variables ambientales

Para la determinación de la concentración de O₃ partes por billón (ppb, Millón de Millones) y NO₂ ppb; en cada sitio de muestreo se colocó un muestreador pasivo Marca Radiello para O₃ y otro para NO₂, en dos épocas del año: seca-fría del 18 de noviembre al 5 de diciembre del 2011 y cálido-seca del 25 de mayo al 15 de junio del 2012. (Oliva *et al.*, 2001; Radiello, 2006; Espinosa, 2007), en 62 sitios de muestreo por tipo de vegetación Bosque de encino (BE), mixto (BM), oyamel (BO) y pino (BP). Se tomaron datos de las siguientes variables ambientales por período de muestreo: temperatura (T, °C), humedad relativa (HR, %), radiación solar (Radsol, W m⁻²), índice de radiación ultravioleta (IUV), de la red de estaciones meteorológicas del Distrito Federal (REDMET), PEMBU (Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario, UNAM) y Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

Se tomó una muestra compuesta de suelo en cada sitio de muestreo a una profundidad de 30 cm, para determinar las siguientes variables edáficas: Calcio (Ca, meq/100 g), Conductividad eléctrica (C. E., ds/m), Capacidad de intercambio catiónico (CIC, meq/100 g), Hierro (Fe, ppm), Potasio (K, meq/100 g), Magnesio (Mg, meq/100 g), Materia orgánica (M. O., %), Nitrógeno (N, ppm), Fósforo (P, ppm) y pH.

El análisis físico-químico de las muestras de suelo fue el siguiente: El pH del suelo se determinó con un potenciómetro usando una relación suelo-agua 1:2 en Ca Cl₂ 0.01M; Capacidad de intercambio catiónico (CIC) en (cmol(+))kg⁻¹ por acetato de amonio 1N pH 7,0 centrifugación Kjeltex Auto Analyzer 1030; Materia orgánica (M.O.%), técnica Walkley y Black en K₂Cr₂O₇ 1N. Nutrientes en el suelo: nitrógeno inorgánico N (mg kg⁻¹) fue extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor Kjeltex Auto Analyzer 1030. Fósforo P (mg kg⁻¹) por medio del método Olsen. Potasio K (mg kg⁻¹) fue extraído en acetato de amonio 1N, el pH 7.0 relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de emisión de flama. Calcio Ca (mg kg⁻¹) y magnesio Mg (mg kg⁻¹) fueron extraídos en acetato de amonio 1N pH

7,0 relación 1:20 y determinados por espectrofotometría de absorción atómica. El hierro (mg kg⁻¹) fue extraído con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica.

Indicador de salud del arbolado

El indicador de salud del arbolado fue determinado para cada árbol vivo ≥ 7.5 cm de diámetro normal (dn), se numeró y se le tomó los siguientes datos: especie, proporción de copa viva (PrC), densidad de copa (DnC), transparencia de copa (TrC), muerte regresiva (Mreg), (Burkman *et al.*, 1995; Betchtold and Radolph, 2007; Eichhorn *et al.*, 2010; Randolph *et al.*, 2010, ICP Forests, 2010, Alvarado y Saavedra, 2012).

Los índices de muerte regresiva y la transparencia de follaje (Burkman *et al.*, 1995; Betchtold and Radolph, 2007), se utilizaron para determinar el Índice ajustado de composición foliar para cada árbol (Z_f), (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004) (Ecuación 1). Éste índice representa la cantidad por la cual el follaje del árbol está reducido comparado con un árbol completamente foliado, supone que la transparencia de copa $> 25\%$ indica una pobre condición de copa o copa no saludable (Coulston *et al.*, 2005) (Cibrián *et al.*, 1995; Betchtold and Radolph, 2007; Shomaker *et al.*, 2007; Eichhorn *et al.*, 2010; Alvarado y Saavedra, 2012).

El índice de severidad de daño (ISD en %), representa el promedio de múltiples daños, ubicación y severidad de éstos. La evaluación de los factores de daño en el arbolado se realizó en tres fases: 1. Parte del árbol afectada (follaje), 2. Causa o agente (ozono), 3. Cuantificación o extensión del síntoma (Cibrián *et al.*, 2007; Eichhorn *et al.*, 2010). Un ISD $< 15\%$, indica el mínimo daño considerado como normal y cercano a una condición saludable del árbol (Stolte *et al.*, 2002).

Análisis de datos

El índice ajustado de composición foliar (Z_{β}) (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004), ecuación 1:

$$Z_{\beta} = \left[1 \left(1 - \frac{(T-15)}{100} \right) \left(1 - \frac{D}{100} \right) \right] \quad \text{Si } T \geq 15$$

$$Z_{\beta} = \frac{D}{100} \quad \text{Si } T < 15$$

Donde: T= Transparencia de copa (%), D= Muerte regresiva (%).

Para determinar promedio del índice ajustado de composición foliar (Z_{β}) por sitio e índice de severidad de daño en copa por ozono (ISD en %), (Zarnoch *et al.*, 2004; Ambrose, 2004) se aplicó modelos lineales de efectos mixtos (Ecuación 2), (Randolph and Moser, 2004), en virtud de que las observaciones no se ajustaron a distribución normal y por estar expresadas en proporción (Angulo, 2011; Calama y Montero, 2004) (Ecuación 2).

Ecuación 2. $\gamma = X\beta + Z + \epsilon$

El índice Z_{β} , fue modelado individualmente como la variable respuesta γ , el tipo de vegetación y especie como el efecto fijo (X) y el sitio (sitio) como efecto-al azar (Z) y ϵ vector de errores. Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) Tipo III de efectos fijos, para evaluar la hipótesis nula de que la variable (sitio) es igual a 0 y puede ser rechazada a un nivel de significancia $\alpha=0.05$.

El índice de severidad de daño (ISD), fue modelado individualmente como la variable respuesta γ , el tipo de vegetación, clase de especie y especie como el efecto fijo (X), el tipo de daño y ubicación del daño como efecto-al azar (Z) y ϵ vector de

errores. Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) Tipo III de efectos fijos, para evaluar la hipótesis nula de que la variable (tipo de daño y ubicación de daño) es igual a 0 y puede ser rechazada a un nivel de significancia $\alpha=0.05$.

Para determinar la correlación entre las variables ambientales, edáficas y el índice ajustado de composición foliar Z_B , se utilizaron árboles de regresión (Stat Soft, Inc., 2004); Chipman *et al.*, 1998. Bajo el criterio de validación cruzada y minimización de la varianza dentro de cada nodo e impureza de la rama que es el promedio ponderado de las varianzas de los nodos terminales, usando por default el Error estándar de 1.0 (Timofeev, 2004; Juárez y Castells, 2010).

3.5 Resultados

A través del análisis de varianza (ANOVA) Tipo III de efectos fijos para el Índice Z_B , por sitio, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, se determinó que hubo diferencias significativas (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Análisis de varianza de los índices Z_B e ISD por sitio en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Unidad	Efecto	Análisis de efectos fijos			
		Z_B		ISD	
		Tipo III F	Pr>F	Tipo III	Pr>F
Sitio	Sitio	434.82	<.0001	52.60	<.0001

Z_B : Índice ajustado de composición foliar

ISD: Índice de severidad de daño

De acuerdo con el índice ajustado de composición foliar (Z_B), por sitio y tipo de vegetación, los resultados indican que se tuvieron índices mayores a 0.25, lo cual indica que en promedio las copas de los árboles en el área de estudio presentaron una condición de copa pobre o no saludable (Figura 3.2), presentando un rango Z_B

de 0.33 a 0.88 (Anexo Cuadro 3.2). Por tipo de vegetación en coníferas, el 97% del arbolado presentó copas no saludables y en latifoliadas el 93%. De todo el arbolado evaluado sólo el 4.80% presentó copas saludables.

El índice de composición foliar Z_B , indica que las especies evaluadas presentaron una condición de copa pobre o no saludable. *Abies religiosa* 0.65, *Alnus firmifolia* 0.59, *Cupressus lusitanica* 0.66, *Pinus hartwegii* 0.64, *Pinus montezumae* 0.69, *Pinus rudis* 0.69, *Quercus castanea* 0.47, *Quercus crassipes* 0.61, *Quercus desertícola* 0.51, *Quercus laurina* 0.43, *Quercus obtusata* 0.46 y *Quercus rugosa* 0.66.

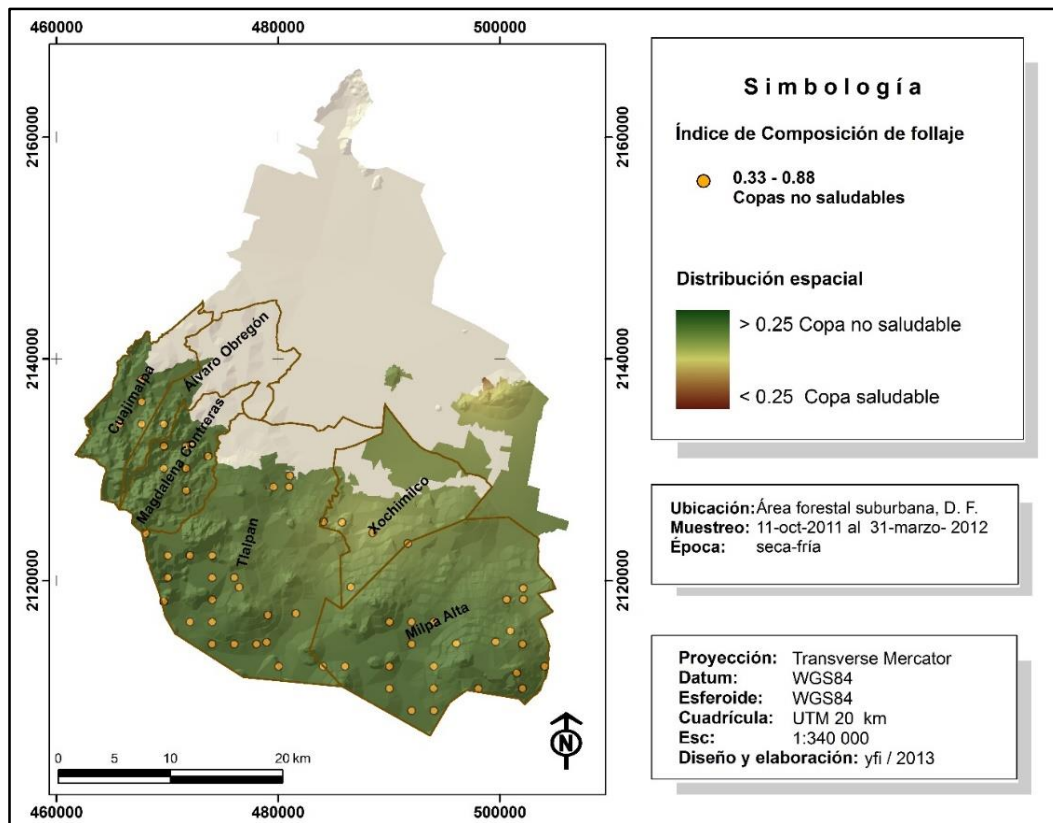


Figura 3.2 Mapa de Índice de composición foliar del arbolado por sitio de muestreo, en el bosque de conservación del Distrito Federal.

En el análisis del índice de severidad de daño (ISD en porcentaje) por ozono en follaje, de 856 árboles clasificados como coníferas, 35 árboles presentaron daños en follaje por ozono. El bosque de oyamel presentó un ISD=32.73, el bosque de pino presentó un ISD=26.0 y el bosque mixto presentó un ISD=12.50. Por especie *Abies religiosa*, tuvo un ISD= 34.50 en 10 árboles, *Pinus hartwegii*, tuvo un ISD=24.32 en 22 árboles y *Pinus montezumae*, presentó un ISD=33.33 en 3 árboles.

De 62 sitios establecidos, 23 sitios presentaron un ISD < 15% considerado como “normal”, bosque de oyamel: BO04, BO05, BO06, BO08, BO09, BO11, BO12, BO14, BO20 y BO21; bosque de pino: BP09, BP12, BP29, BP30 y BP34; bosque de encino: BE04, BE06, BE10, BE11 y BE14 y bosque mixto: BM06 (Anexo Cuadro 3.3), Figura 3.3.

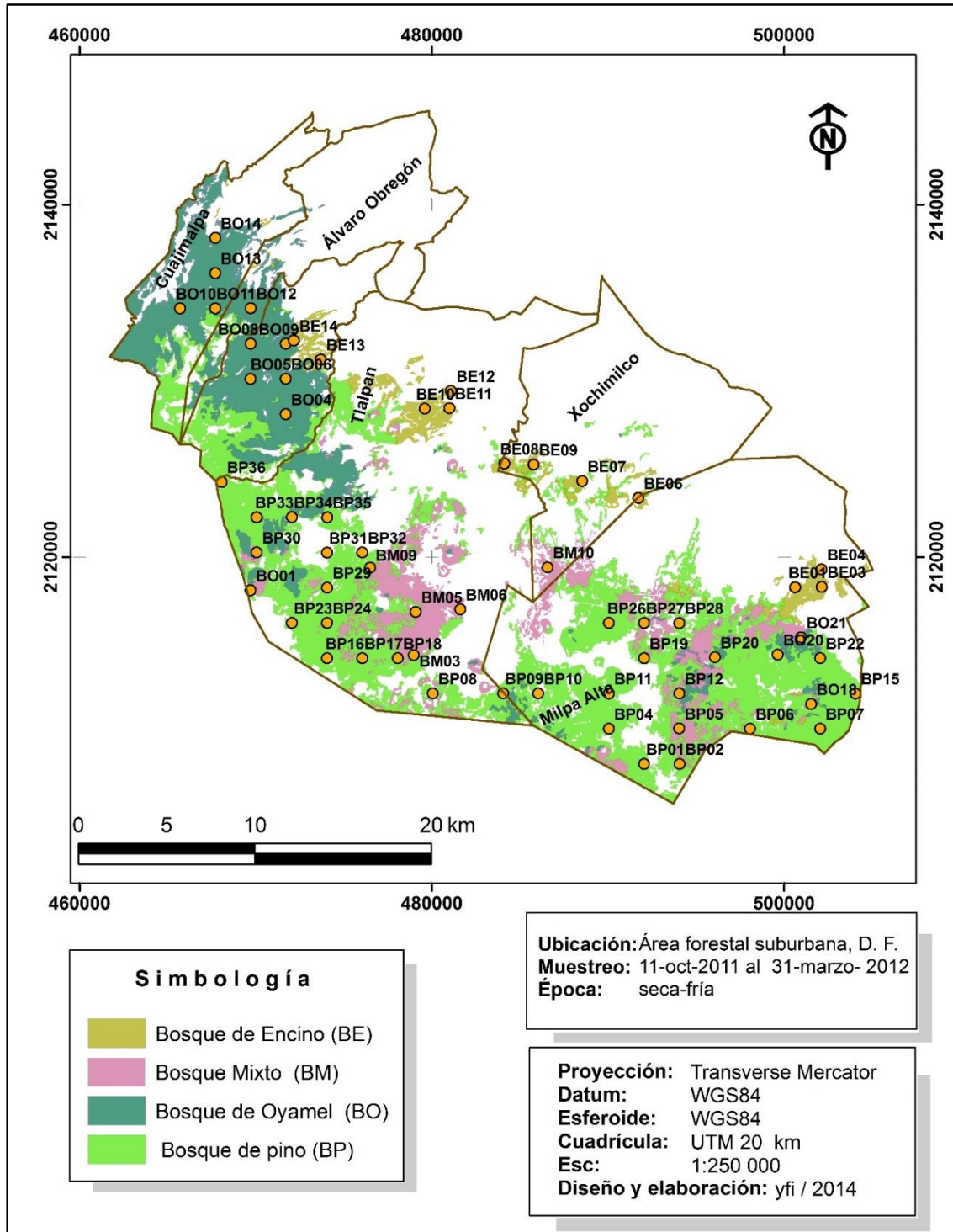


Figura 3.3 Mapa de tipos de vegetación y ubicación de sitios en el bosque de conservación del Distrito Federal.

El análisis de árboles de regresión (Figura 3.4), mostró que los factores que se correlacionaron con el Índice (Z_B) fueron: Hierro (Fe), índice de radiación solar (Radsol2), índice de concentración de bióxido de nitrógeno (NO_2), índice de concentración de ozono (O_3), calcio (Ca), pH y porcentaje de humedad relativa (HR). En el presente estudio, el Fe fue una de las variables más importantes; la estructura del árbol indicó dos ramificaciones, siendo la ramificación izquierda la más importante de acuerdo al incremento del índice Z_B . La primera rama, nodo (ID=3) sugiere que el menor índice de Z_B (0.48), es cuando la concentración de Fe >85.00 ppm y el índice de CE es ≤ 0.52 , correspondiendo a los sitios (BE06, BE07, BE08, BE09 y BM03) (Figura 3.3 y 3.4).

En la segunda rama, nodo (ID=2), indica que el índice Z_B se incrementó, presentando una concentración de Fe ≤ 85.00 ppm, situación que se presentó en 54 sitios. De estos mismos sitios, 6 sitios (nodo ID=4), presentaron una ligera disminución en el Índice Z_B (0.57), asociados a un índice de Radsol $\leq 323.76 \text{ W m}^{-2}$ (Sitios BE03, BE04, BO18, BP07, BP15 y BP22) (Figura 3.3 y 3.4) y en 48 sitios se presentó un índice de Radsol $> 323.76 \text{ W m}^{-2}$ e incremento del índice Z_B (0.67).

De los 48 sitios (ID=5), el sitio BP07 presentó un índice Z_B de 0.370, asociado a un índice de concentración de $\text{NO}_2 \leq 49.60$ ppb, el resto (nodo ID=7) presentó un índice de concentración de $\text{NO}_2 > 49.60$ ppb, presentando un incremento en el índice de Z_B (0.673), de estos 47 sitios, los sitios BM06, BO06, BO13, BO14, BP02, BP05, BP19 y BP20, presentaron un menor índice Z_B (0.61) y un índice de concentración de $\text{O}_3 \leq 73.91$ ppb, en la misma rama nodo ID=9 39 sitios estuvieron afectados por una concentración de O_3 mayor a > 73.91 ppb, asociados a un incremento en el índice Z_B (0.67), en estos mismos sitios (ID=11) los sitios BE14, BM05, BO01, BO05, BO09, BO11, BO20 y BP12 (Figura 3.3 y 3.4), presentaron un índice de concentración de Ca > 9.87 meq.100 g, presentando una ligera disminución en el índice de Z_B (0.62). Por otro lado 31 sitios (ID=10) presentaron un índice Z_B (0.71), asociados con índice de concentración de Ca ≤ 9.87 meq.100 g.

De los 31 sitios (ID=10), los sitios BP33, BP34 y BP35 (Figura 3.3 y 3.4), presentaron un índice Z_B (0.61), ligeramente menor, asociados con un índice de pH ≤ 4.95 . En la rama derecha, nodo ID=13, 28 sitios presentaron un índice $Z_B=0.72$ asociados a un índice de pH > 4.95 . De estos 28 sitios, los sitios BE11, BE12 y BP27, ID=15 (Figura 3.3 y 3.4) presentaron un índice de $Z_B=0.62$, asociados con un índice de HR $> 55.25\%$.

En el último nodo (ID=14) los sitios que presentaron el mayor índice Z_B (0.73), fueron BE01, BE10, BE13, BM10, BO10, BO12, BO21, BP01, BP04, BP06, BP08, BP09, BP10, BP11, BP16, BP17, BP18, BP23, BP24, BP26, BP28, BP29, BP30, BP31 y BP32 (Figura 3.3 y 3.4); indicando que éstos fueron los sitios cuya condición de copa es pobre o escasamente foliada.

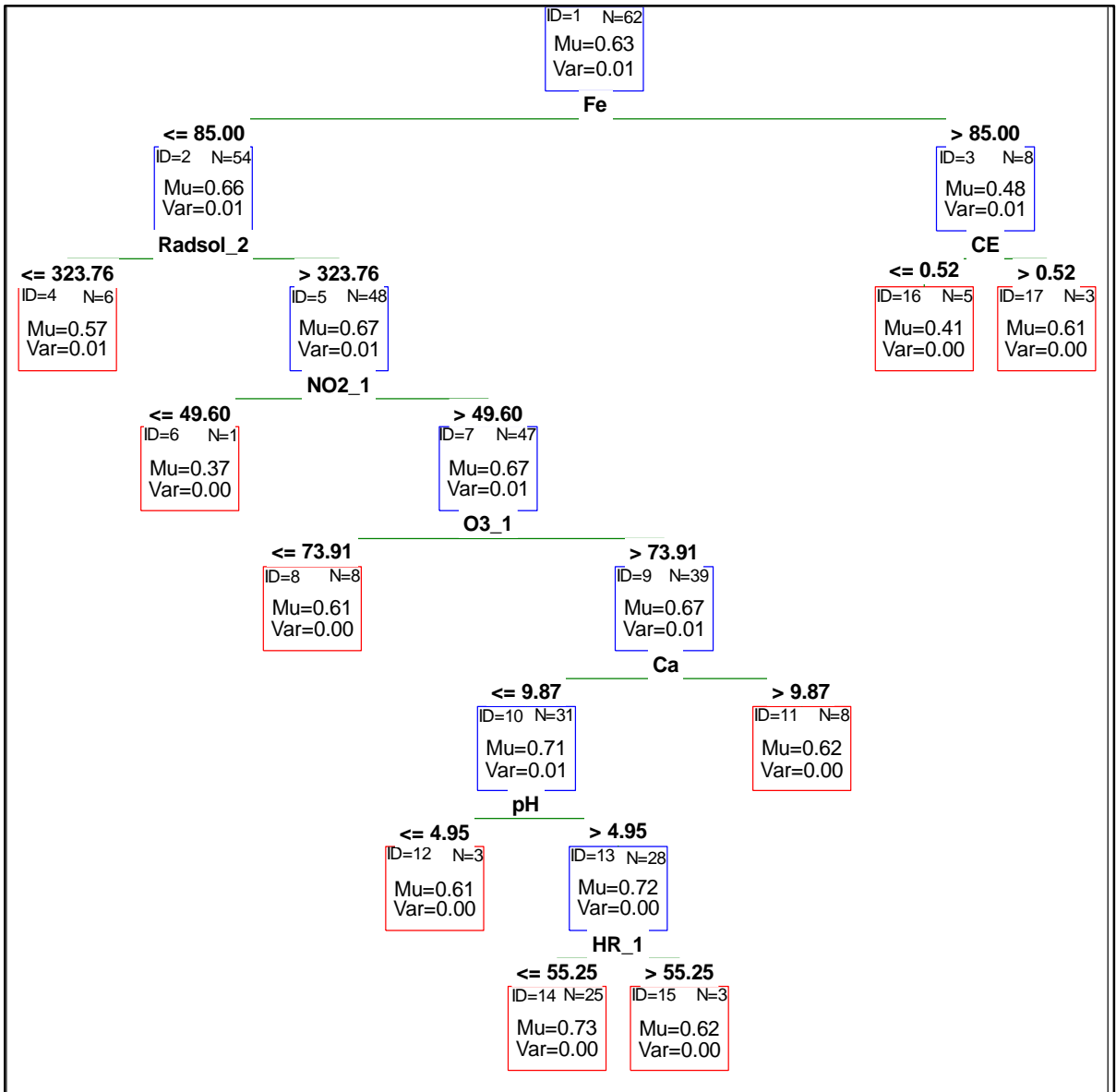


Figura 3.4 Árbol de regresión para el índice ajustado de composición foliar $Z\beta$, por sitio. Los parámetros ubicados dentro de los rectángulos indican ID: número de nodo, N: Número de sitios que cumplen con el parámetro especificado, Mu: Media por sitio del índice $Z\beta$ y Var: Varianza por sitio; valores que van a lo largo de las ramas del árbol hacia un nodo terminal en particular. Variables: Fe: Hierro, Radsol_2: Índice de radiación solar evaluada en el segundo muestreo; NO2_1: Índice de concentración Bióxido de nitrógeno, correspondiente al primer muestreo; O3_1: índice de concentración de Ozono correspondiente al primer muestreo; Ca: Calcio, pH y HR_1: porcentaje de Humedad relativa correspondiente al primer muestreo.

3.6 Discusión

Tradicionalmente, los efectos del Ozono en los bosques han sido investigados a través de experimentos controlados Manning (2005) y estudios en campo. Ferreti *et al.* (2007), mencionan que otro posible método para explorar las relaciones entre el O₃ y la condición forestal es por medio de análisis estadístico de datos que han sido colectados en los programas de monitoreo, aún sin un diseño experimental. De acuerdo con los resultados obtenidos, a través de la aplicación de árboles de decisión, una de las variables relacionadas con el Índice ajustado de composición foliar (Z_B), para evaluar la condición del bosque de conservación del Distrito Federal, fue el Ozono, indicando que con una concentración mayor a 73.91 ppb se incrementa el índice (Z_B 0.66), mayor al umbral establecido (Z_B 0.25), para considerar a un área forestal con copas saludables.

Alvarado y Hernández (2002), mencionan que las posibles causas de los síntomas de declinación del Oyamel empiezan con los factores abióticos como la contaminación atmosférica, sequía y deficiencias nutricionales; ésta continúa con los agentes bióticos como insectos y patógenos y concluye con la falta de manejo forestal. De acuerdo con el análisis de árboles de regresión los factores abióticos más significativos y cuyos valores promedio fueron: índice de radiación solar (390.07 W m⁻²), porcentaje de HR (51.97%), concentración de NO₂ (85.25 ppb), O₃ (87.35 ppb); variables edáficas: Fe (69.95 ppm) como la variable más significativa, Ca (8.07 meq/100 g) y pH (5.37).

Fenn *et al* (2002), expone que debido a la diversidad de especies vegetales que crecen en la Ciudad de México y en las áreas vecinas, y considerando la exposición de éstas a elevadas concentraciones de contaminantes fitotóxicos, hay poca duda de que las especies sensibles han sido severamente impactadas. El área de estudio está conformada por cuatro estratos forestales, cuyas especies dominantes son consideradas como sensibles a daños por contaminantes atmosféricos; de los cuales, en el bosque de oyamel la especie dominante es *Abies religiosa*; bosque de

pino, *Pinus hartwegii*; bosque mixto *Pinus hartwegii*, *Alnus firmifolia*; y bosque de encino *Quercus* spp. Esto se confirma con lo mencionado por Miller *et al* (2002), Bauer y Hernández (1986), que indican que la primer especie forestal conocida por ser severamente impactada por la contaminación atmosférica es *Pinus hartwegii*, la cual presentó un índice de composición foliar de Z_b 0.64, indicando que la mayoría del arbolado presenta una condición de copa pobre o no saludable.

Fenn *et al.* (2002), mencionan que en la cuenca del Valle de México, los contaminantes con los más grandes efectos ecológicos y ambientales son el O_3 y los compuestos de Nitrógeno. De acuerdo con el análisis estadístico el NO_2 , fue una de las principales variables correlacionadas con la condición de salud del bosque de conservación del Distrito Federal, en 48 sitios de los 62 evaluados y en seguida el O_3 en 39 sitios de los 48 sitios condicionados por NO_2 .

Hernández y Bauer (1984), mencionan que el efecto de contaminantes, especialmente gases oxidantes se ha observado en varias especies de importancia económica en el Valle de México. El ozono a concentración de 0.15 a 0.45 ppm, causan reducción hasta un 85% en la tasa fotosintética. Altas concentraciones de O_3 aumentan la respiración de los vegetales. A este respecto, en el área de investigación se registraron elevadas concentraciones máximas de O_3 (135.24 ppb) y de NO_2 (217.01 ppb), consideradas mayores a los umbrales establecidos para O_3 (110 ppb) (NOM-020-SSA1-1993) y para NO_2 (210 ppb) (NOM-023-SSA1-1993).

Jáuregui (2002), menciona que el impacto de la contaminación por ozono es particularmente severo en los bosques cercanos a las fuentes de emisión y en aquellos localizados directamente viento abajo. Este es el caso del Ajusco y el Desierto de los Leones donde las lesiones del ozono a *Pinus hartwegii* Lindl y *P. montezumae* ha sido reportado desde los años 80's (Bauer *et al.*, 2000; Miller *et al.*, 2002). De acuerdo con los autores anteriormente mencionados, el área de estudio se localiza hacia el sur – suroeste del Distrito Federal, cuyos estratos forestales están formados por coníferas susceptibles a daños por contaminación, tales como

Abies religiosa, *Pinus hartwegii* y *Quercus* spp. A través del índice Z_b , en el presente estudio se pudo determinar que el área forestal bajo estudio presenta una condición no saludable de copa para todos los sitios evaluados.

Hernández y Bauer (1984), señalan que existe un grado de daño por gases oxidantes en especial el ozono a especies sensibles como *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae*. Así mismo, en su estudio sobre evolución del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae* en el Ajusco, D. F. Los daños severos se manifiestan claramente durante el mes de diciembre. Se puede verificar que las variables NO_2 y O_3 más correlacionadas corresponden a los índices obtenidos durante el muestreo realizado en la época seca-fría 2011, cuando los niveles de NO_2 tienden a incrementarse en relación con el O_3 . Así mismo, en el presente estudio se pudo verificar que las especies clasificadas como coníferas presentaron los mayores índices de daño por O_3 . *Abies religiosa* presentó un índice de severidad de daño de 34.50%, *Pinus hartwegii* 24.32% y *Pinus montezumae* del 33.33%

Bauer y Hernández (1986), mencionan que en un estudio de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional “Desierto de los Leones” en 1985, mostró que el 96% del arbolado presentó severas lesiones por ozono. De manera similar se encontró que en el 95% del arbolado evaluado, la condición de copa se calificó como “No saludable” y el Índice de Severidad de daño promedio por O_3 en coníferas fue del 27.30%; y sólo 2.70% del presentó copas saludables.

Miller *et al.* (2002), usando un procedimiento estándar para evaluar las lesiones por ozono en pinos, compararon el daño en la condición de copa para *Pinus hartwegii* en el Desierto de los Leones con la condición de copa de un bosque mixto de *Pinus ponderosa* y *P. jeffreyi* en Barton Flats, California, USA. El índice de daño del ozono reveló que las especies de pino mexicanas tuvieron la más alta cantidad de lesión en copa. En coincidencia con este hallazgo, en el presente estudio, *Abies religiosa*

presentó un índice de severidad de daño por ozono del 34.50%, *Pinus hartwegii* 24.32% y *Pinus montezumae* 33.33%.

Especies de hojosas entre el área forestal urbana y circundante a la Ciudad de México, también presentan síntomas de estrés inducido por oxidantes, incluyendo clorosis prematura y senescencia prematura de hojas, indicador de una exposición estacional larga a contaminantes oxidantes (Bauer and Krupa, 1990). A este respecto, por clasificación de vegetación, el bosque de encino presentó un índice de transparencia de copa severa > 51%, una densidad de copa y proporción de copa promedio. Así mismo, 95.20% del arbolado presentó una condición de copa no saludable.

Bravo y Torres (2002), especifican que el dióxido de nitrógeno puede afectar adversamente a las plantas. Los efectos directos resultan de la exposición a NO₂ y ocurren en áreas localizadas. De acuerdo con la cita anterior, las áreas forestales de Encino se encuentran en los límites del área urbana y son susceptibles a daño por NO₂. En coincidencia con Bauer and Krupa (1990), éstas especies presentaron una transparencia de copa severa y un índice promedio Z_B 0.54, considerado como condición de copa no saludable y sólo el 6.77% del arbolado presentó copas saludables.

Bauer and Krupa (1990), mencionan que las especies hojosas entre el área urbana y áreas forestales aledañas de la Ciudad de México, sufren de estrés oxidativo, los síntomas incluyen clorosis prematura y temprana senescencia. Skelly *et al* (1997), realizó investigaciones del daño foliar en *Prunus serotina* var Capuli, en el Parque Nacional Desierto de los Leones; ésta especie muy sensible a la exposición de ozono, la cual presentó una defoliación mayor al 80%. De acuerdo con estos autores, en el área de estudio las especies latifoliadas de un total de 928 árboles, el 93% del arbolado (863 árboles) presentó copas no saludables.

Las plantas están expuestas a la interacción de factores bióticos y abióticos que afectan el desarrollo y respuesta al O₃. Las temperaturas cálidas, luz solar, humedad relativa, la nutrición y humedad del suelo son necesarios para que las lesiones por O₃ ocurran (Krupa, 1987). A través del análisis de árboles de regresión se tuvo correlación entre variables climáticas y edáficas con el índice ajustado de composición foliar en donde a mayor índice de radiación solar y menor índice de humedad relativa aumentan el índice Z_B; así mismo, en cuanto a variables edáficas significativas como el fierro y el calcio, en donde los menores índices también contribuyen a aumentar el índice Z_B.

López (1993), en su trabajo sobre evaluación nutrimental de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones, D. F., señala que en el área se presenta una deficiencia generalizada de potasio, magnesio y fierro. Así mismo indica que los suelos presentan bajas concentraciones de nitrógeno y calcio. En lo relativo al fierro, los resultados del presente estudio coinciden con López (1993), dado que bajos índices de Fe contribuyen a aumentar el índice Z_B y cuando éste es mayor a 0.25, indica que la condición de copa del arbolado evaluado “no es saludable”.

La profundidad del suelo, contenido de arcilla, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), K, Ca, Mg, Na y BS (Bases solubles) disminuye con la elevación en los sitios estudiados. Así mismo, estos suelos, comúnmente están limitados en nutrientes, debido a que la mayoría de los nutrientes están en forma orgánica y no están rápidamente disponibles para las plantas (Gómez, 1986). De acuerdo con este autor, los bajos niveles de Ca \leq 9.8 y pH \leq 4.95, también contribuyen a elevar el índice Z_B; a diferencia de índices de CE \leq 0.52 que contribuyen a disminuir el índice Z_B.

De acuerdo con estudios realizados por López (1993), Rivera *et al* (2006), Alvarado y Hernández (2002); los síntomas de declinación del oyamel pueden ser debidas a deficiencias nutricionales, haciendo a los árboles más susceptibles a los efectos de otros estresores incluyendo los contaminantes atmosféricos. Considerando como

otra posibilidad que los problemas nutricionales son factores secundarios en el proceso de declinación de esta especie, en el presente estudio se pudo corroborar que no únicamente los contaminantes oxidantes como el O_3 y el NO_2 fueron significativos en la determinación del índice de composición foliar; sino también variables climáticas como la radiación solar y humedad relativa, y variables edáficas como la deficiencia de fierro y calcio; y la presencia de suelos con mayor acidez, cuyo índice promedio fue de 5.37. En lo referente al índice Z_B por clasificación de especies el 97.30 % de coníferas presentaron un índice $Z_B > 0.25$. En latifoliadas el 93.23% del arbolado también presentó un índice $Z_B > 0.25$, lo que indica que sólo el 4.8% del total de arbolado presentó una condición de copa saludable.

Vázquez *et al* (2004), determinaron que la declinación de encinos en “Sierra de Lobos”, Guanajuato, México, está asociada a múltiples factores como la destrucción del hábitat, contaminación, prácticas silvícolas inadecuadas y deficiencia de nutrimentos en el suelo. Variaciones en la temperatura y humedad son factores que crean condiciones favorables para el desarrollo de este fenómeno. De acuerdo a Vázquez *et al* (2004), se pudo verificar que el 97% del arbolado de especies latifoliadas *Quercus* spp, presentaron una condición de copa no saludable y presentaron un índice de Transparencia de copa $>$ a 50%, cuyo índice está correlacionado con la defoliación y senescencia prematura del follaje.

Ferreti *et al* (2007), en su estudio sobre exposición de ozono, defoliación de *Fagus sylvatica* y síntomas foliares visibles en plantas nativas en sitios seleccionados al sur-oeste de Europa, indican que el ozono fue un significativo predictor en la defoliación de esta especie. También indican que la temperatura, radiación solar, velocidad del viento y precipitación son factores importantes asociados con los niveles de O_3 . En concordancia con los estudios de estos autores, 27.37% del arbolado evaluado en el presente estudio mostró daños por O_3 y 42.52% por agentes bióticos, manifestándose principalmente en defoliación, clorosis y muerte de ramas. Las especies evaluadas con daños en follaje por ozono fueron *Abies*

religiosa, *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae*; además de presentar gran porcentaje de ramas muertas.

Dudley and Stolton (1996), indican que desde una perspectiva ecológica, existen ecosistemas susceptibles a la contaminación atmosférica, esto es comunidades vegetales situadas en suelos pobres o rocosos, suelos delgados y comunidades vegetales en suelos ácidos o pobres en bases. De acuerdo con Dudley y Stolton (1996), se puede inferir que el bosque de conservación del Distrito Federal son comunidades vegetales susceptibles a presentar síntomas de daños por contaminantes, por ubicarse viento abajo de la zona metropolitana, principal fuente de emisión de gases oxidantes. Así mismo, de acuerdo con López (1993), los suelos forestales de éstas comunidades presentan síntomas de deficiencia de potasio, magnesio y fierro. Esto coincide con el presente estudio, donde se determinó que existen índices de deficiencia de fierro como la principal variable, además de calcio. Por otro lado, se pudo verificar que existe una tendencia generalizada hacia suelos con mayor acidez.

3.7 Conclusiones

La contaminación atmosférica no es el único factor que contribuye al deterioro de los ecosistemas forestales, está asociada a factores edáficos y climáticos que actúan a diferentes tiempos e intensidades y esto ocurre con la interacción de factores antropogénicos y la falta de manejo forestal adecuado, lo cual repercute en la calidad de los servicios ambientales que los bosques pueden proveer y la sobrevivencia de éstos.

Síntomas de clorosis, defoliación, senescencia prematura y copas escasamente foliadas están asociados a daños por ozono y bióxido de nitrógeno, estos síntomas son indicadores tanto de la situación del suelo, deposición ácida y concentración de contaminantes atmosféricos en los ecosistemas forestales.

Un ecosistema forestal expuesto a contaminantes oxidantes como el ozono y el bióxido de nitrógeno, generalmente presentan alteración en la composición de especies y en la estructura, mayor incidencia de plagas y enfermedades, incremento en la morbilidad y declinación de las especies más sensibles.

Existe un rango diverso de factores que afectan a las especies arbóreas el bosque de conservación del Distrito Federal. Entre estos se mencionan: cambios en los regímenes de agua, deposición de contaminantes, acidificación del suelo, desordenes nutrimentales, senescencia, falta de un adecuado manejo forestal y actividades antropogénicas que interactúan estacionalmente, manifestándose en el reducido crecimiento de algunas especies, pérdida de biomasa, copas escasamente foliadas y finalmente la mortalidad de éstas.

El indicador de copa e indicador de daño proporcionan información sobre la sustentabilidad, resiliencia, productividad y condición de un ecosistema forestal y es una herramienta útil para la toma de decisiones en el manejo de áreas forestales con síntomas de declinación.

3.8 Literatura citada

- Alvarado, R. D., Bauer, L. I. de and Galindo, I. 1993. Decline of Sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental Pollution* 80:115-121.
- Alvarado, R. D. y Saavedra, R. L. de L. 2012. Indicador de condición de copa. Manual de campo. (Colpos-Conafor). 18 pp.
- Alvarado, R. D. and Hernández, T. T. 2002. Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park. In *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ecol. Stud., eds. M. E. Fenn, L. I. de Bauer, and T. Hernández-Tejeda. New York. Springer-Verlag. 243-260.
- Ambrose, M. J. 2004. Criterion 3 - maintenance of ecosystem health and vitality: indicator 17: area and percentage of forest land with diminished biological components indicative of changes in fundamental ecological processes and/or ecological continuity. In: Darr, David R., coord. Data report: a supplement to the national report on sustainable forests – 2003. FS-766A. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture Forest Service. [Not paged]. Disponible en: <http://www.fs.fed.us/research/sustain>. [Date accessed: May] and Private Forestry, 68 p.
- Angulo, M. M. 2011. Introducción al uso de modelos de efectos mixtos como técnica estadística para analizar datos agrupados. 21 p.
- Bauer, L. I. de and Krupa, S. 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. de, y Hernández, T. T. 1986. Contaminación. Una amenaza para la vegetación en México. Chapingo, Estado de México, México. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México. 78 p.
- Bauer, L. I. de, Hernández, T. T. y Skelly, J. M. 2000. Air pollution problems in the forested areas of Mexico on Central America. CAB International. Air Pollution and the Forests of Developing and Rapidly Industrializing Regions. (eds) J. L. Innes and A. H. Haron.
- Betchold, W. A. and Randolph, K. C. 2007. FIA. Crown Analysis Guide. Ver. 1.0. USDA Forest Service. Arlington. VA. 62 p. [Disponible en] <http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/27730>. Consultado: 12 de agosto del 201.

- BOLFORD, Mostacedo, B. y Fredericksen, T. S. 2000. Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Editora El País, Santa Cruz, Bolivia. 87 pp.
- Bravo, A. H. and Torres, J. R. 2002. Air pollution levels and trends in the Mexico City metropolitan area. In *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ecol. Stud., eds. M. E. Fenn, L. I. de Bauer, and T. Hernández-Tejeda. New York. Springer-Verlag.
- Burkman, W., Schomaker, M., Stolte, K. W. 1995. Crown condition classification: 1995 version. In: Tallent-Halsell, N.G., ed. Forest health monitoring field methods guide. EPA/620/R-94/027. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency: 1-23. Section 2.
- Calama, S. R. y Montero, G. G. 2004. Aplicación de los modelos mixtos a un caso práctico de modelización del crecimiento y producción de las masas forestales. *Cuad. Soc. Esp. Cien, For.* 18:317-321.
- Cibrián, T. D., Méndez, M. J. T., Campos, B. R., Yates III, H. O y Flores, L. J. E. 1995. Insectos forestales en México. Universidad Autónoma Chapingo, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre de la SARH, México; Forest Service, United States USDA; NRCAN Forest Service, Canadá y Comisión Forestal de América del Norte, COFAN, FAO. Chapingo, México. 453 p.
- Chipman, H. A., George, E. I. and Mcculbch, R. E. 1998. Bayesian CART model Search (With discussion) *Journal of the American Statistical Association* 93:935-948.
- CORENA. Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal. (2005). Mapa vectorial de vegetación y uso de suelo del Distrito Federal. Esc: 1:50 000.
- Coulston, J. W., Ambrose, M.J., Riitters, K.H., Conkling, B. L., and Smith, W. D. 2005b. Forest health monitoring: 2003 national technical report. Gen. Tech. Rep. SRS-85. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 97 p.
- Dudley, N., and Stolton, S. 1996. Air pollution and biodiversity: a review. *Switzerland: WWF International*. 44 pp.
- Eichhorn, J., Roskams, P., Ferretti, M., Mues, V., Szepesi, A., and Durrant, D. 2010: Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. 49 pp. Manual Part IV. In: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Hamburg. [Disponible en:] <http://www.icp-forests.org/Manual.htm>

- Environmental Systems Research Institute. ESRI. 2008. ArcGIS 9. Using ArcGIS Geoestatistical Analyst. User Guide. 300 pp.
- Espinosa, R. M. 2007. Manual de Monitoreo de la Calidad del Aire. México, D. F. 312 pp.
- Fenn, M. E., Poth, M. A., Schilling, S. L., and Grainger, D. B. 2000. Throughfall and fog deposition of nitrogen and sulfur at an N-limited and N-saturated site in the San Bernardino Mountains, southern California. *Can. J. For. Res.* 30:1476-1488.
- Ferreti, M., Calderisi, M., and Bussotti, F. 2007. Ozone exposure, defoliation of beech (*Fagus sylvatica*) and visible foliar symptoms on native plants in selected plots of South-Western Europe. *Environmental Pollution*. 145:644-651.
- Gómez, G. A. 1986. Relación entre algunas propiedades edáficas y el crecimiento de coníferas al oeste del Tlaloc, Estado de México. Tesis Profesional. Facultad de Agrobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán, México.
- González, M. R. E., Mendoza, B. M., y Alvarado, R. D. 2010. Exposición a ozono en relación a vitalidad en un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham). *Madera y Bosques* 16(4), 2010: 7-19.
- Hawthorne, L. B. 2006. Hawth's tools ver. 3.27. Biological Sciences University of Alberta, Canada
- Hernández, T. T. y Bauer, L. I. de. 1984. Evolución del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *P. montezumae* var. *Lindleyi* en el Ajusco, D. F. Centro de Fitopatología. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. P 183-194.
- ICP-Forests. 2011. Ozone effects. Web page for the European programs on the assessment of ozone visible symptoms. Disponible en: [<http://www.icp-forests.org/>]. Consultado: 18-nov-2011.
- Jáuregui, E. 2002. The climate of the Mexico City Air Basin: Its effects on the formation and transport of pollutants. In *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ecol. Stud., eds. M. E. Fenn, L. I. de Bauer, and T. Hernández-Tejeda. New York. Springer-Verlag. 87-117
- Juárez, O. y Catells, E. 2010. Modelos de árbol de regresión bayesiano. Un estudio de caso. Revista Investigación de Operaciones. 17 p.
- Krupa, S. V. 1987. Atmospheric Ozone: Formation and effects on vegetation. *Environmental Pollution* 50, 101-137.

- López, L. M. A. 1993. Evaluación nutrimental de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Estado de México. 101 p.
- Manning, W. J. 2005. Establishing a cause and effect relationship for ambient ozone exposure and tree growth in the forests: progress and an experimental approach. *Environmental Pollution*. 137:443-454.
- Miller, P. R., de Bauer, L. I., and Hernández, T. T. 2002. Oxidant exposure and effects on pines in forests in the Mexico City and Los Angeles, California air basins. In *Urban Air Pollution and Forests: Resources at risk in the Mexico City Air Basin*. Ecol. Stud. Series, eds. M. E. Fenn, L. I. de Bauer, and T. Hernández-Tejeda. New York: Springer-Verlag. 225-243.
- Oliva, P., García K., Cortez, R., Dávila, R., Alfaro, M. R. y Duke, V. 2001. Manual de Laboratorio. Programa Aire Puro para Centro América, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. 102 pp.
- PAOT. 2010. Modelo de análisis tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el suelo de conservación del Distrito Federal. México, D. F. 223 pp.
- Percy, K. E., and Ferretti, M. 2003. Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environmental Pollution* 130:1113-126.
- RADIELLO. 2006. Manual. Fondazione Salvatore Maugeri-Irccs. Centro di Ricerche Ambientali-Padova. 56 pp.
- Randolph, K. C. Morin, R. S. and Steinman, J. 2010. Descriptive statistics of tree crown condition in the North Central United States. Gen. Tech. Rep. SRS-125. Asheville, NC. U. S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station. 28 p.
- Rivera, A. R., López, L. M. A., y Campos, B. R. 2006. Nutrición y síntomas de declinación de *Abies religiosa* (H.B.K) Sch. et Cham., en el Desierto de los Leones, D. F. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del ambiente*. 12(2):145-150
- Schomaker, M. E., Zarnoch, S. J., Bechtold, W. A., Latelle, D. J., Burkman, W. G., y Cox, S. M. 2007. Crown-Condition Classification: A guide to data collection and Analysis. United States Department of Agriculture. Forest Service. Southern Research Station. General Technical Report SRS-102. Asheville, NC. 92 p.

- SMADF. 2012. Programa general de ordenamiento ecológico del Distrito Federal. [En línea]. <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=61> 22/02/2013
- Stat soft, Inc. 2004. Statistica, Data Analysis Software System. Ver. 7.0. www.statsoft.com
- SSA. 1993. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) de la calidad del aire ambiente. Diario Oficial de la Federación. 1° de agosto de 2002.
- SSA. 1993. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) de la calidad del aire ambiente. Diario Oficial de la Federación. 1° de agosto de 2002.
- Timofeev, R. 2004. Classification and regression trees (CART). Theory and applications. Center of Applied Statistics and Economics Humboldt University, Berlin.
- Vázquez, S. L., Tamarit, U. J. C., y Quintanar, O. J. 2004. Caracterización de la declinación de bosques de encinos en “Sierra de Lobos”, Guanajuato, México. Polibotánica. 17:1-14.
- Zarnoch, S. J., Bechtold, W. A., and Stolte, K. W. 2004. Crown condition as an indicator of forest health. Canadian Journal of Forest Research. 34:1057-1070.

CONCLUSIONES GENERALES

EL BOSQUE DE CONSERVACION del Distrito Federal son comunidades vegetales susceptibles a presentar síntomas de daños asociados a contaminantes; sin embargo, la contaminación atmosférica no es el único factor que contribuye al deterioro y proceso de declinación de algunas especies como *Abies religiosa*. En este proceso la muerte de estructuras en el árbol es un indicador de la prematura y relativa declinación de éste, asociado a factores causales como la senescencia de la especie, incidencia de insectos y patógenos, acidificación del suelo, desordenes nutrimentales, incendios forestales, falta de manejo adecuado y daños como desmoche, descortezado y ocoteo.

La condición de copa y los síntomas de daño proporcionan información valiosa referente a la condición del bosque e indica las posibles causas de deterioro, daño o declinación de éste. Generalmente, la incidencia de los daños en el árbol se manifiesta por el reducido crecimiento, pérdida de biomasa, pobre condición de copa o copas escasamente foliadas, mortalidad de ramas y en su defecto la muerte del árbol.

ANEXO

Cuadro 2.3 Índices promedio del Indicador de copa e índice Z_{β} en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Unidad	PrC	DnC	TrC	Mreg	ExpL	Z_{β}
Todo el arbolado	44.6	49.6	53.03	5.44	3	0.59
Coníferas	46.0	55.4	47.05	3.19	3	0.65
Latifoliadas	43.3	44.3	58.55	7.50	2	0.53
Bosque de encino	43.4	45.3	57.99	8.36	2	0.54
Bosque mixto	46.7	49.1	50.76	3.62	3	0.61
Bosque de oyamel	38.2	53.96	47.63	4.0	3	0.63
Bosque de pino	50.4	54.62	48.96	1.94	3	0.64

PrC: Proporción de copa, DnC: Densidad de copa, TrC: Transparencia de copa, Mreg: Muerte regresiva, ExpL: Número de lados de la copa expuestos a la luz, Z_{β} : Índice ajustado de composición foliar.

Cuadro 2.4 Índices promedio del Indicador de copa e índice Z_{β} por especie, en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Especie	PrC	DnC	TrC	Mreg	ExpL	Z_{β}
<i>Abies religiosa</i>	40.78	56.1	45.30	5.11	3	0.65
<i>Cupressus lusitánica</i>	52.91	56.4	43.79	5.83	3	0.66
<i>Pinus hartwegii</i>	48.32	54.6	49.45	4.14	2	0.64
<i>P. montezumae</i>	47.43	55.6	45.07	1.57	4	0.69
<i>P. rudis</i>	47.27	57.5	45.91	0.0	3	0.69
<i>Alnus firmifolia</i>	60.65	49.4	51.94	5.46	3	0.59
<i>Quercus castanea</i>	34.09	41.5	61.84	21.6	3	0.47
<i>Q. crassipes</i>	60.11	53.5	52.61	3.41	1	0.61
<i>Q. deserticola</i>	38.86	44.5	62.68	11.3	1	0.51
<i>Q. laurina</i>	35.25	38.0	69.26	10.7	3	0.43
<i>Q. obtusata</i>	43.51	39.2	65.41	10.7	2	0.46
<i>Q. rugosa</i>	50.84	52.9	46.94	5.4	2	0.66

PrC: Proporción de copa, DnC: Densidad de copa, TrC: Transparencia de copa, Mreg: Muerte regresiva, ExpL: Número de lados de la copa expuestos a la luz, Z_{β} : Índice ajustado de composición foliar.

Cuadro 2.5 Media del índice de severidad de daño para todo el arbolado, por clasificación de especies y tipo de vegetación, en el bosque de conservación del Distrito Federal.

	No. arb dañados	LoC	Solución de efectos fijos			Error estándar	Valor t	Pr> t
			Catgen	Clave	Estimador			
Todos los árboles	38	Follaje	Abio	ABI04	27.37	2.62	10.	<.0001
	22	Follaje	Bio	BIO01	35.91	3.45	10.	<.0001
	44	Follaje	Bio	BIO02	43.41	2.44	17.	<.0001
	4	Follaje	Bio	BIO03	30.00	8.08	3.7	0.0002
	3	Follaje	Bio	BIO04	36.67	9.33	3.9	<.0001
	32	Follaje	Bio	BIO18	48.75	2.86	17.	<.0001
	4	Follaje	Bio	BIO20	36.25	8.08	4.4	<.0001
	6	Ramas	Abio	ABI01	40.00	6.60	6.0	<.0001
	14	Ramas	Abio	ABI03	27.14	4.32	6.2	<.0001
	3	Ramas	Ant	ANT01	48.33	9.33	5.1	<.0001
	4	Ramas	Bio	BIO05	16.25	8.08	2.0	0.0445
	4	Ramas	Bio	BIO06	16.25	8.08	2.0	0.0445
	2	Ramas	Bio	BIO07	20.00	11.43	1.7	0.0804
	17	Ramas	Bio	BIO08	28.82	3.92	7.3	<.0001
	1	Ramas	Bio	BIO09	10.00	16.17	0.6	0.5363
	9	Ramas	Bio	BIO14	35.56	5.39	6.6	<.0001
	2	Ramas	Bio	BIO15	57.50	11.43	5.0	<.0001
	28	Ramas	Bio	BIO16	19.82	3.06	6.4	<.0001
	83	Ramas	Bio	BIO17	30.64	1.77	17.	<.0001
	37	Ramas	Bio	BIO21	62.03	2.66	23.	<.0001
	307	Tronco	Abio	ABI01	48.27	0.92	52.	<.0001
	6	Tronco	Abio	ABI02	41.67	6.60	6.3	<.0001
	57	Tronco	Abio	ABI03	37.02	2.14	17.	<.0001
	3	Tronco	Ant	ANT01	46.67	9.33	5.0	<.0001
	26	Tronco	Ant	ANT02	32.69	3.17	10.	<.0001
	9	Tronco	Ant	ANT03	76.11	5.39	14.	<.0001
	15	Tronco	Ant	ANT04	35.33	4.17	8.4	<.0001
	1	Tronco	Bio	BIO05	45.00	16.17	2.7	0.0054
	20	Tronco	Bio	BIO09	37.00	3.61	10.	<.0001
	4	Tronco	Bio	BIO10	37.50	8.08	4.6	<.0001
18	Tronco	Bio	BIO11	29.17	3.81	7.6	<.0001	
2	Tronco	Bio	BIO12	45.00	11.43	3.9	<.0001	
35	Tronco	Bio	BIO13	74.03	2.73	27.	<.0001	
4	Tronco	Bio	BIO14	26.25	8.08	3.2	0.0012	
1	Tronco	Bio	BIO15	30.00	16.17	1.8	0.0637	
99	Tronco	Bio	BIO16	27.53	1.62	16.	<.0001	
19	Tronco	Bio	BIO19	32.11	3.71	8.6	<.0001	

Coníferas	37	Follaje	Abio	ABI04	27.30	2.53	10.	<.0001
	4	Follaje	Bio	BIO03	30.00	7.71	3.8	0.0001
	2	Ramas	Abio	ABI01	30.00	10.90	2.7	0.006
	14	Ramas	Abio	ABI03	27.14	4.12	6.5	<.0001
	2	Ramas	Ant	ANT01	65.00	10.90	5.9	<.0001
	4	Ramas	Bio	BIO05	16.25	7.71	2.1	0.0352
	9	Ramas	Bio	BIO08	32.78	5.14	6.3	<.0001
	1	Ramas	Bio	BIO09	10.00	15.42	0.6	0.5167
	1	Ramas	Bio	BIO14	10.00	15.42	0.6	0.5167
	17	Ramas	Bio	BIO17	41.76	3.74	11.	<.0001
	9	Ramas	Bio	BIO21	25.56	5.14	4.9	<.0001
	251	Tronco	Abio	ABI01	51.55	0.97	52.	<.0001
	6	Tronco	Abio	ABI02	41.67	6.29	6.6	<.0001
	38	Tronco	Abio	ABI03	30.13	2.50	12.	<.0001
	3	Tronco	Ant	ANT01	46.67	8.90	5.2	<.0001
	23	Tronco	Ant	ANT02	32.17	3.21	10.	<.0001
	15	Tronco	Ant	ANT04	35.33	3.98	8.8	<.0001
	1	Tronco	Bio	BIO05	45.00	15.42	2.9	0.0036
	20	Tronco	Bio	BIO09	37.00	3.45	10.	<.0001
	4	Tronco	Bio	BIO10	37.50	7.71	4.8	<.0001
15	Tronco	Bio	BIO11	27.67	3.98	6.9	<.0001	
4	Tronco	Bio	BIO14	26.25	7.71	3.4	0.0007	
1	Tronco	Bio	BIO15	30.00	15.42	1.9	0.0518	
1	Tronco	Bio	BIO16	20.00	15.42	1.3	0.1947	
7	Tronco	Bio	BIO19	27.86	5.83	4.7	<.0001	
Latifoliadas	1	Follaje	Abio	ABI04	30.00	15.42	1.9	0.0518
	22	Follaje	Bio	BIO01	35.91	3.29	10.	<.0001
	44	Follaje	Bio	BIO02	43.41	2.32	18.	<.0001
	3	Follaje	Bio	BIO04	36.67	8.90	4.1	<.0001
	32	Follaje	Bio	BIO18	48.75	2.73	17.	<.0001
	4	Follaje	Bio	BIO20	36.25	7.71	4.7	<.0001
	4	Ramas	Abio	ABI01	45.00	7.71	5.8	<.0001
	1	Ramas	Ant	ANT01	15.00	15.42	0.9	0.3307
	4	Ramas	Bio	BIO06	16.25	7.71	2.1	0.0352
	2	Ramas	Bio	BIO07	20.00	10.90	1.8	0.0667
	8	Ramas	Bio	BIO08	24.38	5.45	4.4	<.0001
	8	Ramas	Bio	BIO14	38.75	5.45	7.1	<.0001
	2	Ramas	Bio	BIO15	57.50	10.90	5.2	<.0001
	28	Ramas	Bio	BIO16	19.82	2.91	6.8	<.0001
	66	Ramas	Bio	BIO17	27.77	1.90	14.	<.0001

	28	Ramas	Bio	BIO21	73.75	2.91	25.	<.0001
	56	Tronco	Abio	ABI01	33.57	2.06	16.	<.0001
	19	Tronco	Abio	ABI03	50.79	3.54	14.	<.0001
	3	Tronco	Ant	ANT02	36.67	8.90	4.1	<.0001
	9	Tronco	Ant	ANT03	76.11	5.14	14.	<.0001
	3	Tronco	Bio	BIO11	36.67	8.90	4.1	<.0001
	2	Tronco	Bio	BIO12	45.00	10.90	4.1	<.0001
	35	Tronco	Bio	BIO13	74.03	2.61	28.	<.0001
	98	Tronco	Bio	BIO16	27.60	1.56	17.	<.0001
	12	Tronco	Bio	BIO19	34.58	4.45	7.7	<.0001
Bosque de encino	1	Follaje	Abio	ABI04	30.00	15.08	1.9	0.0468
	22	Follaje	Bio	BIO01	35.91	3.21	11.	<.0001
	44	Follaje	Bio	BIO02	43.41	2.27	19.	<.0001
	3	Follaje	Bio	BIO04	36.67	8.70	4.2	<.0001
	32	Follaje	Bio	BIO18	48.75	2.67	18.	<.0001
	4	Follaje	Bio	BIO20	36.25	7.54	4.8	<.0001
	3	Ramas	Abio	ABI01	43.33	8.70	4.9	<.0001
	1	Ramas	Ant	ANT01	15.00	15.08	0.9	0.3199
	4	Ramas	Bio	BIO06	16.25	7.54	2.1	0.0313
	2	Ramas	Bio	BIO07	20.00	10.66	1.8	0.0608
	3	Ramas	Bio	BIO14	33.33	8.70	3.8	0.0001
	2	Ramas	Bio	BIO15	57.50	10.66	5.3	<.0001
	26	Ramas	Bio	BIO16	19.62	2.96	6.6	<.0001
	63	Ramas	Bio	BIO17	27.03	1.90	14.	<.0001
	13	Ramas	Bio	BIO21	73.54	4.18	17.	<.0001
	57	Tronco	Abio	ABI01	31.67	2.00	15.	<.0001
	6	Tronco	Abio	ABI03	68.33	6.16	11.	<.0001
	9	Tronco	Ant	ANT03	76.11	5.03	15.	<.0001
	2	Tronco	Bio	BIO12	45.00	10.66	4.2	<.0001
	35	Tronco	Bio	BIO13	74.03	2.55	29.	<.0001
	95	Tronco	Bio	BIO16	27.84	1.55	18.	<.0001
	12	Tronco	Bio	BIO19	34.58	4.35	7.9	<.0001
Bosque mixto	2	Follaje	Abio	ABI04	12.50	10.66	1.1	0.2412
	1	Ramas	Abio	ABI01	30.00	15.08	1.9	0.0468
	2	Ramas	Abio	ABI03	35.00	10.66	3.2	0.001
	17	Ramas	Bio	BIO08	28.82	3.66	7.8	<.0001
	5	Ramas	Bio	BIO14	42.00	6.74	6.2	<.0001
	1	Ramas	Bio	BIO16	20.00	15.08	1.3	0.1848
	2	Ramas	Bio	BIO17	45.00	10.66	4.2	<.0001

	10	Ramas	Bio	BIO21	70.50	4.77	14.	<.0001
	28	Tronco	Abio	ABI01	48.39	2.85	16.	<.0001
	4	Tronco	Abio	ABI02	30.00	7.54	3.9	<.0001
	14	Tronco	Abio	ABI03	40.00	4.03	9.9	<.0001
	1	Tronco	Ant	ANT01	90.00	15.08	5.9	<.0001
	5	Tronco	Ant	ANT02	48.00	6.74	7.1	<.0001
	3	Tronco	Ant	ANT04	30.00	8.70	3.4	0.0006
	1	Tronco	Bio	BIO05	45.00	15.08	2.9	0.0029
	1	Tronco	Bio	BIO10	20.00	15.08	1.3	0.1848
	5	Tronco	Bio	BIO11	40.00	6.74	5.9	<.0001
	2	Tronco	Bio	BIO16	20.00	10.66	1.8	0.0608
Bosque de oyamel	11	Follaje	Abio	ABI04	32.73	4.55	7.2	<.0001
	2	Ramas	Abio	ABI01	40.00	10.66	3.7	0.0002
	5	Ramas	Abio	ABI03	23.00	6.74	3.4	0.0007
	1	Ramas	Ant	ANT01	60.00	15.08	3.9	<.0001
	4	Ramas	Bio	BIO05	16.25	7.54	2.1	0.0313
	1	Ramas	Bio	BIO09	10.00	15.08	0.6	0.5073
	1	Ramas	Bio	BIO14	10.00	15.08	0.6	0.5073
	18	Ramas	Bio	BIO17	41.67	3.55	11.	<.0001
	17	Tronco	Abio	ABI01	27.94	3.66	7.6	<.0001
	17	Tronco	Abio	ABI03	32.35	3.66	8.8	<.0001
	1	Tronco	Ant	ANT01	30.00	15.08	1.9	0.0468
	13	Tronco	Ant	ANT02	24.23	4.18	5.7	<.0001
	20	Tronco	Bio	BIO09	37.00	3.37	10.	<.0001
	13	Tronco	Bio	BIO11	25.00	4.18	5.9	<.0001
	2	Tronco	Bio	BIO19	17.50	10.66	1.6	0.1009
Bosque de pino	24	Follaje	Abio	ABI04	26.04	3.08	8.4	<.0001
	4	Follaje	Bio	BIO03	30.00	7.54	3.9	<.0001
	7	Ramas	Abio	ABI03	27.86	5.70	4.8	<.0001
	1	Ramas	Ant	ANT01	70.00	15.08	4.6	<.0001
	1	Ramas	Bio	BIO16	25.00	15.08	1.6	0.0975
	14	Ramas	Bio	BIO21	45.29	4.03	11.	<.0001
	205	Tronco	Abio	ABI01	54.56	1.05	51.	<.0001
	2	Tronco	Abio	ABI02	65.00	10.66	6.1	<.0001
	20	Tronco	Abio	ABI03	29.50	3.37	8.7	<.0001
	1	Tronco	Ant	ANT01	20.00	15.08	1.3	0.1848
	8	Tronco	Ant	ANT02	36.88	5.33	6.9	<.0001
	12	Tronco	Ant	ANT04	36.67	4.35	8.4	<.0001
	3	Tronco	Bio	BIO10	43.33	8.70	4.9	<.0001
	4	Tronco	Bio	BIO14	26.25	7.54	3.4	0.0005
	1	Tronco	Bio	BIO15	30.00	15.08	1.9	0.0468
	2	Tronco	Bio	BIO16	20.00	10.66	1.8	0.0608
	5	Tronco	Bio	BIO19	32.00	6.74	4.7	<.0001

Loc: Localización del daño en el árbol
Catgen: Categoría general del agente de daño

Clave:
Abio Abiótico
Bio Biótico
Ant Antropogénico

Enfermedades por hongos en follaje

BIO01 *Apiognomia quercina*
BIO02 *Pestalotiopsis funerea*
BIO03 *Ploioderma lethale*
BIO04 *Microsphaera*

Enfermedades causadas por royas en ramas

BIO05 *Melampsorella Cayophyllacearum*
BIO06 *Cronartium quercuum*

Cancros causados por hongos en ramas y tronco

BIO07 *Hypoxylon*
BIO08 *Seiridium unicorne*
BIO11 *Fusarium circinatum*
BIO13 *Nectria cinnabarina*

Hongos que causan pudrición en tronco

BIO09 *Phellinus pini*
BIO10 *Armillaria*
BIO12 *Ganoderma*

BIO14 Muérdago
BIO15 Plantas epífitas
*BIO16 Pudrición
*BIO17 Ramas muertas
BIO18 Insectos defoliadores
BIO19 Insectos que se alimentan de floema
*BIO20 Clorosis
*BIO21 Defoliación

ABI01 Fuego
ABI02 Rayos
ABI03 Viento
ABI04 Ozono

ANT01 Desmoche
ANT02 Descortezado
*ANT03 Brotes epicórmicos
*ANT04 Ocoteo

*Signos

Cuadro 2.6 Media del Índice de severidad de daño por especie en el bosque de conservación del Distrito Federal

Especie	No. arb. dañados	LoC	Catgen	Clave	Solución de efectos fijos			
					Estimad	Error	Valor t	Pr> t
<i>Abies religiosa</i>	10	Follaje	Abio	ABI04	34.50	4.38	7.88	<.0001
	1	Ramas	Abio	ABI01	30.00	13.84	2.17	0.0304
	3	Ramas	Abio	ABI03	16.67	7.99	2.09	0.0372
	1	Ramas	Ant	ANT01	60.00	13.84	4.33	<.0001
	4	Ramas	Bio	BIO05	16.25	6.92	2.35	0.019
	1	Ramas	Bio	BIO09	10.00	13.84	0.72	0.4702
	1	Ramas	Bio	BIO14	10.00	13.84	0.72	0.4702
	16	Ramas	Bio	BIO17	41.88	3.46	12.1	<.0001
	22	Tronco	Abio	ABI01	33.64	2.95	11.4	<.0001
	4	Tronco	Abio	ABI02	30.00	6.92	4.33	<.0001
	22	Tronco	Abio	ABI03	29.77	2.95	10.0	<.0001
	2	Tronco	Ant	ANT01	60.00	9.79	6.13	<.0001
	19	Tronco	Ant	ANT02	30.26	3.18	9.53	<.0001
	20	Tronco	Bio	BIO09	37.00	3.10	11.9	<.0001
	13	Tronco	Bio	BIO11	25.00	3.84	6.51	<.0001
<i>Alnus firmifolia</i>	2	Tronco	Bio	BIO19	17.50	9.79	1.79	0.074
	4	Follaje	Bio	BIO01	30.00	6.92	4.33	<.0001
	3	Ramas	Bio	BIO14	35.00	7.99	4.38	<.0001
	1	Ramas	Bio	BIO17	50.00	13.84	3.61	0.0003
	13	Ramas	Bio	BIO21	73.08	3.84	19.0	<.0001
	1	Tronco	Abio	ABI01	40.00	13.84	2.89	0.0039
	11	Tronco	Abio	ABI03	40.00	4.17	9.58	<.0001
	2	Tronco	Ant	ANT02	35.00	9.79	3.58	0.0004
	3	Tronco	Bio	BIO11	36.67	7.99	4.59	<.0001
	<i>Cupressus lusitanica</i>	1	Ramas	Abio	ABI01	30.00	13.84	2.17
2		Ramas	Abio	ABI03	35.00	9.79	3.58	0.0004
8		Ramas	Bio	BIO08	30.63	4.89	6.26	<.0001
1		Ramas	Bio	BIO17	40.00	13.84	2.89	0.0039
3		Tronco	Abio	ABI01	5.00	7.99	0.63	0.5317
2		Tronco	Abio	ABI03	45.00	9.79	4.60	<.0001
2		Tronco	Ant	ANT02	50.00	9.79	5.11	<.0001
1		Tronco	Bio	BIO05	45.00	13.84	3.25	0.0012
<i>Pinus hartwegii</i>	22	Follaje	Abio	ABI04	24.32	2.95	8.24	<.0001
	4	Follaje	Bio	BIO03	30.00	6.92	4.33	<.0001
	3	Ramas	Abio	ABI03	30.00	7.99	3.75	0.0002
	1	Ramas	Ant	ANT01	70.00	13.84	5.06	<.0001
	9	Ramas	Bio	BIO21	25.56	4.61	5.54	<.0001
	174	Tronco	Abio	ABI01	53.76	1.05	51.2	<.0001
	2	Tronco	Abio	ABI02	65.00	9.79	6.64	<.0001
14	Tronco	Abio	ABI03	28.57	3.70	7.72	<.0001	

	1	Tronco	Ant	ANT01	20.00	13.84	1.44	0.1488
	1	Tronco	Ant	ANT02	30.00	13.84	2.17	0.0304
	13	Tronco	Ant	ANT04	31.92	3.84	8.31	<.0001
	3	Tronco	Bio	BIO10	43.33	7.99	5.42	<.0001
	1	Tronco	Bio	BIO11	50.00	13.84	3.61	0.0003
	3	Tronco	Bio	BIO14	33.33	7.99	4.17	<.0001
	1	Tronco	Bio	BIO15	30.00	13.84	2.17	0.0304
	1	Tronco	Bio	BIO16	20.00	13.84	1.44	0.1488
	5	Tronco	Bio	BIO19	32.00	6.19	5.17	<.0001
<i>Pinus montezumae</i>	3	Follaje	Abio	ABI04	33.33	7.99	4.17	<.0001
	1	Ramas	Bio	BIO08	50.00	13.84	3.61	0.0003
	43	Tronco	Abio	ABI01	58.26	2.11	27.5	<.0001
	1	Tronco	Ant	ANT04	65.00	13.84	4.69	<.0001
	1	Tronco	Bio	BIO14	5.00	13.84	0.36	0.718
<i>Pinus rudis</i>	4	Ramas	Abio	ABI03	26.25	6.92	3.79	0.0002
	1	Tronco	Abio	ABI01	30.00	13.84	2.17	0.0304
<i>Quercus castanea</i>	32	Follaje	Bio	BIO18	48.75	2.45	19.9	<.0001
	3	Follaje	Bio	BIO20	40.00	7.99	5.00	<.0001
	3	Ramas	Abio	ABI01	43.33	7.99	5.42	<.0001
	4	Ramas	Bio	BIO16	33.75	6.92	4.88	<.0001
	15	Ramas	Bio	BIO17	37.87	3.57	10.5	<.0001
	14	Tronco	Abio	ABI01	40.36	3.70	10.9	<.0001
	2	Tronco	Ant	ANT03	55.00	9.79	5.62	<.0001
	33	Tronco	Bio	BIO13	76.70	2.41	31.8	<.0001
	39	Tronco	Bio	BIO16	36.79	2.22	16.6	<.0001
	6	Tronco	Bio	BIO19	59.17	5.65	10.4	<.0001
<i>Quercus crassipes</i>	15	Follaje	Bio	BIO01	41.33	3.57	11.5	<.0001
	1	Follaje	Bio	BIO20	25.00	13.84	1.81	0.0711
	2	Tronco	Abio	ABI03	57.50	9.79	5.87	<.0001
	2	Tronco	Bio	BIO16	22.50	9.79	2.30	0.0217
<i>Quercus deserticola</i>	2	Ramas	Bio	BIO06	25.00	9.79	2.55	0.0107
	1	Ramas	Bio	BIO15	45.00	13.84	3.25	0.0012
	2	Ramas	Bio	BIO17	10.00	9.79	1.02	0.3072
	6	Tronco	Abio	ABI01	38.33	5.65	6.78	<.0001
	1	Tronco	Bio	BIO12	50.00	13.84	3.61	0.0003
	1	Tronco	Bio	BIO13	50.00	13.84	3.61	0.0003
	3	Tronco	Bio	BIO19	6.67	7.99	0.83	0.4044
<i>Quercus laurina</i>	4	Follaje	Bio	BIO02	36.25	6.92	5.24	<.0001
	1	Ramas	Ant	ANT01	15.00	13.84	1.08	0.2788
	12	Ramas	Bio	BIO16	15.83	4.00	3.96	<.0001
	8	Ramas	Bio	BIO17	20.63	4.89	4.21	<.0001
	5	Ramas	Bio	BIO21	76.80	6.19	12.4	<.0001
	31	Tronco	Abio	ABI01	29.19	2.49	11.7	<.0001
	1	Tronco	Abio	ABI03	40.00	13.84	2.89	0.0039
	6	Tronco	Ant	ANT03	82.50	5.65	14.6	<.0001

<i>Quercus obtusata</i>	20	Tronco	Bio	BIO16	17.00	3.10	5.49	<.0001
	1	Ramas	Bio	BIO06	10.00	13.84	0.72	0.4702
	1	Ramas	Bio	BIO14	10.00	13.84	0.72	0.4702
	7	Ramas	Bio	BIO16	15.71	5.23	3.00	0.0027
	23	Ramas	Bio	BIO17	13.91	2.89	4.82	<.0001
	2	Ramas	Bio	BIO21	94.50	9.79	9.65	<.0001
	1	Tronco	Ant	ANT03	80.00	13.84	5.78	<.0001
	1	Tronco	Bio	BIO12	40.00	13.84	2.89	0.0039
<i>Quercus rugosa</i>	1	Tronco	Bio	BIO13	10.00	13.84	0.72	0.4702
	25	Tronco	Bio	BIO16	18.20	2.77	6.57	<.0001
	1	Follaje	Abio	ABI04	30.00	13.84	2.17	0.0304
	38	Follaje	Bio	BIO02	45.39	2.25	20.2	<.0001
	3	Follaje	Bio	BIO04	36.67	7.99	4.59	<.0001
	1	Ramas	Bio	BIO06	5.00	13.84	0.36	0.718
	2	Ramas	Bio	BIO16	12.50	9.79	1.28	0.2018
	3	Ramas	Bio	BIO17	13.33	7.99	1.67	0.0955
	6	Ramas	Bio	BIO21	63.83	5.65	11.2	<.0001
	1	Tronco	Abio	ABI01	15.00	13.84	1.08	0.2788
	5	Tronco	Abio	ABI03	74.00	6.19	11.9	<.0001
	5	Tronco	Bio	BIO16	40.00	6.19	6.46	<.0001
	1	Tronco	Bio	BIO19	30.00	13.84	2.17	0.0304

Loc: Localización del daño en el árbol

Catgen: Categoría general del agente de daño

Clave:

Abi Abiótico

Bio Biótico

Ant Antropogénico

Enfermedades por hongos en follaje

BIO01 *Apiognomia quercina*

BIO02 *Pestalotiopsis funerea*

BIO03 *Ploioderma lethale*

BIO04 *Microsphaera*

Enfermedades causadas por royas en ramas

BIO05 *Melampsorella Cayophylloearum*

BIO06 *Cronartium quercuum*

Cancros causados por hongos en ramas y tronco

BIO07 *Hypoxylon*

BIO08 *Seiridium unicorne*

BIO11 *Fusarium circinatum*

BIO13 *Nectria cinnabarina*

Hongos que causan pudrición en tronco

BIO09 *Phellinus pini*

BIO10 *Armillaria*

BIO12 *Ganoderma*

BIO14 Muérdago

BIO15 Plantas epífitas

*BIO16 Pudrición

*BIO17 Ramas muertas

BIO18 Insectos defoliadores

BIO19 Insectos que se alimentan de floema

*BIO20 Clorosis

*BIO21 Defoliación

ABI01 Fuego

ABI02 Rayos

ABI03 Viento

ABI04 Ozono

*ANT01 Desmoche

*ANT02 Descortezado

*ANT03 Brotes epicórmicos

*ANT04 Ocoteo

Cuadro 3 2. Índice ajustado de composición foliar ZB por sitio en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Efecto	Sitio	Tipo de vegetación	Estimador	Error estándar	Valor t	Pr > t
Sitio	BE01	B. encino	0.705	0.022	31.35	<.0001
Sitio	BE03	B. encino	0.395	0.014	28.45	<.0001
Sitio	BE04	B. encino	0.581	0.020	29.13	<.0001
Sitio	BE06	B. encino	0.483	0.019	25.37	<.0001
Sitio	BE07	B. encino	0.334	0.021	15.9	<.0001
Sitio	BE08	B. encino	0.412	0.020	20.49	<.0001
Sitio	BE09	B. encino	0.405	0.019	21.15	<.0001
Sitio	BE10	B. encino	0.768	0.023	33.81	<.0001
Sitio	BE11	B. encino	0.701	0.020	35.45	<.0001
Sitio	BE12	B. encino	0.623	0.020	30.49	<.0001
Sitio	BE13	B. encino	0.697	0.020	34.69	<.0001
Sitio	BE14	B. encino	0.599	0.029	20.37	<.0001
Sitio	BM03	B. mixto	0.398	0.022	17.7	<.0001
Sitio	BM05	B. mixto	0.628	0.045	13.98	<.0001
Sitio	BM06	B. mixto	0.555	0.049	11.27	<.0001
Sitio	BM09	B. mixto	0.373	0.042	8.96	<.0001
Sitio	BM10	B. mixto	0.674	0.030	22.51	<.0001
Sitio	BO01	B. oyamel	0.527	0.021	25.34	<.0001
Sitio	BO04	B. oyamel	0.551	0.045	12.26	<.0001
Sitio	BO05	B. oyamel	0.606	0.052	11.67	<.0001
Sitio	BO06	B. oyamel	0.562	0.032	17.3	<.0001
Sitio	BO08	B. oyamel	0.617	0.036	17.28	<.0001
Sitio	BO09	B. oyamel	0.598	0.019	31.42	<.0001
Sitio	BO10	B. oyamel	0.740	0.028	26.04	<.0001
Sitio	BO11	B. oyamel	0.565	0.037	15.4	<.0001
Sitio	BO12	B. oyamel	0.714	0.026	27.5	<.0001
Sitio	BO14	B. oyamel	0.671	0.022	30.45	<.0001
Sitio	BO18	B. oyamel	0.600	0.023	26.15	<.0001
Sitio	BO20	B. oyamel	0.767	0.032	23.64	<.0001
Sitio	BO21	B. oyamel	0.635	0.028	22.35	<.0001
Sitio	BP01	B. pino	0.742	0.064	11.67	<.0001
Sitio	BP02	B. pino	0.630	0.059	10.71	<.0001
Sitio	BP04	B. pino	0.613	0.078	7.87	<.0001
Sitio	BP05	B. pino	0.600	0.070	8.62	<.0001
Sitio	BP06	B. pino	0.753	0.038	19.94	<.0001
Sitio	BP07	B. pino	0.636	0.059	10.8	<.0001
Sitio	BP08	B. pino	0.701	0.036	19.61	<.0001
Sitio	BP09	B. pino	0.734	0.024	30.91	<.0001
Sitio	BP10	B. pino	0.628	0.064	9.88	<.0001

Sitio	BP11	B. pino	0.755	0.064	11.88	<.0001
Sitio	BP12	B. pino	0.634	0.036	17.75	<.0001
Sitio	BP15	B. pino	0.661	0.033	19.92	<.0001
Sitio	BP16	B. pino	0.663	0.035	19.03	<.0001
Sitio	BP17	B. pino	0.785	0.049	15.94	<.0001
Sitio	BP18	B. pino	0.783	0.090	8.71	<.0001
Sitio	BP19	B. pino	0.611	0.034	17.98	<.0001
Sitio	BP20	B. pino	0.591	0.045	13.15	<.0001
Sitio	BP22	B. pino	0.519	0.039	13.34	<.0001
Sitio	BP23	B. pino	0.670	0.049	13.61	<.0001
Sitio	BP24	B. pino	0.708	0.043	16.39	<.0001
Sitio	BP26	B. pino	0.750	0.090	8.34	<.0001
Sitio	BP27	B. pino	0.543	0.059	9.22	<.0001
Sitio	BP28	B. pino	0.881	0.055	16.01	<.0001
Sitio	BP29	B. pino	0.830	0.070	11.92	<.0001
Sitio	BP30	B. pino	0.800	0.070	11.49	<.0001
Sitio	BP31	B. pino	0.728	0.031	23.38	<.0001
Sitio	BP32	B. pino	0.691	0.033	20.81	<.0001
Sitio	BP33	B. pino	0.650	0.029	22.09	<.0001
Sitio	BP34	B. pino	0.634	0.028	22.66	<.0001
Sitio	BP35	B. pino	0.558	0.018	31.24	<.0001
Sitio	BP36	B. pino	0.653	0.031	20.96	<.0001

Cuadro 3 3. Índice de severidad de daño ISD por sitio en el bosque de conservación del Distrito Federal.

Efecto	Sitio	Tipo de vegetación	Estimador	Error estándar	Valor t	Pr > t
Sitio	BE01	B. encino	15.80	3.00	5.27	<.0001
Sitio	BE03	B. encino	22.95	1.86	12.35	<.0001
Sitio	BE04	B. encino	3.25	2.71	1.20	0.2317
Sitio	BE06	B. encino	11.94	2.59	4.61	<.0001
Sitio	BE07	B. encino	63.46	2.76	23.00	<.0001
Sitio	BE08	B. encino	23.42	2.74	8.56	<.0001
Sitio	BE09	B. encino	34.09	2.61	13.07	<.0001
Sitio	BE10	B. encino	6.67	3.06	2.18	0.0294
Sitio	BE11	B. encino	2.26	2.69	0.84	0.4016
Sitio	BE12	B. encino	28.97	2.78	10.41	<.0001
Sitio	BE13	B. encino	23.17	2.74	8.47	<.0001
Sitio	BE14	B. encino	7.68	4.00	1.92	0.0553
Sitio	BM03	B. mixto	17.81	3.06	5.82	<.0001
Sitio	BM05	B. mixto	45.42	6.12	7.42	<.0001
Sitio	BM06	B. mixto	12.00	6.70	1.79	0.0735
Sitio	BM09	B. mixto	26.71	5.66	4.72	<.0001
Sitio	BM10	B. mixto	21.11	4.08	5.18	<.0001
Sitio	BO01	B. de oyamel	16.43	2.83	5.80	<.0001
Sitio	BO04	B. de oyamel	7.08	6.12	1.16	0.247
Sitio	BO05	B. de oyamel	4.00	6.70	0.60	0.5506
Sitio	BO06	B. de oyamel	5.43	4.42	1.23	0.2189
Sitio	BO08	B. de oyamel	5.26	4.86	1.08	0.2791
Sitio	BO09	B. de oyamel	13.31	2.57	5.18	<.0001
Sitio	BO10	B. de oyamel	4.83	3.87	1.25	0.2117
Sitio	BO11	B. de oyamel	3.61	4.99	0.72	0.4698
Sitio	BO12	B. de oyamel	2.78	3.53	0.79	0.4317
Sitio	BO14	B. de oyamel	5.90	3.00	1.97	0.0491
Sitio	BO18	B. de oyamel	34.78	3.12	11.13	<.0001
Sitio	BO20	B. de oyamel	10.65	4.42	2.41	0.016
Sitio	BO21	B. de oyamel	14.50	3.87	3.75	0.0002
Sitio	BP01	B. de pino	52.50	8.65	6.07	<.0001
Sitio	BP02	B. de pino	45.71	8.01	5.71	<.0001
Sitio	BP04	B. de pino	40.00	10.60	3.78	0.0002
Sitio	BP05	B. de pino	24.00	9.48	2.53	0.0114
Sitio	BP06	B. de pino	27.94	5.14	5.44	<.0001
Sitio	BP07	B. de pino	22.50	7.49	3.00	0.0027
Sitio	BP08	B. de pino	46.75	4.74	9.87	<.0001
Sitio	BP09	B. de pino	12.56	3.23	3.89	0.0001
Sitio	BP10	B. de pino	20.00	8.65	2.31	0.0209

Sitio	BP11	B. de pino	40.00	8.65	4.62	<.0001
Sitio	BP12	B. de pino	3.16	4.86	0.65	0.516
Sitio	BP15	B. de pino	46.59	4.52	10.31	<.0001
Sitio	BP16	B. de pino	32.50	4.74	6.86	<.0001
Sitio	BP17	B. de pino	18.50	6.70	2.76	0.0058
Sitio	BP18	B. de pino	78.33	12.23	6.40	<.0001
Sitio	BP19	B. de pino	90.00	4.62	19.46	<.0001
Sitio	BP20	B. de pino	25.00	6.12	4.09	<.0001
Sitio	BP22	B. de pino	44.38	5.30	8.38	<.0001
Sitio	BP23	B. de pino	66.50	6.70	9.92	<.0001
Sitio	BP24	B. de pino	52.31	5.88	8.90	<.0001
Sitio	BP26	B. de pino	33.33	12.23	2.72	0.0065
Sitio	BP27	B. de pino	18.57	8.01	2.32	0.0205
Sitio	BP28	B. de pino	41.88	7.49	5.59	<.0001
Sitio	BP29	B. de pino	5.00	9.48	0.53	0.5978
Sitio	BP30	B. de pino	0.00	9.48	0.00	1.0000
Sitio	BP31	B. de pino	35.60	4.24	8.40	<.0001
Sitio	BP32	B. de pino	6.14	4.52	1.36	0.1746
Sitio	BP33	B. de pino	23.57	4.00	5.89	<.0001
Sitio	BP34	B. de pino	10.32	3.81	2.71	0.0067
Sitio	BP35	B. de pino	48.62	2.43	20.00	<.0001
Sitio	BP36	B. de pino	16.00	4.24	3.78	0.0002
