





Concentración de ozono y vitalidad de árboles en la zona metropolitana de Guadalajara

The ozone concentration and tree vitality at the metropolitan zone of Guadalajara

Alejandra Macías-Muro¹ ,
Tomás Martínez-Trinidad^{1*} ,
José René Valdez-Lazalde¹ ,
Humberto Vaquera-Huerta² 

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado en Ciencias Forestales. Km. 36.5 Carr. México- Texcoco. Montecillo, CP. 56264. Texcoco, Estado de México, México .

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado en Estadística. Km. 36.5 Carr. México- Texcoco. Montecillo, CP. 56264. Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia:
tomtz@colpos.mx

Nota científica

Recibido: 15 de junio 2023

Aceptado: 07 de octubre 2023

Como citar: Macías-Muro A, Martínez-Trinidad T, Valdez-Lazalde JR, Vaquera-Huerta H (2023) Concentración de ozono y vitalidad de árboles en la zona metropolitana de Guadalajara. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 10(3): e3824. DOI: 10.19136/era.a10n3.3824

RESUMEN. La contaminación por ozono (O₃) troposférico en concentraciones elevadas afecta la salud de los árboles. En este estudio se analizaron las concentraciones de O₃ y su efecto en la vitalidad de árboles en la zona metropolitana de la ciudad de Guadalajara. Se utilizaron datos de la red de monitoreo de la calidad del aire de Jalisco y registros de la fluorescencia de clorofila de *Fraxinus uhdei*, *Eucalyptus camaldulensis*, y *Casuarina equisetifolia*. Se ajustó el modelo de valores extremos generalizado para estimar la distribución del O₃ e identificar las zonas de mayor concentración. Se realizó un análisis de varianza para determinar diferencias en la condición de vitalidad causadas por la concentración de O₃. Las regiones con mayor concentración de O₃ se localizaron en Zapopan, Tlaquepaque, y en el noreste de Guadalajara. No se observó un efecto significativo de las zonas con mayores concentraciones de O₃ sobre la vitalidad del arbolado.

Palabras clave: Casuarina, contaminación atmosférica, eucalipto, fresno, salud del arbolado, valores extremos.

ABSTRACT. Air pollution, particularly tropospheric ozone (O₃), when present in high concentrations, affects urban tree health. This study analyzed the ozone concentration and the potential effect on the vitality of the trees located in the metropolitan area of Guadalajara. Data from the Jalisco air quality monitoring network and photosynthetic activity through chlorophyll fluorescence of *Fraxinus uhdei*, *Eucalyptus camaldulensis*, and *Casuarina equisetifolia* were studied. A generalized extreme value model was fitted to estimate the atmospheric distribution and identify areas with the highest concentration of ozone. An analysis of variance was carried out to evaluate possible changes in the condition of the vitality due to the ozone concentration in the atmosphere. The areas with the highest ozone concentration were in Tlaquepaque, Zapopan, and the northeast of Guadalajara. No significant effect of areas with higher ozone concentrations on tree vitality was observed.

Key words: Casuarina, air pollution, eucalyptus, ash tree, tree health, extreme values.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica por ozono troposférico (O_3) afecta la salud del arbolado urbano; de hecho, dicho contaminante es señalado como un gas fitotóxico importante. En consecuencia, valores altos de O_3 troposférico por arriba de un nivel tolerado por el arbolado, provoca daños y causa una afectación en el desarrollo de los árboles (Guidi *et al.* 2016). El O_3 es un gas oxidante que ingresa por los estomas durante el intercambio gaseoso provocando el rompimiento del tejido membranosos, y por ende, la pérdida prematura de las hojas y una reducción en la asimilación de carbono; lo que repercute, en una reducción de la producción de biomasa (Cassimiro y Moraes 2016). Los daños por O_3 pueden ser agudos en eventos de corta duración cuando las concentraciones son muy altas, observándose como síntomas visibles en el follaje (Krupa *et al.* 2007). Por otro lado, una exposición en intervalos de tiempo largos (estrés crónico) a concentraciones bajas de O_3 constantes, provoca la caída prematura de las hojas y modificación en el desarrollo de los árboles, en muchos casos, sin manifestar síntomas notorios en el follaje (Jolivet *et al.* 2016).

La vitalidad del arbolado se define como la habilidad de la respuesta fisiológica de los árboles ante el estrés causado por distintos factores externos (Callow *et al.* 2018) y se puede estimar con la determinación de la fluorescencia de la clorofila (F_v/F_m), debido a que ésta está relacionada con la actividad fotoquímica y fotosintética de las plantas (Martínez-Trinidad *et al.* 2012, Pontius y Hallet 2014). Considerando que el O_3 se forma por reacciones fotoquímicas en la atmósfera, es factible que en algunas zonas urbanas y periurbanas se presenten niveles elevados; de tal manera, que el arbolado en esas áreas podría manifestar daños por O_3 y reducción en su vitalidad (Kim *et al.* 2007).

En años recientes se han llevado a cabo diversos trabajos para monitorear y modelar geostatísticamente los niveles de O_3 . Además, se ha tratado de determinar el umbral de concentración de

O_3 que causa daños en las plantas, e.g., el índice AOT40 que se basa en la cuantificación de los niveles O_3 acumulados por arriba de las 40 partes por billón (ppb) durante las horas de luz (Gerosa *et al.* 2006); lo anterior, ya que se considera que, alcanzando dicho límite, el arbolado muestran alteraciones en distintas variables fisiológicas (Jackovljevic *et al.* 2021). El comportamiento del O_3 en la atmósfera y la interacción con otras variables ambientales se han predicho con varios modelos (Cano-Baudino *et al.* 2016); dentro de los cuales se encuentran el *Quadratic Rollback Model* que provee la predicción de la concentración de los contaminantes usando variables climáticas tales como la precipitación y la temperatura (Hogsett *et al.* 2008); el modelaje del transporte de las moléculas de O_3 , tales como la aplicación *WRF-Chimere* (Blanco-Ward 2019); o el modelaje a través de la distribución de valores extremos (Zolghadri y Henry 2003) como la distribución DAGUM y la distribución DGEV, que examinan el comportamiento del O_3 a través del tiempo (Okorie *et al.* 2019).

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) actualmente presenta niveles de contaminación elevados, debido al incremento constante de la población, al desarrollo industrial sin control, al incremento de número de automóviles, así como a condiciones ambientales (De Quevedo *et al.* 2017), en particular la contaminación por O_3 ; lo que repercute en problemas de salud humana y vegetal. Por ejemplo, existe evidencia de que, en los días con concentraciones elevadas de O_3 y partículas suspendidas, los problemas cardiovasculares aumentan (Figuroa *et al.* 2016). Por otro lado, se han registrado daños en árboles del género *Fraxinus* por motivos similares en China (Gao *et al.* 2016). Sin embargo, no se ha evaluado el impacto de concentraciones altas de O_3 en la vitalidad del arbolado urbano en la ZMG. Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue identificar las zonas de mayor concentración de ozono en la ZMG mediante un modelo geoestadístico y relacionar tales concentraciones de O_3 con el estado de vitalidad de tres especies arbóreas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La ZMG se sitúa en el estado de Jalisco y está conformada por los municipios: Tlaquepaque, Guadalajara, Tlajomulco, Tonalá, Zapopan, y El Salto (20° 40.0092' LN y 103° 23.5092' LO) con una altitud promedio de 1540 m (Macías-Muro *et al.* 2022). En la ZMG existen 10 estaciones de monitoreo de la calidad del aire (Figura 1). La ZMG posee una superficie de 2 734.1 km² con el predominio de un clima del tipo templado subhúmedo. La precipitación acumulada media anual es de entre 700 y 900 mm y la temperatura media anual de 21.7 °C (33 °C máxima y -6 °C mínima). Se localiza entre las zonas montañosas del Cinturón Volcánico Transmexicano y la Sierra Madre Occidental; dicha orografía establece de manera parcial una barrera física natural que reduce la dispersión de la contaminación generada en la urbe (Nájera Cedillo *et al.* 2005). La velocidad del viento es moderada (promedio 1.4 m/s) con vientos predominantes del este en la época de lluvia y del oeste en la época seca (Fonseca-Hernández *et al.* 2018).

Base de datos de la concentración de O₃

Los datos utilizados para este estudio fueron tomados de las observaciones de la concentración de O₃ en partes por billón (ppb) de cada hora registradas por la red de monitoreo de calidad del aire de Jalisco durante los años 2015 a 2018. Los datos se analizaron y posteriormente, se modelaron con la distribución de valores extremos generalizada - DGEV (Tobías y Scotto 2005). En casos donde no se obtuvieron registros de datos, se estimó un promedio para las casillas en las que faltaban valores, con respecto al valor anterior y al posterior. De las estaciones estudiadas, la estación de Tlajomulco no contó con mediciones para las variables climáticas, por lo que se decidió no incluirla en los análisis de este trabajo.

Variables atmosféricas

Las estaciones de monitoreo de calidad del aire utilizadas, también registran variables climáticas.

Para la modelación y el análisis del presente trabajo se consideró la humedad relativa (%), temperatura (°C), dirección del viento (azimut), y velocidad del viento (m/s) (Zolghadri *et al.* 2003). Como se reporta que las concentraciones de O₃ más elevadas se tienden a presentar en las horas con registros de mayor temperatura (Escarela 2012), se decidió usar en el análisis de las variables climáticas descritas, sus valores máximos.

Datos de los árboles en el estudio

Para la evaluación de la vitalidad del arbolado, se muestreó el follaje de 123 individuos (copa >3 m de diámetro) de tres especies, ubicadas en áreas verdes manejadas cercanas a las estaciones de monitoreo de calidad del aire: fresno (*Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh.) [51 individuos], eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) [31 individuos] y casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.) [41 individuos]. Cinco hojas por árbol se recolectaron entre los meses de septiembre a noviembre de 2018, de la parte externa de la copa a una altura de ocho a 10 metros sobre el suelo. Para evitar un efecto por el corte, se colocaron las muestras en bolsas de plástico, y se transportaron en una hielera para medirlas en menos de 3 horas. La fluorescencia de clorofila se midió con un fluorímetro Handy Pea en una parte de la hoja sin daño visible (Hansatech Instruments, King's Lynn, Norfolk, UK). Las hojas se aislaron completamente de la luz por un período de 20 minutos, posteriormente se hizo incidir un rayo de luz infrarrojo, para que por el efecto del rebote se determinara la relación Fv/Fm; en la que Fv es la diferencia entre los valores máximo (Fm) y mínimo (Fo) de fluorescencia. Una disminución de los valores de fluorescencia de la clorofila (Fv/Fm) indica generalmente un daño foto inhibitorio provocado por factores de estrés (Johnstone *et al.* 2012).

Análisis geoestadístico de la base de datos de SIMAJ

Para conocer la variabilidad espacial, primero se realizó un análisis exploratorio de los valores disponibles: la concentración de O₃ (variable respuesta), y de la humedad, temperatura, y ve-

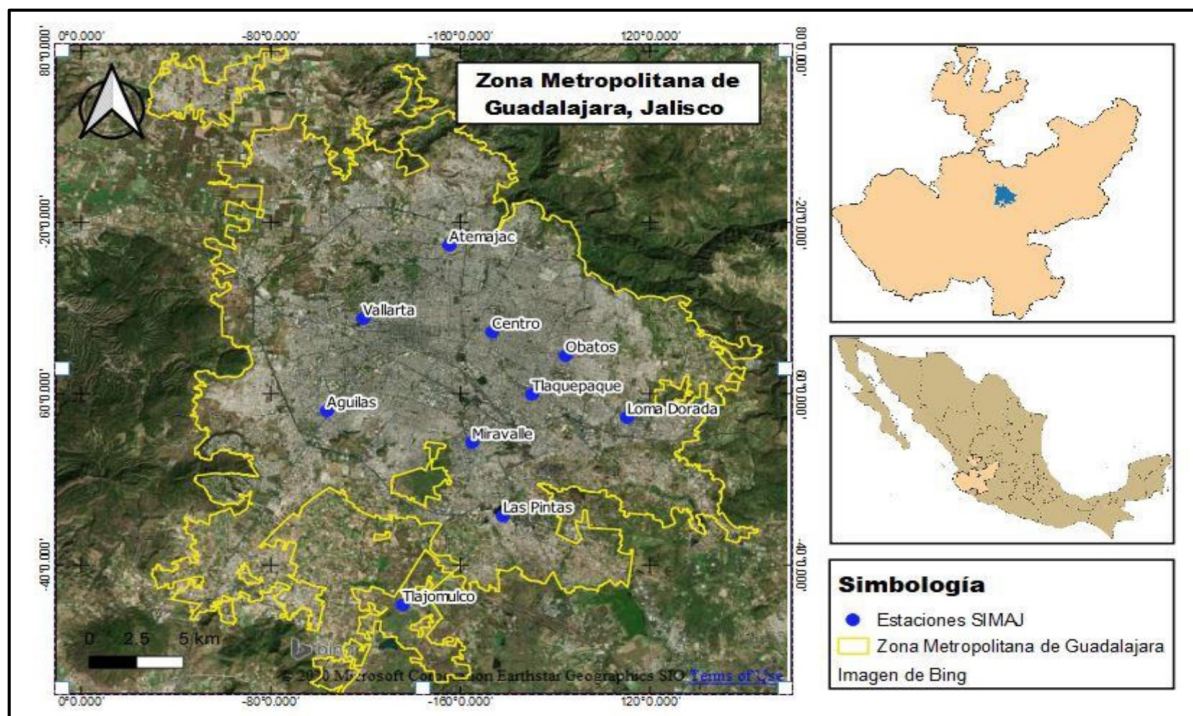


Figura 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire (Sistema de Monitoreo de Jalisco SIMAJ) en la zona metropolitana de Guadalajara.

locidad del viento (variables explicativas). Para este fin, se utilizaron los paquetes `gstat` y `geoR` del Software R (R Core Team 2019). Se estimaron las medidas de tendencia central, las medidas de forma, y la variación; además, se graficó la distribución de los valores máximos de O_3 . Posteriormente, se ajustó un modelo de valores extremos, utilizando el paquete `extremes` y `VGAM` del software R (R Core Team 2019). La distribución de Fisher-Tippett también conocida como el modelo de la distribución de valores extremos generalizada - GEV (Hansen 2020) brinda una base segura para la modelación de valores extremos, que han sido de utilidad en estudios climáticos (Blanco *et al.* 2014) y sobre contaminación atmosférica (Tobias y Scotto 2005). Se revisaron tres modelos de distribución de valores extremos: Fréchet, Weibull, y Gumbel, y se conjuntaron en el modelo generalizado (Hansen 2020). El modelo generalizado tiene como hipótesis contar con una muestra independiente y aleatoria de los datos. En nuestro trabajo, los datos

se utilizaron en bloques usando el valor máximo de cada tres días (Pal y Mazumdar 2015); este procedimiento se empleó para cada estación de monitoreo. Con lo anterior, se generó una muestra aleatoria independiente. Después, se usó la función `vectorized generalized additive models (VGAM)`, para la modelar los parámetros de distribución de valores extremos como funciones lineales de covariables.

Análisis de la vitalidad del arbolado

Los valores tomados a través del fluorímetro se compararon entre las estaciones. El análisis se llevó a cabo a través del programa R y se empleó un análisis de varianza de una vía de clasificación (Contran *et al.* 2009). El análisis consideró la comparación para cada especie. Considerando que cerca de la estación Las Pintas sólo se encontró un área verde pública, se descartó dicha estación. Además, se examinó la correlación entre los valores máximos de concentración de O_3 y la vitalidad de cada especie arbórea de cada estación (variable respuesta), con la

finalidad de conocer de una manera preliminar si la concentración de O₃ presenta una relación con la vitalidad de los árboles registrada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de ozono en la ZMG

Los valores de concentración de O₃ registrados en la mayoría de las estaciones de monitoreo mostraron que del 20 al 40% de las horas registradas mostraron valores superiores a 40 ppb indicados por el índice de exposición acumulada AOT40 (Tabla 1). Mientras que los valores máximos de O₃ en las estaciones analizadas sobrepasaron las 40 ppb (Figura 2). La mayor parte de los días, dicho índice es sobrepasado y, por ende, los árboles están expuestos constantemente a niveles altos de concentraciones de O₃. Los resultados indican que los niveles más altos de O₃ para los valores máximos (Figura 2), así como de medianas y mínimos, se presentaron al medio día. Con base en la concentración de O₃ y en la distribución geográfica de las estaciones de monitoreo, se encontró que los valores máximos mostraron una tendencia hacia la dirección Centro-Norte que incluye a las estaciones de Vallarta y Atemajac; lo que concuerda con los valores registrados a través de la base de datos. Con lo anterior, se asume que la zona con mayor contaminación se confina en los municipios de Zapopan, Tlaquepaque, y noreste de Guadalajara, adyacente a la región de Miravalle (la zona industrial de la ZMG), y se acentúa la situación por las condiciones topográficas que restringe la dispersión de los contaminantes (Fonseca-Hernández *et al.* 2018).

Derivado de modelar la concentración de O₃ a través de la distribución de valores extremos generalizada, se encontró que los niveles de retorno para tres, cinco y 10 años, así como los valores de los parámetros estimados en el período de 2015 a 2018 varían en cada estación. Cabe indicar que es factible definir los comportamientos en cada una de las estaciones con los parámetros estimados. Con base en el modelo de ajuste, es posible determinar que la estación que presentará un incremento mayor en la concentración de O₃ en 10 años, es la estación

de Vallarta. Considerando el parámetro de forma (ξ), las estaciones Aguilillas, Miravalle, Atemajac y Centro presentan una distribución cercana a la Weibull, mientras que las estaciones Oblatos, Tlaquepaque, y Loma Dorada se ajustan a la distribución Fréchet; por otro lado, las estaciones Vallarta y Las Pintas se ajustaron a la distribución Gumbell. Cabe señalar, que, en todos los casos, los valores se ajustaron aceptablemente al modelo de valores extremos y que los estimadores de la temperatura en las diferentes estaciones fueron positivos, debido a la relación positiva entre la concentración de O₃ y la temperatura; por lo que el aumento de la temperatura durante el día favorece la cinética de formación del O₃ (Cano Baudino *et al.* 2016). Por otro lado, la velocidad del viento tiene parámetros negativos, debido a que se considera que los valores mayores de concentración de O₃ se presentan a menores intensidades del viento (Ooka *et al.* 2011). Considerando los resultados del análisis, la concentración por O₃ está en función de variables climáticas (como la temperatura y velocidad del viento).

Al considerar la dirección del viento dominante de oeste-suroeste, las concentraciones de las áreas ubicadas al suroeste de la ZMG, como Santa Fe, y Loma Dorada, son las que presentan menor concentración de O₃ por el movimiento de los vientos (Nájera Cedillo *et al.* 2005). De tal manera que en estas zonas se presenta en menor cantidad la concentración de contaminantes. Con base en el registro de valores máximos de O₃, las estaciones con mayores valores de concentración de O₃ en el año 2018 fueron Miravalle, Las Pintas y Vallarta. Asimismo, el análisis de la distribución de valores máximos facilitó la realización de estimaciones de los valores de retorno (Zolghadri *et al.* 2003).

Análisis de vitalidad de árboles

Trabajos previos indican que valores Fv/Fm mayores de 0.8, representan una vitalidad buena. De los resultados destaca que los árboles de *Fraxinus uhdei*, presentaron los valores promedio de vitalidad más bajos (Fv/Fm = 0.763); sólo en las estaciones Atemajac y Águilas tuvieron valores por arriba de 0.8. Mientras que la especie *Casuarina equisetifolia* pre-

Tabla 1. Número de horas (#) en las que los registros de ozono superaron el límite de 40 ppb, por estación en el año 2018.

| Variable | Estación de monitoreo | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|---------|-------------|-----------|--------|---------|------------|-------------|----------|----------|
| | Atemajac | Águilas | Loma Dorada | Miravalle | Centro | Oblatos | Las Pintas | Tlaquepaque | Santa Fe | Vallarta |
| # horas > índice AOT40 | 962 | 891 | 1096 | 1694 | 1459 | 783 | 1711 | 1352 | 494 | 1738 |
| Porcentaje que representa | 22% | 20% | 25% | 39% | 33% | 18% | 39% | 31% | 11% | 40% |
| Promedio (ppb) | 57 | 52 | 59 | 63 | 59 | 53 | 66 | 68 | 66 | 62 |

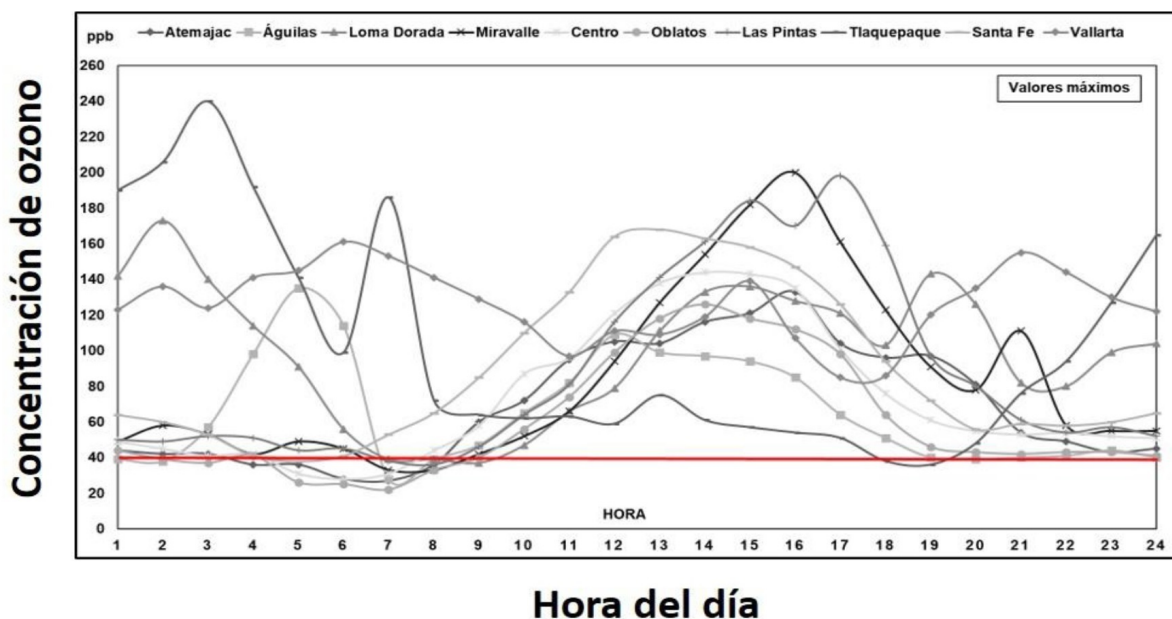


Figura 2. Valores máximos promedio de la concentración de O₃ (ppb) por hora durante 2015-2018. La línea roja indica el límite del índice AOT40 ppb y cada línea representa a una estación de monitoreo.

sentó los valores de vitalidad más altos ($F_v/F_m = 0.792$). Por otra parte, se puede considerar que el arbolado cerca de la estación Oblatos (0.734) y Las Pintas (0.735), presentaron el arbolado con una vitalidad menor. El valor menor de F_v/F_m para Casuarina fue en la estación Oblatos (0.676) y para Eucalipto en Las Pintas (0.609). No obstante, el resultado del análisis de varianza no mostró una diferencia significativa ($P > 0.05$) en la vitalidad del arbolado entre las estaciones. Investigación previa ha indicado el efecto de los factores climáticos en la afectación por O₃ en algunas especies arbóreas. Por ejemplo, en el trabajo de Contran *et al.* (2009) donde evaluaron el efecto del O₃ en árboles de *Fraxinus excelsior* L. encontraron que la humedad y la temperatura intervienen en el incremento de daño por O₃; muy probablemente por un daño en los estomas. Por otro lado, las característi-

cas del suelo como la salinidad influyen en el intercambio de gases y, por ende, en la afectación del O₃ (Hoshika *et al.* 2015).

Una razón alterna para no encontrar diferencias en la vitalidad de las especies arbóreas se debe al efecto crónico potencial del O₃, que se muestra generalmente como una disminución en la producción de biomasa (Kim *et al.* 2007). Por tanto, se recomienda, realizar estudios multi-temporales con la finalidad de comparar el desarrollo de los árboles y la afectación de contaminantes atmosféricos a través del tiempo. Por último, la correlación con respecto a los valores máximos de concentración de O₃ y la vitalidad de los árboles evaluados muestran una correlación más baja para el arbolado de *Fraxinus uhdei* (-0.071); lo que podría indicar que los árboles de fresno son más sensibles a las concentra-

ciones de O₃.

El modelaje de la concentración de O₃ con la distribución de valores extremos presentó un ajuste aceptable al usar los datos de las estaciones de monitoreo. Los valores de la modelación determinaron que el área con mayor concentración de O₃ se localizó en los municipios de Tlaquepaque, Zapopan y noreste de la ZMG. Las estaciones de monitoreo con los valores de concentración más altos fueron Vallarta y Tlaquepaque. Al considerar la tasa de retorno determinada con base en la distribución de valores extremos, la concentración de O₃ en las estaciones de monitoreo estudiadas indican un incremento para los próximos años, de tal manera que es

trascendente un monitoreo constante de la vitalidad de los árboles. En consideración al análisis de la vitalidad de los árboles a través de la fluorescencia de clorofila (Fv/Fm) se indica que no se detectó un efecto claro de la afectación de los niveles de O₃ en las especies arbóreas estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Conahcyt por su apoyo en la realización de sus estudios de posgrado de la primera autora.

LITERATURA CITADA

- Blanco ME, Vaquera H, Villaseñor JA, Valdez-Lazalde JR, Rosengaus M (2014) Metodología para investigar tendencias espacio-temporales en eventos meteorológicos extremos: caso Durango, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5: 25-39.
- Blanco-Ward D, Rocha A, Viceto C, Ribeiro AC, Feliciano M, Paoletti E, Miranda AI (2019) Validation of meteorological and ground-ozone WRF-CHIMERE simulations in a mountainous grapevine growing area for phytotoxic risk assessment. *Atmospheric Environment* 259: 118507. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118507.
- Callow D, May P, Johnstone DM (2018) Tree vitality assessment in urban landscapes. *Forests* 9: 1-7. DOI: 10.3390/f9050279.
- Cano-Baudino YN, Morales-Mariño JA, Sánchez-Castillo LJ, Colina-Rincon MN, Torres-Puente JC (2016) Evaluación de los niveles de ozono en la ciudad de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 32: 25-34.
- Cassimiro JC, Moraes RM (2016) Responses of a tropical tree species to ozone: visible leaf injury, growth, and lipid peroxidation. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 8085-8090.
- Contran, N, Poletti E, Manning WJ, Tagliaferro F (2009) Ozone sensitivity and ethylenediurea protection in ash trees assessed and JIP chlorophyll a fluorescence transient analysis. *Photosynthetica* 47: 68-78.
- De Quevedo F, Asprilla Y, González M (2017) Entropías de la movilidad urbana en el espacio metropolitano de Guadalajara: Transporte privado y calidad del aire. *Revista Tecnura* 21: 138-149.
- Escarela G (2012) Extreme value modeling for the analysis and prediction of time series of extreme tropospheric ozone levels: A case of study. *Journal of the Air and Waste Management Association* 62: 651-661.
- Figuroa MA, Davydova-Belitskaya V, Garibay CG, Parada GT, Orozco-Medina MG (2016) PM₁₀ y O₃ como factores de riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y neumonía en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Ingeniería* 20: 14-23.
- Fonseca-Hernández, M, Tereshchenko I, Mayor YG, Figuroa-Montaño A (2018) Atmospheric pollution by PM₁₀ and O₃ in the Guadalajara metropolitan area, Mexico. *Atmosphere* 9: 243. DOI: 10.3390/atmos9070243.

- Gao F, Calatayud V, García-Brejio F, Reig-Armiñana J, Feng Z (2016) Effects of elevated ozone on physiological, anatomical and ultrastructural characteristics of four common urban tree species in China. *Ecological Indicators* 67: 367-379.
- Gerosa G, Ferretti M, Bussotti F, Rocchini D (2006) Estimates of ozone AOT40 from passive sampling in forest sites in South-Western Europe. *Environmental Pollution* 145: 629-635.
- Guidi L, Remorini D, Cotrozzi L, Giordani T, Lorenzini G, Massai R, Nali C, Pellegrini E, Trivelini A, Vangelisti A, Vernieri P, Landi P (2016) The harsh life of an urban tree: the effect of a single pulse of ozone in salt-stressed *Quercus ilex* saplings. *Tree Physiology* 37: 246-260.
- Hansen A (2020) The three extreme value distribution: An introductory review. *Frontiers in Physics* 8: 604053. DOI: 10.3389/fphy.2020.604053.
- Hogsett WE, Tingey DT, Lee EH, Breedlow PA, Andersen CP (2008) An approach for evaluating the effectiveness of various ozone air quality standards for protecting trees. *Environmental Management* 41: 937-948.
- Hoshika Y, Watanabe M, Kitao M, Haberle KH, Grams T, Koike T, Matyssek R (2015) Ozone induces stomatal narrowing in European and Siebold's beeches: A comparison between two experiments of free-air ozone. *Environmental Pollution* 196: 527-533.
- Jackovljevic, T, Lovreskov L, Jelic G, Anav A, Popa I, Fornasier MF, Proietti C, Limic I, Butorac L, Vitale M, De Marco A (2021) Impact of ground-level ozone on Mediterranean forest ecosystems health. *Science of Total Environment* 783: 147063. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147063.
- Johnstone D, Tausz M, Moore G, Nicolas M (2012) Chlorophyll fluorescence of the trunk rather than leaves indicates visual vitality in *Eucalyptus saligna*. *Trees* 26: 1565-1576.
- Jolivet Y, Bagard M, Cabané M, Vaultier MN, Gandin A, Afif D, Dizengremel P, Thiec DL (2016) Deciphering the ozone-induced changes in cellular processes: a prerequisite for ozone risk assessment at the tree and forest levels. *Annals of Forest Science* 73: 923-943.
- Kim, KJ, Kim YJ, Ma YI, Kim JC, Sunwoo Y (2007) A modeling study of the impact of natural and urban forest on ambient ozone. *Korean Journal of Chemistry Engineering* 25: 483-492.
- Krupa S, McGrath MT, Andersen CP, Booker FL, Burley KO, Chappelka AH, Chevone BI, Pelly EJ, Zilinskas BA (2007) Ambient ozone and plant health. *Plant Disease* 85: 4-12.
- Macías-Muro A., Martínez-Trinidad T, Valdez-Lazalde JR, Romero-Sánchez ME, Vaquera-Huerta H (2022) Evaluación de la salud del arbolado urbano a través de imágenes satelitales en Guadalajara, México. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento* 10(24): 1-12. DOI: 10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81200.
- Martínez-Trinidad T, Plascencia-Escalante FO, Islas-Rodríguez L (2012) La relación entre los carbohidratos y la vitalidad en árboles urbanos. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19: 459-468.
- Nájera Cedillo MC, Márquez Azúa B, Sánchez Gómez R, Corona JP (2005) Los sistemas de información geográfica como herramienta para observar el comportamiento del ozono en la Zona Metropolitana de Guadalajara. *GEOS* 25: 368-376.
- Okorie IE, Akpanta AC, Osu BO (2019) Flexible heavy tail distributions for Surface ozone for selected sites in the United States of America. *Ozone: Science and Engineering* 41: 473-488.
- Ooka R, Khiem M, Hayami H, Yoshikado H, Huang H, Kawamoto Y (2011) Influence of meteorological conditions on summer ozone levels in the central Kanto area of Japan. *Procedia Environmental Sciences* 4: 138-150.

- Pal S, Mazumdar D (2015) Stochastic modelling of monthly rainfall volume during monsoon season over Gangetic West Bengal, India. *Nature Environment and Pollution Technology* 14: 951-956.
- Pontius J, Hallet R (2014) Comprehensive methods for earlier detection and Monitoring of forest decline. *Forest Science* 60(6): 1156-1163.
- R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> Consultado: 14 de junio de 2022.
- Tobias A, Scotto MG (2005) Prediction of extreme ozone levels in Barcelona, Spain. *Environmental Monitoring and Assessment* 100: 23-32.
- Zolghadri A, Henry D (2003) Minimax statistical models for air pollution time series. Application to ozone time series data measured in Bordeaux. *Environmental Monitoring and Assessment* 98: 275-294.