

## Análisis trimestral de la fluctuación para el Ozono de la estación Merced de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

### Quarterly analysis of the fluctuation for the Ozone of the Merced station of the Automatic Atmospheric Monitoring Network of Mexico City

Edgar I. García-Otamendi <sup>a</sup>, Sergio Matias-Gutierrez <sup>b</sup>, Leobardo Morales-Ruiz <sup>c</sup>, Erika Tolentino-Sánchez <sup>d</sup>

#### Abstract:

This paper shows the scaling trend of fluctuations in  $O_3$  air pollutant concentration records taken from the Merced monitoring station (MER) of the metropolitan area of the Valley of Mexico (ZMVM). The structure function of order two is used as a measure to establish the tendency of registers using the Hurst exponent  $H$ . Four time series of  $O_3$  were used per year during the period from 2010 to 2018. It was found that the fluctuations of  $O_3$  obey a behavior of power law, where statistical persistence is obtained for the first three quarters and antipersistence for the last quarter.

#### Keywords:

Ozone  $O_3$ , Hurst exponent, persistence, structure function

#### Resumen:

En este trabajo se muestra la tendencia de escala de las fluctuaciones de registros de concentración contaminante del aire  $O_3$  tomados de la estación de monitoreo Merced (MER) de la zona metropolitana del valle de México (ZMVM). La función de estructura de orden dos es usada como una medida para establecer la tendencia de los registros mediante el exponente de Hurst  $H$ . Se utilizaron cuatro series temporales de  $O_3$  por año durante el periodo de 2010 a 2018. Se encontró que las fluctuaciones de  $O_3$  obedecen un comportamiento de ley de potencia, donde se obtiene persistencia estadística para los tres primeros trimestres y antipersistencia para el último trimestre.

#### Palabras Clave:

Ozono  $O_3$ , exponent de Hurst, persistencia, función de estructura

#### Introducción

La contaminación del aire es uno de los principales problemas de salud pública, la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su estudio Preventing Disease Through Healthy Environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks, estima que nueve de cada diez muertes es causa de la contaminación atmosférica [1], por tanto, el estudio de los diferentes contaminantes del aire se ha convertido en una necesidad

como herramienta en la toma de decisiones de políticas públicas para regulación de estos.

Los principales contaminantes atmosféricos que son observados y regulados en diferentes regiones del planeta son,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ , Ozono  $O_3$  y  $SO_2$ . El monitoreo de dichos contaminantes es una práctica que han adoptado desde hace varias décadas diferentes países, los estudios a los índices de contaminación en las grandes ciudades se han incrementado y abordado con diferentes enfoques. La organización mundial de la salud (OMS) estima alrededor de 150,000 muertes por enfermedades respiratorias

<sup>a</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-3595-3314>, Email: [edgar\\_garcia@uaeh.edu.mx](mailto:edgar_garcia@uaeh.edu.mx)

<sup>b, c, d</sup> Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México, <https://orcid.org/0000-0003-2619-8759>, Email: [smatias@ipn.mx](mailto:smatias@ipn.mx), <https://orcid.org/0000-0002-0206-2964>, Email: [leomorr@yahoo.com](mailto:leomorr@yahoo.com), <https://orcid.org/0000-0003-1978-811X>, Email: [erika\\_to\\_sanchez@protonmail.com](mailto:erika_to_sanchez@protonmail.com)

*Primer Congreso de Investigación e Innovación en Tendencias Globales, 26-28 de octubre*

debido a la exposición del Ozono troposférico ( $O_3$ ) [1], [2], además diferentes estudios han demostrado la correlación del  $O_3$  y su efecto en enfermedades respiratorias, así como problemas cardiovasculares en diferentes grupos poblacionales [1]–[3]

La ciudad de México en la publicación de la Organización Mundial de la Salud, Urban Air Pollution in Megacities of the World, es señalada como una de las ciudades con serios problemas de niveles de contaminación, a pesar de las medidas adoptadas por el gobierno de la Ciudad de México (CDMX) para mejorar la calidad del aire. En México se han adoptado medidas para regular la contaminación del aire, implementando programas de contingencia ambiental para la mejora en la calidad del aire, tomando como contaminante atmosférico criterio a las partículas suspendidas  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y el  $O_3$  atendiendo los valores permisibles sugeridos por la Organización mundial de la salud (OMS) [2] y la NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, para la calidad del aire. Se obvia entonces, la importancia de caracterizar la dinámica de los contaminantes criterio. En particular, destacamos el análisis al Ozono troposférico ( $O_3$ ) por ser este junto con el  $PM_{10}$  los contaminantes que son referencia para el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) que activa el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en la zona metropolitana del valle de México (ZMVM).

El Ozono troposférico ( $O_3$ ) es un contaminante gaseoso derivado de las actividades humanas o fenómenos naturales, que además se forma en presencia de radiación solar, mediante las reacciones fotoquímicas de los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). Su concentración presenta una variabilidad horaria y su máximo se registra después del mediodía, cuando la radiación solar tiene una mayor intensidad. Este contaminante causa afectaciones a nariz, garganta, bronquios y pulmones, provocando irritación e inflamación de las vías respiratorias, empeora las enfermedades pulmonares, como el asma, el enfisema y la bronquitis crónica, causar la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) [1], [2]. Los estudios al  $O_3$  y otros contaminantes del aire se han abordado desde diferentes perspectivas y con diferentes enfoques y datan de varias décadas. Existe una cantidad importante de artículos y proyectos de investigación a los contaminantes del aire, con distintos enfoques y perspectivas, en esta sección listamos solo algunos que destacamos por su importancia y por estar embebidos en el marco teórico, en el que deseamos desarrollar este trabajo.

En [4], [5] se analizaron las series temporales de contaminación atmosférica de la ciudad de Atenas, y se

encontraron relaciones que obedecen a leyes de potencia, persistencia, y memoria a largo plazo para material particulado  $PM_2$ ,  $PM_{10}$  y óxidos de nitrógeno  $NO_x$ , mediante análisis de fluctuación sin tendencia (DFA). También el DFA los autores de [4] lo aplican para los valores medios de la media diaria de índices de Aerosol global (AI) derivados de las observaciones de satélite durante 1979-2003 para buscar propiedades de auto-similitud, hallando correlaciones persistentes de ley de potencia de largo alcance para escalas de tiempo. En [6] se analizaron las observaciones por hora de ozono,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el Reino Unido, hallando evidencia de alta persistencia o memoria a largo plazo en la fluctuación de contaminantes, usando los métodos Sigma-t, rango reescalado de Hurst y curtosis. La persistencia de los promedios diarios de  $CO_2$  registrados en un sitio rural en España durante tres años se analizó mediante tres procedimientos: el método ST, el análisis de rango reescalado (R/S) y el análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) [7], [8]. La persistencia en la concentración de  $O_3$  por hora a nivel del suelo observada durante 2006 en Delhi. Se estudió utilizando un análisis de rango reescalado para la estimación del exponente de Hurst, hallando persistencia para diferentes horizontes de tiempo [8]. También en China los autores hallaron persistencia para los contaminantes de aire  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  mediante integración fraccionaria [9].

En México se han hecho estudios sobre diferentes contaminantes [10]–[12]; por mencionar algunos con diferentes alcances y perspectivas inmersos en la estadística clásica. También se ha estudiado la correlación entre la contaminación y problemas de salud para la Ciudad de México se puede ver en [13]–[15]. Sin embargo, el análisis del  $O_3$  para la ZMVM se ha enfocado en correlaciones entre los índices del  $O_3$  y problemas de salud, correlaciones entre el  $O_3$  y las precipitaciones o diferentes escalas de temperaturas. También tenemos las observaciones estadísticas que aporta el sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México para los diferentes contaminantes del aire entre ellos el Ozono troposférico ( $O_3$ ) objeto de estudio de este trabajo, en los informes anuales de la calidad del aire que publica desde el año 2003 (ver <http://www.aire.cdmx.gob.mx>). Destacamos el estudio a la persistencia de diferentes contaminantes del aire realizado en [16], mediante el uso del método de rango-reescalado, y el trabajo publicado por Aguilar Velazquez et al. en [17] donde se presenta el análisis al  $O_3$  mediante el método de ondas (Wavelets); ambos trabajos exhiben la dependencia temporal del  $O_3$  para diferentes horizontes temporales. La naturaleza compleja del ciclo del  $O_3$  asociado al desarrollo y crecimiento de las ciudades, y con esto la expansión de industrias, el aumento del parque vehicular y los

compuestos derivados a las actividades humanas, además de la influencia del medio ambiente, hace del  $O_3$  un tópico de análisis complejo. Considerando la problemática de este trabajo, los múltiples factores que influyen en la formación del  $O_3$  y por ende su naturaleza compleja, se propone un estudio del análisis de la fluctuación del  $O_3$ , que permite establecer características al  $O_3$  a partir de solo los registros del índice de concentración del  $O_3$ .

### Marco teórico

Los sistemas complejos exhiben correlaciones de largo alcance y la falta de una escala característica; en otras palabras, son invariantes con respecto a la escala de tiempo y/o espacio [18]. Esto último significa que estos sistemas tienen una apariencia similar a diferentes escalas y que no se puede encontrar un rasgo característico que nos indique la escala de observación. Las leyes de potencia describen la manera en que las magnitudes que caracterizan al sistema se comportan cerca de una transición de fase, punto en el que típicamente el sistema presenta un estado auto-semejante, con ausencia de escalas de longitud características [18]. Bajo este contexto entendemos la contaminación ambiental como un sistema complejo, y destacando la universalidad de los sistemas complejos invariancia de escala y leyes de potencia que se presentan en correlaciones de largo alcance e invarianza con respecto a la escala de tiempo.

El exponente de Hurst es un indicador para determinar si un fenómeno o una serie de tiempo presentan un comportamiento fractal y mide la intensidad de dependencia a largo plazo de una serie de tiempo. Se dice que el fenómeno analizado es aleatorio cuando  $H = 0.5$ , que es persistente cuando  $0.5 < H < 1$  (existe invariancia de escala asociada a correlaciones positivas a largo plazo) y es antipersistente cuando  $0 < H < 0.5$ , (existe invariancia en la escala asociada a correlaciones negativas a largo plazo) [19]. También es posible caracterizar la invariancia de escala de registros de series temporales mediante la relación entre la fluctuación y leyes de potencia, como se ha demostrado en [7]–[9], [16], [17], [20].

La fluctuación nos posibilita establecer propiedades de universalidad para sistemas complejos a través de la relación de los promedios de cantidades aditivas  $f_i$  de la contribución de los constituyentes  $N_i$  a la actividad total del sistema complejo y sus desviaciones  $\sigma_i$ , que además está dada por una ley de potencia  $\sigma_i(\Delta t) \propto \langle f_i^{\Delta t} \rangle^{\alpha T}$ . El exponente  $\alpha T$  está usualmente en el rango [1/2, 1]. El índice inferior  $T$  en el exponente de escala indica que las

cantidades estadísticas se definen como promedios temporales [20].

Para caracterizar el comportamiento de la fluctuación de series de tiempo  $Y(t_n)$  se propone el uso de la función de estructura generalizada  $F_q(\Delta n)$  de orden  $q$ , comúnmente usada en fenómenos de turbulencia y sistemas complejos [21], [22]. La función de estructura de orden  $q$  se enuncia como sigue

$$F_{q(\Delta n)} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y(t_n) - Y(t_{n+\Delta n})|^q \right)^{1/q} \quad (1)$$

donde  $\Delta n > 0$  tomado en el intervalo  $[N - 1]$ , y  $N$  es la longitud de las series de tiempo. Esta función exhibe un comportamiento de escalamiento con dependencia del intervalo de la muestra  $\Delta n$ , es decir, para series de tiempo con correlaciones de largo alcance se espera que  $F_q(\Delta n)$  presente un comportamiento en Ley de Potencia,  $F_q(\Delta n) \propto (\Delta n)^{H_q}$ , donde  $H_q$  es el exponente de escalamiento generalizado de orden  $q$  o exponente de Hurts generalizado [23]–[25].

### Metodología

La metodología usada en este trabajo se basa en el análisis de fluctuación (AF) “etapa 2” que caracteriza correlaciones a largo plazo en series de tiempo. A partir de una serie temporal  $x(t): t = 1, 2, \dots, N$  con media distinta de cero, se construye una nueva serie de tiempo  $y(t)$  que está determinada por la suma acumulativa de  $x(t)$  [26], y obtenemos la función de fluctuación  $Y(t)$  definida como

$$Y(t) = y(t) - y_{fit}(t) \quad (2)$$

donde  $y_{fit}(t)$  es una función polinómica de grado uno y es la tendencia asociada a la función  $y(t)$  [26], [27]. De forma general la metodología se divide en tres etapas (**Figura 1**)

### Desarrollo

Adquisición de datos. Los datos se tomaron de la Red de Monitoreo Atmosférico RAMA del Sistema Atmosférico de la Ciudad de México, dicha red contiene registros que datan desde 1986 y actualmente cuenta con 32 estaciones de monitoreo (**Figura 2**), las cuales emplean dos tipos de normas: las NOM de salud ambiental que establecen los límites permisibles para los contaminantes criterio, y las NOM técnicas que definen los métodos de

medición de los contaminantes criterio, específicamente para el  $O_3$  son la NOM-020-SSA1-2014 y NOM-036-SEMARNAT-1993, respectivamente. Los datos y las normas se encuentran publicados en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/>. De las 32 estaciones se elige la estación de monitoreo Merced (MER) ubicada en la Ciudad de México (latitud 9.42461 longitud -99.119594 sobre 2245 metros sobre el nivel del mar, **Figura 2**).

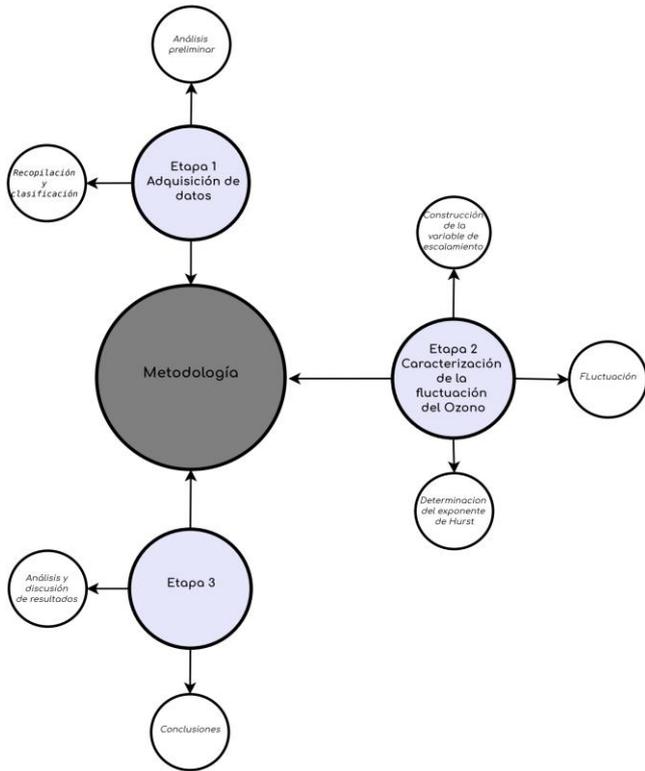


Figura 1. Metodología usada para el análisis de fluctuación de los valores de concentración de  $O_3$

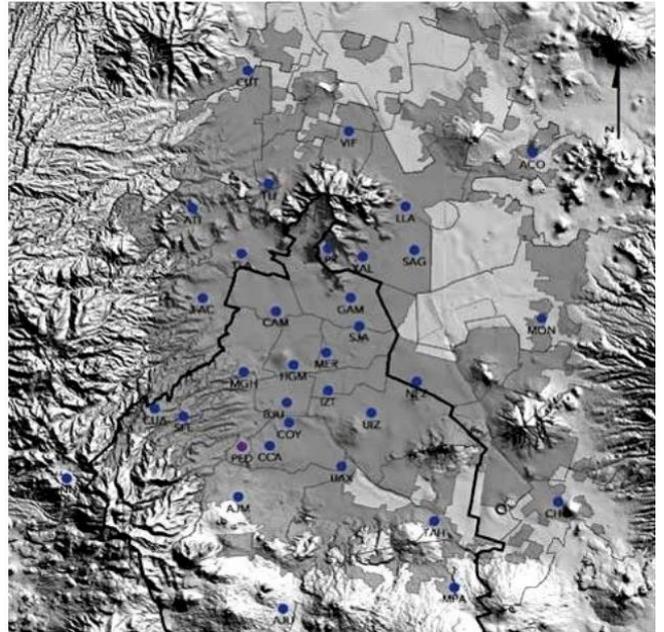


Figura 2. Ubicación de las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA

Se toma una muestra de 9 años en un periodo de 01 de enero de 2010 al 31 de diciembre de 2018 (**Figura 3**), la cual consta de 78887 datos correspondientes al registro de concentración del  $O_3$  con unidades partícula por millón (ppm), por cada hora. Los nueve años que comprende la muestra fueron divididos en periodos trimestrales para el análisis (la **Figura 4** muestra los trimestres para el año 2011, esto se realizó para cada año de la muestra)

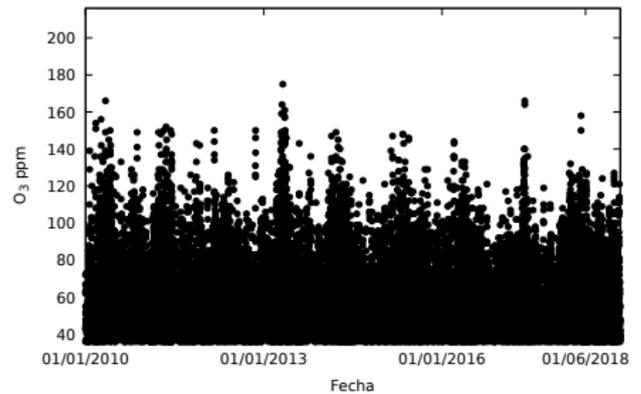


Figura 3. Registro del índice de concentración del Ozono ( $O_3$ ) unidades parte por millón, periodo 01 de enero de 2010 a 31 de diciembre de 2018

### Análisis estadístico preliminar

El análisis estadístico preliminar se centra en la observación de los valores máximos de concentración del  $O_3$ , a 120 ppm por cada año de la muestra. Se determinan los siguientes estadísticos por trimestre de todos los años

Primer Congreso de Investigación e Innovación en Tendencias Globales, 26-28 de octubre

de la muestra definida en la sección de adquisición de datos

Los valores máximos alcanzados en cada trimestre de la muestra

$$Max(O_3)$$

Promedios de concentración del  $O_3$  en cada trimestre por año.

$$\widehat{O}_3 = \sum_i^n o_{3,i}$$

La desviación estándar  $S(O_3)$ , para cada promedio. Los valores obtenidos se presentan en las **Tabla 1**, **Tabla 2** y **Figura 5**

Se analizaron 18887 datos correspondientes al registro del índice de concentración por hora del contaminante del aire  $O_3$ , registro obtenidos de la estación Merced (MER) una de las 38 estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Ciudad de México. La serie de datos comprende un periodo de 01 de enero de 2010 a 31 de diciembre de 2018, cada año de esta serie se dividió en trimestres, cada cual se indizo de forma consecutiva para su análisis estadístico y de fluctuación.

Tabla 1. Estadísticos: máximo de concentración  $Max(O_3)$ , promedio de concentración  $O_3$  y desviación estándar

Año	1er Trimestre			2do Trimestre		
	$Max(O_3)$	$\widehat{O}_3$	$S(\widehat{O}_3)$	$Max(O_3)$	$\widehat{O}_3$	$S(\widehat{O}_3)$
2010	154	17.78	24.53	166	31.34	32.95
2011	149	22.03	27.12	152	33.97	32.69
2012	150	20.20	26.18	126	28.69	28.06
2013	126	21.33	25.96	130	23.78	25.77
2014	149	24.56	30.24	145	26.52	30.11
2015	147	21.51	25.36	148	27.36	29.61
2016	144	21.03	25.02	133	27.45	29.54
2017	117	22.12	25.40	166	32.29	29.32
2018	132	25.96	29.60	158	32.30	29.91

Tabla 2. Estadísticos: máximo de concentración  $Max(O_3)$ , promedio de concentración  $O_3$  y desviación estándar

Año	3er Trimestre			4to Trimestre		
	$Max(O_3)$	$\widehat{O}_3$	$S(\widehat{O}_3)$	$Max(O_3)$	$\widehat{O}_3$	$S(\widehat{O}_3)$
2010	133	15.91	21.30	149	20.87	28.45
2011	119	19.28	23.33	143	20.78	26.92
2012	112	19.52	22.55	150	17.72	23.29
2013	143	19.70	23.92	136	17.53	23.94
2014	123	19.11	22.90	115	15.55	22.06
2015	129	23.40	25.73	129	17.04	21.94
2016	118	20.71	24.48	121	15.36	20.58
2017	119	16.86	21.33	110	17.35	21.92
2018	124	24.82	25.65	127	19.80	25.21

**Caracterización de la fluctuación del Ozono.**

Denotamos el índice de concentración de Ozono como  $O_3$ , y definimos la suma acumulativa como:

$$y(t_i) = \sum_i^N o_{3,i}$$

análogo a la cantidad aditiva  $f_i$  revisada la sección (marco teórico). usada para la construcción de la fluctuación:

$$Y(t_n) = y(t_n) - m \cdot t_n$$

donde  $0 < n \leq N$  y  $N$  es la longitud de la serie temporal del  $O_3$ . La **Figura 6** y **Figura 7**, muestra la suma acumulativa, así como la fluctuación  $Y(t_n)$  para los trimestres del año 2011, (las fluctuaciones asociadas al resto de los trimestres de la muestra se observaron y estudiaron de la misma forma). Finalmente determinamos el valor de  $H$  mediante la función de estructura dada por:

$$G_2(\Delta n) = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y(t_n) - Y(t_{n+\Delta n})|^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

Para diferentes  $\Delta n$  los  $H$  obtenidos para los trimestres del año 2011 se muestran en la **Figura 8** (la **Tabla 3** y **Tabla 4** muestran los  $H$ 's obtenidos para el resto de los años de la muestra).

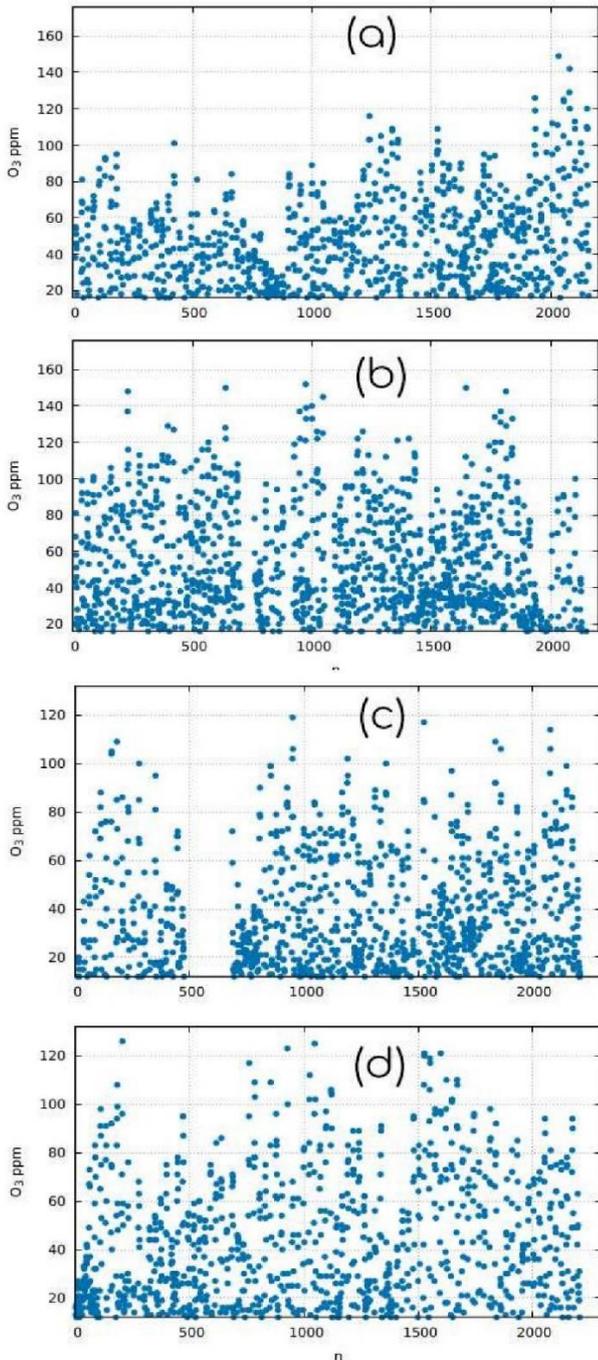


Figura 4. Índice de concentración de O<sub>3</sub> vs número de horas consecutivas, para los trimestres correspondientes al año 2011

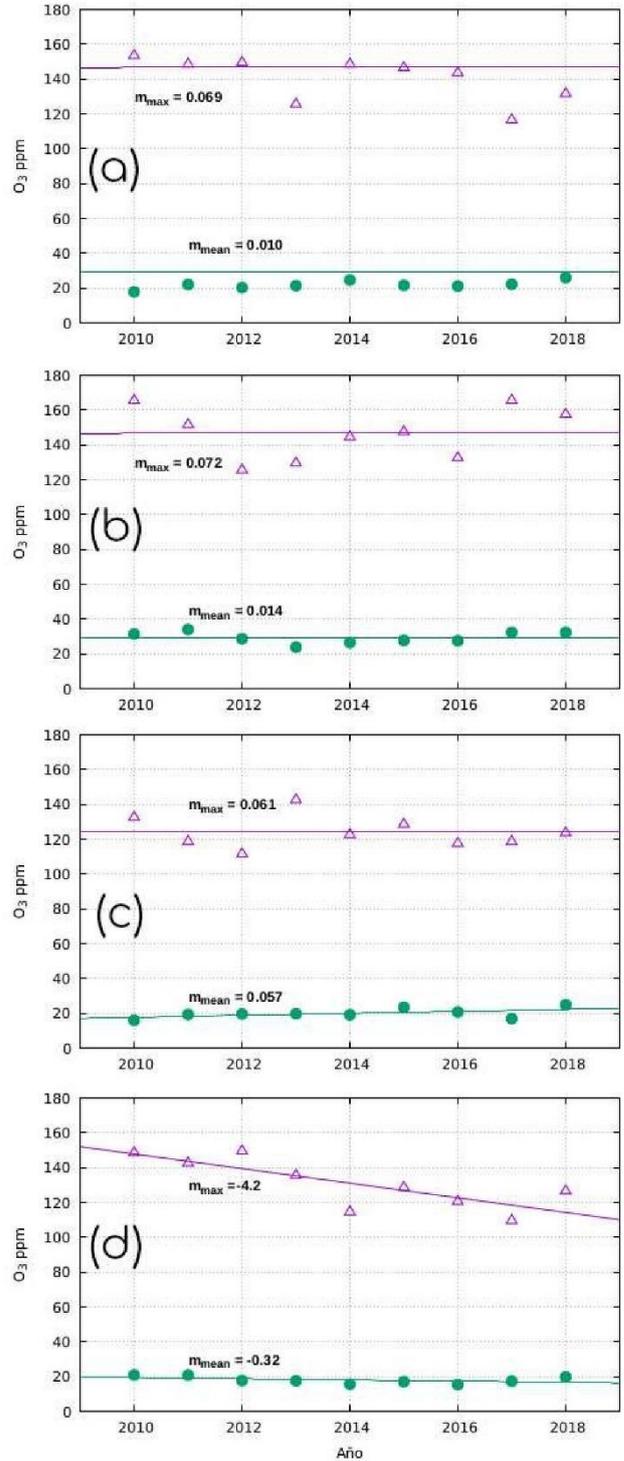


Figura 5. Gráfica Año vs O<sub>3</sub>, ● Promedio del índice de concentración del O<sub>3</sub>, ▲ Valor máximo de concentración del O<sub>3</sub> alcanzado en el trimestre.

### Análisis y discusión de resultados

Del análisis estadístico para valores de concentración del O<sub>3</sub> ≥ 120 ppm valores que indica una calidad muy mala del aire, notamos que la mayor cantidad de ocurrencias de este valor de concentración del O<sub>3</sub> se concentra en el

Primer Congreso de Investigación e Innovación en Tendencias Globales, 26-28 de octubre

segundo trimestre de cada año, siendo 204 el número de veces que se alcanzaron valores por arriba de los 120 ppm, contra 102 veces del resto de los demás trimestres, particularmente se tuvo 35 veces (para 2010), 11 (2011), 12 (2015), 59 (2013), 13 (2014), 18 (2015), 7(2016), 19 (2017), 15 (2018). Es decir, el segundo trimestre (abril - junio) ha presentado una calidad del aire mala, en los últimos años, destacando las 59 veces que se presentó este índice de concentración en 2013. También se observaron los máximos  $Max(O_3)$  alcanzado en cada trimestre, siendo de 166 ppm el valor máximo mayor y este se alcanzó en el segundo trimestre del año 2010 (ver **Tabla 1** y **Tabla 2**), además se obtuvieron los promedios de  $O_3$  de cada trimestre, el promedio mayor de concentración es de 33.975 ppm en el segundo trimestre de 2011 y el valor mínimo de concentración de  $O_3$  se dio el cuarto trimestre de 2014 siendo de 23.786 ppm (**Tabla 1** y **Tabla 2**), de la **Figura 5 (d)** observamos una pendiente -0.32 en el ajuste lineal de la concentración promedio de  $O_3$  para el 4to trimestre, sin embargo en las **Figura 5 (a), (b) y (c)** se tiene pendientes casi nulas en los ajustes lineales para los promedios de concentración, siendo 0.010 para el trimestre enero - marzo, 0.014 abril - junio, 0.061 julio -septiembre, es decir, no se percibe un cambio significativo en los valores promedio de concentración del  $O_3$ , haciendo notar que en el último trimestre de todos los años de la muestra se ha notado una disminución en los promedios de concentración del  $O_3$ , así como la ocurrencia mínima de valores de concentración de  $O_3$  por arriba de los 120 ppm también para el ultimo trimestre de todos los años.

El análisis de la fluctuación para el  $O_3$  mediante la función de estructura  $G_2$  (ecuación 3) muestra un comportamiento en Ley de Potencia  $G_2 \propto (\Delta n)^H$ , los valores de  $H$  se muestran en la **Tabla 3** para cada uno de los trimestres de la muestra, obteniendo  $H = 0.54913 \pm 0.095406$ ,  $H = 0.588456 \pm 0.093259$ ,  $H = 0.533267 \pm 0.0157146$ ,  $H = 0.43988925 \pm 0.095406$  para los trimestres 1, 2, 3, 4 respectivamente, lo que indica invariancia en la escala asociada a correlaciones positivas a largo plazo (persistencia) para los trimestres 1, 2, 3, por otro lado tenemos que  $0 < H < 0.5$  invariancia en la escala asociada a correlaciones negativas a largo plazo (antipersistencia).

Lo cual indica que la serie de tiempo dada por las fluctuaciones del  $O_3$  manifiesta ser una serie de tiempo con comportamiento fractal autoafin, además de mostrar comportamiento estadísticamente persistente, siendo consistente con otros análisis de fluctuación realizados en otras grandes ciudades [7]-[9], [16]

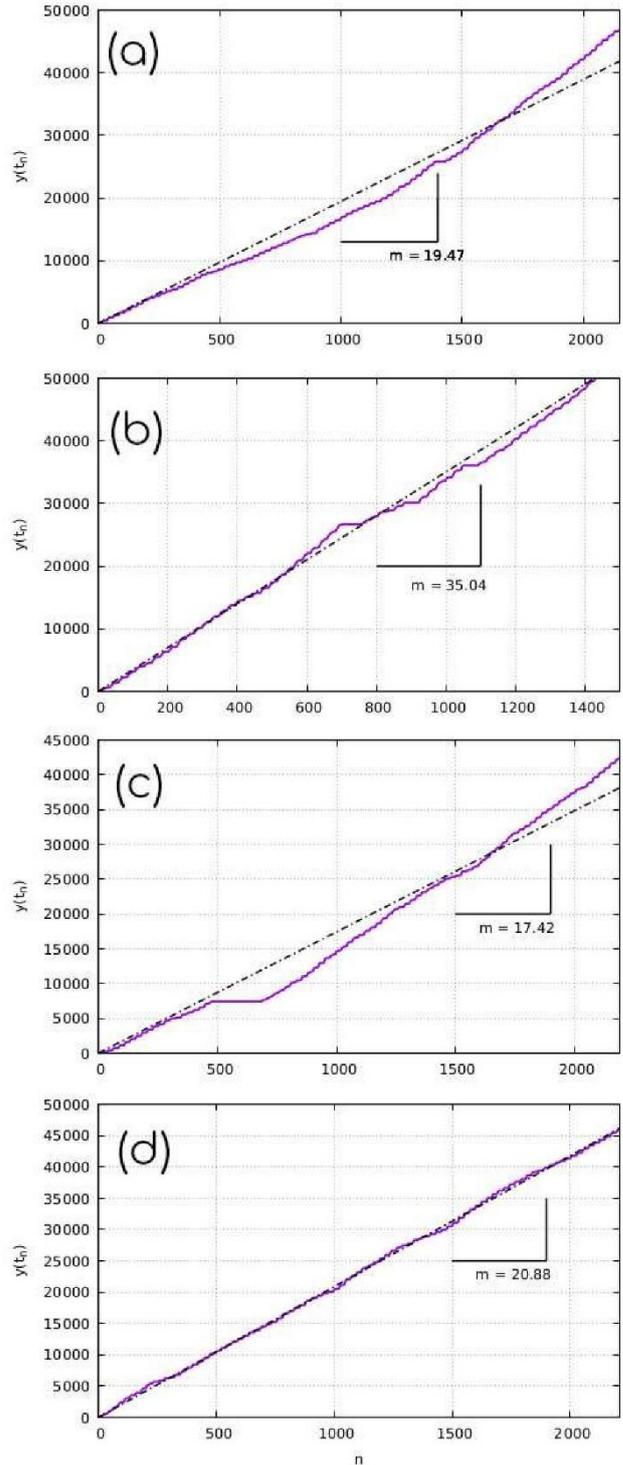


Figura 6 Suma acumulativa de la serie temporal asociada a los índices de concentración del  $O_3$  trimestrales (a) Enero - Marzo, (b) Abril - Junio, (c) Julio - Septiembre, (d) Octubre - Diciembre, (2011), la línea punteada representa el ajuste lineal por mínimos cuadrados.

Primer Congreso de Investigación e Innovación en Tendencias Globales, 26-28 de octubre

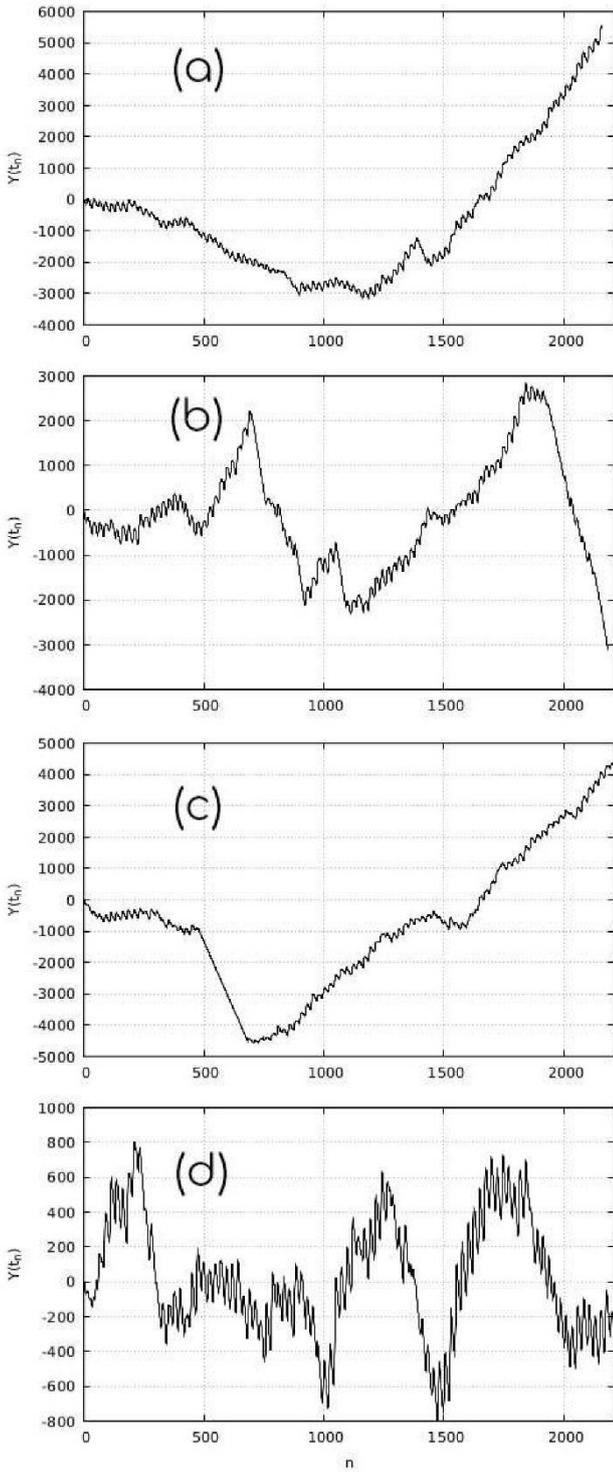


Figura 7 Fluctuación asociada a los trimestres de la figura 6 (a), (b), (c), (d) respectivamente.

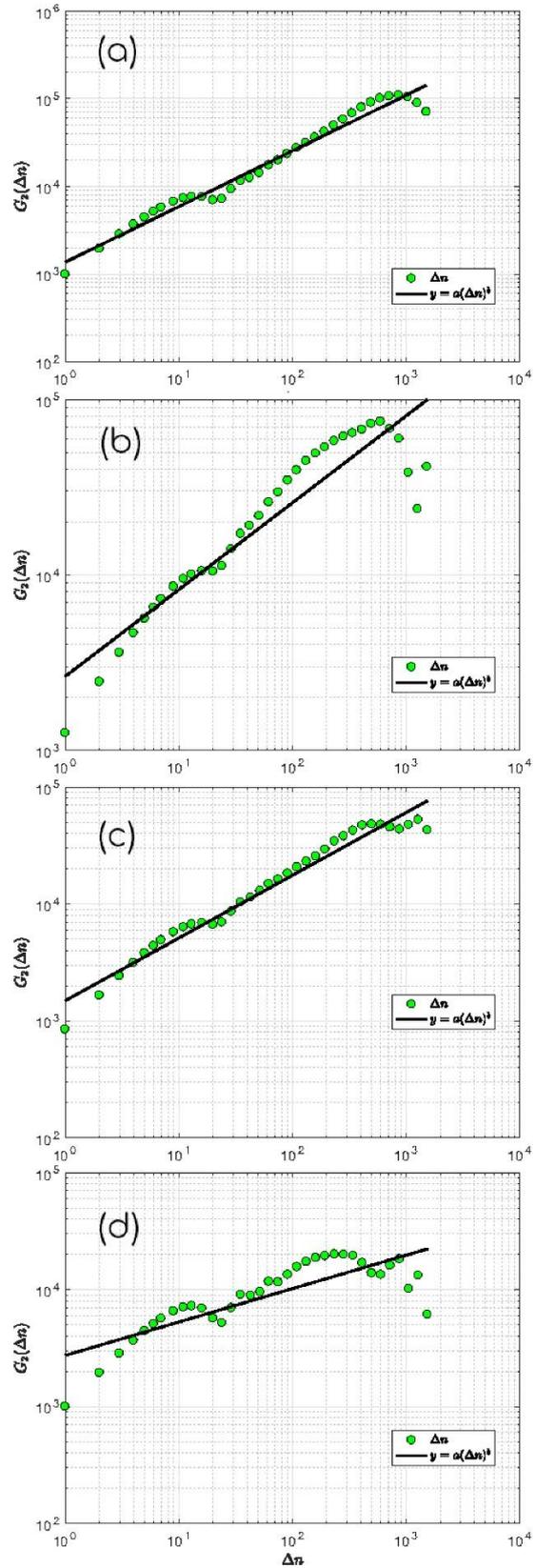


Figura 8  $G_2$  vs  $\Delta n$  para diferentes tamaños de  $\Delta n$ , la línea sólida, es el ajuste de la forma  $a(\Delta n)^b$ , los valores de  $b$  son  $b = 0.63$  para (a);  $b = 0.49$ , (b);  $b = 0.69$ , (c);  $b = 0.28$ , (d)

Primer Congreso de Investigación e Innovación en Tendencias Globales, 26-28 de octubre

Tabla 3: Valores del exponente de Hurst  $H$  tales que  $G_2 \propto (\Delta n)^H$  por trimestre 1 y 2 de los años 2010 - 2018

Año	1er trimestre		2do trimestre	
	$H$	$R^2$	$H$	$R^2$
2010	0.570	0.975	0.525	0.941
2011	0.635	0.972	0.495	0.860
2012	0.644	0.951	0.581	0.966
2013	0.453	0.960	0.628	0.946
2014	0.559	0.971	0.592	0.983
2015	0.538	0.959	0.532	0.978
2016	0.625	0.985	0.681	0.974
2017	0.620	0.972	0.559	0.968
2018	0.544	0.948	0.543	0.956

Tabla 4 : Valores del exponente de Hurst  $H$  tales que  $G_2 \propto (\Delta n)^H$  por trimestre 3 y 4 de los años 2010 - 2018

	3er trimestre		4to trimestre	
	$H$	$R^2$	$H$	$R^2$
2010	0.376	0.822	0.594	0.982
2011	0.690	0.973	0.285	0.669
2012	0.482	0.864	0.405	0.884
2013	0.603	0.949	0.487	0.969
2014	0.536	0.966	0.540	0.916
2015	0.425	0.929	0.539	0.981
2016	0.513	0.963	0.515	0.935
2017	0.529	0.866	0.544	0.879
2018	0.465	0.935	0.449	0.899

**Conclusiones**

A pesar de los esfuerzos del gobierno de la Ciudad de México, a través de los programas para la mejora de la calidad del aire, considerando los resultados presentados en este trabajo, Podemos decir que no hay evidencia de una disminución en los índices de concentración del ozono ( $O_3$ ), al menos para el análisis estadístico de los valores máximos alcanzados en cada trimestre, y los valores promedio del  $O_3$ , a excepción del último trimestre (octubre - diciembre); por otra parte del análisis de fluctuación del  $O_3$  tenemos que existe una invariancia de escala para los primeros 3 trimestres del año, lo cual indica una influencia del histórico en los registros de la concentración del  $O_3$ , es decir, preserva memoria de largo alcance. En particular, notamos que el segundo trimestre del año presenta una frecuencia mayor de valores superiores a los 120 ppm, aunado a la persistencia con un  $H = 0.588456 \pm 0.093259$ , lo cual sugiere un análisis mas robusto para identificar los factores que influyen en este fenómeno. El análisis de fluctuación, nos permitió caracterizar el contaminante del aire Ozono ( $O_3$ ) y determinar la persistencia de las series temporales asociadas al contaminante mediante la función de estructura. La serie de tiempo dada por las fluctuaciones del  $O_3$  manifiesta ser una serie de tiempo con

comportamiento fractal autoafín, además de mostrar comportamiento estadísticamente persistente para los trimestres, excepto el último trimestre de la muestra cuyo comportamiento exhibe antipersistencia con un  $H = 0.43988925 \pm 0.095406$ . Finalmente los hallazgos nos permiten entender aún más el comportamiento del  $O_3$  y extender el análisis a las demás estaciones de monitoreo y otros contaminantes del aire.

**Referencias**

[1] “Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.” <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06-02> (accessed Sep. 01, 2022).

[2] “Air pollution.” [https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1) (accessed Sep. 01, 2022).

[3] “OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction - Key Facts and Figures - OECD.” <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/oecdenvironmentaloutlookto2050theconsequencesofinaction-keyfactsandfigures.htm> (accessed Sep. 01, 2022).

[4] C. A. Varotsos, J. M. Ondov, A. P. Cracknell, M. N. Efstathiou, and M. N. Assimakopoulos, “Long-range persistence in global Aerosol Index dynamics,” *undefined*, vol. 27, no. 16, pp. 3593–3603, Aug. 2006, doi: 10.1080/01431160600617236.

[5] C. A. Varotsos, J. M. Ondov, M. N. Efstathiou, and A. P. Cracknell, “The local and regional atmospheric oxidants at Athens (Greece),” *Environ Sci Pollut Res Int*, vol. 21, no. 6, pp. 4430–4440, 2014, doi: 10.1007/S11356-013-2387-1.

[6] H. L. Windsor and R. Toumi, “Scaling and persistence of UK pollution,” *Atmos Environ*, vol. 35, no. 27, pp. 4545–4556, Sep. 2001, doi: 10.1016/S1352-2310(01)00208-4.

[7] I. A. Pérez, M. L. Sánchez, M. A. García, and V. Paredes, “Persistence analysis of CO2 concentrations recorded at a rural site in the upper Spanish plateau,” *Atmos Res*, vol. 100, no. 1, pp. 45–50, Apr. 2011, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2010.12.025.

[8] A. B. Chelani, “Statistical persistence analysis of hourly ground level ozone concentrations in Delhi,” *Atmos Res*, vol. 92, no. 2, pp. 244–250, Apr. 2009, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2008.12.001.

[9] Z. Chen, C. P. Barros, and L. A. Gil-Alana, “The persistence of air pollution in four mega-cities of China,” *Habitat Int*, vol. 56, pp. 103–108, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.HABITATINT.2016.05.004.

[10] D. M. Bon *et al.*, “Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign:

## Primer Congreso de Investigación e Innovación en Tendencias Globales, 26-28 de octubre

- measurement comparison, emission ratios, and source attribution,” *undefined*, vol. 11, no. 6, pp. 2399–2421, 2010, doi: 10.5194/ACP-11-2399-2011.
- [11] W. Lei, G. Li, and L. T. Molina, “Modeling the impacts of biomass burning on air quality in and around Mexico City,” *Atmos Chem Phys*, vol. 13, no. 5, pp. 2299–2319, 2013, doi: 10.5194/ACP-13-2299-2013.
- [12] G. Li *et al.*, “Atmospheric Chemistry and Physics Impacts of HONO sources on the photochemistry in Mexico City during the MCMA-2006/MILAGO Campaign,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 10, pp. 6551–6567, 2010, doi: 10.5194/acp-10-6551-2010.
- [13] S. Orta-García, F. Pérez-Vázquez, C. González-Vega, J. A. Varela-Silva, L. Hernández-González, and I. Pérez-Maldonado, “Concentrations of persistent organic pollutants (POPs) in human blood samples from Mexico City, Mexico,” *Science of The Total Environment*, vol. 472, pp. 496–501, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2013.11.059.
- [14] M. L. Bell, D. L. Davis, N. Gouveia, V. H. Borja-Aburto, and L. A. Cifuentes, “The avoidable health effects of air pollution in three Latin American cities: Santiago, São Paulo, and Mexico City,” *Environ Res*, vol. 100, no. 3, pp. 431–440, Mar. 2006, doi: 10.1016/J.ENVRES.2005.08.002.
- [15] H. Riojas-Rodríguez *et al.*, “Personal PM<sub>2.5</sub> and CO exposures and heart rate variability in subjects with known ischemic heart disease in Mexico City,” *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol. 16, no. 2, pp. 131–137, Mar. 2006, doi: 10.1038/SJ.JEA.7500453.
- [16] M. Meraz, E. Rodríguez, R. Femat, J. C. Echeverría, and J. Alvarez-Ramirez, “Statistical persistence of air pollutants (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>) in Mexico City,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 427, pp. 202–217, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.physa.2015.02.009.
- [17] D. Aguilar-Velázquez and I. Reyes-Ramírez, “A wavelet analysis of multiday extreme ozone and its precursors in Mexico city during 2015-2016,” 2018, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.06.017.
- [18] A. Sanchez, “Complejidad :: mecánica estadística y ciencia no lineal,” *SeMA Journal: Boletín de la Sociedad Española de Matemática Aplicada*, ISSN 2254-3902, ISSN-e 2254-3902, N<sup>o</sup>. 34, 2006, págs. 175-189, no. 34, pp. 175–189, 2006, Accessed: Sep. 01, 2022. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2317062>
- [19] B. B. Mandelbrot, “Fractals and Scaling in Finance,” *Fractals and Scaling in Finance*, 1997, doi: 10.1007/978-1-4757-2763-0.
- [20] Z. Eisler, I. Bartos, and J. Kertész, “Fluctuation scaling in complex systems: Taylor’s law and beyond,” *Adv Phys*, vol. 57, no. 1, pp. 89–142, Aug. 2007, doi: 10.48550/arxiv.0708.2053.
- [21] A. S. Balankin, “Dynamic scaling approach to study time series fluctuations,” *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 76, no. 5 Pt 2, Nov. 2007, doi: 10.1103/PHYSREVE.76.056120.
- [22] A. S. Balankin, D. Morales Matamoros, J. Patiño Ortiz, M. Patiño Ortiz, E. Pineda León, and D. Samayoa Ochoa, “Scaling dynamics of seismic activity fluctuations,” *Europhys Lett*, vol. 85, no. 3, p. 39001, Feb. 2009, doi: 10.1209/0295-5075/85/39001.
- [23] A. L. Barabási and T. Vicsek, “Multifractality of self-affine fractals,” *Phys Rev A (Coll Park)*, vol. 44, no. 4, p. 2730, Aug. 1991, doi: 10.1103/PhysRevA.44.2730.
- [24] P. Meakin, “Fractals, scaling, and growth far from equilibrium,” p. 674, 1998, Accessed: Sep. 01, 2022. [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/Fractals\\_Scaling\\_and\\_Growth\\_Far\\_from\\_Equ.html?hl=es&id=cWmbNYSQDKoC](https://books.google.com/books/about/Fractals_Scaling_and_Growth_Far_from_Equ.html?hl=es&id=cWmbNYSQDKoC)
- [25] H.-O. Peitgen, H. Jürgens, and D. Saupe, “Chaos and Fractals,” *Chaos and Fractals*, 1992, doi: 10.1007/978-1-4757-4740-9.
- [26] Y. H. Shao, G. F. Gu, Z. Q. Jiang, W. X. Zhou, and D. Sornette, “Comparing the performance of FA, DFA and DMA using different synthetic long-range correlated time series,” *Sci Rep*, vol. 2, 2012, doi: 10.1038/SREP00835.
- [27] K. Hu, P. C. Ivanov, Z. Chen, P. Carpena, and H. E. Stanley, “Effect of trends on detrended fluctuation analysis,” *Phys Rev E*, vol. 64, no. 1, p. 011114, Jun. 2001, doi: 10.1103/PhysRevE.64.011114.