

ANÁLISIS TEMPORAL DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS (NO₂, O₃ TROPOSFÉRICO Y CO) Y SU RELACIÓN CON LA TEMPERATURA DEL AIRE Y LA RADIACIÓN SOLAR EN LIMA METROPOLITANA

TEMPORAL ANALYSIS OF AIR POLLUTANTS (NO₂, GROUND-LEVEL O₃, AND CO) AND THEIR RELATIONSHIP TO AIR TEMPERATURE AND SOLAR RADIATION IN LIMA METROPOLITANA

Orlando Fernando Benites-Morales¹ y Sergio Artemio Pacsi-Valdivia²

Resumen

El presente estudio comprende el análisis temporal de los niveles de NO₂, CO y O₃ troposférico acontecidos en Lima Metropolitana entre los años 2015 al 2018, y su relación entre sí y con la temperatura del aire y la radiación solar. Para ello, se desarrollaron análisis temporales descriptivos, correlacionales y de regresión empleando información horaria registrada en diferentes zonas que componen la ciudad. Se advirtió que los niveles de los gases evaluados se encontraron principalmente por debajo de la normativa peruana y los valores guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud, por lo que su influencia en la salud de la población no fue relevante. El comportamiento horario de estos gases fue bimodal y estuvo influenciado por el tráfico vehicular para el NO₂ y el CO, y por la radiación solar para el O₃ troposférico; aunque, posiblemente este último también haya estado influenciado por su desplazamiento nocturno. En el comportamiento diario se evidenció el denominado “efecto fin de semana”. El análisis correlacional indicó un comportamiento homogéneo de los parámetros entre las zonas evaluadas; y se observó una clara correlación negativa entre el CO con el O₃ troposférico y una clara correlación positiva entre el NO₂ con el CO y entre los parámetros meteorológicos con el NO₂ y con el O₃ troposférico. Finalmente, se generaron modelos de regresión lineal múltiple que estimaron adecuadamente los valores históricos de O₃ troposférico.

Palabras clave: NO₂, CO, O₃ troposférico, temperatura del aire, radiación solar, tráfico vehicular, análisis temporal, Lima Metropolitana.

Abstract

This study includes the temporal analysis of the levels of NO₂, CO, and ground-level O₃ measured in Lima Metropolitana between the years 2015 to 2018 and the relationship between them and with air temperature and solar radiation. For this, descriptive, correlational, and regression temporal analyzes were carried out using hourly records taken in different areas of the city. The levels of the gases evaluated were mainly below the Peruvian regulations and the World Health Organization's air quality guidelines, so their influence on the health of the population was not relevant. The hourly levels of these gases were bimodal and were influenced by vehicular traffic for NO₂ and CO, and by solar radiation for ground-level O₃; although, the latter may also have been influenced by its nocturnal movement. Daily behavior showed the so-called "weekend effect". The correlation analysis indicated a homogeneous behavior of the parameters between the evaluated areas; plus, there was a negative correlation between CO and ground-level O₃. Furthermore, there was a positive correlation between NO₂ and CO; and between the meteorological factors with NO₂ and ground-level O₃. Finally, multiple linear regression models were generated that adequately estimated the historical values of ground-level O₃.

Key words: NO₂, CO, ground-level O₃, air temperature, solar radiation, vehicular traffic, temporal analysis, Lima Metropolitana area.

Introducción

Los óxidos de nitrógeno (NO_x = NO + NO₂), el monóxido de carbono (CO) y el ozono (O₃) troposférico son contaminantes atmosféricos gaseosos que suelen ser evaluados de manera conjunta. Conforme con Cichowicz & Stelegowski (2019), estos desarrollan entre sí una compleja dinámica atmosférica, la cual toma relevancia especialmente en áreas urbanizadas. El O₃ troposférico interactúa con el

dióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de nitrógeno (NO) en un conjunto de reacciones de formación y destrucción catalizadas por la energía solar, el cual fue denominado por Leighton (1961) como “el estado fotoestacionario”. Debido a que tales reacciones establecen un ciclo nulo (es decir, no permite un aumento o disminución neta de ninguna de las moléculas), estudios como el de Monks *et al.* (2015) señalan que el incremento en la concentración

ambiental de O_3 troposférico responde al uso de precursores tales como el CO, metano (CH_4) e hidrocarburos no metánicos (HCNM) en presencia de los NO_x .

Alrededor del mundo, se han llevado a cabo gran cantidad de estudios relacionados con la dinámica entre los NO_x , el CO, el O_3 troposférico y los parámetros meteorológicos. Frecuentemente, en las ciudades estudiadas se evidencia una relación directa entre las concentraciones de NO_x y CO, debido a que estos gases son emitidos directamente por el parque automotor, e inversa entre los niveles de ambos contaminantes y la concentración de O_3 troposférico, pues estos funcionan como sus precursores (Roberts-Semple *et al.*, 2012; Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Tumwitike *et al.*, 2014; Kalbarczyk *et al.*, 2015; Szep *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2019). La temperatura del aire y la radiación solar suelen tener una relación directa con las concentraciones de O_3 troposférico e inversa con las de NO_x y CO, ya que tales parámetros meteorológicos fomentan las reacciones de formación del O_3 troposférico y, por lo mismo, el consumo de sus precursores (es decir, de contaminantes como los NO_x y el CO) (Ocak & Turalioglu, 2008; Kalbarczyk *et al.*, 2015; Szep *et al.*, 2016; Gasmí *et al.*, 2017). Asimismo, es común observar una dinámica opuesta entre la humedad relativa y estos gases en comparación con la de la temperatura del aire, puesto que la humedad relativa suele disminuir conforme la temperatura del aire asciende (Wallace & Kanaroglou, 2009); y dado que niveles altos de humedad relativa suelen indicar una alta inestabilidad atmosférica, alta abundancia de nubes y mayor intensidad de deposición húmeda, lo cual se relaciona a su vez con menores niveles de O_3 troposférico (Liu *et al.*, 2020; Zoran *et al.*, 2020). Adicionalmente, parámetros como la velocidad del viento tienden a presentar una relación inversa con los de NO_x y CO, y directa con los niveles de O_3 troposférico, debido a que el viento intenso promueve la dispersión de gases como el NO_2 , lo cual bajo ciertas circunstancias fomenta la formación del O_3 troposférico (Ocak & Turalioglu, 2008; Jones *et al.*, 2010; Roberts-Semple *et al.*, 2012; Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Agudelo-Castaneda *et al.*, 2014; Kalbarczyk *et al.*, 2015; Gasmí *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019).

En específico para Lima Metropolitana, si bien el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) publica informes mensuales sobre los niveles de contaminantes atmosféricos tales como el NO_2 , el CO y el O_3 troposférico elaborados a partir de los registros de sus diferentes estaciones de calidad del aire ubicadas en dicha ciudad, estos no incluyen como parte de su alcance una explicación profunda de la dinámica de tales parámetros a nivel local ni de su relación con los parámetros meteorológicos, lo cual cobra importancia para la elaboración de futuros planes de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad. En este sentido, el presente estudio buscó

caracterizar el comportamiento temporal de los NO_x (utilizando como indicador al NO_2), el CO y el O_3 troposférico, analizar la relación existente entre estos gases y los parámetros meteorológicos y conocer la influencia de todos estos sobre los niveles horarios de O_3 troposférico ocurrido entre los años 2015 al 2018 en Lima Metropolitana.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en Lima Metropolitana, capital de la región Lima y de Perú, la cual por su extensión suele ser dividida en cuatro zonas: zona norte, zona centro, zona este y zona sur (Figura 1). Esta ciudad costera posee una extensión total de aproximadamente 2 819 km² y alberga a casi el 27% de la población del país con un aproximado de 8.57 millones de habitantes, de los cuales el 99.9% corresponde a población urbana (INEI, 2018). Geográficamente, se sitúa en la costa central del Perú y limita por el oeste con el océano Pacífico y por el este con las estribaciones de la cordillera de los Andes. Asimismo, cuenta con un clima desértico subtropical con una temperatura ambiental que oscila entre 12 en invierno y 28 °C en verano, y una humedad relativa que varía entre 80 y 100% durante todo el año (Ramos & Meza, 2017).

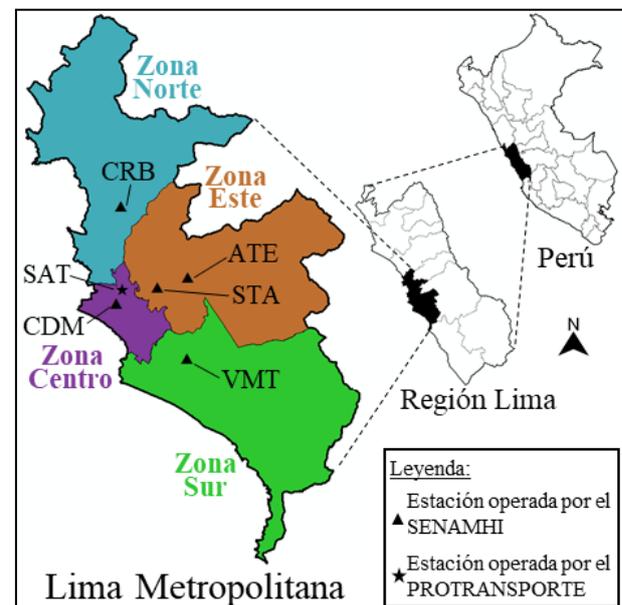


Figura 1. Ubicación de Lima Metropolitana y de las estaciones de monitoreo utilizadas.

Se utilizó información horaria (i.e. promedios cada 60 minutos) de NO_2 , O_3 troposférico, CO, temperatura del aire y radiación solar registrada entre los años 2015 al 2018 por el SENAMHI y por el Instituto Metropolitano Protransporte de Lima (PROTRANSPORTE) en sus diferentes estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas en las cuatro zonas que componen a Lima Metropolitana. Así, como

se observa en la Figura 1, la estación Carabayllo (CRB) fue utilizada como representativa para la zona norte; la estación Campo de Marte (CDM) y complementariamente la información de radiación solar de la estación SAT (SAT), para la zona centro; la estación Santa Anita (STA) y complementariamente la información de temperatura del aire y de radiación solar de la estación Ate (ATE), para la zona este; y la estación Villa María del Triunfo (VMT), para la zona sur.

La metodología para el análisis de los registros horarios del NO₂, O₃ troposférico, CO, temperatura del aire y radiación solar consistió en i) un preprocesamiento de la información disponible, donde se calcularon sus medidas de tendencia central; ii) un análisis temporal cualitativo, en el cual se observó el comportamiento temporal de los parámetros evaluados; iii) un análisis de correlación de Spearman de los registros de un mismo parámetro en las cuatro zonas evaluadas y un análisis de correlación de Spearman de los registros de los parámetros evaluados para una misma zona; y iv) un análisis de regresión lineal múltiple por zona utilizando al O₃ troposférico como variable dependiente y al resto de parámetros como variables independientes o predictoras. Cabe precisar que, para el análisis de correlación se utilizó el coeficiente de Spearman y no el coeficiente de Pearson, dado que las distribuciones de datos relacionados con la calidad del aire no suelen ajustarse a una distribución normal (Jaffar *et al.*, 2018).

Resultados y discusión

Las medidas de tendencia central obtenidas para los parámetros evaluados se presentan en la Tabla 1. La concentración horaria promedio varió entre 18.21 µg/m³ en la zona sur y 23.96 µg/m³ en la zona centro para el NO₂, 11.88 µg/m³ en la zona este y 18.1 µg/m³ en la zona norte para el O₃ troposférico, y 435.17 µg/m³ en la zona centro y 864.2 µg/m³ en la zona este para el CO. Asimismo, el periodo de evaluación contó principalmente con niveles de estos gases por debajo de los valores guía vigentes establecidos por la Organización Mundial de la Salud (2021) de 200 µg/m³ promedio en 1 hora para el NO₂, 30 000 µg/m³ promedio en 1 hora para el CO, 100 µg/m³ promedio en 8 horas continuas para el O₃ troposférico y 10 000 µg/m³ promedio en 8 horas continuas para el CO, los cuales coinciden con sus correspondientes Estándares Nacionales de Calidad Ambiental vigentes. Esto último se aprecia en que la máxima concentración horaria registrada fue de 162.1 µg/m³ en la zona centro para el NO₂ y 3 985.9 µg/m³ en la zona este para el CO, mientras que la máxima concentración promedio cada 8 horas continuas fue de 95.68 µg/m³ en la zona norte para el O₃ troposférico y 2 696.29 µg/m³ en la zona este para el CO.

La Figura 2 muestra el comportamiento horario de los parámetros evaluados. Los gases presentaron dos valores máximos durante el día (es decir, un “comportamiento bimodal”). Para el caso del NO₂ y del CO, estos valores máximos se relacionan con las horas de máxima congestión vehicular, dado que el parque automotor es una fuente de generación importante de estos gases contaminantes en ambientes urbanos (Jang *et al.*, 2017). Para el caso del O₃ troposférico, el valor máximo que ocurre en la tarde se relaciona con la mayor cantidad de reacciones fotoquímicas de generación de O₃ que sucede momentos después de las horas de máxima radiación solar (es decir, luego del mediodía) (Roberts-Semple *et al.*, 2012). Por su parte, el valor máximo de O₃ troposférico que ocurre en la mañana puede relacionarse con: el transporte horizontal del O₃ troposférico a partir de otras localidades cercanas, la reinyección de O₃ atrapado en capas elevadas de la troposfera (Steinberger & Ganor, 1980), los bajos niveles de NO nocturnos (Awang *et al.*, 2015) y la cercanía del área evaluada con el borde costero (Zhang *et al.*, 2019). De estos resultados, y junto con las medidas de tendencia central mostradas previamente, se puede evidenciar que los gases evaluados no presentaron un riesgo relevante sobre la salud de la población conforme con los valores guía vigentes establecidos por la Organización Mundial de la Salud (2021) y la normativa peruana vigente.

En la Figura 3 se presenta el comportamiento diario de los parámetros evaluados. Los gases presentaron niveles similares durante todos los días de la semana, salvo por los fines de semana donde hubo un evidente incremento en los niveles de O₃ troposférico y una disminución en los niveles de NO₂ y CO, lo cual es denominado como el “efecto fin de semana”. Esto último ocurre debido a que durante los fines de semana disminuyen los niveles de tráfico vehicular, lo cual genera una disminución de los niveles de CO y NO₂, y la disminución de este último gas permite una mayor concentración de radicales hidroxilos (•OH), los cuales funcionan como intermediarios en las reacciones fotoquímicas de generación de O₃ (Wang *et al.*, 2012; Gasmi *et al.*, 2017; Alghamdi *et al.*, 2019; Sicard *et al.*, 2020).

En cuanto al comportamiento estacional, en la Figura 2 y Figura 3 se aprecia que, para la zona norte, los niveles de O₃ troposférico fueron mayores durante el verano y los de NO₂ y CO, mayores durante el invierno, lo cual se puede relacionar con la mayor y menor cantidad de reacciones fotoquímicas de generación de O₃ que sucede durante el verano y el invierno, respectivamente (Wang *et al.*, 2012). Además, para la zona este y zona sur, los niveles de O₃ troposférico y CO fueron mayores durante el invierno, posiblemente debido a la mayor intensidad de la capa de inversión térmica que ocurre en Lima Metropolitana durante esos meses, similar a lo visto en otros estudios (Feng *et al.*, 2020).

El resultado del análisis de correlación de Spearman entre zonas es presentado en la Tabla 2. En el verano, invierno y para el promedio anual se observó una alta correlación positiva entre las diferentes zonas evaluadas. Esto indica una tendencia homogénea de los gases entre tales zonas a lo largo del día, lo cual podría deberse a que estos son generados desde fuentes de emisión similares (Castellano *et al.*, 2009).

En la Tabla 3 se resume el resultado del análisis de correlación de Spearman entre parámetros. En general, se encontró que los niveles de O₃ troposférico con los de CO poseen una correlación negativa, salvo en la zona sur y principalmente en el invierno, y que los niveles de O₃ troposférico con los de NO₂ presentan una correlación positiva durante el verano en la zona norte, zona este y zona sur y una correlación negativa durante el invierno en la zona centro, posiblemente debido a que existe una mayor influencia del CO como precursor del O₃ troposférico, similar a lo visto en otros estudios (Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Agudelo-Castaneda *et al.*, 2014; Ismail *et al.*, 2016). Por otro lado, salvo durante el verano en la zona este, en todas las zonas se observó una correlación positiva entre los niveles de NO₂ con los de CO, lo cual posiblemente fue causado debido a que ambos gases comparten al parque automotor como fuente de emisión y a que el CO influencia la oxidación del NO a NO₂ (Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Tumwitike *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2019). Asimismo, salvo durante el invierno en la zona centro, en todas las zonas se obtuvo una correlación positiva entre los niveles de O₃ troposférico con los parámetros meteorológicos, debido a que estos últimos permiten las reacciones fotoquímicas de generación de O₃ (Kovač-Andrić *et al.*, 2013). Mientras que, salvo durante el invierno en la zona centro, se encontró una correlación positiva entre los parámetros meteorológicos con los niveles de NO₂ de menor magnitud en comparación que con los obtenidos para el O₃ troposférico; y, salvo durante el invierno en la zona centro y zona sur, no se halló una correlación significativa entre los parámetros meteorológicos con los niveles de CO, dado que el comportamiento de estos gases responde principalmente a los niveles de tráfico vehicular (Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Gasmi *et al.*, 2017).

Finalmente, en la Tabla 4 y Figura 4 se puede apreciar que los niveles horarios de NO₂, CO, temperatura del aire y radiación solar estiman de manera adecuada los niveles horarios de O₃ troposférico, con coeficientes de determinación (R²) ajustados próximos a la unidad. El uso de tales parámetros como variables independientes se ha observado en otros estudios (Castellano *et al.*, 2009; Ghazali *et al.*, 2010; Jaioun *et al.*, 2014) en los cuales también se obtuvieron R² elevados. Cabe mencionar que, la correlación existente entre las variables independientes de los modelos de regresión lineal múltiple diseñados se puede deber al incumplimiento de la “no colinealidad” (Frost, 2019), lo que ocasiona,

por ejemplo, coeficientes lineales negativos para la temperatura del aire (β_3) o positivos para el NO₂ (β_1), lo cual no refleja necesariamente el tipo de influencia de estos parámetros sobre los niveles de O₃ troposférico.

Conclusiones

Entre los años 2015 al 2018, en Lima Metropolitana se registraron niveles adecuados de NO₂, CO y O₃ troposférico con respecto a la normativa peruana y a los valores guías vigentes hasta el momento de la Organización Mundial de la Salud. Estos gases presentaron un “comportamiento horario bimodal” relacionado especialmente con los niveles de tráfico vehicular para el NO₂ y el CO y con la radiación solar para el O₃ troposférico; se evidenció el “efecto fin de semana” para sus comportamientos diarios y no presentaron un comportamiento estacional claro. Las cuatro zonas de la ciudad tuvieron una tendencia homogénea de los gases evaluados a lo largo del día; y se evidenció i) una clara correlación negativa entre el O₃ troposférico y el CO, ii) una clara correlación positiva entre el NO₂ y el CO, iii) una clara correlación positiva entre los parámetros meteorológicos evaluados (temperatura del aire y radiación solar) y el O₃ troposférico y iv) una clara correlación positiva entre los parámetros meteorológicos evaluados y el NO₂. Por último, se diseñaron modelos de regresión lineal múltiples que estimaron de manera adecuada los niveles horarios de O₃ troposférico utilizando como variables predictoras al NO₂, CO, temperatura del aire y radiación solar.

Agradecimientos

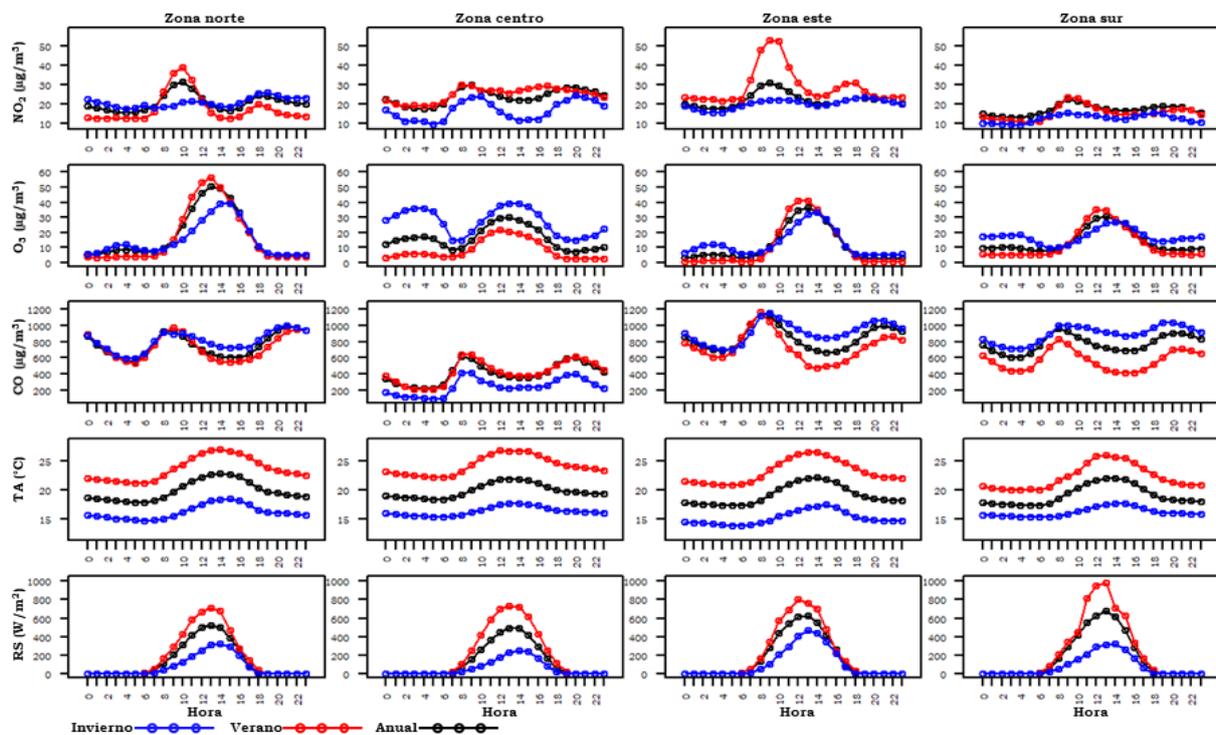
Este trabajo no hubiese podido ser realizado sin el apoyo del SENAMHI y el PROTRANSPORTE, quienes brindaron los registros horarios de los parámetros evaluados.

Literatura citada

- Agudelo-Castaneda D.M., Teixeira E.C. & Pereira F.N. 2014. Time-series analysis of surface ozone and nitrogen oxides concentrations in an urban area at Brazil. *Atmospheric Pollution Research*, 5(3): 411-420. DOI <https://doi.org/10.5094/APR.2014.048>.
- Alghamdi M.A., Al-Hunaiti A., Arar S., Khoder M., Abdelmaksoud A.S., Al-Jeelani H., Lihavainen H., Hyvärinen A., Shabbaj I.I., Almeahadi F.M., Zaidan M.A., Hussein T. & Dada L. 2019. A Predictive Model for Steady State Ozone Concentration at an Urban-Coastal Site. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2): art. 258. DOI <https://doi.org/10.3390/ijerph16020258>.
- Awang N.R., Ramli N.A., Yahaya A.S. & Elbayoumi M. 2015. High Nighttime Ground-Level Ozone Concentrations in Kemaman: NO and NO₂ Concentrations Attributions. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(4): 1357-1366. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.01.0031>.

- Castellano M., Franco A., Cartelle D., Febrero-Bande M. & Roca E. 2009. Identification of NO_x and Ozone Episodes and Estimation of Ozone by Statistical Analysis. *Water, Air, and Soil Pollution*, 198: 95-110. DOI <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9829-2>.
- Cichowicz R. & Stelegowski A. 2019. Average Hourly Concentrations of Air Contaminants in Selected Urban, Town, and Rural Sites. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77: 197-213. DOI <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00627-8>.
- Feng X., Wei S. & Wang, S. 2020. Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Climatology and impacts on air pollution. *Science of the Total Environment*, 726: 138579. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138579>.
- Frost J. 2019. *Regression Analysis: An Intuitive Guide for Using and Interpreting Linear Models*. First edition. Statistics By Jim Publishing, State Collage, Pennsylvania. <https://statisticsbyjim.com/regression/>.
- Gasmi K., Aljalal A., Al-Basheer W. & Abdulahi M. 2017. Analysis of NO_x, NO and NO₂ ambient levels in Dhahran, Saudi Arabia. *Urban Climate*, 21: 232-242. DOI <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.002>.
- Ghazali N.A., Ramli N.A., Yahaya A.S., Yusof N.F., Sansuddin N. & Al Madhoun, W.A. 2010. Transformation of nitrogen dioxide into ozone and prediction of ozone concentrations using multiple linear regression techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 165: 475-489. DOI <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0960-3>.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2018. *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Perfil Sociodemográfico, Informe Nacional. INEI. Lima, Perú. https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf.
- Ismail M., Abdullah S., Yuen F.S. & Ghazali N.A. 2016. A Ten Year Investigation on Ozone and Its Precursors at Kemaman, Terengganu, Malaysia. *EnvironmentAsia*, 9(1): 1-8. DOI <https://doi.org/10.14456/ea.1473.1>.
- Jaffar M.I., Hamid H.A., Yunus R. & Raffee A.F. 2018. Fitting Statistical Distribution on Air Pollution: An Overview. *International Journal of Engineering & Technology*, 7: 40-44. DOI <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.23.17256>.
- Jaioun K., Saithanu K. & Mekparyup J. 2014. Multiple Linear Regression Model to Estimate Ozone concentration in Chonburi, Thailand. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 9(4): 1305-1308. https://www.ripublication.com/ijaes3/ijaesv9n4_25.pdf.
- Jang E., Do W., Park G., Kim M. & Yoo E. 2017. Spatial and temporal variation of urban air pollutants and their concentrations in relation to meteorological conditions at four sites in Busan, South Korea. *Atmospheric Pollution Research*, 8(1): 89-100. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.009>.
- Jones A.M., Harrison R.M. & Baker J. 2010. The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO_x. *Atmospheric Environment*, 44(13): 1682-1690. DOI <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.007>.
- Kalbarczyk R., Kalbarczyk E., Niedźwiecka-Filipiak I. & Serafin L. 2015. Ozone Concentration at Ground Level Depending on the Content of NO_x and Meteorological Conditions. *Ecological Chemistry and Engineering S.*, 22(4): 527-541. Published Online: 21 Jan 2016. DOI <https://doi.org/10.1515/eces-2015-0031>.
- Kovač-Andrić E., Radanović T., Topalović I., Marković B. & Sakač N. 2013. Temporal variations in concentrations of ozone, nitrogen dioxide, and carbon monoxide at Osijek, Croatia. *Advances in Meteorology*, 2013: Article ID 469786. DOI <https://doi.org/10.1155/2013/469786>.
- Leighton P. 1961. *Photochemistry of Air Pollution*. 1st edition. -Physical Chemistry: A Series of Monographs, Edited by Eric Hutchinson and Van Rysseberghe. Academic Press. New York, New York. https://openlibrary.org/books/OL5825045M/Photochemistry_of_air_pollution.
- Liu P., Song H., Wang T., Wang F., Li X., Miao C. & Zhao H. 2020. Effects of meteorological conditions and anthropogenic precursors on ground-level ozone concentrations in Chinese cities. *Environmental Pollution*, 262(2020): art. 114366. DOI <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114366>.
- Monks P.S., Archibald A.T., Colette A., Cooper O., Coyle M., Derwent R., Fowler D., Granier C., Law K.S., Mills G.E., Stevenson D.S., Tarasova O., Thouret V., von Schneidemesser E., Sommariva R., Wild O. & Williams M.L. 2015. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15): 8889-8973. DOI <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>.
- Ocak S. & Turalioglu F.S. 2008. Effect of Meteorology on the Atmospheric Concentrations of Traffic-Related Pollutants in Erzurum, Turkey. *Journal of International Environmental Application and Science*, 3: 325-335.
- Organización Mundial de la Salud. 2021. *Guías globales de calidad del aire de la OMS*. OMS, Copenhagen, Denmark.
- Ramos R. & Meza V. 2017. Efectos de algunos factores meteorológicos sobre la concentración de esporas de hongos en la plaza San Martín de Lima. *Ecología Aplicada*, 16(2): 143-149. DOI <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v16i2.1018>.
- Roberts-Semple D., Song F. & Gao Y. 2012. Seasonal characteristics of ambient nitrogen oxides and ground-level ozone in metropolitan northeastern New Jersey. *Atmospheric Pollution Research*, 3(2): 247-257. DOI <https://doi.org/10.5094/APR.2012.027>.
- Sicard P., Paoletti E., Agathokleous E., Araminiené V., Proietti C., Coulbaly F. & De Marco A. 2020. Ozone weekend effect in cities: Deep insights for urban air pollution control. *Environmental Research*, 191: 110193. DOI <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110193>.
- Steinberger E.H. & Ganor E. 1980. High Ozone Concentrations at Night in Jerusalem and Tel-Aviv. *Atmospheric Environment*, 14(2): 221-225. DOI [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(80\)90281-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(80)90281-4).
- Szep R., Matyas L., Keresztes R. & Ghimpusan M. 2016. Tropospheric Ozone Concentrations - Seasonal and Daily Analysis and its Association with NO and NO₂ as Function of NO_x in Ciuc Depression - Romania. *Revista de Chimie*, 67(2): 205-213. <http://bch.ro/pdfRC/SZEP%20R%202%2016.pdf>.

- Tumwitike H.W., Tenthani C., Tskama M. & Mphangwe I. 2014. Air quality assessment of carbon monoxide, nitrogen dioxide and sulfur dioxide levels in Blantyre, Malawi: a statistical approach to a stationary environmental monitoring station. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 8(6): 330-343. <https://doi.org/10.5897/AJEST2014.1696>.
- Wallace J. & Kanaroglou P. 2009. The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO₂) and fine particulate matter (PM_{2.5}) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *Science of The Total Environment*, 407(18): 5085-5095. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.050>.
- Wang L., Wang J., Tan X. & Fang C. 2019. Analysis of NO_x Pollution Characteristics in the Atmospheric Environment in Changchun City. *Atmosphere*, 11(1): article 30. DOI <https://doi.org/10.3390/atmos11010030>.
- Wang X., Shen Z., Cao J., Zhang L., Liu L., Li J., Liu S. & Sun Y. 2012. Characteristics of surface ozone at an urban site of Xi'an in Northwest China. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(1): 116-126. DOI <https://doi.org/10.1039/c1em10541h>.
- Zhang J., Wang C., Qu K., Ding J., Shang Y., Liu H. & Wei M. 2019. Characteristics of Ozone Pollution, Regional Distribution and Causes during 2014-2018 in Shandong Province, East China. *Atmosphere*, 10(9): article 501. DOI <https://doi.org/10.3390/atmos10090501>.
- Zoran M.A., Savastru R.S., Savastru D.M. & Tautan M.N. 2020. Assessing the relationship between ground levels of ozone (O₃) and nitrogen dioxide (NO₂) with coronavirus (COVID-19) in Milan, Italy. *Science of the Total Environment*, 740(2020): art. 140005. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140005>.



TA = Temperatura del aire (°C), RS = Radiación solar (W/m²).

Figura 2. Comportamiento promedio horario de los parámetros evaluados por zonas.

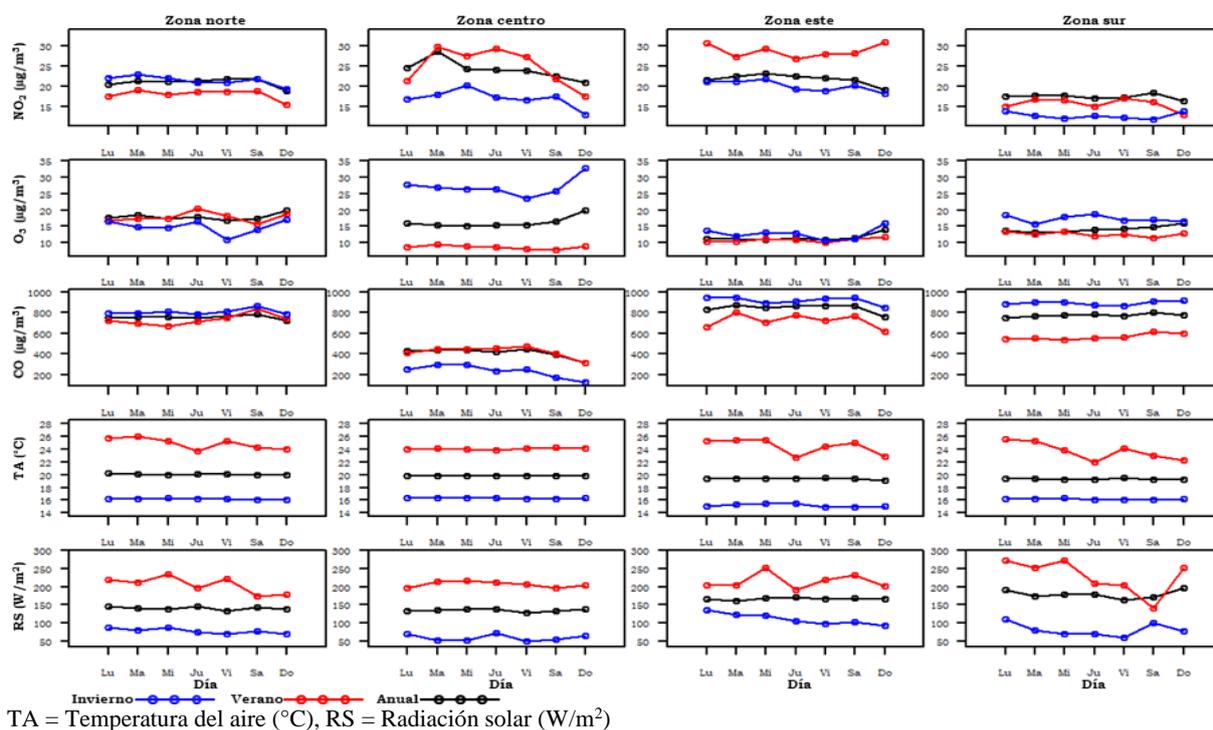


Figura 3. Comportamiento promedio diario de los parámetros evaluados por zonas.

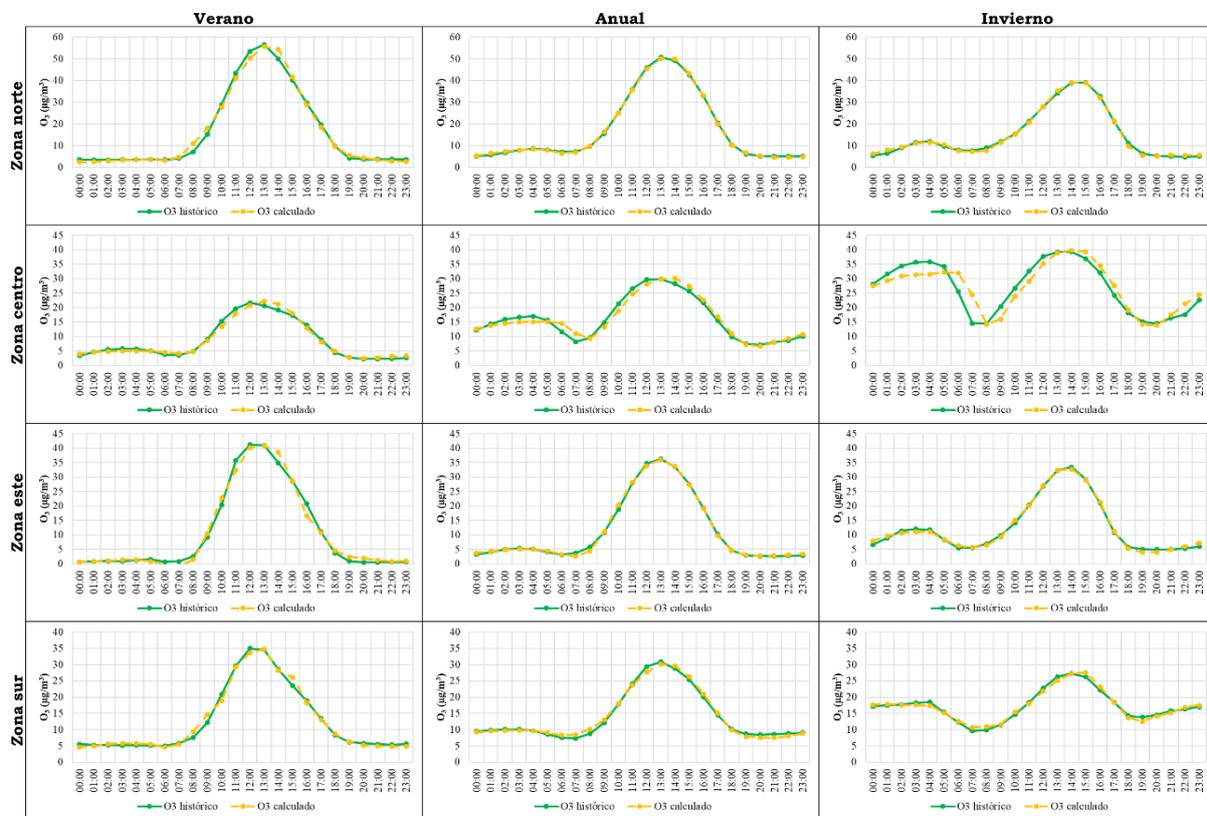


Figura 4. Valores históricos frente a valores estimados por los modelos de regresión lineal múltiple para el O₃ troposférico.

Tabla 1. Descriptores estadísticos básicos.

Zona	Parámetro	Cantidad de registros	Mínimo horario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mediana horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Media horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máxima media cada 8 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo horario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	D.S. horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Norte	NO ₂	24 655	0.10	19.30	21.22	90.11	145.20	13.53
	O ₃	20 869	0.10	10.10	18.10	95.68	150.30	20.70
	CO	28 325	5.60	730.20	746.91	2 264.70	3 234.90	322.22
	TA	15 434	13.39	19.18	19.87	30.50	31.90	3.75
	RS	15 434	0.00	1.16	138.51	770.43	1 021.00	225.28
Centro	NO ₂	16 726	0.10	19.60	23.96	133.00	162.10	18.26
	O ₃	18 672	0.10	12.00	15.62	71.51	94.40	13.41
	CO	25 376	0.10	345.00	435.17	2 590.79	3 065.90	402.87
	TA	33 137	13.90	19.30	19.76	29.5	31.50	3.26
	RS	29 726	0.00	4.83	137.25	750.27	966.33	223.66
Este	NO ₂	14 836	0.10	21.30	22.19	79.14	99.50	16.47
	O ₃	17 329	0.10	5.50	11.88	76.88	108.90	14.67
	CO	26 127	0.30	851.00	864.20	2 696.29	3 985.90	436.42
	TA	16 631	12.84	18.40	19.13	29.63	30.86	3.78
	RS	17 308	0.00	2.01	166.33	776.84	1 189.00	263.23
Sur	NO ₂	15 618	0.10	15.90	18.21	86.50	103.00	13.08
	O ₃	17 260	0.10	10.20	14.49	61.65	113.90	12.68
	CO	24 438	0.20	784.30	781.58	2 085.50	3 251.00	324.84
	TA	13 973	12.33	18.71	19.27	29.66	31.02	3.71
	RS	11 254	0.00	2.48	192.53	942.41	1 246.00	307.82

TA = Temperatura del aire (°C), RS = Radiación solar (W/m²), D.S. = Desviación estándar.

Tabla 2. Matrices de coeficientes de correlación de Spearman entre zonas.

		NO ₂				O ₃ troposférico				CO			
Temperatura del aire	Zona norte	0.65 ***	0.87 ***	0.85 ***		0.66 ***	0.79 ***	0.93 ***		0.72 ***	0.83 ***	0.88 ***	
		0.90 ***	0.92 ***	0.95 ***		0.81 ***	0.95 ***	0.80 ***		0.76 ***	0.89 ***	0.86 ***	
		0.63 ***	0.70 ***	0.34		0.70 ***	0.90 ***	0.63 **		0.74 ***	0.91 ***	0.84 ***	
		0.98 ***	0.82 ***	0.68 ***		0.87 ***	0.95 ***	0.65 ***		-	0.56 **	0.72 ***	
	Zona centro	0.99 ***	0.87 ***	0.90 ***		0.88 ***	0.89 ***	0.87 ***		0.75 ***	0.92 ***		
		0.99 ***	0.80 ***	0.59 **		0.94 ***	0.85 ***	0.85 ***		0.89 ***	0.93 ***		
		0.99 ***	0.99 ***	0.76 ***		1.00 ***	0.87 ***	0.76 ***		-	-	0.95 ***	
		0.99 ***	0.99 ***	0.94 ***		0.97 ***	0.90 ***	0.89 ***		-	-	0.91 ***	
	Zona este	0.99 ***	0.99 ***	0.85 ***		1.00 ***	0.94 ***	0.77 ***		-	-	0.92 ***	
		0.97 ***	0.97 ***	0.98 ***		0.97 ***	0.93 ***	0.97 ***		-	-	-	
		0.99 ***	0.99 ***	0.99 ***		0.92 ***	0.85 ***	0.95 ***		-	-	-	
		0.99 ***	0.99 ***	1.00 ***		0.97 ***	0.92 ***	0.97 ***		-	-	-	
Zona sur	0.97 ***	0.97 ***	0.98 ***		0.97 ***	0.93 ***	0.97 ***		-	-	-		
	0.99 ***	0.99 ***	0.99 ***		0.92 ***	0.85 ***	0.95 ***		-	-	-		
	0.99 ***	0.99 ***	1.00 ***		0.97 ***	0.92 ***	0.97 ***		-	-	-		
	0.99 ***	0.99 ***	1.00 ***		0.97 ***	0.92 ***	0.97 ***		-	-	-		

De color rojo, coeficientes de correlación durante el verano. De color negro, coeficientes de correlación anuales. De color azul, coeficientes de correlación durante el invierno. Los símbolos "*", "**" y "***" indican que el coeficiente de correlación obtuvo un p-valor menor a 0.1, 0.05 y 0.01, respectivamente.

Tabla 3. Matrices de coeficientes de correlación de Spearman entre parámetros.

		Zona norte				Zona centro					
Zona este	NO ₂	0.57 **	0.51 *	0.45 *	0.40	Zona sur	NO ₂	0.27 *	0.67 ***	0.69 ***	0.73 ***
		0.10	0.69 ***	0.43 *	0.19			-0.51 *	0.98 ***	0.36	0.22
		-0.40	0.67 ***	0.42 *	-0.17			-0.71 ***	0.86 ***	0.25	-0.11
	0.48 *	O ₃ tropos.	-0.16 ***	0.87 ***	0.83 ***		0.68 ***	O ₃ tropos.	-0.25 **	0.59 **	0.65 ***
	0.13		-0.54 **	0.66 ***	0.94 ***		0.16		-0.53 **	0.50 *	0.57 **
	-0.33		-0.54 **	0.57 **	0.85 ***		-0.36		-0.55 **	0.31	0.45 *
0.27 *	CO	-0.55 **	-0.11	-0.19	0.51 *	CO	-0.12	0.39	0.33		
0.73 ***		-0.42 *	0.01	-0.36	0.77 ***		-0.37	0.36	0.25		
0.79 ***		-0.35	0.17	-0.10	0.74 ***		-0.39	0.49 *	0.24		
0.63 **	Temp. del aire	0.68 ***	-0.38	0.71 ***	0.66 ***	Temp. del aire	0.96 ***	-0.18	0.87 ***		
0.42 *		0.65 ***	-0.15	0.64 ***	0.61 **		0.76 ***	-0.18	0.81 ***		
0.46 *		0.51 *	0.27	0.71 ***	0.47 *		0.55 **	0.43 *	0.69 ***		
0.65 ***	Rad. solar	0.87 ***	-0.27	0.76 ***	0.51 *	Rad. solar	0.87 ***	-0.20	0.82 ***		
0.39		0.88 ***	-0.16	0.68 ***	0.39		0.70 ***	0.00	0.73 ***		
0.24		0.74 ***	-0.17	0.74 ***	0.47 *		0.48 *	0.18	0.73 ***		

De color rojo, coeficientes de correlación durante el verano. De color negro, coeficientes de correlación anuales. De color azul, coeficientes de correlación durante el invierno. Los símbolos "*", "**" y "***" indican que el coeficiente de correlación obtuvo un p-value menor a 0.1, 0.05 y 0.01, respectivamente.

Tabla 4. Coeficientes de los modelos de regresión lineal múltiple.

Zona	Estación	Coeficiente					R ² ajustado
		β ₀	β ₁ (NO ₂)	β ₂ (CO)	β ₃ (TA)	β ₄ (RS)	
Norte	Verano	-25.69	-0.18	-0.01	1.67	0.06	0.99
	Anual	-26.88	-0.35	-0.01	2.65	0.06	1.00
	Invierno	-49.51	-0.94	-0.02	5.81	0.03	0.99
Centro	Verano	19.98	-0.26	0.00	-0.44	0.03	0.98
	Anual	25.96	0.26	-0.03	-0.5	0.04	0.95
	Invierno	38.26	-0.01	-0.06	-0.03	0.07	0.81
Este	Verano	-18.05	-0.18	-0.01	1.33	0.04	0.98
	Anual	-1.41	-0.5	0.00	1.04	0.04	1.00
	Invierno	-5.9	-1.16	0.00	2.55	0.04	0.99
Sur	Verano	-8.04	0.18	-0.01	0.81	0.02	0.99
	Anual	-19.1	-0.66	0.00	2.23	0.02	0.99
	Invierno	-57.33	-1.29	0.00	5.87	0.00	0.97

TA = Temperatura del aire (°C), RS = Radiación solar (W/m²).

1 INSIDEO S.A.C. Av. Primavera 643, int. S103 / Santiago de Surco / Lima / Perú. fernandobenitesm@outlook.com. ORCID: 0000-0001-9518-3732.

2 Departamento de Ingeniería Ambiental / Universidad Nacional Agraria La Molina. Av. La Universidad s/n / La Molina / Lima / Perú. spv@lamolina.edu.pe. ORCID: 0000-0003-4262-0593.