



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Variación de la calidad del aire en cuatro distritos de Lima en
el periodo 2015 - 2020**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORAS:

Añaños Valladares, Leslie (0000-0002-0987-5730)
Delgado Pereda, Mary Susan (0000-0002-5010-2695)

ASESOR:

Dr. Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto (0000-0002-8200-4640)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2021

Dedicatoria

Se quiere dedicar el presente trabajo de investigación a cada uno de los integrantes de nuestra familia, por el cariño, la confianza y el apoyo que se nos brindan en cada paso que damos para lograr nuestras metas.

Agradecimiento

A nuestra familia por darnos la vida y ayudarnos en el progreso de cada uno de nosotros, a la docente por apoyarnos con paciencia y dedicación en el logro de la realización del trabajo de investigación, a nuestra casa de estudios por las oportunidades que nos ha brindado.

Índice de Contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
III. METODOLOGÍA.....	8
3.1 Tipo y diseño de investigación	8
3.2 Variables y operacionalización.....	8
3.3 Población, muestra y muestreo.....	8
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	10
3.5 Procedimiento	10
3.6 Método de análisis de datos.....	11
3.7 Aspectos éticos	12
IV. RESULTADOS	13
V. DISCUSIÓN.....	23
VI. CONCLUSIONES.....	26
VII. RECOMENDACIÓN	27
REFERENCIAS.....	28
ANEXOS	33

Índice de tablas

Tabla 1 Comparaciones múltiples de los contaminantes PM10, PM2.5, NO2 y O3 en ug/m3 de la media (2015-2019) – 2020 en cuatro estaciones de monitoreo.	13
Tabla 2 Modelo lineal generalizado de GAMMA.	33
Tabla 3 Desvianza del modelo lineal generalizado de GAMMA.....	34

Índice de figuras

Figura 1. Principales Estándares de Calidad Ambiental para Aire	7
Figura 2 Información general de las cuatro estaciones de monitoreo de Lima Metropolitana.....	9
Figura 3 Variabilidad de concentraciones de contaminantes PM10, PM2.5, NO2 y O3 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el periodo 2015-2019 con el año 2020 en cuatro estaciones de monitoreo a) Concentraciones anuales de PM10, b) Concentraciones anuales de PM2.5, c) Concentraciones anuales de NO2, d) Concentraciones anuales de O3.	14
Figura 4 Concentraciones de contaminantes PM10 y PM2.5 en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de los años 2015 – 2020 en cuatro estaciones de monitoreo a) Concentraciones anuales de PM10, b) Concentraciones anuales de PM2.5.....	16
Figura 5 Concentraciones de contaminantes NO2 y O3 en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de los años 2015 – 2020 en cuatro estaciones de monitoreo a) Concentraciones anuales de NO2, b) Concentraciones anuales de O3.....	17
Figura 6 Promedios mensuales de las concentraciones de contaminantes PM10, PM2.5 y NO2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2020 en cuatro estaciones de monitoreo.. ..	30
Figura 7 Variación porcentual de la media anual de los contaminantes PM10, PM2.5, NO2 y O3 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del año 2019 al 2020.....	32

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo general evaluar la variación de los parámetros de calidad del aire (PM10, PM2.5, NO2 y O3) de los cuatro distritos de Lima en el periodo 2015-2020. Con un tipo de investigación aplicada y un diseño no experimental, de tipo transversal descriptivo – explicativo, en donde se recopiló datos de concentraciones de contaminantes del aire en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la cual dichos datos se procesaron en el software SPSS v.25. Los resultados obtenidos se observó una disminución estadísticamente significativa entre el periodo 2015 – 2019 y el 2020 en los contaminantes PM10, PM2.5 y NO2, en las cuatro estaciones de monitoreo debido a que el país entró en cuarentena por COVID-19 paralizando el flujo vehicular y las actividades industriales, pero el O3 incrementó en sus concentraciones en dicho año a causa de la disminución de las concentraciones de NOX. Finalmente, el modelo lineal generalizado gamma representó un 87.6% en la variabilidad del ozono en el distrito de Carabayllo, demostrando un buen ajuste a los datos de campo.

Palabras claves: calidad del aire, contaminantes, modelo lineal generalizado.

ABSTRACT

This research had the general objective of evaluating the variation of the air quality parameters (PM10, PM2.5, NO2 and O3) of the four districts of Lima in the period 2015-2020. With a type of applied research and a non-experimental design, of a descriptive-explanatory cross-sectional type, where data on concentrations of air pollutants in ug / m³ were collected. In which said data was processed in the SPSS v.25 software. The results obtained were observed a statistically significant decrease between the period 2015 - 2019 and 2020 in the pollutants PM10, PM2.5 and NO2, in the four monitoring stations due to the fact that the country entered quarantine for COVID-19, paralyzing the flow vehicle and industrial activities, but O3 increased in its concentrations in said year due to the decrease in NOX concentrations. Finally, the gamma generalized linear model represented 87.6% in the ozone variability in the Carabayllo district, demonstrating a good fit to field data.

Keywords: air quality, pollutants, generalized linear model.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la contaminación atmosférica ha representado un problema de aumento, si bien es cierto, la razón del incremento de los contaminantes en el aire puede presenciarse de forma natural (cenizas volcánicas, niebla y arena) sin embargo, son emitidos y quedan suspendidos en el aire debido las emisiones de gases del transporte motorizado, industrias y distintos factores generados por las actividades humanas. En consecuencia, la contaminación atmosférica muestra efectos perjudiciales en la salud de los seres humanos como también de los animales y de la vegetación. En el ámbito internacional, el contaminante más nocivo para la salud humana es el material particulado fino (PM2.5) puesto que fue la causante de 4.2 millones de muertes prematuras a nivel mundial en el año 2016 (OMS 2016).

Cabe resaltar que la pandemia de COVID-19 ha ocasionado la paralización de fábricas y cierre de empresas emisoras de gases contaminantes, es por eso que a través de las estaciones de monitoreos de calidad del aire se observó que las concentraciones de contaminantes atmosféricos como PM2.5 y NO2 en los países de China, Francia, Alemania, España e Italia se redujeron en gran medida, sin embargo debido al confinamiento también se incrementó el uso de sistemas de calefacción, así como la quema de biomas, etc. aumentando las emisiones de material particulado (Lanchipa, Moreno y Luque 2020). Según IQAir (2020) los contaminantes atmosféricos se encuentran en elevadas concentraciones en distintas partes del mundo, cabe resaltar que, en el ranking mundial de ciudades capitales ordenadas por concentración media anual de PM2.5 solo 20 de las 92 capitales se encuentran dentro de la medida anual de material particulado recomendada por la OMS". En Latinoamérica se observa que en el puesto N°42 se encuentra la ciudad de Lima – Perú.

En Perú, el 6 de marzo del 2020 se presentó el primer caso de infección por coronavirus. Ante esta situación el 15 de marzo el gobierno del Perú aplicó el estado de emergencia entrando en cuarentena (El Peruano 2020) y posteriormente reanudando las actividades económicas de forma gradual a partir del mes de mayo del 2020 mediante cuatro fases (DS-080-2020-PCM 2020). Por ende, esta investigación se demostrará como los contaminantes atmosféricos se

pueden representar en modelos numéricos mediante una simulación de datos obtenidos de las estaciones de monitoreo; de esa manera la información de la data histórica y actualizada servirán como un medio útil para el monitoreo de los índices de calidad del aire y del ambiente de aquellos organismos encargados de controlar la contaminación del aire, además de incentivar a una formación investigadora.

En función de lo planteado, esta investigación realizó un análisis de los parámetros de calidad del aire en cuatro distritos de Lima en el periodo de 2015-2020 en este contexto se formula como problema general: ¿Cuál es la variación de los parámetros de la calidad del aire en cuatro distritos de Lima en el periodo 2015-2020? Siguiendo con el tema, en los problemas específicos se planteó: ¿Cuáles son los contaminantes que presentaron mayor reducción en la calidad del aire de los cuatro distritos de Lima en el año 2020? y ¿Cuál es el ajuste del pronóstico del modelo matemático para los valores del parámetro O₃ en el distrito de Carabayllo en los últimos cinco años? Con referencia a los parámetros climáticos nos demostrarán que áreas geográficas tienen tendencia a mantener un patrón similar y si hay una relación en alguna alteración por la pandemia, de este modo se tiene como justificación teórica aportar conocimiento acerca de la variación de la calidad del aire de los últimos 5 años, asimismo pronosticar su evolución con una proyección a futuro, con el fin de hacer seguimiento a los cambios que se puedan presentar. Es por ello que el objetivo general del trabajo de investigación es evaluar la variación de los parámetros de calidad del aire de los cuatro distritos de Lima en el periodo 2015 al 2020, seguidamente los objetivos específicos: Determinar los contaminantes que presentaron mayor reducción en la calidad del aire de los cuatro distritos de Lima en el 2020, como segundo objetivo estimar mediante el modelo matemático los valores del parámetro O₃ en el distrito de Carabayllo en los últimos cinco años. Por lo tanto, la hipótesis general de la investigación es: los parámetros de calidad del aire de los cuatro distritos de Lima se redujeron en un 20% en el periodo 2015-2020, seguidamente como hipótesis específicas, el parámetro que presenta mayores reducciones de concentración es el NO₂ en el año 2020 y finalmente El modelo que mejor representa los valores del parámetro O₃ en el distrito de Carabayllo tiene un $D^2 > 0.80$

II. MARCO TEÓRICO

En los antecedentes internacionales, Berman y Ebisu (2020) analizaron los parámetros $PM_{2.5}$ y NO_2 en Estados Unidos desde el 2017 al 2020, considerando los datos de la inmovilización por COVID-19 comprendidos en los meses de marzo y abril para una comparación con el periodo antes del COVID-19 de enero y marzo. Por esta razón se utilizaron los datos de OpenAQ API y del EPA, empleando pruebas t de dos caras emparejadas por condado ($\alpha=0.50$) y los resultados obtenidos demostraron una disminución de la concentración de NO_2 en un 25.5% con relación a la data histórica desde 2017-2019 y las concentraciones de $PM_{2.5}$ disminuyeron, pero no en gran proporción debido a las fuentes contaminantes activas.

Siguiendo el mismo orden de ideas, en China se evaluaron los cambios en el índice de calidad del aire (AQI) y las concentraciones de seis contaminantes del aire ($PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, SO_2 , NO_2 y O_3) durante el período de control de Covid-19 vinculando el mejoramiento de la calidad del aire a la reducción de las emisiones del contaminante NO_2 en el sector transporte y a las emisiones de $PM_{2.5}$, CO y SO_2 en el sector industria. Sin embargo, la contaminación del aire también aumento en O_3 posiblemente debido a que menores cargas de partículas finas condujeron a una menor captación de HO_2 y como resultado aumentando la producción de O_3 según los autores Wang et al. (2020).

Además, para los autores Zambrano-Monserrate y Ruano (2020) las concentraciones de NO_2 , $PM_{2.5}$ y O_3 del mes de marzo de 2020 son estadísticamente diferentes a las concentraciones de marzo de 2018 y marzo de 2019, para lo cual se recolectó datos de siete estaciones de monitoreo utilizando la comparación de variables cuantitativas en dos muestras pareadas, paramétricas y no paramétricas en la ciudad de Quito, concluyendo que el método más sencillo es el enfoque paramétrico. En los resultados se encontraron que las concentraciones de NO y $PM_{2.5}$ disminuyeron desde que se aplicó las diferentes medidas de bloqueo, pero también se hallaron resultados que demuestran que las concentraciones de O_3 aumentaron notoriamente en el 2020.

Por otro lado Gutiérrez (2017) en la ciudad de Bogotá evaluó estadísticamente los modelos lineales generalizados de tipo Normal y Gamma, utilizando imágenes satelitales y mediciones de estaciones de monitoreo de los años 2010, 2013 y 2015, con el objetivo de evaluar las características estadísticas (media, desviación estándar, máximo, mínimo y asimetría) de cada conjunto de datos. El resultado obtenido en esta investigación demostró que es óptimo el modelo Gamma, recomendando que es preciso fortalecer estadísticamente y espacialmente más el estudio de este tipo de metodologías.

En los antecedentes nacionales, los autores Rojas et al. (2021) evaluaron la calidad del aire en Lima Metropolitana tomando en cuenta el material particulado $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 y O_3 entre los periodos de 1 de febrero y 15 de marzo de 2020, 16 de marzo al 30 de abril de 2017-2019 y 16 de marzo al 30 de abril de 2020, en donde se visualiza reducciones significativas al comparar las concentraciones de contaminantes de periodos anteriores con las concentraciones del 2020, por lo cual el PM_{10} se redujo en un 40% y el NO_2 en un 48%, pero las concentraciones que aumentaron son la de O_3 . De igual manera para los distritos de San Juan de Lurigancho y Puente Piedra, (Ilizarbe et al. 2020) evaluaron la concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ e identificaron las fuentes contaminantes en el periodo de abril y mayo del 2017, tomando como muestras recolectadas del SENAMHI. Los resultados demostraron que las concentraciones de los 2 contaminantes sobrepasaban los valores de la OMS, obteniendo 160 y 295.06 ug/m^3 de PM_{10} , así como 121.56 y 154.58 ug/m^3 de $PM_{2.5}$ como concentraciones máximas. También se determinó que las fuentes de contaminación predominante son la re suspensión del polvo del suelo, fuente vehicular y actividad industrial. Del mismo modo durante la pandemia de COVID-19.

Por último, Dextre (2016) evaluó el comportamiento de las variables meteorológicas en el distrito de San Juan de Lurigancho y su relación con la calidad del aire del $PM_{2.5}$ en un periodo de 30 días, utilizando equipos de estación meteorológica, en donde los resultados demostraron que no existe una relación significativa de las variables meteorológicas con el $PM_{2.5}$, pero hay correlaciones débiles que demuestran relaciones directas e inversas dependiendo si son consideradas en el día o la noche, además los valores de $PM_{2.5}$ del mes de

mayo del 2016 sobrepasaron el ECA del aire, considerándolo como malo para ese distrito.

Para la investigación se usaron las teorías referidas como la contaminación del aire que son todas las emisiones antrópicas o naturales que modifican los componentes del aire haciendo que surja un cambio en sus características por ende, la calidad del aire disminuye causando que la mayoría de personas sufran de problemas respiratorios (Boletín de Información Clínica Terapéutica de la Academia Nacional de Medicina 2015).

Desde una perspectiva más general se tiene como otro contaminante para la salud humana al monóxido de carbono, porque tiende a reducir el transporte de oxígeno a través de la sangre y esto ocasiona mareos, problemas para respirar hasta incluso la muerte por asfixia teniendo como fuente de exposición a los autos. Por otro lado, el material particulado es producido también por vehículos y provocado por el polvo de las actividades de construcción que quedan suspendidas en el aire, agua y suelo; (Enshassi, Kochendoerfer y Rizq 2014).

El dióxido de nitrógeno es el resultado de la oxidación del NO emitidas principalmente por el parque automotor y este al ser inhalado impacta directamente las vías respiratorias ocasionando infecciones (Moreno Jiménez 2013) y por último el Ozono troposférico que aporta en suprimir los contaminantes que son emitidos a la atmósfera, pero asimismo es nocivo para la salud humana y la vegetación (Beltman et al. 2013).

Por consiguiente, en el análisis de variación de la calidad del aire la prueba de Kolmogorov Smirnov (K-S) es empleada en muestras mayores a cincuenta para comprobar si la muestra sigue una distribución normal al tener un nivel de significancia mayor a 0.05 (Dickinson Gibbons y Chakraborti 2003) aplicando una Prueba de corrección de Lilliefors para variables cuantitativas continuas que verifica la significancia estadística y tabulada en el estadístico de K-S cuando se desconoce la varianza poblacional (Mohd y Bee 2011). Para medir la varianza se emplea la prueba Levene debido a que el análisis en la desviación de la normalidad no es afectado si se cuenta con una distribución no normal en la población muestreada (Correa, Iral y Rojas 2006).

Para la prueba estadística no paramétrica se emplea la prueba Kruskal-Wallis que evalúa las diferencias de tres o más grupos con una sola variable continua distribuida anormalmente con una presunta distribución subyacente continua y medidos en una escala ordinal (Núñez et al. 2019). Asimismo, la prueba de U Mann-Whitney es una prueba estadística utilizada para demostrar las diferencias de los grupos muestreados con una distribución no normal (Rivas, Moreno y Talavera 2013)

Con respecto al modelo matemático se utilizó el modelo lineal generalizado (GLM) que es una extensión del modelo lineal clásico y es utilizado al tener varias condiciones que no se compensan, como es el caso de varianzas no constantes y errores con distribución no normal (Morte 2018). En la cual la bondad de ajuste brinda aquellas medidas al realizar las comparaciones de diferentes modelos; el Valor/gl de la desviación y de chi-cuadrado de Pearson deben aproximarse a la unidad (IBM 2021). Para ello se utilizó el contraste Omnibus, que establece la verosimilitud entre el modelo actual y el modelo nulo; además de identificar la significancia de sus valores (<0.05) y su prueba de chi-cuadrado, la cual compara dos o más distribuciones de proporciones como también determinar que su diferencia no se deba al azar (IBM 2020).

De acuerdo a las normas legales establecidas en el Perú, se tiene al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para aire, aprobada por el Decreto Supremo N° 003-2017- MINAM, en el cual se establece los niveles de concentración presentes en el aire con el fin de no exceder los límites propuestos (Republica del Peru 2017).

En la Figura 1 se observa el valor de los principales parámetros de Calidad del Aire en unidades de microgramos/metro cúbico ($\mu g/m^3$) de dichos periodos establecidos.

Parámetros	Periodo	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Criterios de evaluación	Método de análisis
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM_{10})	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2.5 micras ($\text{PM}_{2.5}$)	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Dióxido de Azufre (SO_2)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Ozono (O_3)	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 7 veces al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	

Figura 1. Principales Estándares de Calidad Ambiental para Aire.

Fuente: Decreto Supremo N° 003-2017- MINAM

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

Para la elaboración del trabajo, cuenta con un tipo de investigación aplicada porque se utilizaron conocimientos y se dispusieron en la práctica, teniendo como guía estudios científicos con el fin de hallar una respuesta a posibles aspectos de mejora (Gerena 2015). En el cual se realizó la evaluación de la variación de los parámetros de la calidad del aire de cuatro distritos de Lima en el periodo 2015-2020. Con un diseño de investigación no experimental porque no se va a manipular la variable (Ato, López y Benavente 2013) de tipo transversal descriptivo – explicativo porque se pretendió describir las características de los elementos que integran la muestra seleccionada (Hernández et al., 2018) en donde se recopiló datos de contaminantes del aire y datos meteorológicos a través del SENAMHI y explicativo porque se logra buscar relación de los datos obtenidos con la normativa de los Estándares de Calidad Ambiental para aire.

3.2 Variables y operacionalización

Variable 1

- Parámetros de calidad del aire

Variable 2

- Modelo lineal generalizado

3.3 Población, muestra y muestreo

Población

Concepcion (2017) mencionó que San Juan de Lurigancho es el distrito más contaminado de Lima, seguido de Carabayllo y Villa María del Triunfo; esto no solo se debe al parque automotor sino también a su ubicación geográfica. Asimismo, Jesús María es el distrito que presenta menor concentración de gases contaminantes, con niveles inferiores al ECA (INEI 2015) en comparación con los distritos del cono norte y sur de Lima. Es por ello, que se tomó como población a cuatro distritos de Lima de la siguiente manera: en la zona norte al distrito de Carabayllo que cuenta con 333 045 mil habitantes, por el sur a Villa María del Triunfo con un total de 398 433 mil, en el lado este a San Juan de Lurigancho con una población de 1 117 629 mil y

finalmente por la zona central a Jesús María con 75 359 mil individuos según el censo del año 2017 realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI 2017).

En la Figura 2 se observa la ubicación de las cuatro estaciones de Lima metropolitana, esta información se encuentra en la página oficial del SENAMHI.

Zona	Norte	Sur	Este	Centro
Estación	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Campo de Marte
Abrev.	CRB	VMT	SJL	CDM
Ubicación	Piscina Municipal de Carabayllo	Parque Nueva Esperanza	Universidad César Vallejo	Jesús María
Latitud	11°54'7.9"S	-12°9'59"S	12°1'8"S	12°4'13.9"S
Longitud	-77°2'1.1"W	-76°55'12"W	76°59'55.8"W	-77°2'35.4"W
Propietario	SENAMHI			
Operador	Dirección de Redes de Observación y datos			



Figura 2 Información general de las cuatro estaciones de monitoreo de Lima Metropolitana. Fuente: SENAMHI

Muestra

Con respecto a la evaluación de la variación de los parámetros de la calidad del aire en el periodo 2015-2020 y la determinación de los contaminantes que presentaron mayor reducción de los cuatro distritos de Lima en el 2020 se tuvo como muestra la data mensual de la calidad del aire de los cuatro distritos de Lima, en donde se recolectó la información de la concentración de contaminantes tales como: PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , y O_3 en unidades de $\mu g/m^3$. Asimismo, para estimar mediante el modelo lineal generalizado de la calidad del aire del distrito de Carabayllo se consideró como muestra la data mensual de los años 2015-2020 del contaminante ozono y de las siguientes variables meteorológicas:

- Temperatura del aire (°C)
- Humedad Relativa (%)

Muestreo

Para el muestreo se usaron los datos de los boletines de estadísticas ambientales que se encuentra en la página (<http://m.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/boletines/estadisticas-ambientales/1/#lista>) del Instituto Nacional de Estadística e Informática, esta información proviene de la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire de SENAMHI - Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales. (Ministerio del ambiente 2019).

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica aplicada fue la observación, que se utilizó en la formulación de los problemas y en la recopilación de datos a investigar (Pulido 2015). El instrumento empleado para la recolección de datos se obtuvo de las estaciones de monitoreo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú que provee información de manera confiable y accesible, además de ser un organismo público adscrito por el Ministerio de Ambiente (MINAM).

Además, se usó el programa de SPSS Statistics v.25 para el análisis estadístico de la variación de los contaminantes PM10, PM2.5, NO2, O3 y para la realización del modelo lineal generalizado Gamma del ozono para el distrito de Carabaylo.

3.5 Procedimiento

Para el desarrollo de la presente investigación, se procedió a registrar los datos de parámetros de calidad del aire y meteorológicos en tablas de Excel, por consiguiente, se realizó una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov de las muestras de cada estación de monitoreo, arrojando que las muestras obtenidas tienen una distribución no normal, por este motivo se llevó a cabo la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para hallar las diferencias significativas ($p < 0.05$) en los datos de cada estación de monitoreo y para identificar aquellos grupos en donde se establecen las diferencias significativas, se usó la prueba post hoc de U de Mann-Whitney, de esa manera se prosiguió con la determinación de la variación de la calidad del aire de los años 2015 hasta el 2020 en función de los promedios

mensuales para los diferentes contaminantes procesados en el software SPSS Statistics v.25.

Asimismo, el modelo matemático elegido es un modelo lineal generalizado Gama con enlace logarítmico, debido a que incluye datos con una distribución no normal y con mayor verisimilitud. El modelo lineal generalizado Gamma con enlace logarítmico tuvo la siguiente estructura:

$$\text{Log}(Y) = \beta_0 + (\beta_1 * x_1) + (\beta_2 * x_2) \quad (1)$$

En donde el valor de "Y" representa el ozono (O3), β_0 , β_1 , β_2 , con los coeficientes del modelo; x_1 es la temperatura (T°) y x_2 la humedad relativa (HR)

3.6 Método de análisis de datos

El análisis estadístico se llevó a cabo mediante el software SPSS V.25 donde se contrastó si los datos de la concentración de contaminantes (PM10, PM2.5, NO2 y O3) de los cuatro distritos de Lima del año 2015 al 2020 se ajustaron o no a una distribución normal con la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Anexo N°03) con la corrección de Lilliefors (Anexo N°04) que se emplea en más de 50 observaciones, para variables cuantitativas continuas que verifica la significancia estadística y tabulada en el estadístico de K-S cuando se desconoce la varianza poblacional (Mohd y Bee 2011). En este caso los datos no se ajustaron a una distribución normal es por ello que se utilizó las pruebas de Kruskal-Wallis y la prueba Post-Hoc de U Mann-Whitney, finalmente se utilizó la prueba de Levene para comparar la homocedasticidad.

Con respecto al modelo generalizado Gamma, se estandarizó los datos con el fin de ajustarlos o adecuarlos a un modelo normal; luego la bondad de ajuste deben aproximarse a la unidad (valor/gl < 1) (IBM 2020) y de esa manera se logró la verosimilitud entre el modelo actual y el modelo nulo; además de identificar la significancia de sus valores (p-valor<0.05) a través de la Prueba Omnibus (IBM 2021).

Validez del modelo de regresión lineal múltiple usando D^2 :

La validez del modelo de regresión lineal generalizado Gamma se dio mediante el ajuste del modelo de los datos de acuerdo a los tests de significación para los valores estimados y la cantidad de varianza explicada por el modelo. Es por ello que se aplicó la desviación D^2 , la cual explicará la variabilidad de los datos a través de la siguiente ecuación:

$$D^2 = \frac{\text{Desviación modelo nulo} - \text{Desviación residual}}{\text{Desviación del modelo nulo}} * 100 \quad (2)$$

Se analizó la precisión de los datos para el modelo a través del porcentaje de la desviación, si el valor de D^2 es alto, mayor precisión habrá en el modelo.

3.7 Aspectos éticos

El presente trabajo de investigación se realizó bajo la política de antiplagio, mediante el uso del programa de evaluación de los trabajos de Investigación – Turnitin, en el cual se presentó el reporte de originalidad. Los resultados obtenidos no serán alterados por el autor, para dar a conocer una información verídica de manera que pueda contribuir en investigaciones posteriores.

IV. RESULTADOS

En el desarrollo de esta investigación, se realizó la prueba H de Kruskal que indica si existen diferencias significativas entre las medias de cada muestra de las cuatro estaciones ($p < 0.05$) (Anexo N°04) y para identificar aquellos grupos en donde se establecen las diferencias, se usó la prueba post hoc de U de Mann-Whitney para las concentraciones de los contaminantes (PM10, PM2.5, O3 y NO2) registrada en las estaciones de monitoreo: Carabayllo (CRB), Villa María del Triunfo (VMT), San Juan de Lurigancho (S JL) y Campo de Marte (CDM) (Ver Tabla 1).

Tabla 1 Comparaciones múltiples de los contaminantes PM10, PM2.5, NO2 y O3 en ug/m3 de la media (2015-2019) – 2020 en cuatro estaciones de monitoreo.

Significancia de los estadísticos de prueba U de Mann-Whitney

Año (2015-2019) - 2020 en la estación de:	Sig.			
	PM10	PM2.5	NO2	O3
CRB	0.001*	0.005*	0.001*	0.019*
VMT	0.402	0.203	0.139	-
S JL	0.001*	0.001*	0.001*	0.426
CDM	0.001*	0.406	0.127	0.001*

a. Variable de agrupación: Año

*Sig <0.05, diferencias significativas.

En la tabla 1 muestran los p-valor de las comparaciones múltiples entre los años 2015-2019 y 2020 de la prueba U de Mann-Whitney, en la cual se puede apreciar que existen diferencias significativas para cada grupo de estación. En el contaminante PM10 se muestran las diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre tres estaciones, excepto en VMT (presentan una media similar al año 2015-2019). Por otro lado, el PM2.5 y NO2, las diferencias fueron significativas ($p < 0.05$) solo en dos estaciones (CRB y S JL) y los dos grupos restantes indica que sus valores son estadísticamente idénticos al año 2015-2019; por último en el O3 se observa que dos grupos tuvieron diferencias significativas (CRB y CDM) ($p < 0.05$). Para el caso de la estación de VMT no se contó con datos de la concentración de O3 para el año 2020.

Consecuentemente se analizó la variabilidad de la calidad del aire en cuatro distritos de diferentes contaminantes atmosféricos (PM10, PM2.5, NO2 y O3) en el periodo 2015-2019 y el año 2020, registrada en las estaciones de monitoreo de Carabayllo (CRB), Villa María del Triunfo (VMT), San Juan de Lurigancho (SJL) y Campo de Marte (CDM) (Ver Figura 5).

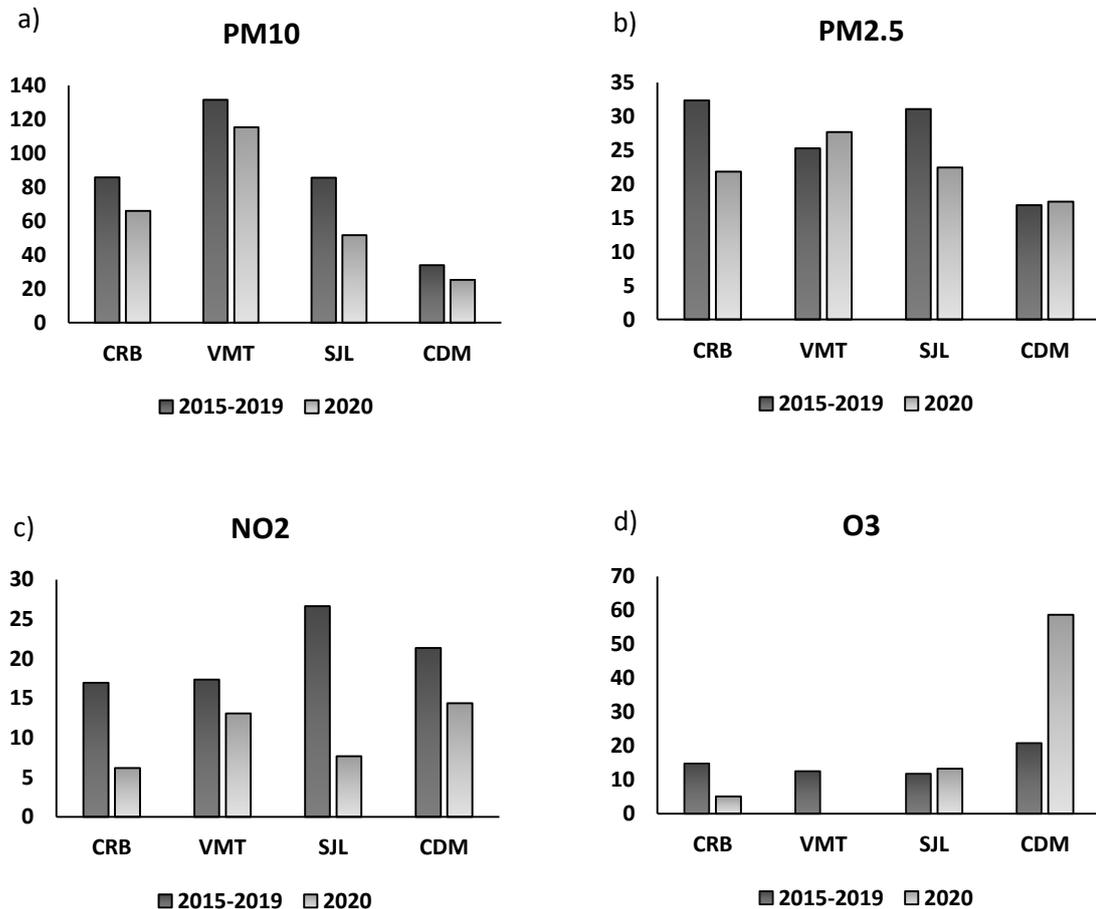


Figura 3 Variabilidad de concentraciones de contaminantes PM10, PM2.5, NO2 y O3 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el periodo 2015-2019 con el año 2020 en cuatro estaciones de monitoreo a) Concentraciones anuales de PM10, b) Concentraciones anuales de PM2.5, c) Concentraciones anuales de NO2, d) Concentraciones anuales de O3. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se presenta la variación media anual de las concentraciones de PM10, PM2.5, NO2 y O3 en el periodo 2015-2019 en comparaciones del año 2020. Según la figura a, las concentraciones de PM10 en relación a las medias de los años 2015-2019 y 2020, se observa que en las estaciones de CRB, SJL y

CDM, existen diferencias significativas en el año 2020, caso contrario ocurrió en la estación de VMT debido a la variabilidad en sus datos mensuales. Para la figura b las concentraciones de PM_{2.5} en las estaciones de CRB y SJL se observó diferencias significativas lo cual se confirmó con la estadística, pero en las estaciones de VMT y CDM no existe diferencia significativa. Del mismo modo en la figura c en las concentraciones de NO₂ también se observaron grandes diferencias significativas en las estaciones de CRB y SJL que fueron confirmadas mediante la estadística, pero al observar las estaciones de VMT y CDM también se visualiza diferencias que es contradicho por la estadística, la cual nos indica que no hay diferencias significativas. Además, en la figura d las concentraciones de O₃ solo en las estaciones de CRB y CDM se observan diferencias significativas, en cambio la estación de SJL no existe diferencias significativas. Para el caso de la estación de VMT no se contó con datos de la concentración de O₃ para el año 2020.

Seguidamente se observó que el PM₁₀ tuvo reducciones que oscilaron entre el 49% al 12% en todas las estaciones de monitoreo. Por otro lado, el contaminante PM_{2.5} solo presentó disminuciones generales en las estaciones CRB (33%) y SJL (49%). Caso contrario ocurrió con el NO₂, dado que presentó un porcentaje de disminución entre el 71% al 25% en cada estación. Sin embargo, el O₃ solo tuvo reducciones en la estación de CRB en un 66%.

Después se analizó los contaminantes atmosféricos (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y O₃) de la calidad del aire en cuatro distritos de Lima desde el 2015 - 2020, registrada en las estaciones de monitoreo: Carabayllo (CRB), Villa María del Triunfo (VMT), San Juan de Lurigancho (SJL) y Campo de Marte (CDM) (Ver Figura 4 y Figura 5).

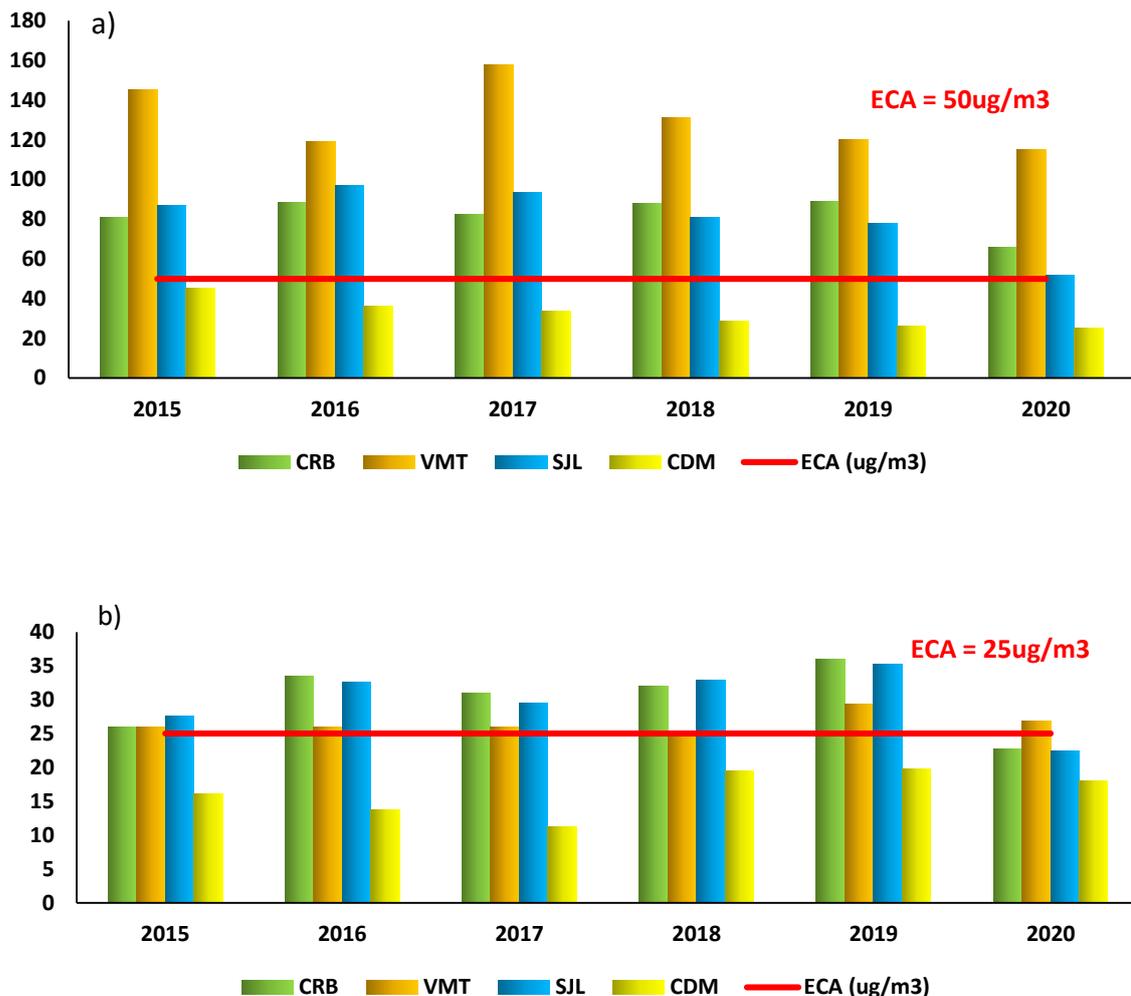


Figura 4 Concentraciones de contaminantes PM10 y PM2.5 en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de los años 2015 – 2020 en cuatro estaciones de monitoreo a) Concentraciones anuales de PM10, b) Concentraciones anuales de PM2.5
Fuente: Elaboración propia

La figura 4 indica las medias anuales de los contaminantes en las diferentes estaciones de monitoreo; en la figura (a) se observa que las medias anuales de 2015 - 2020 registradas en la estación de CRB, VMT y SJL estuvieron por encima del ECA-aire ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para PM10; por otro lado, CDM se mantuvo por debajo de ECA-aire. De igual manera sucedió con el PM2.5 (figura b), las mismas estaciones anteriormente mencionadas superaron el ECA-aire ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en los años 2015 – 2019. Cabe resaltar que la estación de CDM no superó el ECA-aire en los últimos cinco años y las estaciones de CRB – SJL estuvieron por debajo del ECA-aire en el 2020.

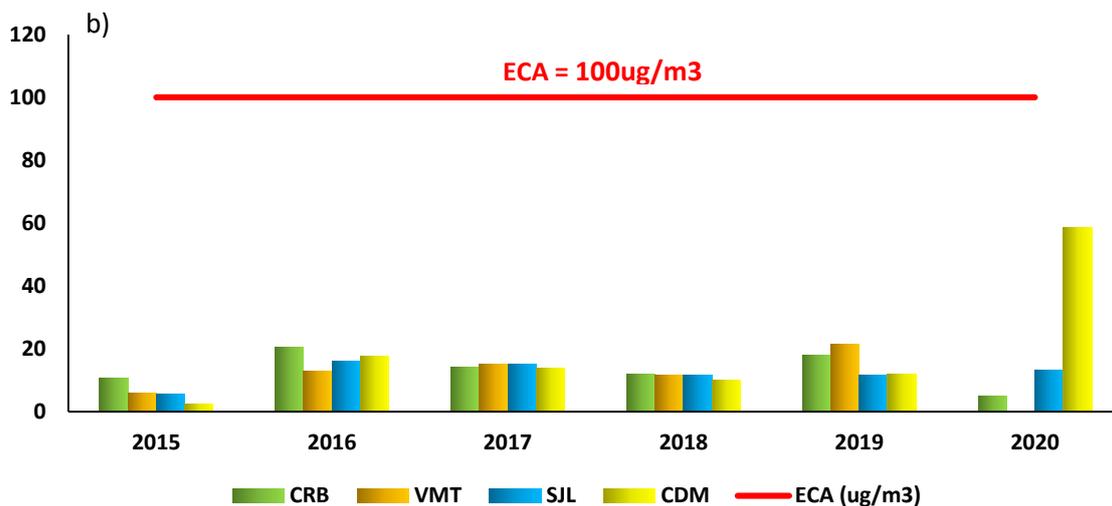
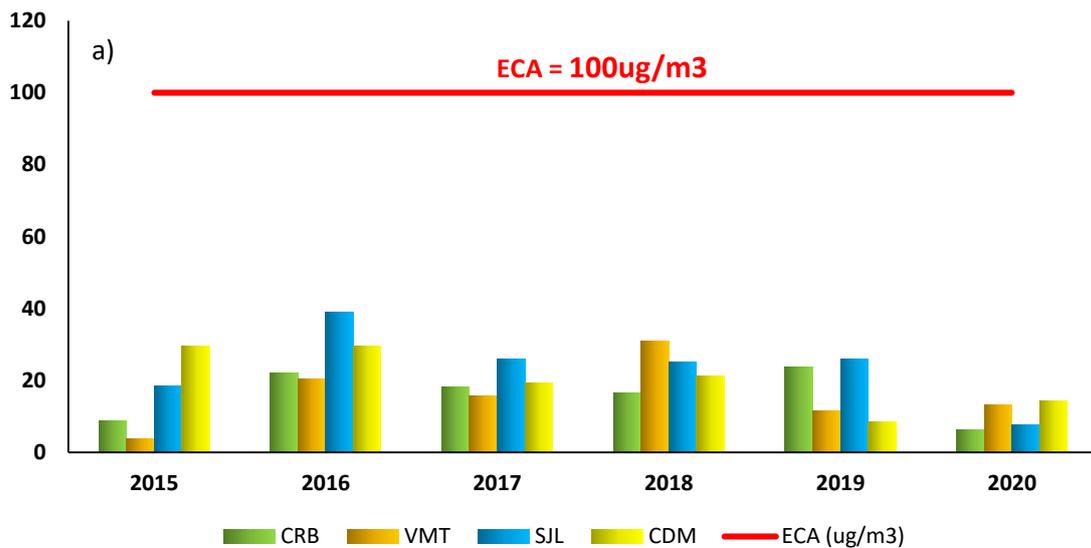


Figura 5 Concentraciones de contaminantes NO₂ y O₃ en (µg/m³) de los años 2015 – 2020 en cuatro estaciones de monitoreo a) Concentraciones anuales de NO₂, b) Concentraciones anuales de O₃. Fuente: Elaboración propia

La figura 5 indica las medias anuales de los contaminantes en las diferentes estaciones de monitoreo; el promedio anual de NO₂ y O₃ de la figura (a) y (b) presentó que en los años del 2015 hasta el 2020 las concentraciones de los contaminantes no superaron el ECA-aire de 100 µg/m³ en las cuatro estaciones de monitoreo. Para el caso de la estación de VMT no se contó con datos de la concentración de O₃ para el año 2020.

En la figura 6 se visualiza la concentración de contaminantes de: PM10, PM2.5 y NO2 que presentaron mayor reducción en la Calidad del Aire de los cuatro distritos de Lima.

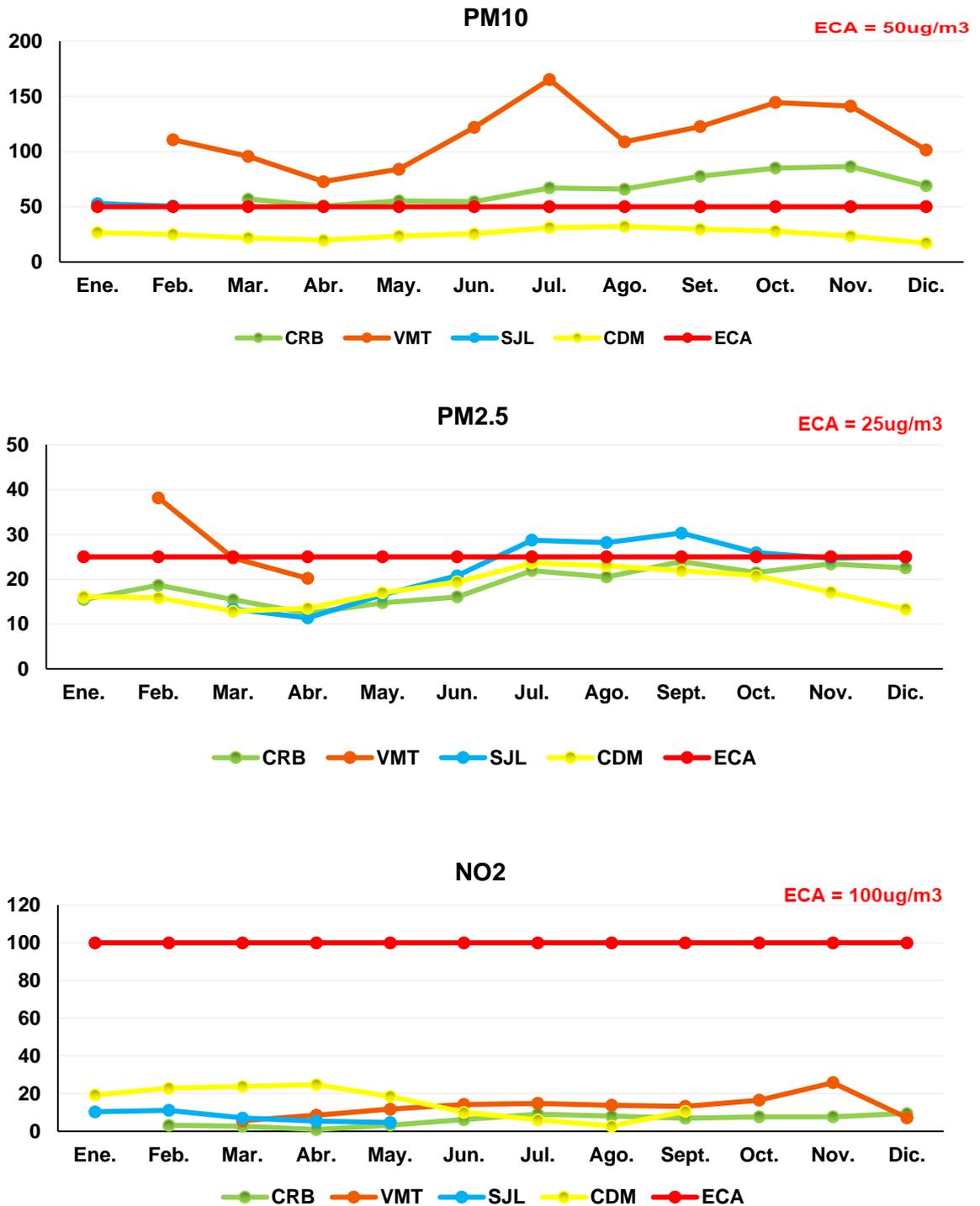


Figura 6 Promedios mensuales de las concentraciones de contaminantes PM10, PM2.5 y NO2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2020 en cuatro estaciones de monitoreo. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6 se aprecia que las concentraciones mensuales de PM10 en las estaciones de CRB y VMT estuvieron por encima de ECA-aire ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) observando que en VMT tuvo una alta concentración de PM10 es en el mes de julio, caso contrario ocurrió en CDM dado que no superó el ECA-aire. En la estación de SJL no se contó con datos de la concentración de PM10 en los meses de marzo hasta diciembre del año 2020.

Asimismo, se presenta que las estaciones de CRB y CDM no superaron el ECA-aire para PM_{2.5} ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sin embargo, SJL tuvo picos altos en los meses de julio hasta septiembre. En la estación de VMT no se contó con datos de la concentración de PM_{2.5} en los meses de mayo hasta diciembre del año 2020.

Además, en concentraciones de NO₂ en las cuatro estaciones de monitoreo se encontraron por debajo de los niveles del ECA-aire ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en donde los niveles más bajos fueron en el periodo de marzo hasta mayo.

En los tres contaminantes anteriormente mencionados, indican que el mes de julio sus concentraciones aumentaron debido al levantamiento del confinamiento por el COVID19 y a la reactivación económica del país (DS-080-2020-PCM 2020).

Además, en la figura 7 se visualiza la variación porcentual de la media anual de contaminantes: PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ Y O₃ en los cuatro distritos de Lima con respecto al periodo 2019-2020.

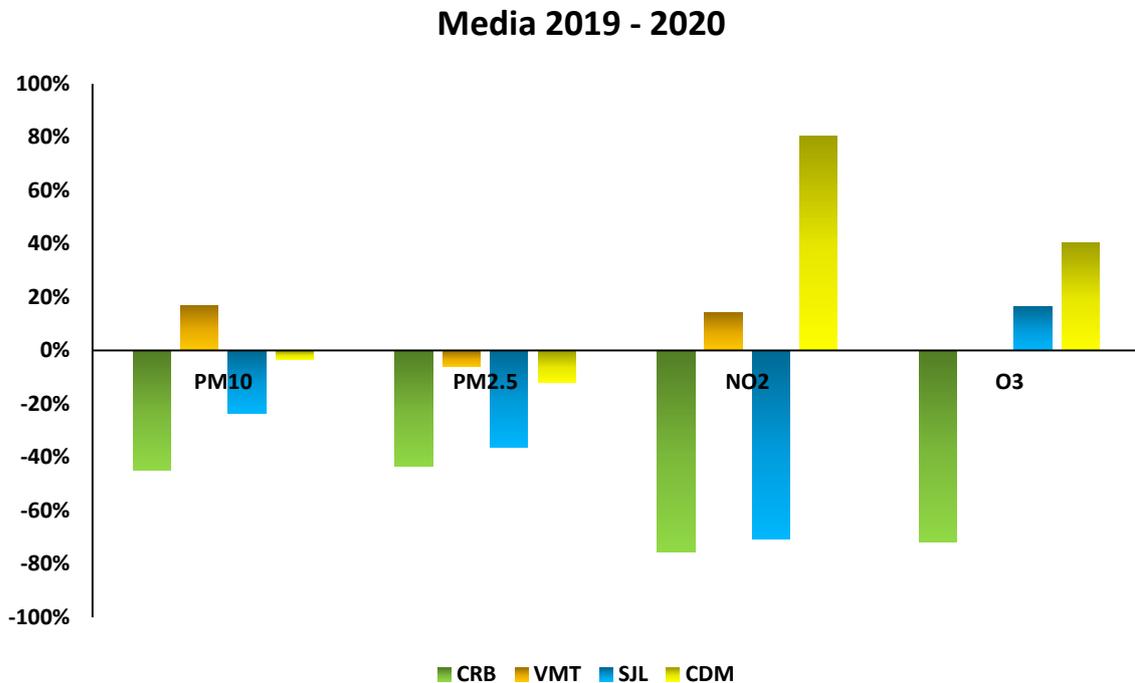


Figura 7 Variación porcentual de la media anual de los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y O₃ en ug/m³ del año 2019 al 2020. Fuente: Elaboración propia

En la figura 7 se observó que las concentraciones de PM₁₀ registradas en las estaciones de CRB, SJL y CDM disminuyeron entre un 45% y 3% en los años 2019 al 2020, por otro lado, en las concentraciones de PM_{2.5} se notó una reducción para las cuatro estaciones. El contaminante NO₂ solo se mostró disminuciones en las estaciones de CRB (74%) y SJL (71%). En cambio, para el O₃ solo se presentó reducciones en la estación de CRB con un 72%. Para el caso de la estación de VMT no se contó con datos de la concentración de O₃ para el año 2020.

Por otro lado, se desarrolló el modelo lineal generalizado Gamma donde se estandarizó los datos con el fin de ajustarlos a un modelo normal, se obtuvo como resultado la prueba Ómnibus con un valor de significancia <0.05 (Anexo N°07) y un grado de verosimilitud estadísticamente significativa ($p\text{-valor}<0.05$) (ver tabla 2).

Tabla 2 Modelo lineal generalizado de GAMMA.

Parámetro	B	Sig.
(Intersección)	2,346	,000
Puntuación Z(T°)	,180	
Puntuación Z(HR)	-,109	

Variable dependiente: O₃

Modelo: (Intersección), Puntuación Z(T), Puntuación Z(H)^a

a. Estimación de máxima verosimilitud.

$$O_3 = e^{2.346+0.180T^\circ-0.109HR} \quad (3)$$

Se observa en la ecuación (3) que la temperatura (T°) tiende a aumentar el valor de O₃, caso contrario ocurre con la variable HR (humedad relativa) porque la disminuye y estas variables de manera agrupada, son estadísticamente significativas.

Finalmente se determinó la desviación explicada por el modelo ajustado en la tabla 3, donde el modelo de lineal generalizado Gamma tuvo una bondad de ajuste pequeña en la desviación nula (0.114) y la desviación residual (0.276).

Tabla 3 Desviación del modelo lineal generalizado de GAMMA.

Bondad de ajuste ^a			Bondad de ajuste ^a		
	Valor	Valor/gl		Valor	Valor/gl
Desviación Residual	1,022	,114	Desviación Nula	8.268	,276
Variable dependiente: O3 Modelo: (Intersección), Puntuación Z(T), Puntuación Z(H) ^a a. Los criterios de información están en un formato de cuanto más pequeño mejor.			Variable dependiente: O3 Modelo: (Intersección) ^a a. Los criterios de información están en un formato de cuanto más pequeño mejor.		

En la tabla 3 se muestra la desviación (medida de bondad de ajuste del modelo lineal generalizado), en donde la desviación residual corresponde al modelo ajustado y la desviación nula es en base a un modelo nulo, es decir que al procesarlo en el software SPSSv.25 no tenga covariables y se ajuste a la intersección. Seguidamente se analizó la precisión de los datos para el modelo lineal generalizado Gamma a través del porcentaje de la desviación, si el valor de D^2 es alto, mayor precisión habrá en el modelo reemplazado en la siguiente fórmula:

$$D^2 = \frac{8.268 - 1.022}{8.268} * 100 \quad (4)$$

Donde, D^2 es igual a la diferencia del modelo nulo (desviación nula) y el modelo completo (desviación residual) entre la desviación del modelo nulo. En la cual se demuestra que el modelo lineal generalizado de GAMMA se ajusta en un 87.6% de la variabilidad del dato predicho O3 en la estación de Carabayllo.

V. DISCUSIÓN

En esta investigación se determinó la variación de los cuatro contaminantes (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y O₃) de la calidad del aire en cuatro distritos de Lima en el periodo 2015-2020, demostrando en su evaluación que solo disminuyeron tres contaminantes (PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂) en el año 2020 respecto a los años anteriores. Cabe resaltar que en los distritos de Carabaylo y San Juan de Lurigancho la variación de los parámetros de calidad del aire fue mayor que los distritos de Jesús María y Villa María del Triunfo en el año 2020. Esto se debe a que la dirección de los vientos, por el cual la concentración de contaminantes originada en la zona central de Lima (CDM) y en el lado sur (VMT) es transportada al lado este (S JL) y norte (CRB) respectivamente (Ilizarbe et al. 2020). Además, por el motivo de que en el año 2020 el Perú entró en cuarentena por COVID19, en dónde se paralizó totalmente el flujo vehicular y actividades industriales, entre otras (MINAM 2020).

Con respecto a los parámetros de calidad del aire de los cuatro distritos de Lima se redujeron en un 20 % en el periodo 2015-2019 con el año 2020, podemos señalar que, no se cumple, dado que los resultados obtenidos en la figura 5 se observan una disminución de las concentraciones en rangos diferentes en cada estación de monitoreo, el PM₁₀ mostró una disminución en las cuatro estaciones entre un 49% y 12%, el PM_{2.5} se redujo en las estaciones de CRB y S JL en 33% y 49%, el NO₂ disminuyó en las cuatro estaciones en intervalos de 71% y 25%; y las concentraciones de O₃ disminuyeron solo en la estación de CRB en una proporción de 66% en relación al año 2015-2019. Esto se relaciona con lo que plantea los autores Rojas et al. (2021) puesto que visualizaron las reducciones significativas en las estaciones de CRB, S JL y VMT al comparar las concentraciones de contaminantes en un periodo del 2017-2019 con las concentraciones del periodo de inactividad del 2020, por lo cual el PM₁₀ se redujo en un 49% en CRB y un 61 % en VMT, en las concentraciones de PM_{2.5} se redujeron 55% en CRB, 64% en S JL y 26 % en VMT. Dentro de esta misma línea, en una investigación de Berman y Ebisu (2020) demostraron que la concentración de NO₂ disminuyó en un 25.5% y también el PM_{2.5} (no en gran

proporción) en la data histórica de los años 2017 hasta el 2020 en Estados Unidos.

En el siguiente apartado, se determinó los contaminantes que presentaron mayor reducción en la calidad del aire de los cuatro distritos de Lima en el 2020. En los resultados se comparó los promedios anuales del año 2019 y 2020, en donde se observó que las concentraciones de PM_{10} solo se redujo en dos estaciones (CRB y SJL), puesto que el material particulado menor a 10 micrómetros no se mantiene mucho tiempo en el aire por lo que se deposita instantáneamente en su lugar de origen (MITECO 2014).

Por otro lado, el parámetro $PM_{2.5}$ presentó una reducción en el año 2020 en los cuatro distritos de Lima. Esto se debe a que estas partículas provienen del parque automotor que tiene una estimación de 2'281,786 de vehículos, con una antigüedad promedio de 12,5 años (MINAM 2019) por lo tanto al ser distritos con mayor aumento de población (INEI 2017) el crecimiento de su parque automotor va en ascenso debido a la mayor demanda de medios de transporte público y privado (Serna 2017). Otra causa de la disminución de concentraciones de $PM_{2.5}$ fue por el Covid19 debido a la paralización de fuentes emisoras de contaminante. Asimismo, otro factor son las condiciones meteorológicas como la velocidad y dirección del viento ya que el material particulado tanto fino como grueso, puede ser direccionado de acuerdo a la mayor frecuencia del viento, en este caso proveniente del suroeste de Lima por efecto del anticiclón del Pacífico del sur provocando que el $PM_{2.5}$ sea transportado a la zona este y norte del distrito (Espinoza 2018).

Además, las concentraciones de NO_2 en el año 2020 se observó que las estaciones con mayor reducción fueron CRB (74%) y SJL (71%), caso contrario sucedió en las estaciones de monitoreo de VMT y CDM que aumentaron en 14% y 69% respectivamente. Debido a que el NO_2 tiene como fuente principal la emisión al tráfico vehicular, a consecuencia de la oxidación del nitrógeno del aire con la combustión de los motores de los vehículos (Pérez 2017), asimismo este contaminante al reaccionar con la luz solar da formación al ozono troposférico O_3 (Alejo et al. 2011).

Por lo tanto, la reducción de este contaminante fue el resultado de la paralización del transporte vehicular en el confinamiento por el Covid19. Así que se puede asociar el estudio de los autores (Wang et al. 2020) durante la etapa de control de Covid19 en China, en donde mencionaron que la disminución de las concentraciones de NO₂ tuvieron como factor principal al sector transporte debido a las medidas de inmovilización de su población. Además, las concentraciones de O₃ evaluadas en los cuatro distritos presentaron una reducción en sus promedios anuales en la estación de CRB (72%) caso contrario ocurrió en las estaciones de monitoreo de SJL (16%) y CDM (40%); por el motivo de que las concentraciones de NO_x reduce el consumo de los radicales OH, haciendo que reaccione con los COV ocasionando el incremento de la formación del O₃ (SENAMHI 2020) y estos son dirigidos según la dirección predominante de los vientos a grandes distancias (Mantilla et al. 2015), además que Lima centro tuvo una mayor densidad empresarial por Km^2 (INEI 2018) y las empresas reanudaron sus actividades en un porcentaje de 34.5% (INEI 2020). En relación a la hipótesis del parámetro que presenta mayores reducciones de concentración es el NO₂ en el año 2020, se observó que no se cumple, dado que el parámetro que presenta mayor reducción es el PM_{2.5}, de tal modo que el estudio realizado por Zambrano y Ruano (2020) concuerda con nuestros resultados ya que dichas concentraciones de NO₂ y PM_{2.5} disminuyeron desde que se aplicó las diferentes medidas de cuarentena en Quito, Ecuador.

Finalmente, modelo matemático que estima las concentraciones de O₃ del distrito de Carabayllo en los últimos cinco años presentó que las variables meteorológicas de temperatura y humedad relativa explican la variabilidad del O₃ a través de los años. De esa manera el modelo lineal generalizado tuvo un buen diagnóstico en las concentraciones de ozono de la estación de Carabayllo relacionándose así con los resultados obtenidos por el autor Gutiérrez (2017) en la ciudad de Bogotá que tiene un resultado óptimo Gamma aplicado en datos obtenidos de estaciones de monitoreo con una distribución de probabilidad normal con una confianza del 95%. En relación al modelo que mejor representa los parámetros de calidad del aire con un $D^2 > 0.80$ es el modelo lineal generalizado Gamma, ya que obtuvo una desviación $D^2 > 0.87$ en el distrito de Carabayllo, por lo tanto, con este modelo se puede predecir dicho contaminante.

VI. CONCLUSIONES

En esta investigación se analizó la variación de la calidad del aire en cuatro distritos de Lima: Carabayllo (CRB), San Juan de Lurigancho (SJL), Villa María del Triunfo (VMT) y Jesús María (CDM) en los años 2015-2020. En el cual se apreció diferencias significativas entre los años 2015-2019 y el año 2020. Las concentraciones anuales en los años 2015-2019 se observó que el PM10 y PM2.5 en las estaciones de CRB, VMT y SJL estuvieron por encima del ECA aire, a diferencia de la estación de CDM que en esos años siempre se mantuvo por debajo del ECA aire, asimismo se observó que en la estación de SJL en el año 2020 se mantuvo por el límite del ECA-aire; cabe resaltar que los contaminantes de NO₂ y O₃ no excedieron el ECA aire. Del mismo modo se presentó reducciones de PM10, PM2.5 y NO₂ en el año 2020 en las cuatro estaciones de monitoreo debido a que el país entró en cuarentena por COVID-19 paralizando el flujo vehicular y las actividades industriales, entre otras. Sin embargo, el contaminante O₃ incrementó en dicho año a causa de la disminución de las concentraciones de NO_x, haciendo que reaccione los OH con los COV facilitando la formación del O₃, a pesar de ello no excedió el ECA aire (100 ug/m³).

Al determinar los contaminantes que presentaron mayor reducción en la calidad del aire en los cuatro distritos de Lima en el año 2020 se concluyó que en las concentraciones de PM10 disminuyeron en las estaciones de CRB, SJL y CDM, en las concentraciones de PM2.5 se observó disminución en las cuatro estaciones de monitoreo, además en las concentraciones de NO₂ disminuyeron las estaciones de CRB y SJL, por lo que se puede asociar a las medidas tomadas en confinamiento por el COVID-19 que se estableció en marzo del año 2020. En el caso de la concentración del O₃ se redujo en la estación de CRB, debido a que hay una tendencia en el aumento cuando las concentraciones de NO_x se reducen.

Para estimar el modelo matemático que estima los valores de O₃ en el distrito de Carabayllo solo se incluyeron los datos meteorológicos de temperatura y humedad relativa, en la cual se demostró que el modelo lineal generalizado de Gamma representa un 87.6% de la variabilidad del ozono.

VII. RECOMENDACIÓN

- Se recomienda que en las futuras investigaciones en el análisis de la calidad del aire se considere a los contaminantes de dióxido de azufre y monóxido de carbono con el fin de realizar una investigación más detallada no solo en Lima Metropolitana, sino a nivel provincial y regional.
- Se recomienda que al realizar estudios de la variabilidad de los contaminantes atmosféricos se debe considerar variables climáticas y meteorológicas como temperatura, precipitación, humedad, entre otros.
- A otros investigadores que estén interesados en este problema de investigación referente al análisis del comportamiento de las variables estudiadas y del modelo lineal generalizado gamma, se propone realizar investigaciones más profundizadas a fin de contrastar los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- ALEJO, D., MORALES, M., VAN, P., DE LA TORRE, J., QUINTERO, H., SOSA, D. y NUÑEZ, V., 2011. Cuantificación De Dióxido De Nitrógeno Con Captadores Pasivos Tipo Radiello. *Revista Cubana de Química* [en línea], vol. XXIII, no. 2, pp. 66-71. ISSN 0258-5995. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543723010>.
- ATO, M., LÓPEZ, J.J. y BENAVENTE, A., 2013. Un sistema de clasificación de los diseños de investigación en psicología. *Anales De Psicología/Annals of Psychology*, vol. 29, no. 3, pp. 1038-1059. DOI <https://doi.org/10.6018/analesps.29.3.178511>.
- BELTMAN, J., HENDRIKS, C., TUM, M. y SCHAAP, M., 2013. The impact of large scale biomass production on ozone air pollution in Europe. *Atmospheric Environment*, vol. 71, pp. 352-363. DOI <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.019>.
- BERMAN, J.D. y EBISU, K., 2020. Changes in U.S. air pollution during the COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 739, pp. 139864. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.139864. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139864>.
- BOLETÍN DE INFORMACIÓN CLÍNICA TERAPÉUTICA DE LA ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA, 2015. La contaminación del aire y los problemas respiratorios. *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, vol. 58, no. 5, pp. 44-47.
- CONCEPCION, E., 2017. ¿Cuáles son los distritos más contaminados de Lima? [en línea]. 2017. Disponible en: <https://stakeholders.com.pe/noticias-sh/cuales-son-los-distritos-mas-contaminados-de-lima/>.
- CORREA, J.C., IRAL, R. y ROJAS, L., 2006. Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. *Revista Colombiana de Estadística*, vol. 29, no. 1, pp. 57-76. ISSN 01201751.
- DEXTRE, E., 2016. *Comportamiento de las variables meteorológicas y su relación con la calidad de aire por material particulado PM2.5, San Juan de Lurigancho – 2016* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/8956/Dextre_EE D.pdf.
- DICKINSON GIBBONS, J. y CHAKRABORTI, S., 2003. *Nonparametric Statistical Inference, Fourth Edition: Revised and Expanded* [en línea]. Fourth edi. New York, USA: s.n. ISBN 0824740521. Disponible en: <https://books.google.com/books?id=kJbVO2G6VicC&pgis=1>.
- DS-080-2020-PCM, 2020. Decreto Supremo que aprueba la reanudación de actividades económicas en forma gradual y progresiva dentro del marco de la declaratoria de Emergencia Sanitaria Nacional por las graves circunstancias

que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID. *El Peruano* [en línea]. S.l.: Disponible en:
<https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que-aprueba-la-reanudacion-de-actividades-ec-decreto-supremo-n-080-2020-pcm-1865987-1>.

ENSHASSI, A., KOCHENDOERFER, B. y RIZQ, E., 2014. Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, vol. 29, no. 3, pp. 234-254. DOI 10.4067/s0718-50732014000300002.

ESPINOZA, J.A., 2018. *Evaluación espacial y temporal del material particulado PM10 y PM2,5 en Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en:
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3739/espinoza-guillen-jose-abel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

GERENA, L., 2015. Investigacion Aplicada@ es.calameo.com. ,

GUTIÉRREZ, A., 2017. Uso de Modelos Lineales Generalizados (MLG) para la interpolación espacial de PM10 utilizando imágenes satelitales Landsat para la ciudad de Bogotá , Colombia. , vol. 22, pp. 105-121. DOI 10.19053/01233769.5600.

HERNÁNDEZ, A.A., RAMOS RODRÍGUEZ, M.P., PLACENCIA LÓPEZ, B.M., INDACOCHEA GANCHOZO, B., QUIMIS GÓMEZ, A.J. y MORENO PONCE, L.A., 2018. *Metodología de la investigación científica*. S.l.: s.n. ISBN 9788494825705.

IBM, 2020. Estadísticos de bondad de ajuste. [en línea]. Disponible en:
<https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/18.2.2?topic=analysis-feature-selection>.

IBM, 2021. Contraste Omnibus. [en línea]. Disponible en:
<https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/SaaS?topic=tests-one-sample-kolmogorov-smirnov-test>.

ILIZARBE, G.M., ROJAS-QUINCHO, J.P., CABELLO-TORRES, R.J., UGARTE-ALVAN, C.A., REYNOSO-QUISPE, P. y VALDIVIEZO-GONZALES, L.G., 2020. Chemical characteristics and identification of pm10 sources in two districts of lima, peru. *DYNA (Colombia)*, vol. 87, no. 215, pp. 57-65. ISSN 00127353. DOI 10.15446/dyna.v87n215.83688.

INEI, 2015. Estadísticas Ambientales: Enero 2015. , pp. 1-33.

INEI, 2017. CENSOS NACIONALES 2017. [en línea]. S.l.: Disponible en:
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1583/.

INEI, 2018. Análisis de la Densidad Empresarial. [en línea], ISSN 1098-6596. Disponible en:

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1262/cap05.pdf.

INEI, 2020. Demografía Empresarial en el Perú - III Trimestre 2020. *Informe técnico* [en línea], vol. 2, pp. 3. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin-demografia_empresarial.pdf.

IQAIR, 2020. World Air Quality Report. *2020 World Air Quality Report* [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2020-en.pdf>.

LANCHIPA ALE, T.M., MORENO-SALAZAR, K. y LUQUE-ZÚÑIGA, B., 2020. Perspectiva del COVID-19 sobre la contaminación del aire. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, vol. 25, no. 2, pp. 155-182. ISSN 0379-9123. DOI 10.32480/rscp.2020.25.2.155.

MANTILLA, E., CASTELL, N., SALVADOR, R., AZORÍN, C., MILLÁN, M., MIRÓ, J.Vi. y JUAN, L., 2015. Ozono troposférico y calidad del aire. *Generalitat Valenciana y CEAM* [en línea], pp. 42. Disponible en: <http://www.citma.gva.es/documents/20549779/161512949/Ozono+troposférico+y+calidad+del+aire.+Libro+completo/c0ae3c3e-5588-433f-a0b6-daf473a9c0a9;jsessionid=49ADB4805220D697BF9FF226B34A1ABD.node1>.

MINAM, 2019. Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y. [en línea], pp. 97. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao>.

MINAM, 2020. Calidad de aire en Lima durante cuarentena alcanzó niveles que recomienda Organización Mundial de Salud. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/110755-calidad-de-aire-en-lima-durante-cuarentena-alcanzo-niveles-que-recomienda-organizacion-mundial-de-salud>.

MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2019. Decreto Supremo que aprueba el protocolo nacional de monitoreo de la calidad ambiental del aire. *El peruano*, pp. 9-10.

MITECO, 2014. Partículas en suspensión. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico* [en línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/particulas.aspx#:~:text=En general%2C la parte gruesa, construcción%2C resuspensión de polvo%2C actividades>.

MOHD, N. y BEE, Y., 2011. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, vol. 2, no. 1, pp. 13-14.

MORENO JIMÉNEZ, A., 2013. Población y polución atmosférica intraurbana por dióxido de nitrógeno en Madrid: Análisis desde la justicia ambiental basado

- en sistemas de información geográfica. *Cuadernos Geograficos*, vol. 52, no. 1, pp. 84-107. ISSN 02105454.
- MORTE, L., 2018. *Modelos lineales generalizados: Modelos con coeficiente de variación constante y otros* [en línea]. S.l.: Zaragoza. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/76354/files/TAZ-TFG-2018-4745.pdf>.
- NÚÑEZ, V., RODRÍGUEZ, R., GÓMEZ, L., HERRERA, I. y MORALES, M., 2019. Emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera por fuentes fijas del MINAG y su influencia en la calidad del aire en la provincia de Villa Clara. *Centro Agrícola*, vol. 46, no. 3, pp. 10. ISSN 0253-5785.
- OMS, 2016. Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. .
- PÉREZ, D.G., 2017. Estudio De Emisiones Contaminantes Utilizando Combustibles. *INNOVA Research Journal*, vol. 2, no. 23, pp. 23-34.
- PERUANO, E., 2020. Decreto Supremo N°044-2020-pcm. *Diario Oficial El Peruano* [en línea], no. 90, pp. 545318-545321. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/581842/DU036_2020.pdf.
- PULIDO, M., 2015. Ceremonial y protocolo: Métodos y técnicas de investigación científica. *Opcion*, vol. 31, pp. 1137-1156. ISSN 10121587.
- REPUBLICA DEL PERU, 2017. Decreto Supremo No. 003-2017-MINAM. , pp. 6-9.
- RIVAS, R., MORENO, J. y TALAVERA, J., 2013. Diferencias de medianas con la U de Mann-Whitney. *Rev Med Inst Mex Seguro Soc*, vol. 51, no. 4, pp. 414-9. ISSN 0443-5117.
- ROJAS, J.P., URDANIVIA, F.R., GARAY, R.A., GARCÍA, A.J., ENCISO, C., MEDINA, E.A., TORO, R.A., MANZANO, C. y LEIVA-GUZMÁN, M.A., 2021. Effects of COVID-19 pandemic control measures on air pollution in Lima metropolitan area, Peru in South America. *Air Quality, Atmosphere and Health* [en línea], no. 0123456789. ISSN 18739326. DOI 10.1007/s11869-021-00990-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-00990-3>.
- SERNA, M., 2017. *CAUSAS QUE PRESENTA EL CONGESTIONAMIENTO DEL PARQUE AUTOMOTOR DE LIMA METROPOLITANA EN EL AÑO 2017* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_5a6a549efdf71152916db e2918fd6ac4/Description#tabnav.
- SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (SENAMHI), 2020. Vigilancia de la Calidad del Aire Área Metropolitana de Lima y Callao abril-2020. , pp. 1-25.
- WANG, Y., YUAN, Y., WANG, Q., LIU, C.G., ZHI, Q. y CAO, J., 2020. Changes in air quality related to the control of coronavirus in China: Implications for traffic and industrial emissions. *The Science of the total environment*, vol. 731, no.

December 2019, pp. 139133. ISSN 18791026. DOI
10.1016/j.scitotenv.2020.139133.

ZAMBRANO-MONSERRATE, M.A. y RUANO, M.A., 2020. Has air quality improved in Ecuador during the COVID-19 pandemic? A parametric analysis. *Air Quality, Atmosphere and Health*, vol. 13, no. 8, pp. 929-938. ISSN 18739326. DOI 10.1007/s11869-020-00866-y.

ANEXOS

Anexo N° 01: Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Parámetros de Calidad del aire	Son aquellos límites establecidos que al excederse pueden ocasionar impactos negativos en el ambiente, la salud, etc. (OMS)	Los datos de las concentraciones de contaminantes y condiciones meteorológicas serán recolectados por medio de plataforma del SENAMHI.	Concentraciones de contaminantes	PM ₁₀	$\mu g/m^3$
				PM _{2.5}	
				NO ₂	
				O ₃	
			Condición Meteorológica	Temperatura	°C
	Humedad Relativa	%			
Modelo lineal generalizado	Es una representación matemática de un modelo lineal clásico y es utilizado en pruebas no paramétricas con varianzas no constantes y errores con distribución no normal, (Morte 2018)	Para el modelo matemático de calidad de aire, los datos se procesarán utilizando el software SPSS V.25.	Prueba omnibus	P valor	%
			Desvianza	R ²	%

Anexo N°02: Recolección de datos de los contaminantes del aire (PM10, PM2.5, NO2 y O3) por estaciones de monitoreo, de los años 2015 al 2020

Material Particulado menor a 10 micras (PM10)

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 MICRAS (PM10)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM10 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2015				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	73.4	108.6	67.2	35.1
FEBRERO	86.0	126.6	92.2	41.6
MARZO	99.6	240.3	122.6	52.4
ABRIL	S/D	203.5	115.3	45.0
MAYO	87.6	173.0	101.5	50.2
JUNIO	89.1	S/D	147.7	84.3
JULIO	73.1	S/D	66.0	47.3
AGOSTO	72.0	S/D	69.3	37.4
SETIEMBRE	69.9	S/D	65.2	S/D
OCTUBRE	79.2	S/D	41.5	31.4
NOVIEMBRE	76.7	86.7	79.2	33.8
DICIEMBRE	76.3	106.4	78.3	36.5
ECA AIRE PM10 = 50 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 MICRAS (PM10)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM10 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2016				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	75.4	141.7	70.8	31.7
FEBRERO	82.0	169.8	73.4	38.2
MARZO	97.0	198.4	87.9	35.6
ABRIL	100.2	S/D	108.5	38.9
MAYO	104.6	173.0	116.2	44.7
JUNIO	S/D	105.2	134.7	44.7
JULIO	80.0	66.2	87.2	32.0
AGOSTO	S/D	57.2	S/D	29.9
SETIEMBRE	S/D	90.2	S/D	32.6
OCTUBRE	S/D	88.9	S/D	32.6
NOVIEMBRE	S/D	99.4	100.2	39.0
DICIEMBRE	84.4	119.6	93.0	35.4
ECA AIRE PM10 = 50 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 MICRAS (PM10)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM10 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2017				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	78.7	158.8	86.4	S/D
FEBRERO	84.7	176.0	97.5	33.8
MARZO	84.0	160.4	S/D	29.3
ABRIL	89.0	166.4	96.1	31.9
MAYO	S/D	127.9	S/D	39.8
JUNIO	S/D	S/D	S/D	S/D
JULIO	S/D	S/D	S/D	S/D
AGOSTO	S/D	S/D	S/D	S/D
SETIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
OCTUBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
NOVIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
DICIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
ECA AIRE PM10 = 50 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 MICRAS (PM10)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM10 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2018				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	S/D	28.6
FEBRERO	57.3	S/D	79.9	25.6
MARZO	84.3	239.4	92.8	30.7
ABRIL	101.3	206.8	97.1	36.4
MAYO	91.2	158.3	96.3	37.6
JUNIO	72.4	64.2	72.7	34.7
JULIO	74.5	64.4	73.8	28.3
AGOSTO	83.5	64.2	78.6	29.4
SETIEMBRE	97.8	103.5	85.6	28.0
OCTUBRE	94.5	118.9	72.1	21.7
NOVIEMBRE	101.0	134.2	71.5	22.2
DICIEMBRE	112.7	169.6	68.7	20.4
ECA AIRE PM10 = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 MICRAS (PM10)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM10 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2019				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	64.6	S/D
FEBRERO	S/D	S/D	75.3	16.6
MARZO	116.2	S/D	S/D	18.5
ABRIL	S/D	S/D	S/D	21.6
MAYO	S/D	142.4	S/D	31.0
JUNIO	S/D	67.1	S/D	28.9
JULIO	S/D	S/D	S/D	24.2
AGOSTO	S/D	S/D	S/D	26.6
SETIEMBRE	S/D	86.4	74.4	30.8
OCTUBRE	S/D	S/D	64.5	34.8
NOVIEMBRE	S/D	S/D	S/D	27.9
DICIEMBRE	S/D	S/D	59.5	26.4
ECA AIRE PM10 = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 MICRAS (PM10)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM10 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2020				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	55.4	131.0	52.8	26.7
FEBRERO	53.8	110.8	50.5	24.9
MARZO	56.9	95.7	S/D	21.8
ABRIL	50.8	72.8	S/D	19.8
MAYO	55.4	84.0	S/D	23.5
JUNIO	54.6	121.9	S/D	25.5
JULIO	57.2	165.3	S/D	31.0
AGOSTO	66.0	108.8	S/D	32.1
SETIEMBRE	77.7	122.6	S/D	29.7
OCTUBRE	85.0	144.5	S/D	27.9
NOVIEMBRE	86.4	141.2	S/D	23.4
DICIEMBRE	69.0	101.5	S/D	17.1
ECA AIRE PM10 = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5)

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 2.5 MICRAS (PM2.5)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM2.5 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2015				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabaylo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	23.2	19.6	20.7	20.3
FEBRERO	S/D	23.5	22.1	12.5
MARZO	S/D	26.0	24.5	12.8
ABRIL	S/D	33.3	34.0	19.7
MAYO	27.8	29.7	29.6	17.5
JUNIO	29.0	S/D	31.4	20.8
JULIO	15.0	S/D	28.8	16.3
AGOSTO	15.8	S/D	31.0	16.1
SETIEMBRE	14.3	S/D	28.0	S/D
OCTUBRE	25.6	S/D	28.1	14.3
NOVIEMBRE	24.8	21.7	26.4	13.0
DICIEMBRE	25.7	21.8	26.4	14.3
ECA AIRE PM2.5 = 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 2.5 MICRAS (PM2.5)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM2.5 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2016				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabaylo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	21.5	22.1	22.1	13.7
FEBRERO	20.1	22.6	22.0	S/D
MARZO	23.2	30.8	26.4	13.0
ABRIL	32.9	S/D	34.5	15.9
MAYO	35.3	S/D	46.1	22.9
JUNIO	S/D	S/D	45.2	S/D
JULIO	31.4	21.2	34.1	15.0
AGOSTO	29.0	20.0	S/D	13.4
SETIEMBRE	S/D	25.6	S/D	13.7
OCTUBRE	S/D	19.1	S/D	11.7
NOVIEMBRE	S/D	20.3	30.5	10.3
DICIEMBRE	S/D	28.5	32.0	7.3
ECA AIRE PM2.5 = 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 2.5 MICRAS (PM2.5)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM2.5 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2017				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabaylo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	23.2	30.2	S/D
FEBRERO	S/D	28.1	29.7	11.5
MARZO	S/D	27.0	26.8	10.7
ABRIL	S/D	28.1	29.6	11.3
MAYO	S/D	23.8	31.6	11.8
JUNIO	S/D	S/D	S/D	S/D
JULIO	S/D	S/D	S/D	S/D
AGOSTO	S/D	S/D	S/D	S/D
SETIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
OCTUBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
NOVIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
DICIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
ECA AIRE PM2.5 = 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 2.5 MICRAS (PM2.5)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM2.5 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2018				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	32.4	15.0
FEBRERO	S/D	S/D	25.8	13.7
MARZO	25.5	28.0	35.6	18.0
ABRIL	27.3	30.7	S/D	20.7
MAYO	S/D	34.0	S/D	26.9
JUNIO	S/D	23.6	S/D	26.6
JULIO	24.8	22.4	S/D	21.7
AGOSTO	25.2	20.7	34.8	22.1
SETIEMBRE	27.0	23.3	34.6	21.6
OCTUBRE	21.8	17.8	35.4	16.3
NOVIEMBRE	21.1	22.2	36.2	16.2
DICIEMBRE	21.1	23.6	29.0	14.8
ECA AIRE PM2.5 = 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 2.5 MICRAS (PM2.5)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM2.5 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2019				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	38.6	S/D	32.6	S/D
FEBRERO	S/D	S/D	S/D	10.3
MARZO	S/D	S/D	S/D	12.1
ABRIL	S/D	S/D	30.7	16.0
MAYO	S/D	31.0	36.2	24.6
JUNIO	S/D	26.0	39.1	24.4
JULIO	S/D	S/D	37.6	21.0
AGOSTO	S/D	S/D	S/D	24.0
SETIEMBRE	S/D	26.2	S/D	23.4
OCTUBRE	S/D	30.9	S/D	24.3
NOVIEMBRE	S/D	S/D	S/D	19.2
DICIEMBRE	S/D	33.0	S/D	17.8
ECA AIRE PM2.5 = 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
MATERIAL PARTICULADO MENOR A 2.5 MICRAS (PM2.5)				
PROMEDIOS MENSUALES DE PM2.5 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2020				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	15.4	S/D	S/D	16
FEBRERO	18.7	38.2	S/D	16
MARZO	15.4	24.7	13.1	13
ABRIL	12.4	20.2	11.4	14
MAYO	14.7	S/D	16.5	17
JUNIO	16.1	S/D	20.8	19
JULIO	57.2	S/D	28.7	24
AGOSTO	20.5	S/D	28.2	S/D
SETIEMBRE	23.9	S/D	30.3	22
OCTUBRE	21.5	S/D	25.9	21
NOVIEMBRE	23.4	S/D	24.7	17
DICIEMBRE	22.5	S/D	25.0	13
ECA AIRE PM2.5 = 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

Dióxido de Nitrógeno (NO2)

CALIDAD DEL AIRE				
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO2)				
PROMEDIOS MENSUALES DE NO2 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2015				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	S/D	S/D
FEBRERO	S/D	S/D	S/D	S/D
MARZO	6.4	S/D	S/D	S/D
ABRIL	S/D	S/D	12.6	S/D
MAYO	7.4	S/D	16.3	S/D
JUNIO	5.3	S/D	21.0	S/D
JULIO	9.9	S/D	18.9	S/D
AGOSTO	11.4	S/D	20.4	S/D
SETIEMBRE	11.9	S/D	20.9	S/D
OCTUBRE	10.5	S/D	19.1	S/D
NOVIEMBRE	10.6	3.9	18.1	20.5
DICIEMBRE	9.1	3.4	17.5	38.7
ECA AIRE NO2 = 100 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO2)				
PROMEDIOS MENSUALES DE NO2 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2016				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	11.4	6.7	S/D	58.8
FEBRERO	11.4	13.7	20.9	42.9
MARZO	20.5	22.9	24.7	11.9
ABRIL	24.5	S/D	38.9	23.9
MAYO	32.7	24.7	54.2	30.3
JUNIO	34.1	24.8	63.1	35.6
JULIO	20.8	41.4	39.6	3.3
AGOSTO	15.3	S/D	S/D	S/D
SETIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
OCTUBRE	S/D	16.8	S/D	S/D
NOVIEMBRE	S/D	16.1	35.1	S/D
DICIEMBRE	31.5	15.9	35.4	S/D
ECA AIRE NO2 = 100 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO2)				
PROMEDIOS MENSUALES DE NO2 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2017				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	25.1	16.1	28.9	S/D
FEBRERO	23.9	17.5	28.4	19.1
MARZO	30.7	13.9	20.6	16.6
ABRIL	30.6	15.7	S/D	19.6
MAYO	S/D	14.7	S/D	22.4
JUNIO	S/D	S/D	S/D	S/D
JULIO	S/D	S/D	S/D	S/D
AGOSTO	S/D	S/D	S/D	S/D
SETIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
OCTUBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
NOVIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
DICIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
ECA AIRE NO2 = 100 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO2)				
PROMEDIOS MENSUALES DE NO2 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2018				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	S/D	9.9
FEBRERO	18.7	S/D	15.4	S/D
MARZO	22.7	29.9	17.5	20.1
ABRIL	24.2	31.8	21.1	21.7
MAYO	24.2	S/D	29.1	26.3
JUNIO	23.2	S/D	27.7	28.4
JULIO	20.8	S/D	21.9	25.8
AGOSTO	S/D	S/D	26.9	20.9
SETIEMBRE	S/D	S/D	31.5	22.0
OCTUBRE	5.4	S/D	30.3	25.0
NOVIEMBRE	5.2	S/D	28.0	26.0
DICIEMBRE	4.3	S/D	26.5	7.4
ECA AIRE NO2 = 100 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO2)				
PROMEDIOS MENSUALES DE NO2 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2019				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	18.6	7.4
FEBRERO	S/D	S/D	S/D	S/D
MARZO	S/D	S/D	25.5	S/D
ABRIL	S/D	S/D	20.5	10.7
MAYO	S/D	S/D	27.6	S/D
JUNIO	S/D	S/D	26.5	S/D
JULIO	S/D	S/D	26.9	S/D
AGOSTO	S/D	15.0	36.7	S/D
SETIEMBRE	25.8	10.7	S/D	18.5
OCTUBRE	25.4	8.7	S/D	3.4
NOVIEMBRE	20.0	S/D	S/D	2.5
DICIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
ECA AIRE NO2 = 100 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO2)				
PROMEDIOS MENSUALES DE NO2 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2020				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	10	19.2
FEBRERO	3.1	S/D	11	22.8
MARZO	2.2	5.6	7	23.7
ABRIL	S/D	8.5	5	24.7
MAYO	3.2	11.7	5	18.5
JUNIO	6.1	14.1	S/D	10.0
JULIO	9.0	14.7	S/D	6.0
AGOSTO	7.9	13.8	S/D	2.7
SETIEMBRE	6.9	13.2	S/D	10.5
OCTUBRE	7.6	16.4	S/D	S/D
NOVIEMBRE	7.6	25.7	S/D	S/D
DICIEMBRE	9.4	7.1	S/D	S/D
ECA AIRE NO2 = 100 µg/m³				

Ozono (O3)

CALIDAD DEL AIRE				
OZONO (O3)				
PROMEDIOS MENSUALES DE O3 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2015				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	11.0	S/D	S/D	S/D
FEBRERO	7.2	5.2	S/D	S/D
MARZO	8.9	7.7	S/D	S/D
ABRIL	S/D	6.3	S/D	S/D
MAYO	S/D	S/D	3.7	S/D
JUNIO	7.2	S/D	3.5	S/D
JULIO	9.0	S/D	4.2	S/D
AGOSTO	9.8	S/D	5.9	S/D
SETIEMBRE	15.3	S/D	7.6	S/D
OCTUBRE	12.5	S/D	S/D	S/D
NOVIEMBRE	14.0	S/D	7.2	S/D
DICIEMBRE	12.8	3.8	6.5	2.5
ECA AIRE O3 = 100 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
OZONO (O3)				
PROMEDIOS MENSUALES DE O3 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2016				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	51.0	14.4	33.3	10.6
FEBRERO	21.8	7.8	13.8	5.4
MARZO	22.5	S/D	11.3	11.1
ABRIL	24.4	S/D	13.2	12.5
MAYO	28.2	17.9	14.0	16.2
JUNIO	10.0	18.1	10.8	23.7
JULIO	8.7	8.9	S/D	28.8
AGOSTO	12.2	14.3	S/D	27.6
SETIEMBRE	S/D	10.2	S/D	20.4
OCTUBRE	S/D	12.9	S/D	S/D
NOVIEMBRE	S/D	12.6	17.2	21.9
DICIEMBRE	14.8	11.5	14.7	15.0
ECA AIRE O3 = 100 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
OZONO (O3)				
PROMEDIOS MENSUALES DE O3 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2017				
(Microgramo por metro cúbico (µg/m³))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	12.2	10.9	14.3	S/D
FEBRERO	16.5	15.0	18.9	11.2
MARZO	14.0	15.7	13.7	9.5
ABRIL	14.2	16.4	15.9	14.9
MAYO	S/D	18.2	12.9	19.7
JUNIO	S/D	S/D	S/D	S/D
JULIO	S/D	S/D	S/D	S/D
AGOSTO	S/D	S/D	S/D	S/D
SETIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
OCTUBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
NOVIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
DICIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
ECA AIRE O3 = 100 µg/m³				

CALIDAD DEL AIRE				
OZONO (O3)				
PROMEDIOS MENSUALES DE O3 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2018				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	12.6	9.9
FEBRERO	S/D	S/D	11.9	9.5
MARZO	S/D	12.4	16.4	11.9
ABRIL	17.7	9.2	13.8	9.3
MAYO	S/D	9.3	10.5	S/D
JUNIO	S/D	10.3	4.9	S/D
JULIO	5.5	11.3	6.4	S/D
AGOSTO	S/D	S/D	7.4	S/D
SETIEMBRE	8.9	S/D	9.9	S/D
OCTUBRE	15.0	16.0	13.9	S/D
NOVIEMBRE	13.3	12.3	15.8	S/D
DICIEMBRE	S/D	12.2	14.0	S/D
ECA AIRE O3 = 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
OZONO (O3)				
PROMEDIOS MENSUALES DE O3 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2019				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	10.7	S/D
FEBRERO	18.0	S/D	S/D	S/D
MARZO	S/D	S/D	S/D	S/D
ABRIL	S/D	S/D	16.8	60.9
MAYO	S/D	21.5	13.4	S/D
JUNIO	S/D	21.1	9.6	S/D
JULIO	S/D	S/D	S/D	57.2
AGOSTO	S/D	S/D	6.5	46.7
SETIEMBRE	S/D	S/D	11.4	29.2
OCTUBRE	S/D	S/D	S/D	24.8
NOVIEMBRE	S/D	S/D	S/D	31.9
DICIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
ECA AIRE O3 = 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

CALIDAD DEL AIRE				
OZONO (O3)				
PROMEDIOS MENSUALES DE O3 DE CUATRO ESTACIONES DE MEDICIÓN, 2020				
(Microgramo por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))				
MES	Carabayllo	Villa María del Triunfo	San Juan de Lurigancho	Jesús María (Campo de Marte)
ENERO	S/D	S/D	S/D	55.1
FEBRERO	S/D	S/D	S/D	56.9
MARZO	S/D	S/D	S/D	50.9
ABRIL	S/D	S/D	S/D	59.8
MAYO	S/D	S/D	15.6	64.0
JUNIO	S/D	S/D	15.4	S/D
JULIO	S/D	S/D	13.4	S/D
AGOSTO	5.1	S/D	11.5	S/D
SETIEMBRE	5.1	S/D	10.4	65.5
OCTUBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
NOVIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
DICIEMBRE	S/D	S/D	S/D	S/D
ECA AIRE O3 = 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				

Anexo N°03: Resultados de Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra de calidad del aire de cuatro estaciones de monitoreo.

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
PM10	,137	92	,000	,911	92	,000
PM2.5	,085	92	,101	,939	92	,000
NO2	,098	92	,031	,926	92	,000
O3	,285	92	,000	,687	92	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Anexo N°04: Resultados de Prueba de Kolmogorov-Smirnov(corrección de Lilliferos) para una muestra de calidad del aire de cuatro estaciones de monitoreo.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		PM10	PM2.5	NO2	O3
N		222	202	168	149
Parámetros normales ^{a,b}	Media	76,908	25,166	18,543	16,001
	Desv. Desviación	43,1675	10,1731	10,8803	12,3874
Máximas diferencias extremas	Absoluto	,086	,096	,069	,256
	Positivo	,086	,096	,069	,256
	Negativo	-,081	-,067	-,059	-,152
Estadístico de prueba		,086	,096	,069	,256
Sig. asintótica(bilateral)		,000 ^c	,000 ^c	,084 ^c	,000 ^c

a. La distribución de prueba es normal.

b. Se calcula a partir de datos.

c. Corrección de significación de Lilliefors.

Anexo N°05: Resultados de Prueba de Kruskal Wallis de la distribución de los parámetros de calidad del aire de cuatro estaciones de monitoreo entre las categorías años (2015-2019) - 2020.

Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de PM10 es la misma entre las categorías de Año 2015-2019 y 2020.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de PM2.5 es la misma entre las categorías de Año 2015-2019 y 2020.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de NO2 es la misma entre las categorías de Año 2015-2019 y 2020.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
4	La distribución de O3 es la misma entre las categorías de Año 2015-2019 y 2020.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

Anexo N°06: Resultados de prueba de homogeneidad (Estadístico de Levene) de las varianzas de los parámetros de calidad del aire (2015-2019) – 2020 de cuatro estaciones de monitoreo.

Prueba de homogeneidad de varianzas

		Estadístico de			
		Levene	gl1	gl2	Sig.
PM10	Se basa en la media	22,085	7	214	,000
	Se basa en la mediana	17,811	7	214	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	17,811	7	92,289	,000
	Se basa en la media recortada	21,156	7	214	,000
PM2.5	Se basa en la media	9,304	7	194	,000
	Se basa en la mediana	4,552	7	194	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	4,552	7	81,786	,000
	Se basa en la media recortada	8,106	7	194	,000
NO2	Se basa en la media	2,095	7	160	,047
	Se basa en la mediana	2,015	7	160	,056
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	2,015	7	118,779	,059
	Se basa en la media recortada	2,034	7	160	,054
O3	Se basa en la media	5,892	7	141	,000
	Se basa en la mediana	4,141	7	141	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	4,141	7	60,267	,001
	Se basa en la media recortada	5,256	7	141	,000

Anexo N°07: Resultado de la Prueba Omnibus del modelo lineal generalizado

Prueba Ómnibus^a		
Chi-cuadrado de razón de verosimilitud	gl	Sig.
9,858	2	,007

Variable dependiente: O3

Modelo: (Intersección), Puntuación Z(T), Puntuación Z(H)^a

a. Compara el modelo ajustado con el modelo de sólo intersección.