

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

Unidad de Posgrado de Ingeniería y Arquitectura



Tendencia temporal de PM 2,5 y el riesgo asociado para la salud humana en Lima, Perú

Tesis para obtener el Título de Segunda Especialidad Profesional de Ingeniería: Estadística Aplicada para Investigación

Autor:

Domingo Zapana Diaz
Justiniano Felix Palomino Quispe

Asesor:

Dr. Alex Ruben Huaman De La Cruz

Lima, abril de 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Dr. Alex Ruben Huaman De La Cruz, docente de la Unidad de Posgrado de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Posgrado de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“TENDENCIA TEMPORAL DE PM 2,5 Y EL RIESGO ASOCIADO PARA LA SALUD HUMANA EN LIMA, PERU”** de los autores Domingo Zapana Diaz y Justiniano Felix Palomino Quispe, tiene un índice de similitud de 19% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 10 días del mes de julio del año 2024



Asesor

Dr. Alex Ruben Huaman De La Cruz

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa unión a 8 días del mes de abril del año 2024, siendo las 11:10 horas, se reunieron de forma online sincrónica, bajo la dirección del presidente del jurado, Mg. Lizeth Geanina Huanca López, el secretario, Mg. Esteban Tocto Cano; los demás miembros: PhD. Javier Linkolk López Gonzales, Dr. Josué Edison Turpo Chaparro y el asesor Dr. Alex Ruben Huamán De la Cruz, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de tesis de la segunda especialidad, titulada: "Tendencia temporal de PM2.5 y el riesgo asociado a la salud humana en el Área Metropolitana de Lima", conducente a la obtención del Título de Segunda Especialidad Profesional de Ingeniería: Estadística Aplicada para Investigación.

El presidente inició el acto académico de sustentación invitando a los candidatos a hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, cuestionamientos y aclaraciones pertinentes, los cuales fueron absueltos por los candidatos. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidatos: Domingo Zapana Díaz y Justiniano Felix Palomino Quispe

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Con nominación de muy bueno	Sobresaliente

Finalmente, el presidente del jurado invitó a los candidatos a ponerse de pie, para recibir la evaluación final. Además, el presidente concluyó el acto académico de sustentación, procediéndose a registrar a registrar las firmas respectivas.



Presidente



Secretario




Asesor



Miembro



Miembro



Candidato



Candidato

Tendencia temporal de PM_{2,5} y el riesgo asociado para los seres humanos salud en el área metropolitana de lima

Justiniano Palomino Quispe 1, Domingo Zapana Díaz 1, Daniel Álvarez Tolentino 2, Alex Huamán De La Cruz 3,4, *

Universidad Peruana Unión, Escuela de Posgrado, Km 19 Carretera Central, Ñaña, Perú; justinianopalomino@upeu.edu.pe,

2 Universidad Peruana Los Andes, Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Medio Ambiente y Desarrollo; danielalvareztolentino@gmail.com

3 Universidad Tecnológica del Perú, Escuela de Derecho, Huancayo, Perú; aebut2@hotmail.com, lady.valenzuela@hotmail.com

4 Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, Escuela Profesional de Ingeniería ambiental; aebut2@hotmail.com

* Correspondencia: aebut2@hotmail.com

Resumen: El objetivo de este estudio fue evaluar el riesgo para la salud humana asociado con la exposición a PM_{2.5} en residentes del Área Metropolitana de Lima (MAL), Perú, para el mejor de los casos y para el peor de los casos.

escenario basado en el promedio mensual de PM_{2.5} y el percentil 90 de concentración de PM_{2.5}, respectivamente.

Las concentraciones horarias de PM_{2.5} entre 2014 y 2023 correspondientes a cinco estaciones de monitoreo fueron proporcionadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). La calidad del aire se evaluó mediante el índice de calidad del aire (ICA). El cociente de peligro para evaluar el riesgo para la salud humana se calculó utilizando el valor límite anual establecido por la Unión Europea (UE, 25 µg/m³) y la Organización Mundial de la Salud (OMS, 10 µg/m³) porque no existe un valor de toxicidad para PM_{2.5}. La concentración media anual de PM₁₀ osciló entre 19,5 µg/m³

a 35,8 µg/m³ con algún año por debajo del límite anual establecido por la UE, mientras que todos los años excedieron los límites de la OMS. El AQI mostró que Lima se clasifica de moderada a peligrosa. En el mejor y peor escenario basados en la UE, ambos

muestran un mayor riesgo potencial crónico no cancerígeno en los meses de invierno que en los meses de verano, y se identificaron todos los años (excepto 2020), principalmente en las estaciones de invierno. lo que indica una exposición permanente y un riesgo para la salud de la población de Lima, respectivamente, mientras que el GCA de la OMS para el mejor escenario indicó un potencial riesgo crónico no cancerígeno para la salud en la mayoría de los meses del año, mientras que para el peor escenario, fueron mayores en los meses de invierno que en los meses de verano, mostrando un comportamiento constante, indicando que existe riesgo no cancerígeno durante casi todo el período.

Cita: Para ser agregado por personal durante la producción.

Palabras clave: calidad del aire; PM_{2,5}; riesgo para la salud humana

Editor académico: Nombre Apellido-
nombre

Recibido: fecha

Fecha revisada

Aceptado: fecha

Fecha de Publicación

1. Introducción

La contaminación del aire, especialmente la generada por partículas en suspensión (PM), es un problema importante 36 en Europa y América Latina. PM es una mezcla compleja de sólidos y aerosoles que contiene 37 metales y metaloides, especies carbonosas (carbono elemental y carbono orgánico) y 38 especies iónicas [1]. Las PM se clasifican según su diámetro aerodinámico en partículas gruesas 39 o "inhalables" (PM₁₀, ≤ 10 µm (micras) de diámetro) y partículas finas o "respirables" 40 (PM_{2,5}, ≤ 2,5 (micras) µm de diámetro) [2]. Las PM_{2.5} se monitorean ampliamente porque 41 su tiempo de exposición corto o largo puede tener impactos adversos para la salud y efectos ambientales (deterioro de la visibilidad, daños ambientales y daños materiales). Ef- (<https://creativecommons.org/licenses>

Copyright: © 2024 por los autores.

Presentado para posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de los Creative Commons

Los efectos causados por la exposición a PM dependen en gran medida de su tamaño, forma y fuente de emisión, s/by/

y composición química. Sin embargo, la exposición a PM_{2.5} en comparación con PM₁₀ es más peligrosa debido a su capacidad de penetrar directamente al pulmón e incluso ingresar directamente al torrente sanguíneo, lo que puede generar disminución de la función pulmonar, exacerbación del asma, intensificación de los síntomas de enfermedades relacionadas con el sistema circulatorio y respiratorio, e incluso promueven diferentes tipos de cáncer (pulmón, garganta y laringe). Por ejemplo, [3] reportó 103.974 casos de asma entre 2010 y 2016 encontrados en 39 distritos de Lima, que se asociaron con la exposición a PM_{2.5}.

Según la OMS, alrededor de 7 millones de personas mueren cada año por exposición a partículas finas, y el 90% de estas muertes ocurren en países de ingresos bajos y medios [4]. En el Área Metropolitana de Lima, la Autoridad de Transporte Urbano de Lima y Callao (ATU) reveló que el parque vehicular es responsable del 58% de la contaminación del aire en esta zona, siendo que el 85% del parque vehicular utiliza diésel como combustible, mientras que una pequeña En proporción se alimenta de gas natural y electricidad. Además, el 24% de estas flotas vehiculares tienen más de 20 años, siendo necesaria su renovación [5]. Ante toda esta información, la población es la más afectada porque diariamente está expuesta a diferentes contaminaciones y concentraciones de PM_{2.5}.

Existe evidencia científica significativa de que las partículas finas (PM_{2.5}) tienen un mayor impacto negativo en la salud humana. Varios estudios han informado niveles de PM_{2.5} en diferentes ciudades del mundo [6–8]. Los riesgos para la salud humana relacionados con la exposición a PM_{2.5} y sus elementos tóxicos también se llevaron a cabo en varias ciudades [9,10]. La mayoría de estos estudios revelaron que, aunque las concentraciones de PM_{2.5} no excedieron los límites establecidos por los estándares de calidad del aire, los impactos en la salud relacionados con la exposición a la contaminación del aire son clave para evaluar el riesgo para la salud humana para controlar y reducir la contaminación del aire urbano.

Este estudio tuvo como objetivo estimar el riesgo para la salud asociado con PM_{2.5} para los residentes viviendo en el Área Metropolitana de Lima (MAL), en Perú. El índice de calidad del aire (ICA) fue aplicado para encontrar información relacionada con la calidad del aire y su variación temporal del Niveles de PM_{2.5} en el MAL de 2014 a 2023, y así identificar las temporadas en las que la calidad del aire se convirtió en un problema para la población local. Además, se realizó la evaluación de riesgos para la salud (HRA) estimado utilizando los valores recomendados por la UE y la OMS. La HRA ofrece información sobre El riesgo o peligro que representa un lugar para la salud humana. La información encontrada puede ser utilizado por los gobiernos locales para gestionar eficientemente la calidad del aire y ayudar a los tomadores de decisiones a mejorar implementar y desarrollar mejores estrategias y regulaciones para mejorar la calidad del aire y mitigar los efectos sobre la salud humana.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el Área Metropolitana de Lima (AML) o Lima Metropolitana (75°30'18" S y 77°53'02" W) constituida por los distritos de la Provincia de Lima y la Provincia constitucional del Callao. Es el área urbana más grande, extensa y poblada del Perú y una de las cinco megaciudades más grandes de América Latina, con una superficie territorial de 2683 km² y una población estimada de 11,3 millones de habitantes (població

densidad de Lima 3620 hab/km² y Callao 8050 hab/km²) en 2023 [11]. Según el boletín de calidad ambiental de la Autoridad de Transporte Urbano (ATU), la AML posee el 68,6% (más de 2 millones de vehículos) del parque de vehículos livianos y pesados del Perú [12], los cuales funcionan principalmente con petróleo, sus derivados y líquidos de gas natural como el diésel (alrededor del 46% del consumo total de combustible líquido), el GLP (24%) y la gasolina/diésel (20%) [13].

Las fuentes fijas de contaminación del aire en la lucha contra el lavado de dinero incluyen las industrias química, metalúrgica, siderúrgica, textil, minera no metálica y papelera e imprenta. El clima de la AML es subtropical, con una temperatura promedio anual de 19 °C, humedad relativa del 80% y precipitación promedio anual de 10 mm anuales, y cielos nublados casi todo el año.

2.2. Datos de calidad del aire PM_{2.5}

La AML cuenta con una red de estaciones de monitoreo de calidad del aire en tiempo real instaladas en 10 distritos: Ate Vitarte (ATE), Huachipa (HUA), San Juan de Lurigancho (S JL), Santa Anita (STA), Puente Piedra (PP), San Borja (SBJ), Campo de Marte (CM), Carabaylo (CRB), Villa María del Triunfo (VMT) y San Martín de Porres (SMP) que están a cargo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SEHAMHI). Estas estaciones están instaladas en entornos urbanos y reportan cada hora las concentraciones de PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ y NO₂.

El SENAMHI proporcionó datos de PM₁₀ (período 2010-2023) de cinco estaciones de monitoreo (SBJ, STA, VMT, S JL y CRB) (Tabla 1). (La información relacionada con cada estación de monitoreo, instrumento y principio utilizado se presenta en el material complementario). PM_{2.5}

El SENAMHI proporcionó datos (período 2014-2023) de cinco estaciones de monitoreo (SBJ, STA, VMT, S JL y CRB) (Figura 1 y Tabla 1).

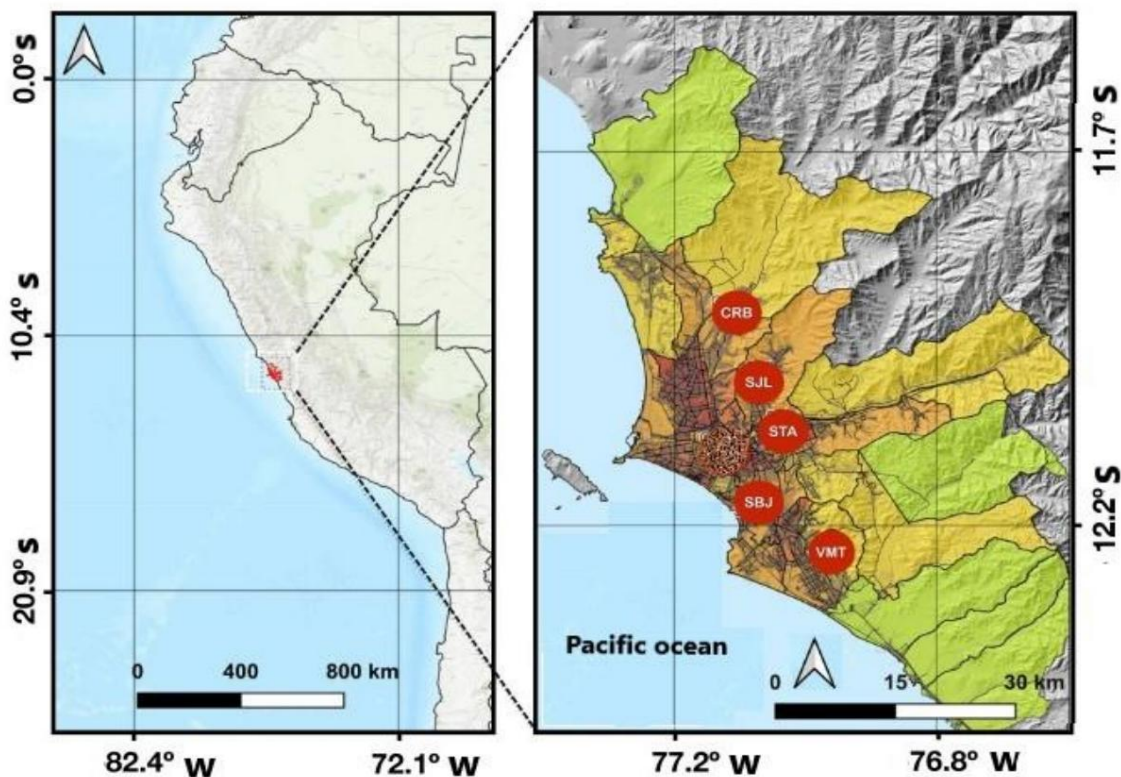


Figura 1. Mapa de localización de AML y la red de estaciones de monitoreo.

Tabla 1. Localización de la estación de monitoreo de calidad del aire del SENAMHI

Estación de monitoreo	Latitud y longitud	Población	Superficie superficial (km ²)
San Borja (SBJ)	12°6'31.1"S, 77°0'27.9"W	133328	11.5
Carabayllo (CRB)	11°54'7.9"S, 77°2'1.1"W	426895	384,89
san juan de lurigancho (S JL)	12°1'8.0"S, 76°59'57.4"W	1240489	131,25
Santa Anita (STA)	12°2'35.9"S, 76°58'17.0"W	232739	10.69
Villa María del Triunfo (VMT)	12°9'59.0"S, 77°55'12.0"	459010	70,57

2.3. Índice de calidad del aire (ICA)

El AQI es un indicador que proporciona información relacionada con la calidad del aire de una zona determinada. Generalmente se utiliza para obtener información de la calidad del aire diaria de cada estación de monitoreo, en esta investigación se aplicó para analizar la variabilidad mensual y encontrar tendencias plurianuales utilizando las cinco estaciones de monitoreo instaladas en la AML, considerando que solo una La estación no es representativa y no reflejaría bien las variaciones de PM_{2,5} dentro de la AML. Así, el ICA diario se calculó utilizando la concentración media de PM_{2,5} de cada estación de monitoreo y el valor límite diario de la UE (25 µg/m³) usando la Ecuación 1 [14].

$$= \frac{2.5}{\text{concentración media de PM}_{2,5}} \times 100 \quad (1)$$

El ICA tiene seis escalas que van de 0 a 500, y se categorizan en bueno (0-50), moderado (51-100), nocivo para la salud para grupos sensibles (101-150), nocivo para la salud (151-200), muy nocivo para la salud (201-300), y peligroso (más de 300). Los valores de AQI inferiores a 100 se consideran satisfactorios, mientras que los valores superiores a 100 indican contaminación del aire y riesgos para la salud [15].

2.4. Evaluación de riesgos para la salud humana

Esta evaluación permite calcular y estimar el peligro o riesgo que un lugar (residencia, área de trabajo o sitio) representa para la salud humana [16]. Por tanto, el riesgo de PM_{2.5} la exposición a la salud humana se estimó utilizando el cociente de peligros (HQ) (Ecuación 2).

$$= \frac{\text{TV}}{\text{EC}} \quad (2)$$

donde TV es el valor de toxicidad y EC se refiere a la concentración de exposición de PM₁₀ (µg/m³) que se calcula mediante la Ecuación 3 [17]. Como no se encontró ningún valor de toxicidad para PM_{2,5} en la literatura, TV asumió el valor límite anual de la UE de 20 µg/m³ (HQ1) y el AQG de la OMS de 10 µg/m³ (HQ2).

$$= \left(\frac{\text{CA}}{\text{ET}} \right) \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{AT} \quad (3)$$

donde CA es la concentración promedio mensual de PM_{2.5} para el mejor de los casos, mientras que el cuartil 90 mensual para el peor de los casos, ET es el tiempo de exposición (horas/día), la frecuencia de exposición de EF (días/año), ED es la duración de la exposición (año) y AT es el tiempo promedio obtenido al multiplicar ED x 365 días/año x 24 h/día. Para calcular la exposición de los residentes se consideró que la ET tomó un valor de 24 h/día, la EF fue de 350 días/año y la DE fue de 30 años para los adultos [17].

El riesgo no cancerígeno se refiere a todos los efectos adversos para la salud, excepto el cáncer causado por la exposición. El nivel de referencia de seguridad para la sede central es 1. En base a esto, la exposición a PM_{2,5} podría

induce efectos crónicos no cancerígenos si $HQ > 1$, y ningún riesgo no cancerígeno si $HQ < 1$ [18].

2.5. Análisis estadístico

Los valores de PM_{2.5} obtenidos para el periodo 2014-2023 de cada estación de monitoreo fueron tratados de forma independiente y conjunta (representantes del AML) para encontrar sus estadísticos básicos (mínimo, máximo, promedio, desviación estándar, percentiles (10, 50 y 90). , y número de días que superaron los límites establecidos). Todos los tratamientos estadísticos y gráficos se realizaron en el software libre CRAN R versión 4.2.1 [19] utilizando los paquetes openair [20] y ggplot2 [21].

3. Resultados y Discusiones

3.1. Calidad del aire

Las estadísticas descriptivas de PM_{2.5} registradas en el Área Metropolitana de Lima entre 2014-2023, las cuales fueron calculadas con base en los valores diarios de las 5 estaciones de monitoreo, se presentan en la Tabla 1. De la Tabla 1 es posible ver que el promedio anual varía de 19,5 a 35,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que se encuentran por encima del valor límite anual establecido por la legislación de la UE y la normativa peruana (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) excepto para los años 2015, 2020 y 2023. También se señala que todos los valores promedio anuales superaron los AQS establecidos por la OMS (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en todos los años.

El valor diario máximo anual se registró en 2018 (157 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que el máximo anual más bajo se registró en 2023 (52,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Todos los valores máximos anuales mostraron un comportamiento temporal con dos períodos de picos elevados: antes (2018) y después (2022) de la pandemia de COVID-19. Un comportamiento similar se observó en función del número de días con valores diarios superiores a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en los percentiles 10, 50 y 90, siendo el periodo pico 2022 el que presentó el mayor número de infracciones (1262) que superaron las PM_{2.5} valor límite, así como los valores percentiles más altos.

En el año de mayor violación de los límites anuales de PM_{2.5}, 329 ocurrieron en SJL, 272 en VMT y 268 en STA. El año con menor número de infracciones fue 2020 cuando se aplicaron medidas sanitarias para controlar y prevenir el aumento de contagios debido a la pandemia de COVID-19 con la suspensión de actividades industriales y de transporte, produciendo una mejora en la calidad del aire en muchas ciudades del mundo [22] donde Lima no fue la excepción. [23].

Tabla 1. Estadística descriptiva de las concentraciones anuales de PM_{2.5} (2014-2023) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el Área Metropolitana de Lima

Año	N	Media (DE)	[Mínimo máximo]	10mo percentil	50 percentil	90 percentil	día con PM _{2.5} >25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2014	1375	29,5 (9,95)	[9.24, 67.2]	17.56	28.35	41,83	419
2015	1825	24,1 (8,05)	[9.70, 70.2]	14.54	23.14	34,50	626
2016	1830	27,8 (11,1)	[8.24, 84.8]	15.42	26.09	42.33	774
2017	1825	26,3 (10,5)	[8.22, 119]	13.29	25,90	39.18	725
2018	1825	25,6 (11,1)	[6.86, 157]	13,79	23,99	38.14	551
2019	1825	28,7 (15,6)	[4.89, 148]	13.03	26,87	45,49	323
2020	1830	19,5 (7,53)	[3,74, 53,4]	10,95	18.58	29.29	172
2021	1825	29,3 (11,6)	[3,71, 71,6]	15.13	27,82	44,45	354
2022	1825	35,8 (15,4)	[6,74, 99,9]	18.01	32,75	57,20	1262
2023	1505	23,7 (7,37)	[6.72, 52.4]	14,90	22,89	33,50	474

DE= desviación estándar

En la Figura 1 se muestra una tendencia variable en el promedio anual de PM2.5, primero se nota un ligero aumento del 2014 al 2019, luego se observa que disminuye en el 2020, pero que vuelve a aumentar hasta el 2022, año donde se registra el promedio más alto. Se registraron violaciones de los valores límite de la UE y del ECA peruano. La diferencia entre el promedio y la mediana anual de PM2,5 aumentó de 2014 a 2023, aumentando el número de días con valores elevados de PM2,5. 2023 muestra una disminución de las infracciones. Estos resultados coinciden con los reportados por Valdivia [24] y Ordóñez-Aquino & Gonzales [25], quienes destacan que las PM2.5 son uno de los contaminantes problema para la ciudad de Lima.

Figura 1. Evolución anual de PM10 entre 2014 y 2023 dentro del Área Metropolitana de Lima. Línea continua = valor límite umbral de la UE = $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y curva = percentil 98.

Las concentraciones mensuales de PM2,5 (Figura 2A) fueron más altas en agosto ($48,2 \pm 27,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de 2019, así como en mayo ($48,4 \pm 6,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y agosto ($48 \pm 9,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de 2022. el más bajo registrado en abril ($13,9 \pm 4,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de 2020. Los valores máximos se registraron en mayo y agosto, con un comportamiento similar en todas las estaciones donde ocurrieron la mayor parte de las infracciones entre mayo y septiembre. En general, las concentraciones mensuales de PM2,5 fueron mayores en las estaciones de invierno que en verano. Una posible explicación a los altos niveles de PM2,5 en invierno podría ser la acumulación de PM en la atmósfera baja debido a la reducción del espesor de la capa de mezcla, determinada por las condiciones meteorológicas húmedas de una ciudad costera [26].

En el caso del percentil 98 de PM2.5 mensual (Figura 2 B), mostraron tendencias similares entre los años, excepto para 2020, lo que confirma las emisiones constantes de una fuente importante en la ciudad que es el parque vehicular. En el caso del percentil 98, los valores más altos se midieron entre mayo y agosto, siendo los valores más extremos $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $136 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2018 y 2019 respectivamente. El ICA mensual promedio (Figura 2C) osciló entre 56 (abril de 2020) y 271 (enero de 2018), lo que indica que la calidad del aire en Lima se clasifica de moderada a insalubre. Sin embargo, el percentil 98 (Figura 2D) osciló entre 58 (abril de 2020) y 557 (enero de 2018), lo que indica que hay principalmente meses en los que la calidad del aire no es saludable y es peligrosa para los grupos de población más vulnerables.

Estos resultados indican que a pesar de los avances logrados en la gestión de la calidad del aire, la contaminación del aire en Lima sigue siendo un problema crítico. Esta realidad de que AML continúa teniendo una calidad de aire crítica también fue reportada por Valdivia [24], Silva et al. [27], [28], Tapia et al., y Delgado-Villanueva y Aguirre-Loayza [29].

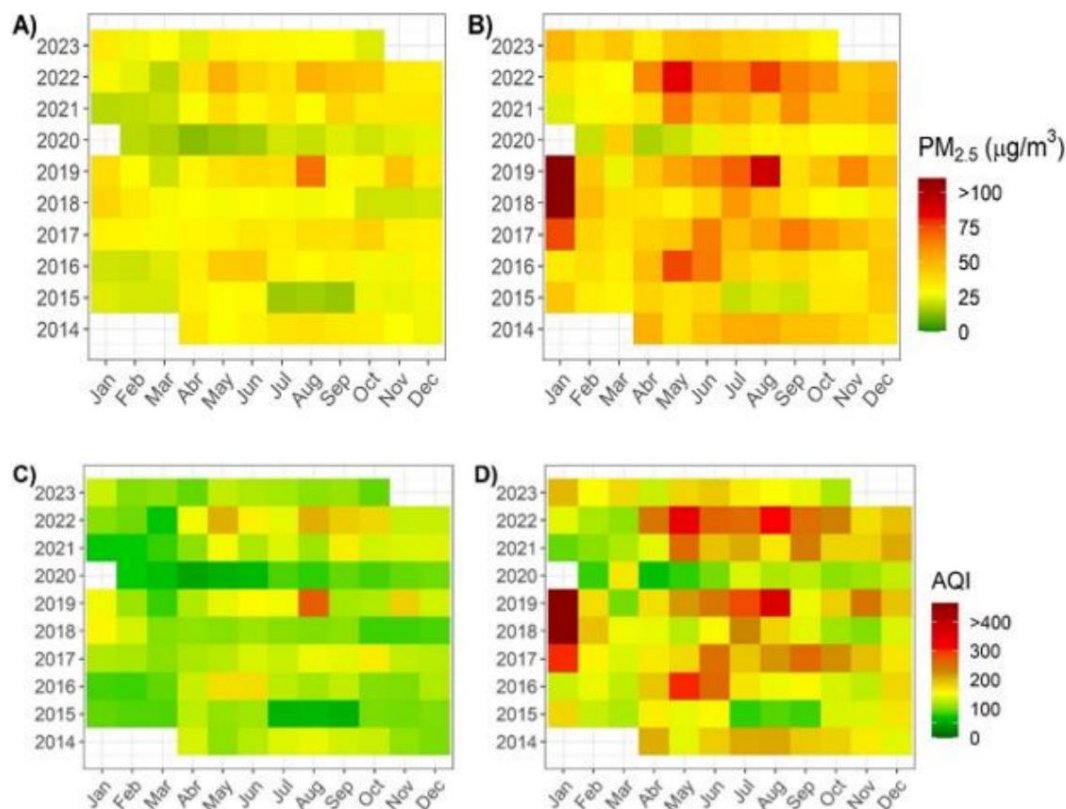


Figura 2. Variación temporal de (A) promedio de concentración de PM_{2.5} (B) percentil 90 de PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) concentración (C) promedio del índice de calidad del aire (ICA) y (D) percentil 90 del índice de calidad del aire (ICA) en el MAL para 2014 - 2023.

Está claro que la calidad del aire de moderada a peligrosa se atribuye en gran medida a la flota de vehículos [24,30], responsable del 58% de la contaminación del aire. Esta situación se ve agravada por el hecho de que un porcentaje importante de los vehículos, tanto en el transporte regular como en el servicio de taxi, son tienen más de quince años, mientras que otras son aún más antiguas, y que gran parte de ellas funcionan principalmente con combustibles fósiles como petróleo, diésel, gasolina, GLP y GNC. Además, la presencia de un 25% de vehículos con más de 20 años de antigüedad, y que aún circulan dentro del Área Metropolitana de Lima, hace necesario tomar medidas y renovar el parque vehicular o sacar de circulación estos autos viejos [24].

La gestión del tráfico también es un factor relevante en este problema, como muestra el TomTom Traffic Index 2022, que sitúa a nuestra capital como la octava ciudad del mundo con peor congestión del tráfico y la primera del continente. Esta congestión no sólo contribuye a la emisión de contaminantes al aire sino que también afecta negativamente la calidad de vida de los habitantes. Es imperativo abordar estos temas desde una estrategia integral que incluya tanto medidas regulatorias como de incentivos para la renovación del parque vehicular, el impulso de tecnologías más limpias y eficientes, así como la mejora de las infraestructuras del transporte público, y la implementación de más políticas eficaces de gestión del tráfico. Además, es fundamental fomentar la investigación y la innovación en el sector de la automoción y la movilidad urbana para encontrar soluciones sostenibles a largo plazo que reduzcan la contaminación atmosférica y mejoren la calidad de vida en nuestras ciudades. El costo de la contaminación por material particulado asociado al transporte vehicular osciló entre 0,21 y 0,29% del PIB de la ciudad de Lima Metropolitana [27].

3.2. Evaluación de riesgos para la salud humana

Las concentraciones de exposición (CE) para los períodos de estudio, calculadas con base en la concentración promedio mensual de PM_{2,5}, oscilaron entre 12,8 µg/m³ (mayo de 2020) y 133,6 µg/m³ (enero de 2019), mientras que la CE se calculó con base en la La concentración mensual del percentil 98 osciló entre 17,9 µg/m³ (abril de 2020) y 150,1 µg/m³ (enero de 2018).

Estos datos muestran un aumento en las concentraciones de exposición de mayo a septiembre.

El HQ1 crónico no cancerígeno calculado en base al valor límite de la UE obtenido para el mejor escenario residencial osciló entre 0,1 y 6,7 en todos los años estudiados, lo que indica un riesgo potencial crónico no cancerígeno para la salud en todos los años del estudio, excepto 2020 y ciertos meses de 2015.

De manera similar, en el peor de los casos, los valores de HQ1 fueron más altos (0,2–7,54) y cada año se encontraron picos mensuales con valores superiores al punto de referencia de seguridad. La variación mensual de HQ1 en el mejor de los casos (Figura 3A) y en el peor de los casos (Figura 3B) muestra un mayor riesgo potencial crónico no cancerígeno en los meses de invierno que en los meses de verano. En el mejor de los casos, el riesgo para la salud no cancerígeno se identificó desde el inicio del monitoreo de PM_{2,5} en 2014 y, en el peor de los casos, el riesgo para la salud no cancerígeno, en ambos escenarios de exposición, se identificó cada año (excepto 2020), principalmente en las temporadas invernales, lo que indica una exposición y riesgo permanente para la salud de la población limeña.

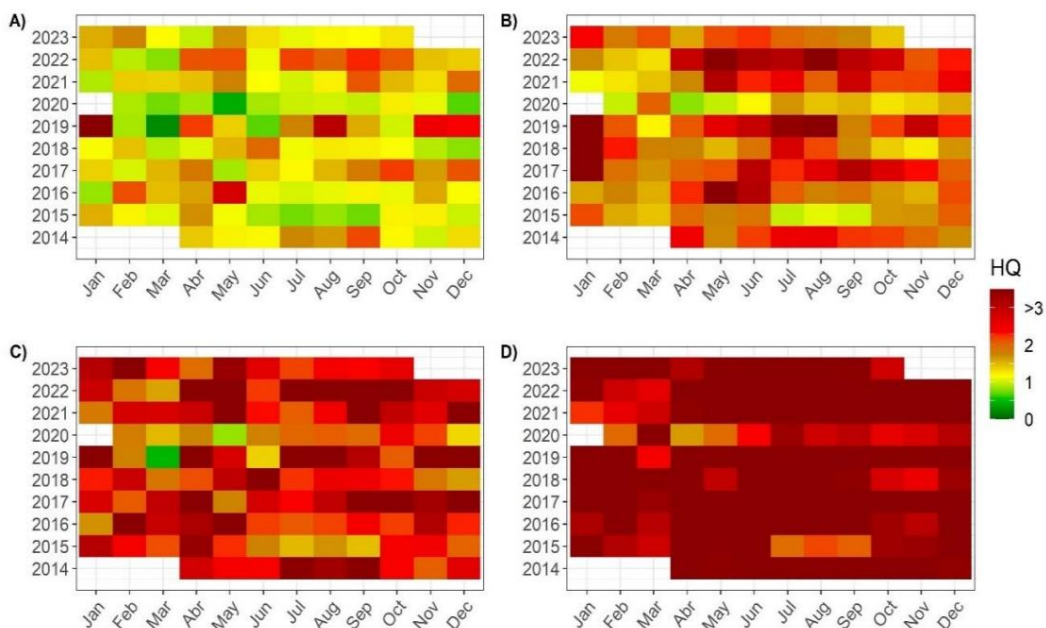


Figura 3. Variación temporal del cociente de peligro (HQ) calculado con base en los valores límite de la UE para los escenarios del mejor de los casos (A) y del peor de los casos (B) y calculado con base en las directrices de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud para el mejor de los casos (C) y Peores escenarios (D) en el Área Metropolitana de Lima para 2014 - 2023.

El HQ2 crónico no cancerígeno calculado con base en el AQG de la OMS obtenido para el mejor de los casos osciló entre 0,3 y 13,4 en todos los años estudiados, lo que indica un riesgo potencial crónico no cancerígeno para la salud en la mayoría de los meses del año, mientras que para el peor de los casos, los valores de HQ2 fueron más altos (0,4–15,1), superando el punto de referencia de seguridad en todos los meses. Los valores mensuales de HQ2, tanto en el mejor escenario (Figura 4C) como en el peor escenario (Figura 4D), fueron mayores en los meses de invierno que en los meses de verano, mostrando un comportamiento constante, indicando que hay un riesgo no cancerígeno durante casi todo el período.

Las diferencias entre las mediciones de riesgo para la salud humana de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire para el período 2014-2023, en la ciudad de Lima, se muestran en la Figura 4 para ambos

los mejores y peores escenarios. Para los valores HQ1, calculados con base en los valores límite de la UE, todas las estaciones de monitoreo excedieron el umbral, excepto SBJ, lo que sugiere que existe un riesgo potencial para la salud en todas las estaciones urbanas, siendo mayor en SJL y STA.

De igual forma, en el caso de HQ2, el riesgo para la salud es mayor en las estaciones urbanas de SJL y STA donde hay tránsito y ambiente industrial. Se observa un patrón similar en el peor de los casos, tanto para HQ1 como para HQ2, con todas las estaciones por encima de 1, lo que indica un riesgo potencial no cancerígeno permanente en la población, especialmente en los más vulnerables. Estos resultados complementan los reportados por Aybar [31], Silva et al. [27], Córdova et al. [32], y Tapia et al. [33].

Figura 4. Variación del cociente de peligros (HQ) calculado con base en los valores límite de la UE (a) y las pautas de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (b) entre las estaciones de monitoreo de la calidad del aire del área metropolitana de Lima para el período 2010 - 2023.

Los altos valores de HQ sugieren que los niveles ambientales de PM_{2.5}, aunque por debajo de los umbrales legislativos, probablemente induzcan diversas patologías crónicas, lo que revela que los riesgos para la salud humana resultantes de la exposición a la contaminación del aire son permanentes en la ciudad de Lima. Este riesgo es especialmente preocupante debido a la posible inducción de diversas enfermedades crónicas [34].

Es fundamental considerar los efectos acumulativos de las PM_{2.5} junto con otros contaminantes del aire, ya que esto podría aumentar la probabilidad de sufrir efectos adversos crónicos no cancerígenos. Estos resultados resaltan la necesidad de revisar y potencialmente reajustar los umbrales legislativos para garantizar una protección adecuada de la salud pública contra la exposición a contaminantes del aire [25]. Además, subrayan la importancia de implementar medidas preventivas y de mitigación para reducir los riesgos asociados con la contaminación del aire, incluso cuando los niveles parecen estar dentro de límites aceptables.

Las limitaciones del estudio surgen de su enfoque exclusivo en las PM_{2.5}, sin tener en cuenta la exposición simultánea a otros contaminantes del aire, lo que lleva a una subestimación del riesgo. Además, el cálculo del riesgo no cancerígeno para la salud se basó en supuestos relacionados con el momento, la frecuencia y la duración de la exposición, que no son específicos de la población analizada y no consideran variaciones de comportamiento individuales. También se supuso que las concentraciones diarias promedio de PM_{2.5}, medidas por la calidad del aire

estaciones de monitoreo, son representativas de toda la ciudad. A pesar de estas limitaciones, los resultados contribuyen a una mejor comprensión de los riesgos potenciales para la salud relacionados con la exposición humana a PM_{2.5} en áreas urbanas, proporcionando información útil para fortalecer la gestión de la calidad del aire en Lima de los diferentes actores responsables.

4. Conclusiones

El nivel promedio anual de PM_{2.5} en la ciudad de Lima osciló entre 19,5 y 35,8 µg/m³, ubicándose por encima del valor límite anual establecido por la legislación de la UE y la normativa peruana (25 µg/m³) excepto para los años 2015, 2020 y 2023. En general, las concentraciones mensuales de PM_{2.5} fueron mayores en las temporadas de invierno que en verano. El ICA mensual promedio osciló entre moderado y peligroso, lo que indica que la calidad del aire no es saludable para los grupos de población sensibles.

El riesgo crónico no cancerígeno, calculado en base al valor límite de la UE y la GCA de la OMS, indica un riesgo crónico permanente para la salud no cancerígeno en todos los meses del año, siendo mayor de mayo a septiembre. No hay una tendencia a la baja en los valores de HQ que indique la existencia de medidas de mejora de la calidad del aire; Sin embargo, la implementación de medidas de mitigación podría reducir aún más el riesgo para la salud, especialmente en el caso de grupos de población sensibles. Las medidas deberían centrarse principalmente en la gestión del parque de vehículos, en particular el tipo de combustible y su calidad.

Contribuciones de los autores: Para artículos de investigación con varios autores, se debe proporcionar un breve párrafo especificando sus contribuciones individuales. Se deben utilizar las siguientes afirmaciones "Conceptualización, XX y YY; metodología, XX; software, XX; validación, XX, YY y ZZ; análisis formal, XX; investigación, XX; recursos, XX; curación de datos, XX; escritura—preparación del borrador original, XX; redacción: revisión y edición, XX; visualización, XX; supervisión, XX; administración de proyectos, XX; adquisición de financiación, YY Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: No aplicable.

Declaración de Consentimiento Informado: No aplicable.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos presentados en este estudio están disponibles previa solicitud al autor correspondiente.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Zhang, G.; Ding, C.; Jiang, X.; Pan, G.; Wei, X.; Sun, Y. Contribución de las fuentes y composiciones químicas de las partículas atmosféricas en un sitio urbano industrial de acero típico. *Ciencia. Rep.* 2020, 10, 1–11, doi:10.1038/s41598-020-64519-x.
- Emisiones de partículas de la EPA ; Washington, Estados Unidos, 2011;
- Vu, BN; Tapia, V.; Ebel, S.; González, GF; Liu, Y.; Steenland, K. La asociación entre el Departamento de Emergencias de Asma Visitas y PM 2.5 Satelital en Lima , Perú. *Reinar. Res.* 2021, 199, 111226, doi:10.1016/j.envres.2021.111226.
- OMS 9 de cada 10 personas en todo el mundo respiran aire contaminado, pero más países están tomando medidas Disponible en línea: <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action> (consultado el 31 de enero de 2024).
- Jáuregui-fung, F.; Almaaroufi, S.; Pulido-castro, N. Anatomía de una ciudad de tránsito informal: análisis de movilidad de la Área Metropolitana de Lima. *Ciencia urbana.* 2019, 3, 1–39, doi:10.3390/urbansci3030067.
- Pereira, gerente general; Oraggio, B.; Teinilä, K.; Custódio, D.; Huang, X.; Hillamo, R. Un estudio químico comparativo de PM 10 en tres ciudades latinoamericanas: Lima, Medellín y Sao Paulo. *Calidad del aire. Atmos. Sanar.* 2019, 12, 1141–1152, doi:10.1007/s11869-019-00735-3.
- Kassomenos, PA; Vardoulakis, S.; Chaloulakou, A.; Paschalidou, AK; Grivas, G.; Borge, R.; Lumbreras, J. Estudio de los niveles de PM₁₀ y PM_{2.5} en tres ciudades europeas: análisis de variaciones intra e interurbanas. *Atmos. Reinar.* 2014, 87, 153–163,

- doi:10.1016/j.atmosenv.2014.01.004.
8. Kunecki, P.; Franús, W.; Wdowin, M. Estudio estadístico y caracterización fisicoquímica del material particulado en el Contexto de Cracovia, Polonia. *Atmos. Contaminación. Res.* 2020, 11, 520–530, doi:10.1016/j.apr.2019.12.001.
 9. Wang, Y.; Wu, Y.; Zheng, F.; Zhang, T.; Wang, M.; Huang, L.; Ventilador, X.; Chen, J.; Xiao, N. Amenaza para la salud de la exposición a oligoelementos ligados a PM_{2.5} en el ingreso hospitalario por asma: un estudio cruzado de casos estratificado en el tiempo. *Reinar. En t.* 2022, 170, 107604, doi:10.1016/j.envint.2022.107604.
 10. Curtis, L. PM_{2.5}, NO₂, incendios forestales y otras exposiciones ambientales están relacionados con una mayor incidencia y gravedad de Covid 19 y tasas de mortalidad. *Reinar. Ciencia. Contaminación. Res.* 2021, 28, 54429–54447, doi:10.1007/s11356-021-15556-0.
 11. INEI Población Peruana Alcanzó Los 33 Millones 726 Mil Personas En El Año 2023 Disponible en línea: <https://m.inei.gov.pe/prensa/noticias/poblacion-peruana-alcanzo-los-33-millones-726-mil-personas-en-el-ano-2023-14470/> (consultado el 29 de enero de 2023).
 12. MTC Parque Automotor Nacional Estimado Por Clase Vehicular, Según Departamento: 2011 - 2022 Disponible en línea: 361 <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344892-estadistica-servicios-de-transporte-terrestre-por-carretera-parque-automotor> (consultado el 30 de enero de 2023).
 13. Indecopi Informe de Lanzamiento Del Estudio de Mercado Sobre Combustibles Líquidos y Gas Licuado de Petróleo En El Perú; Lima, Perú, 2022;
 14. Levei, L.; Hoaghia, MA; Romano, M.; Marmureanu, L.; Moisa, C.; Levei, EA; Ozunu, A.; Cadar, O. Tendencia temporal de PM₁₀ y riesgos asociados para la salud humana durante la última década en la ciudad de Cluj-Napoca, Rumania. *Aplica. Ciencia.* 2020, 10, 1-13, doi:10.3390/APP10155331.
 15. Mohán, M.; Kandya, A. Un análisis de las tendencias anuales y estacionales del índice de calidad del aire de Delhi. *Reinar. Monit. Evaluar.* 2007, 131, 267–277, doi:10.1007/s10661-006-9474-4.
 16. EPA ¿Qué Es La Evaluación Del Riesgo Para La Salud Humana?; Miami, Estados Unidos, 2007;
 17. Guía de evaluación de riesgos de la EPA para Superfund Volumen I: Manual de evaluación de la salud humana (Parte F, Guía complementaria para Evaluación del riesgo de inhalación); Washington, Estados Unidos, 2009; vol. I;
 18. Miclean, M.; Cadar, O.; Levei, EA; Romano, R.; Ozunu, A.; Levei, L. Transferencia de metales (Pb, Cu, Cd y Zn) a lo largo de la cadena alimentaria y evaluación de riesgos para la salud mediante el consumo de leche cruda de vacas criadas en libertad. *En t. J. Medio Ambiente. Res. Salud pública* 2019, 16, 1–14, doi:10.3390/ijerph16214064.
 19. R Team Core Un lenguaje y entorno para la informática estadística. Fundación R para Computación Estadística 2019.
 20. Carslaw, D. Herramientas de código abierto del manual Openair para analizar datos sobre la contaminación del aire. *Reinar. Modelo. Software.* 2019, 224.
 21. Wickham, H.; Chang, W.; Enrique, L.; Pedersen, TL; Wilke, C.; Woo, K. Cree visualizaciones de datos elegantes utilizando la gramática de los gráficos 2023, 1–304.
 22. Rodríguez-urrego, D.; Rodríguez-urrego, L. Calidad del aire durante el COVID-19: Análisis de PM_{2.5} en las 50 ciudades capitales más contaminadas del mundo. *Reinar. Contaminación.* 2020, 266, 115042, doi:10.1016/j.envpol.2020.115042.
 23. Rojas, JP; Urdanivia, FR; Garay, RA; García, AJ; Enciso, C.; Medina, EA; Toro, RA; Manzano, C.; Guzmán, MAL. Efectos del COVID - 19 Medidas de Control de la Pandemia sobre la Contaminación del Aire en el Área Metropolitana de Lima, Perú en América del Sur. *Aire Cual. Atmos. Sanar.* 2021, 14, 925–933, doi:10.1007/s11869-021-00990-3.
 24. Valdivia, SAP Análisis Espacial y Temporal de la Calidad del Aire Determinada por Material Particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima Metropolitana. *Un. Científicos* 2016, 77, 273–283, doi:10.21704/ac.v77i2.699.
 25. Ordóñez-Aquino, C.; Gonzales, GF Calidad Del Aire En Perú No Se Ajusta a Los Valores Recomendados Por La Organización Mundial de La Salud (OMS). *Rev. médica Hered.* 2023, 34, 236–238, doi:10.20453/rmh.v34i4.5155.
 26. Reátegui-Romero, W.; Sánchez-ccoillo, OR; Andrade, MDF; Moya-Alvarez, A. Estimación de PM_{2.5} con WRF/Chem Modelo, Producido por Flujo Vehicular en el Área Metropolitana de Lima. *Abra J. Contaminación del aire.* 2018, 7, 215–243,

- doi:10.4236/ojap.2018.73011.
27. Silva, J.; Rojas, J.; Norabuena, M.; Molina, C.; Toro, RA; Leiva-Guzmán, MA Niveles de partículas en una región sudamericana Megaciudad: El Área Metropolitana de Lima-Callao, Perú. *Reinar. Monit. Evaluar.* 2017, 189, doi:10.1007/s10661-017-6327-2.
 28. Tapia, V.; Carbajal, L.; Vásquez, V.; Espinoza, R.; Vásquez-Velásquez, Cinthya Steenland, K.; Gonzales, GF Reordenamiento Vehicular y Contaminación Ambiental Por Material Particulado (2.5 y 10), Dióxido de Azufre y Dióxido de Nitrógeno En Lima Metropolitana, Perú. *Rev. Perú. Medicina. Exp. Salud Pública* 2018, 35, 190–197, doi:10.17843/rpmesp.2018.352.3250.190.
 29. Delgado-villanueva, A.; Aguirre-loayza, A. Modelación y evaluación de la calidad del aire mediante análisis de agrupamiento gris, Estudio de caso: Lima Metropolitana. *TECNIA* 2020, 30, 114–120, doi:10.21754/tecnia.v30i1.588 TECNIA.
 30. Mishel, G.; Piscina, J.; Jaqueline, R.; Alfredo, C.; Gilberto, L.; Ilizarbe-gonzáles, GM; Rojas-quincho, JP; Cabello-torres, RJ; Alfredo, C. Características químicas e identificación de fuentes de PM10 en dos distritos de Lima, Perú. *Rev.DYNA* 2020, 87, 57–65, doi:10.15446/dyna.v87n215.83688.
 31. Aybar, CEB Contaminación Por Material Particulado (PM10 y PM2.5) y Enfermedades Respiratorias Agudas a Menores de 5 Años En Lomas de Carabayllo, Lima - Perú. *Rev. Investigando. Multidisciplinario.* 2019, 3, 1–8.
 32. Córdoba, EJD; Aguirre, VT; Apestegui, VV; Ibargüen, LO; Vu, BN; Steenland, K.; Gonzales, Asociación GF de PM2.5 Concentración con Visitas Ambulatorias a Centros de Salud por Enfermedades Respiratorias de Niños Menores de 5 Años en Lima, Perú. *Reinar. Sanar.* 2020, 5, 1–6, doi:10.1186/s12940-020-0564-5.
 33. Tapia, VL; Vásquez-Apestegui, B.; Alcántara-Zapata, D.; Vu, B.; Steenland, K. Asociación entre la temperatura máxima y PM2.5 con los resultados del embarazo en Lima, Perú. *Reinar. Epidemiol.* 2021, 1, 1–7, doi:10.1097/EE9.000000000000179.
 34. Carranza, CC; Maldonado, MD; Arévalo, WG; Pacheco, RA; Giraldo, AV; Loayza, S. Relaciones Entre Calidad Ambiental y Calidad de Vida En Lima Metropolitana. *Rev. Del Inst. Investigando. La Fac. Minas, Metales. Y Ciencias geográficas* 2002, 5, 47–52.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente las de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI y/o los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a 415 personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.