

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**

ESCUELA DE POSGRADO

Unidad de Posgrado de Ingeniería y Arquitectura



**Tendencia temporal de PM 10 y el riesgo asociado para la salud humana en el Área Metropolitana de Lima**

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

**Autores:**

Lucila Amelia De la Cruz Rojas  
Lady Diana Valenzuela Hinojosa

**Asesor:**

Dr. Alex Ruben Huamán De la Cruz

Lima, abril de 2024.

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Alex Ruben Huamán 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 10 y el riesgo asociado para la salud humana en el Área Metropolitana de Lima”** de los autores Lucila Amelia De la Cruz Rojas y Lady Diana Valenzuela Hinostroza tiene un índice de similitud de 18 % 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 nueve días del mes de julio del año 2024



---

Alex Ruben Huamán 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 8:40 horas, se reunieron de forma online sincrónica, bajo la dirección del presidente del jurado Mg. Lizeth Huanca Lopez, secretario PhD. Javier Linkolk López Gonzales; los demás miembros: Dr. Josué Edison Turpo Chaparro, Mg. Esteban Tocto Cano 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 PM10 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: Lucila Amelia De la Cruz Rojas y Lady Diana Valenzuela Hinostroza

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy bueno

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



Presidente



Secretario



Aesor



Miembro



Miembro



Candidato



Candidato

# Tendencia temporal de PM<sub>10</sub> y el riesgo asociado para la salud humana en el Área Metropolitana de Lima

Lucila De La Cruz Rojas , Lady Valenzuela Hinostroza.

## ABSTRACT

El objetivo de este estudio fue evaluar el riesgo para la salud humana asociado con la exposición a PM<sub>10</sub> en residentes del Área Metropolitana de Lima (MAL), Perú, para el mejor de los casos y para el peor de los casos con base en el promedio mensual de PM<sub>10</sub> y percentil 90 de concentración de PM<sub>10</sub>, respectivamente. Las concentraciones horarias de PM<sub>10</sub> entre 2010 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, 40 µg/m<sup>3</sup>) y la Organización Mundial de la Salud (OMS, 15 µg/m<sup>3</sup>) porque no existe un valor de toxicidad para PM<sub>10</sub>. La concentración media anual de PM<sub>10</sub> osciló entre 45,1 µg/m<sup>3</sup> y 96,1 µg/m<sup>3</sup> y estuvo por encima del límite anual establecido por la UE y la OMS. El AQI mostró que Lima se clasifica de moderada a insalubre, pero la mayoría de los días tienen una calidad del aire peligrosa. En el mejor de los casos y en el peor de los casos basados en la UE, ambos mostraron un mayor riesgo potencial crónico no cancerígeno en los meses de verano y primavera, mientras que el GCA de la OMS indicó un riesgo potencial crónico no cancerígeno para la salud en la mayoría de los meses del año. y el peor de los casos, indicó que existe un riesgo no cancerígeno durante la mayor parte del período .

**Palabras clave:** calidad del aire; riesgo para la salud humana; PM<sub>10</sub>

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es un problema que afecta a todos [1] . El material particulado (PM) es uno de los contaminantes del aire constituido por una mezcla compleja de fragmentos sólidos secos y aerosoles líquidos emitidos de fuentes naturales y antropogénicas [2] . El PM puede generarse localmente o transportarse a largas distancias. Su composición química, forma y distribución de tamaños varían mucho en función de su origen y procesos de transformación en la atmósfera [3] . Las PM pueden contener iones inorgánicos, compuestos orgánicos y metálicos, y carbono elemental y se clasifican según su diámetro aerodinámico en partículas gruesas (PM<sub>10</sub>, ≤ 10 µm (micras) de diámetro) y partículas finas (PM<sub>2,5</sub>, ≤ 2,5 (micras) µm de diámetro) [4] . Ambas PM son ampliamente monitoreadas porque su exposición corta o grande puede causar efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente (deterioro de la visibilidad, daños ambientales y daños materiales) [5,6] . Las partículas PM<sub>10</sub> indican una gran variedad de sustancias que incluyen especies carbonosas (carbono elemental y orgánico), compuestos solubles en agua (especies de aniones y cationes) y metales y metaloides [7] . En la literatura científica se informó que las partículas PM<sub>10</sub> pueden provocar una reducción de la función pulmonar, un aumento de las hospitalizaciones y visitas de emergencia, una reducción de la esperanza de vida, un empeoramiento del asma y otras enfermedades respiratorias y un aumento de la mortalidad, entre otras [8,9] .

La Organización Mundial de la Salud (OMS) informó que el 99% de la población mundial todavía respira aire que excede los límites de calidad del aire basados en material particulado, poniendo en riesgo su salud [10]. Además, una actualización de 2022 de la base de datos de calidad del aire ambiente de la OMS (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>) reveló que más de 6.000 ciudades en 117 países muestran niveles nocivos para la salud de partículas finas [11]. La OMS estableció límites de calidad del aire según los cuales las PM<sub>2,5</sub> no deben exceder los 5 µg/m<sup>3</sup> de media anual, o 15 µg/m<sup>3</sup> de media anual, mientras que las PM<sub>10</sub> no deben exceder los 15 µg/m<sup>3</sup> de media anual, o 45 µg/m<sup>3</sup> Media de 24 horas [12].

La contaminación del aire generada por PM generalmente se reporta tanto en áreas rurales como urbanas, y se origina principalmente en actividades antropogénicas relacionadas con la quema de combustibles fósiles, el uso intensivo de leña para calefacción y cocina residencial, la combustión de biomasa, el tráfico de vehículos, el transporte por carretera y otros [13 -15]. En el Perú, el Área Metropolitana de Lima (MAL) es el área metropolitana más grande de este país, la cuarta más grande de América Latina y se posiciona entre las treinta más grandes del mundo. Además, alberga la mayor población (alrededor de 11,3 millones de habitantes para 2024, lo que muestra un aumento del 1,41% con respecto a 2023), el mayor parque vehicular y una variedad de empresas instaladas (por ejemplo, industria textil, maderera, química, alimentaria.) dentro del MAL. 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 MAL, y que actualmente el 85% del transporte público utiliza diésel como combustible, mientras que una pequeña proporción funciona con gas. naturales y electricidad. Asimismo, el 24% del parque vehicular tiene más de 20 años y necesita ser renovado [16]. Ante toda esta información, la población es la más afectada porque diariamente está expuesta a diferentes contaminaciones y concentraciones.

Varios estudios han informado niveles de PM<sub>10</sub> en ciudades de todo el mundo [17,18]. Los riesgos para la salud humana relacionados con la exposición a PM<sub>10</sub> y sus elementos tóxicos también se llevaron a cabo en varias ciudades [19-21]. La mayoría de estos estudios revelaron problemas con altas concentraciones de PM así como impactos en la salud, por lo tanto, los estudios relacionados con la exposición a la contaminación del aire son clave para evaluar el riesgo para la salud humana y así implementarlos para controlar y mitigar la contaminación del aire urbano.

Así, este estudio tuvo como objetivo evaluar el riesgo para la salud asociado con las PM<sub>10</sub> para los residentes que viven en una de las aglomeraciones más grandes del Perú. Se aplicó el índice de calidad del aire (ICA) en el aglomerado urbano del Área Metropolitana de Lima (MAL), con el fin de analizar la variación temporal del nivel de contaminación de PM<sub>10</sub> del 2010 al 2023, y así identificar las estaciones en las que la calidad del aire empeora. se convirtió en un problema para la población local. La evaluación de riesgos para la salud (HRA) se estimó utilizando las recomendaciones de la UE y la OMS, que ofrecerán información a los gobiernos locales sobre la eficiencia de la gestión de la calidad del aire. Los resultados encontrados pueden ayudar a los tomadores de decisiones a implementar y desarrollar mejores estrategias y regulaciones para mejorar la calidad del aire y mitigar los efectos en 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 ( $75^{\circ}30'18''$  S y  $77^{\circ}53'02''$  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 la quinta ciudad más grande de América Latina, con una superficie territorial de  $2683 \text{ km}^2$  y una población estimada de 11,3 millones de habitantes (densidad poblacional de Lima  $3620 \text{ hab/km}^2$  y Callao  $8050 \text{ hab/km}^2$ ) en 2023 [22]. 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 [23], que funciona principalmente con diésel (alrededor del 46%), GLP (24%), y gasolina (20%) del consumo total de combustibles [24]. Dentro del AML hay varias fuentes fijas que incluyen industrias química, metalúrgica, siderúrgica, textil, minera no metálica y papelería e imprenta, que probablemente contribuyen a las emisiones de PM. El clima de la AML es subtropical, con una temperatura promedio anual de  $19^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa del 80%, precipitación promedio anual de 10 mm anuales y cielos nublados casi todo el año.

## 2.2. Datos de calidad del aire PM<sub>10</sub>

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), Carabayllo (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 las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> cada hora. El SENAMHI proporcionó datos de PM<sub>10</sub> (período 2010-2023) de cinco estaciones de monitoreo (SBJ, STA, VMT, S JL y CRB) (Figura 1 y Tabla 1).

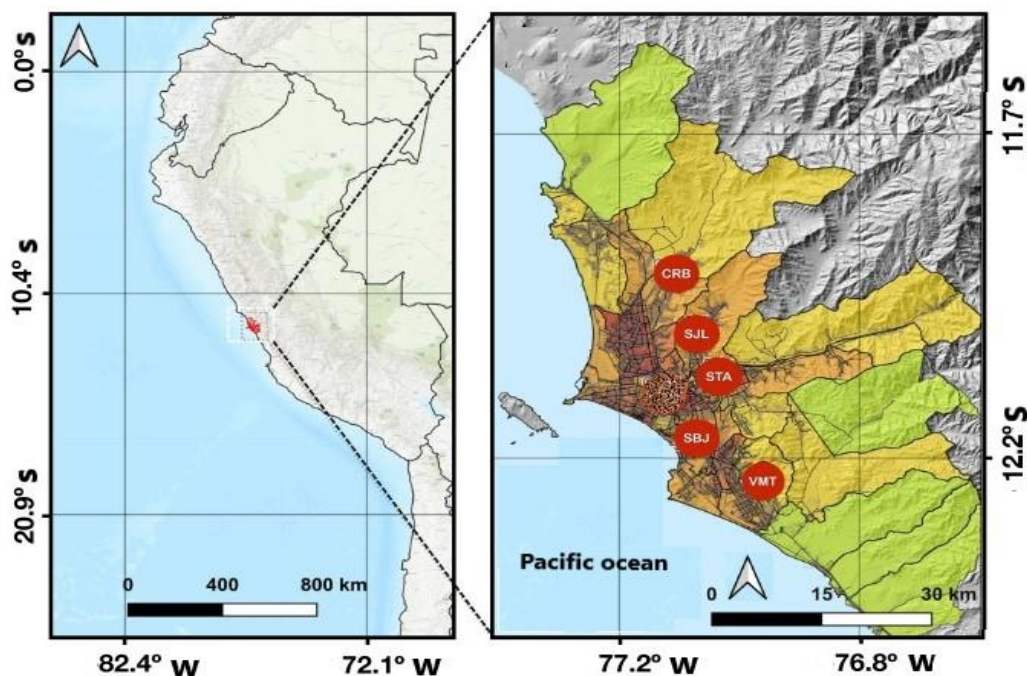


Figura 1. Mapa de localización de AML y la red de estaciones de monitoreo.

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

Estación de monitoreo	Latitud y longitud	Población [25]	Área superficial (km <sup>2</sup> )	Elevación msal
San Borja (SBJ)	12 <sup>0</sup> 6'31.1"S, 77 <sup>0</sup> 0'27.9"W	133328	11.5	128
Carabayllo (CRB)	11 <sup>0</sup> 54'7.9"S, 77 <sup>0</sup> 2'1.1"W	426895	384,89	179
San Juan (SJL)	12 <sup>0</sup> 1'8.0"S, 76 <sup>0</sup> 59'57.4"W	1240489	131,25	240
Santa Anita (STA)	12 <sup>0</sup> 2'35.9"S, 76 <sup>0</sup> 58'17.0"W	232739	10.69	253
Villa María del Triunfo (VMT)	12 <sup>0</sup> 9'59.0"S	459010	70,57	292

### 2.3. Índice de calidad del aire (ICA)

El AQI es un indicador que proporciona información relacionada con la calidad del aire de una determinada zona. 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 estación es no representativo y no reflejaría bien las variaciones de la PM<sub>10</sub> dentro de la AML. Por lo tanto, el ICA diario se calculó utilizando la concentración media de PM<sub>10</sub> de cada estación de monitoreo y el valor límite diario de la UE (40 µg/m<sup>3</sup>) mediante la Ecuación 1 [26].

$$AQI = \frac{PM_{10} \text{ concentration}}{\text{threshold concentration}} \times 100 \quad (1)$$

El ICA utiliza seis escalas que van de 0 a 500, y se clasifican en bueno (0-50), moderado (51-100), perjudicial para la salud para grupos sensibles (101-150), perjudicial 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 [27].

### 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 [28]. Por lo tanto, el riesgo de

exposición a PM<sub>10</sub> para la salud humana se estimó utilizando el cociente de peligro (HQ) (Ecuación 2).

$$HQ = EC/TV \quad (2)$$

donde TV es el valor de toxicidad y EC se refiere a la concentración de exposición de PM<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) que se calcula mediante la Ecuación 3 [29]. Como no se encontró ningún valor de toxicidad para PM<sub>10</sub> en la literatura, TV asumió el valor límite anual de la UE de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (HQ<sub>1</sub>) y el AQG de la OMS de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (HQ<sub>2</sub>).

$$EC = (CA \times ET \times EF \times ED) / AT \quad (3)$$

donde CA es la concentración promedio mensual de PM<sub>10</sub> 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), EF es la frecuencia de exposición (días/año), ED es la duración de la exposición (año), y AT es el tiempo promedio que se obtiene multiplicando 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 [29].

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 HQ es 1. En base a esto, la exposición a PM<sub>10</sub> podría inducir efectos crónicos no cancerígenos si HQ > 1, y ningún riesgo no cancerígeno si HQ < 1 [30].

## 2.5. Análisis estadístico

Los valores de PM<sub>10</sub> obtenidos para el periodo 2010-2023 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 excedieron los límites establecidos). Todos los tratamientos estadísticos y gráficos se realizaron en el software libre CRAN R versión 4.2.1 [31] utilizando los paquetes openair [32] y ggplot2 [33].

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 3.1. Calidad del aire

La Tabla 2 presenta las estadísticas descriptivas de PM<sub>10</sub> para el período 2010-2023, las cuales fueron calculadas con base en los valores diarios de todas las estaciones de monitoreo. La Tabla 2 muestra que el promedio anual de concentración de PM<sub>10</sub> osciló entre  $45,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2023) y  $96,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2013) y que en la mayoría de los años (excepto 2010 ( $46,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 2023 ( $45,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )) se observó que las PM<sub>10</sub> excedieron los límites establecidos por la UE ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y las Normas de Calidad Ambiental (ECA -  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de la normativa peruana. Asimismo, se encontró que la concentración promedio anual de PM<sub>10</sub> en todos los años superó los AQS establecidos por la OMS ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Resultados similares se informaron anteriormente en 2018 para PM<sub>10</sub> en el área metropolitana de Lima [34]. Asimismo, Peláez 2020 [35] informó que Lima entre otras megaciudades durante el período de monitoreo (2010-2017) excede los lineamientos de calidad del aire de la OMS para PM<sub>10</sub>. Estos hallazgos corroboran lo reportado en este trabajo.

El valor máximo anual se registró en 2020 ( $579 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mientras que el valor mínimo anual se encontró en 2010 ( $75,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Los valores máximos anuales mostraron un comportamiento temporal con tres periodos de picos mayores en 2013 ( $423 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2018 ( $435 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 2020 ( $579 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Además, se observa un comportamiento similar para la mayoría de mediciones diarias cuyos valores fueron superiores a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y en los percentiles 10, 50 y 90 con diferencias en los años con mayor pico, siendo 2022 el que presenta mayor número de infracciones (1049 días excedieron los límites de la UE) y 2013 con el percentil 90 más alto. Esta diferencia podría explicarse por el hecho de que no todas las estaciones estuvieron operativas de forma continua todos los años.

En el año con la mayor violación de los límites anuales de  $\text{PM}_{10}$ , 281 ocurrieron en SJL y SBJ seguidos por VMT con 252. El año con el menor número de violaciones fue 2010 cuando solo estaba en operación la estación SBJ, donde se registraron 37 violaciones. En 2011 se inició el monitoreo de  $\text{PM}_{10}$  en STA, en 2012 en VMT y en 2014 en SJL y CRB, lo que explica el aumento de infracciones de 2010 a 2017.

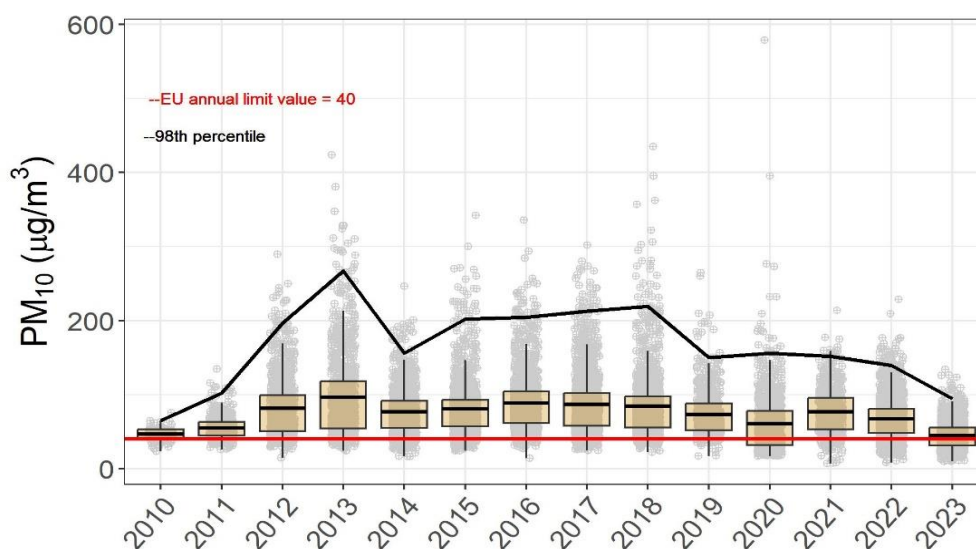
**Tabla 2.** Estadística descriptiva de las concentraciones anuales de  $\text{PM}_{10}$  (2010-2023) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en el Área Metropolitana de Lima

<b>Año</b>	<b>nor te</b>	<b>Media (DE)</b>	<b>[Mínimo máximo]</b>	<b>percent il 10</b>	<b>percent il 50</b>	<b>percent il 90</b>	<b>día con <math>\text{PM}_{10}</math> &gt;50 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></b>
2010	87	46,9 (9,38)	[23.7, 75.6]	35.1	47,9	56.2	37
2011	396	55,0 (15,8)	[25.9, 135]	37,9	51.4	74,7	212
2012	879	81,6 (42,2)	[14.7, 290]	41.1	69,9	142.2	455
2013	905	96,1 (58,4)	[24.4, 423]	43,5	76,5	177,2	415
2014	119 1	76,5 (31,0)	[16.7, 246]	42,6	71,7	116,6	727
2015	136 4	80,9 (37,3)	[24.1, 342]	46.3	73,7	120.1	900
2016	147 7	88,5 (38,8)	[14.5, 336]	49,6	80,4	135.1	888
2017	156 4	86,6 (41,9)	[24.6, 302]	44.1	77,4	139,9	920
2018	135 1	84,7 (45,5)	[22.2, 435]	45.3	74,7	132,4	811
2019	664	73,3 (31,3)	[17.2, 265]	43,7	64,7	113,5	421

20	100	61,0	[17.0, 579]	23.2	53,7	104.4	429
20	7	(40,4)					
20	505	76,9	[7.16, 214]	41,9	72.1	124,4	290
21		(32,1)					
20	174	67,2	[8.40, 229]	36.3	63,7	103.2	1049
22	4	(27,7)					
20	116	45,1	[9.81, 134]	24.3	41,7	71.3	375
23	6	(19,3)					

DE= desviación estándar

La Figura 2 presenta la evolución anual de las PM<sub>10</sub> entre el periodo 2010-2023 dentro del Área Metropolitana de Lima. La Figura 2 muestra un aumento anual promedio de PM<sub>10</sub> de 2010 a 2013, una disminución en 2014 y un aumento adicional de 2014 a 2018. En 2019 y 2020 hubo una reducción consecutiva de PM<sub>10</sub>, que está relacionada con la pandemia de COVID-2019. pandemia, y un aumento en 2021, que podría explicarse por el levantamiento de las restricciones pandémicas. Además, se observa que la mayoría de los valores de PM<sub>10</sub> medidos diariamente están por encima de la mediana (con mayor énfasis en los años 2013 y 2018) y que en todos los años se superó el límite anual establecido por la UE. Por ejemplo, la diferencia entre el promedio y la mediana anual de PM<sub>10</sub> aumentó hasta 2013 (19,6), luego disminuyó en 2014 para aumentar hasta 2018 (10) y volvió a disminuir hasta 2023.



**Figura 2.** Evolución anual de PM<sub>10</sub> entre 2010 y 2023 dentro del Área Metropolitana de Lima (MAL). La línea roja = valor límite umbral de la UE = 40 µg/m<sup>3</sup> y la línea negra = percentil 90.

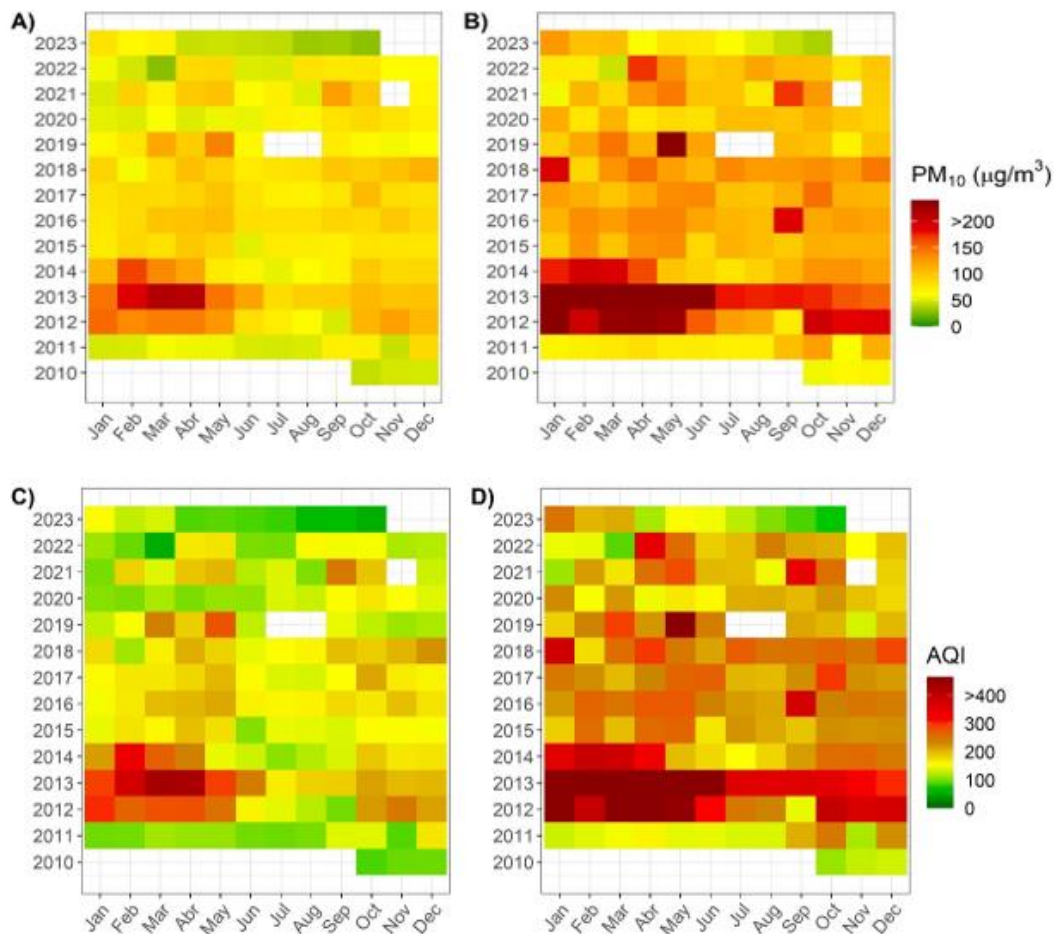
La Figura 3 muestra la variación temporal de la concentración de PM<sub>10</sub>, el percentil 90 de PM<sub>10</sub>, el promedio del índice de calidad del aire (ICA) y el percentil 90 del índice de calidad del aire (ICA) en el MAL para 2010 - 2023. Concentraciones mensuales de PM<sub>10</sub> (Figura 2A) fueron más altos en marzo ( $131 \pm 78,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y abril ( $136 \pm 73,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de 2013, con los más bajos registrados en agosto ( $39,8 \pm 11,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )

y octubre ( $43 \pm 14,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) del año 2023. Los valores máximos se registraron en dos periodos: 1) febrero-abril y 2) septiembre-noviembre, con un comportamiento similar en todas las estaciones, excepto VMT donde los valores más altos se registraron en febrero-abril. En general, las concentraciones mensuales de  $\text{PM}_{10}$  fueron mayores en las temporadas verano-otoño y primavera, manifestándose su permanencia en el aire. Esto puede deberse a la influencia del tráfico, cambios en los patrones climáticos y la intensificación de la industria ya que en los meses de verano e invierno los valores disminuyen [36] .

En el caso del percentil 98 de  $\text{PM}_{10}$  mensual (Figura 2B), mostraron tendencias similares entre años. Los valores más altos se midieron entre marzo ( $318 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y abril ( $326 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de 2013. El ICA mensual promedio (Figura 2C) osciló entre 57,1 (octubre de 2023) y 273 (abril de 2013), 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 73,5 (octubre de 2023) y 418 (abril de 2013), lo que indica que en su mayoría hay días con una calidad del aire 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. Asimismo, las estaciones mostraron menor calidad del aire probablemente por estar cercanas a cerros y vías de alto tránsito, carretera central. Además, las calles aledañas no se encuentran pavimentadas, lo que puede influir en el aumento de los niveles de material particulado.

Este hallazgo contrasta con los reportados por Valdivia [37] , Silva et al. [38] , Tapia y cols. [39] , y Delgado-Villanueva y Aguirre-Loayza [40] .



**Figura 3.** Variación temporal de (A) promedio de la concentración de PM<sub>10</sub> (B) percentil 90 de la concentración de PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) (C) promedio del índice de calidad del aire (ICA) y (D) percentil 90 del índice de calidad del aire (AQI) en el MAL para 2010 - 2023.

La calidad del aire de moderada a peligrosa se atribuye en gran medida al parque de vehículos y al uso de combustibles fósiles como petróleo, diésel, gasolina, GLP y GNC. Además, el aumento de la actividad industrial durante ciertos períodos puede contribuir significativamente a las emisiones de partículas [17,41], ya que los cambios estacionales en los patrones climáticos pueden influir en la dispersión y acumulación de contaminantes del aire [37]. Los meses con valores más altos, como marzo y abril de 2013, pueden estar asociados con una combinación de factores, incluida la intensificación de la actividad humana y condiciones climáticas desfavorables.

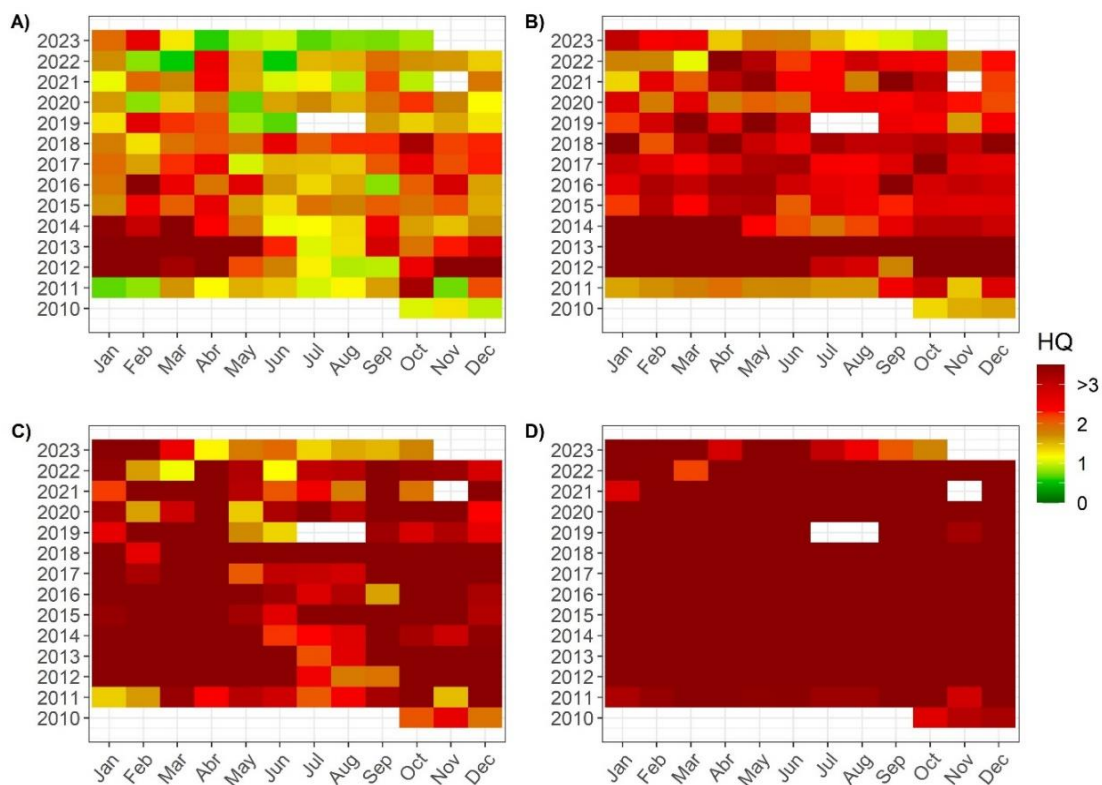
Los resultados del análisis indican una situación de calidad del aire preocupante en Lima para la UE, con concentraciones de PM<sub>10</sub> consistentemente por encima de los límites establecidos, picos de contaminación preocupantes y una distribución temporal que resalta la influencia de múltiples factores en la calidad del aire en la región. Estos hallazgos subrayan la necesidad de medidas urgentes para abordar y mitigar la contaminación del aire en la ciudad, ya que Lima es considerada una de las ciudades más contaminadas de América Latina en términos de PM<sub>10</sub>. [42].

### 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<sub>10</sub>, oscilaron entre 40,8 µg/m<sup>3</sup> (octubre de 2023) y 131,2 µg/m<sup>3</sup> (abril de 2013), mientras que la CE se calculó con base en la La concentración mensual del percentil 98 osciló entre 63,6 µg/m<sup>3</sup> (octubre de 2023) y 200,4 µg/m<sup>3</sup> (abril de 2013). Estos datos muestran un aumento de las concentraciones de exposición en dos periodos: verano y primavera.

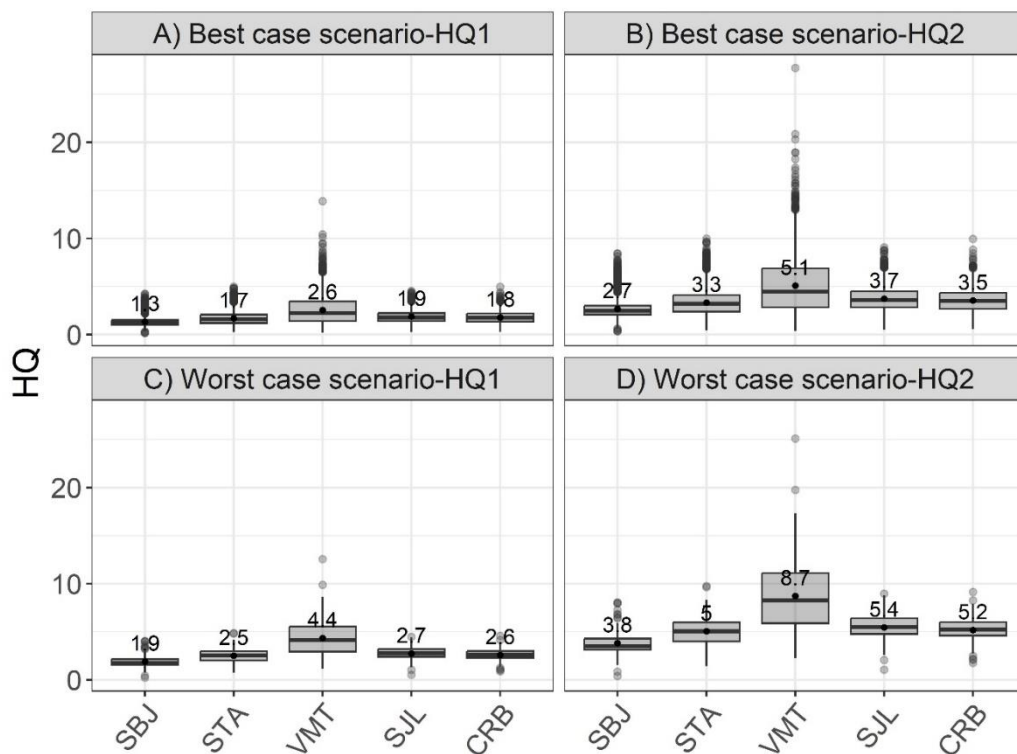
1 crónico no cancerígeno calculado en base al valor límite de la UE obtenido para el mejor escenario residencial osciló entre 0,2 y 3,3 en todos los años estudiados. De manera similar, en el peor de los casos, los valores de HQ<sub>1</sub> fueron más altos (0,8–5,1) y cada año se encontraron picos mensuales con valores superiores al punto de referencia de seguridad. La variación mensual de HQ<sub>1</sub> en el mejor de los casos (Figura 4A) y en el peor de los casos (Figura 4B) muestra un mayor riesgo potencial crónico no canceroso en los meses de verano y primavera. En el mejor de los casos, el riesgo para la salud no cancerígeno se identificó desde el inicio del seguimiento más intensivo también hasta 2017, y en el peor de los casos, el riesgo para la salud no cancerígeno se identificó en ambos escenarios de exposición. cada año, lo que indica una exposición y riesgo permanente para la salud de la población limeña.

2 crónico no cancerígeno calculado en base al AQG de la OMS obtenido para el mejor de los casos osciló entre 0,8 y 6,56 (Figura 4C) en todos los años estudiados, lo que indica un posible riesgo crónico no cancerígeno para la salud en la mayoría de los meses del año. mientras que para el peor escenario, los valores de HQ<sub>2</sub> fueron superiores: 2–10 (Figura 4D), superando el benchmark de seguridad en todos los meses, mostrando un comportamiento consistente, indicando que existe riesgo no cancerígeno durante la mayor parte del período .



**Figura 4.** 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 el período 2010 - 2023.

Según la Figura 5, se muestran las diferencias entre las mediciones de riesgos a la salud humana provenientes de las estaciones de monitoreo de calidad del aire para el período 2014-2023, en la ciudad de Lima, tanto para el mejor como para el peor escenario. Para los valores de  $HQ_1$ , todas las estaciones de monitoreo superaron el umbral, lo que indica que existe un riesgo potencial para la salud de la población, siendo mayor en VMT y SJL. De igual forma, en el caso de la  $HQ_2$ , el riesgo para la salud es mayor en las estaciones VMT y SJL. Se observa un patrón similar en el peor de los casos, tanto para  $HQ_1$  como para  $HQ_2$ , con todas las estaciones por encima de 1, lo que indica un riesgo potencial no cancerígeno permanente en la población .



**Figura 5.** 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.

Las estaciones VMT y SJL forman parte del cono sur y cono norte de Lima respectivamente, estas zonas urbanas presentan una alta densidad poblacional, diversidad de actividades (industrial, flota vehicular) y falta de áreas verdes, lo que en combinación con factores meteorológicos estar provocando el mayor riesgo para la salud registrado en todo el período de estudio. Una situación similar fue reportada en años anteriores por Carranza et al, 2002) [43]

Los altos valores de HQ sugieren que los niveles ambientales de PM<sub>10</sub>, aunque por debajo de los umbrales legislativos peruanos, probablemente induzcan diversas patologías crónicas, revelando así que los riesgos para la salud humana resultantes de la exposición a la contaminación del aire son permanentes en la ciudad de Lima. Estos resultados complementan lo ya informado por Aybar [44], Betetta-Gomez et al. (2020) [45], y Sizgorich et al. [46].

Destaca la necesidad de revisar y potencialmente reajustar los umbrales legislativos peruanos para garantizar una protección adecuada de la salud pública contra la exposición a contaminantes del aire como lo mencionaron Ordoñez-Aquino y Gonzales [47]. Además, subrayan la importancia de implementar medidas preventivas y de mitigación para reducir los riesgos asociados a 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<sub>10</sub>, sin tener en cuenta la exposición simultánea a otros contaminantes del aire. 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 asumió que las concentraciones diarias promedio de PM<sub>10</sub>, medidas por las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, 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<sub>10</sub> en áreas urbanas, proporcionando información útil para fortalecer la gestión de la calidad del aire en Lima de los diferentes actores responsables.

Se enfatiza la urgencia de tomar medidas concretas y efectivas para abordar la contaminación del aire en Lima y proteger la salud de sus habitantes. Además, es importante revisar y actualizar continuamente la normativa ambiental para garantizar la seguridad y el bienestar de la población.

#### 4. CONCLUSIONES

Existe evidencia de un problema persistente con la calidad del aire en la ciudad de Lima durante todo el período estudiado 2010-2023. Las concentraciones promedio anuales de PM<sub>10</sub> estuvieron consistentemente por encima de los límites establecidos por la legislación de la UE y las regulaciones peruanas, así como por el WHO-AQG. Estas altas concentraciones de PM<sub>10</sub> indican que la población de Lima está expuesta a niveles peligrosamente altos de partículas contaminantes en el aire, lo que puede provocar efectos crónicos en la salud pública. Así, los niveles de PM<sub>10</sub> a los que está expuesta la población del Área Metropolitana de Lima indican que los riesgos para la salud humana son permanentes, lo que resalta la necesidad de revisar y potencialmente ajustar los umbrales legislativos para asegurar una adecuada protección de la salud pública. Además, subraya la importancia de implementar medidas preventivas y de mitigación para reducir los riesgos asociados a la contaminación del aire, incluso cuando los niveles parecen estar dentro de límites aceptables.

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

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

## REFERENCIAS

1. OMS Cómo la contaminación del aire está destruyendo nuestra salud Disponible en línea: <https://www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health> (consultado el 10 de junio de 2023).
2. Contaminación por partículas (PM) de la EPA Disponible en línea: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> (consultado el 10 de junio de 2023).
3. 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. Repts.* **2020** , *10* , 1–11, doi:10.1038/s41598-020-64519-x.
4. *Emisiones de partículas* de la EPA ; Washington, Estados Unidos, 2011;
5. Manisalidis, I.; Stavropoulou, E.; Stavropoulos, A. Impactos ambientales y de salud de la contaminación del aire: una revisión. *Frente. Sanación pública.* **2020** , *8* , 1–13, doi:10.3389/fpubh.2020.00014.
6. Kim, K.-H.; Kabir, E.; Kabir, S. Una revisión sobre el impacto de las partículas en el aire en la salud humana. *Reinar. En t.* **2015** , *74* , 136–143, doi:10.1016/j.envint.2014.10.005.
7. Correa, MA; Franco, SA; Gómez, LM; Aguiar, D.; Colorado, HA Métodos de caracterización de iones y metales en partículas contaminantes en muestras de PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> de varias fuentes de emisión. *Sostenibilidad* **2023** , *15* , 4402, doi:10.3390/su15054402.
8. Kyung, SY; Jeong, SH Enfermedades respiratorias relacionadas con partículas en suspensión. *Tuberc. Respirar. Dis. (Seúl).* **2020** , *83* , 116–121, doi:10.4046/TRD.2019.0025.
9. Lee, YG; Lee, P.-H.; Choi, SM; An, MH; Jang, A.-S. Efectos de los contaminantes del aire sobre las enfermedades de las vías respiratorias. *En t. J. Medio Ambiente. Res. Salud pública* **2021** , *18* , 9905, doi:10.3390/ijerph18189905.
10. OMS Miles de millones de personas todavía respiran aire no saludable: nuevos datos de la OMS disponibles en línea: <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data> (consultado el 31 de enero de 2024).
11. OMS Organización Mundial de la Salud Disponible en línea: <http://www.who.int/news-room/headlines/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-más-países-están-tomando-medidas> (consultado el 13 de septiembre de 2018).
12. OMS ¿Qué son las directrices de la OMS sobre calidad del aire? Disponible en línea: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines> (consultado el 22 de febrero de 2024).
13. Maciejczyk, P.; Lung-Chi, C.; Thurston, G. El papel de los metales de la

combustión de combustibles fósiles en las asociaciones de salud de la contaminación del aire PM<sub>2.5</sub>. *Ambiente (Basilea)*. **2021** , *12* , 1–34, doi:10.3390/atmos12091086.

14. Solís, R.; Rugir.; Gómez, L.; Vélez-Pereira, AM; López, M.; Fleming, ZL; Fierro, N.; Leiva G., M. Evaluación de la contaminación por partículas en el aire a largo plazo en la ciudad de Coyhaique, Patagonia, Chile. *Clima urbano*. **2022** , *43* , 1–16, doi:10.1016/j.uclim.2022.101144.
15. Karagulian, F.; Belis, California; Francisco, C.; Dora, C.; Prüss-ustün, AM; Bonjour, S.; Adair-rohani, H.; Amann, M. Contribuciones a las partículas ambientales (PM): una revisión sistemática de las contribuciones de fuentes locales a nivel global. *Atmos. Reinar*. **2015** , *120* , 475–483, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.08.087.
16. Jáuregui-fung, F.; Almaaroufi, S.; Pulido-castro, N. Anatomía de una ciudad de tránsito informal: análisis de movilidad del área metropolitana de Lima. *Ciencia urbana*. **2019** , *3* , 1–39, doi:10.3390/urbansci3030067.
17. 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.
18. Kassomenos, PA; Vardoulakis, S.; Chaloulakou, A.; Paschalidou, AK; Grivas, G.; Borge, R.; Lumbreras, J. Estudio de los niveles de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> en tres ciudades europeas: análisis de variaciones intra e interurbanas. *Atmos. Reinar*. **2014** , *87* , 153–163, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.01.004.
19. Behrooz, RD; Kaskaoutis, director general; Grivas, G.; Mihalopoulos, N. Evaluación de riesgos para la salud humana por elementos tóxicos en las condiciones extremas de polvo ambiental observadas en Sistán, Irán. *quimiosfera* **2021** , *262* , 127835, doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127835.
20. De Donno, A.; Giorgi, M. De; Bagordo, F.; Grassi, T.; Identificación, IA; Identificación, FS; Identificación, CE; Feretti, D.; Identificación, VM; Moretti, M.; et al. Riesgo para la salud asociado con la exposición a PM 10 y benceno en tres ciudades italianas. *En t. J. Medio Ambiente. Res. Salud pública* **2018** , *15* , 1–13, doi:10.3390/ijerph15081672.
21. Ghosh, B.; Padhy, PK; Niyogi, S.; Patra, PK; Hecker, M. Un estudio comparativo de la contaminación por metales pesados en el aire ambiente y la evaluación de riesgos para la salud en áreas industriales, urbanas y semiurbanas de Bengala Occidental, India: una evaluación de casos de cáncer cancerígenos, no cancerígenos y adicionales a lo largo de la vida. *Ambientes* **2023** , *10* , 1–17, doi:10.3390/environments10110190.
22. INEI Población Peruana Alcanzó Los 33 Millones 726 Mil Personas En El Año 2023 Available online: <https://m.inei.gov.pe/prensa/noticias/poblacion-peruana-alcanzo-los-33-millones-726-mil-personas-en-el-ano-2023-14470/> (accessed on 29 January 2023).

23. MTC Parque Automotor Nacional Estimado Por Clase Vehicular, Según Departamento: 2011 - 2022 Available online: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344892-estadistica-servicios-de-transporte-terrestre-por-carretera-parque-automotor> (accessed on 30 January 2023).
24. Indecopi *Informe de Lanzamiento Del Estudio de Mercado Sobre Combustible Liquidos y Gas Licuado de Petróleo En El Perú*; Lima, Perú, 2022;
25. INEI Perú: *Proyecciones de Población, Segundo Departamento, Provincia y Distrito, 2018-2022* ; Lima, Perú, 2022; Boletines ;
26. Levei, L.; Hoaghia, MA; Romano, M.; Marmureanu, L.; Moisa, C.; Lo tomé, 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.
27. Mohán, M.; Kandya, A. Un análisis de las tendencias anuales y estacionales del índice de calidad del aire de Delhi. *Reinar. Monitor. Asesor.* **2007** , *131* , 267–277, doi:10.1007/s10661-006-9474-4.
28. EPA *¿Qué Es La Evaluación Del Riesgo Para La Salud Humana?* ; Miami, Estados Unidos, 2007;
29. Guía de evaluación de riesgos de la EPA *para Superfund Volumen I: Manual de evaluación de la salud humana (Parte F, Guía complementaria para la evaluación de riesgos de inhalación)* ; Washington, Estados Unidos, 2009; vol. I;
30. 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.
31. R Team Core Un lenguaje y entorno para la informática estadística. Fundación R para Computación Estadística 2019.
32. Carslaw, D. The Openair Manual Herramientas de código abierto para analizar datos de contaminación del aire. *Reinar. Modelo. Software.* 2019, 224.
33. 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.
34. Encalada-Malca, AA; Cochachi-Bustamante, JD; Rodríguez, PC; Salas, R.; López-Gonzales, JL Un enfoque de visualización espacio-temporal de datos de concentración de PM10 en Lima Metropolitana. *Ambiente (Basilea).* **2021** , *12* , 609, doi:10.3390/atmos12050609.
35. Peláez, L.M.G.; Santos, J.M.; Albuquerque, T.T. de A.; Reis, N.C.; Andreão, W.L.; Andrade, M. de F. Air Quality Status and Trends over Large Cities in South America. *Environ. Sci. Policy* **2020** , *114* , 422–435, doi:10.1016/j.envsci.2020.09.009.

36. Rojas, F.J.; Pacsi-valdivia, S.; Sánchez-ccoylo, O.R. Simulación Computacional e Influencia de Las Variables Meteorológicas En Las Concentraciones de PM 10 y PM 2.5 En Lima Metropolitana Computational Simulation and the Influence of Meteorological Variables on PM 10 and PM 2.5 Concentrations in Metropoli. *Inf. Tecnológica* **2022**, *33*, 223–238, doi:10.4067/S0718-07642022000300223.
37. Valdivia, SAP Análisis Espacial y Temporal de la Calidad del Aire Determinada por Material Particulado PM10 y PM2.5 en Lima Metropolitana. *Un. Científicos* **2016**, *77*, 273–283, doi:10.21704/ac.v77i2.699.
38. Silva, J.; Rojas, J.; Norabuena, M.; Molina, C.; Toro, RA; Leiva-Guzmán, MA Niveles de partículas en una megaciudad sudamericana: el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. *Reinar. Monit. Evaluar.* **2017**, *189*, doi:10.1007/s10661-017-6327-2.
39. Tapia, V.; Carbajal, L.; Vásquez, V.; ESpinoza, R.; Vásquez-Velásquez, Cinthya Steenland, K.; Gonzales, G.F. Reordenamiento Vehicular y Contaminación Ambiental Por Material Particulado (2.5 y 10), Dióxido de Azufre y Dióxido de Nitrógeno En Lima Metropolitana, Perú. *Rev. Peru. Med. Exp. Salud Publica* **2018**, *35*, 190–197, doi:10.17843/rpmesp.2018.352.3250.190.
40. Delgado-villanueva, A.; Aguirre-loayza, A. Modeling and Air Quality Assessment through Grey Clustering Analysis, Case Study: Lima Metropolitana. *TECNIA* **2020**, *30*, 114–120, doi:10.21754/tecnia.v30i1.588 TECNIA.
41. 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. *Reverendo DYNA* **2020**, *87*, 57–65, doi:10.15446/dyna.v87n215.83688.
42. Córdoba, CH; Niño, M.; Portocarrero, L.; Salas, R.; Torres, R.; Rodríguez, PC; Linkolk, J.; Gonzales, L. Evaluación de la calidad del aire y pronóstico de la contaminación mediante redes neuronales artificiales en Lima Metropolitana - Perú. *Ciencia. Repts.* **2021**, *11*, 1–19, doi:10.1038/s41598-021-03650-9.
43. Carranza, C.C.; Maldonado, M.D.; Arévalo, W.G.; Pacheco, R.A.; Giraldo, A. V; Loayza, S. Relaciones Entre Calidad Ambiental y Calidad de Vida En Lima Metropolitana. *Rev. Del Inst. Investig. La Fac. Minas, Metal. Y Ciencias geográficas* **2002**, *5*, 47–52.
44. Aybar, C.E.B. Contaminación Por Material Particulado (PM10 y PM2.5) y Enfermedades Respiratorias Agudas a Menores de 5 Años En Lomas de Carabayllo, Lima - Perú. *Rev. Investig. Multidiscip.* **2019**, *3*, 1–8.
45. Betetta-gómez, J.; Tafur-anzualdo, I.; Medina-ramos, C.; Diaz-Diaz, F. de M. Aprendizaje profundo para predecir visitas ambulatorias por enfermedades respiratorias en un ambiente con alto contenido de PM10. *IEEE XXVII Int. Conf. Electrón. eléctrico. Ing. Computadora.* **2020**, *1*, 1–4, doi:10.1109/INTERCON50315.2020.9220211.
46. Sizgorich, DF; Aquino, CO; Coylo, Odón Sánchez, Gonzales, GF Asociación entre la concentración de hierro en PM10 y la enfermedad de Alzheimer en Lima,

Perú: un estudio ecológico. *ISEE 2023 35º año. Conf. En t. Soc. Reinar. Epidemiol.* **2023** , *1* , 1–5, doi:10.1289/isee.2023.FP-169.

47. Ordoñez-Aquino, C.; Gonzales, G.F. 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.