

Tendencias y escenarios de la contaminación del aire por origen automotriz en Lima Metropolitana

Trends and scenarios of air pollution by automotive origin in Metropolitan Lima

Irma Janet Zegarra Tello ¹, Carlos Francisco Cabrera Carranza ², Rosa Moore Torres ³

Recibido: 08/01/2020 - Aprobado: 01/12/2020 – Publicado: 18/06/2021

RESUMEN

El sector transporte cumple un papel muy importante en el desarrollo de un país tanto en el aspecto social como económico, así mismo, se encuentra altamente relacionado con el cambio climático por ser el principal productor de gases de efecto invernadero, situación que no es exenta para el Perú ya que cuenta con un vasto parque automotor. Es por ello que se consideró de interés el analizar las tendencias y escenarios posibles a mediano plazo de la contaminación del aire por fuentes de origen automotor en Lima Metropolitana. La investigación se encuentra circunscrita en un enfoque cuantitativo, utilizándose técnicas como la encuesta y el análisis documental. Se concluye que Lima Metropolitana se ubica en el escenario 2, consumo de combustibles fósiles líquidos en proceso de mejora de su calidad, con la tecnología EURO III y la introducción progresiva de vehículos del tipo EURO IV, demostrándose resultados menores con el paso de los años respecto a los estándares nacionales y a los estándares internacionales en cuanto a la medición del SO₂ y del NO₂, y en cuanto a las tendencias, existe una prevalencia de continuar con el uso de combustibles fósiles líquidos.

Palabras clave: Contaminantes ambientales; regulación; emisiones vehiculares; calidad del aire.

ABSTRACT

The transport sector plays an especially important role in the development of a country, both socially and economically. It is also highly related to climate change as it is the main producer of greenhouse gases, a situation that is not exempt for Peru, since it has a vast fleet of vehicles. For this reason, it was considered of interest to analyze the trends and possible medium-term scenarios of air pollution from automotive sources in Metropolitan Lima. The research is circumscribed in a quantitative approach, using techniques such as survey and documentary analysis. It is concluded that Metropolitan Lima is located in scenario 2, consumption of liquid fossil fuels in the process of improving its quality, with the technology EURO III and the progressive introduction of vehicles of the type EURO IV, showing lesser results over the years regarding national standards and international standards in terms of SO₂ and NO₂ measurement, and in terms of trends, there is a prevalence of continuing to use liquid fossil fuels.

Keywords: Environmental pollutants; regulation; vehicle emissions; air quality.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. E-mail: irmajanet.zegarra@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2227-7708>

2 Profesor Principal - Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.
E-mail: ccabrera@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3404-412X>

3 Docente de Postgrado - Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Industrial. Lima, Perú.
E-mail: kmooret@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7608-9377>

I. INTRODUCCIÓN

El sector transporte cumple un papel muy importante en el desarrollo de un país tanto en el aspecto social como económico; social ya que moviliza a las personas según sus necesidades hacia diferentes lugares ya sea por fines, personales o laborales y en el aspecto económico ya que moviliza la carga dentro y fuera de las ciudades, siendo un elemento impulsor de la industria nacional (Izurieta et al., 2013), así mismo se encuentra altamente relacionado con el cambio climático ya que es el principal productor de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, el metano, el dióxido de nitrógeno, el ozono, etc. (Böhler-Baedeker et al., 2014; IPCC, 2014; Jia et al., 2018), debido al uso de combustibles fósiles líquidos como la gasolina de 84 octanos y el Diésel B5; y combustibles gaseosos como el Gas Natural y el Gas Licuado de Petróleo (PETROPERU, 2019). El Perú es uno de los países que cuenta con un vasto parque automotor, las razones son diversas: El ingreso de vehículos de segunda mano provenientes del mercado asiático, ingreso de vehículos nuevos con marcadas diferencias entre sí por sus sistemas de control de emisiones, y el fuerte impulso al uso del vehículo personal frente al de transporte público. A través de un estudio realizado por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA, 2012) con el fin de monitorear la calidad del aire en 32 distritos de Lima por medio de una metodología de análisis (muestreo pasivo: Captador Pasivo Passam y el método activo Estándar EPA 40 CFR PL 50 App B) en dos estaciones: verano e invierno, comprendido entre los años 2000 y 2011, se demostró que el principal contaminante era el material particulado, PM 10 y PM 2.5, así mismo se evidenció la disminución de los valores de Dióxido de Azufre (SO₂) producto de la reducción de azufre (ppm) en los combustibles y el cambio de consumo a combustibles más limpios como el Gas Natural Vehicular (GNV), Gas

Licuado de Petróleo (GLP), Gashol y otros (DIGESA, 2012). Dicha situación ha conllevado a reconocer dos conceptos importantes en el contexto ambiental en el cual se desenvuelve el transporte urbano: Las tendencias y escenarios posibles que repercuten en la calidad del aire. Las tendencias (Tabla 1) se relacionan a los cambios del consumo respecto al tipo de combustible, ya que hasta antes del año 1990 era tradicional el uso combustibles fósiles líquidos como la gasolina en los motores de automóvil, y del petróleo diésel en los de camiones y ómnibus, y después del referido año, en el Perú se promueve la capacidad alternativa en las unidades vehiculares de utilizar combustibles fósiles gasificados de menor peso molecular como el GNV o el GLP, considerados como combustibles más limpios (Peña Vinasco, 2014), cuya característica distintiva es la escasa generación de los subproductos moleculares contaminantes, muy dañinos para la salud humana, así mismo la intervención de la tecnología para el uso de la electricidad como impulsor de energía (Hall, 2016).

Los escenarios posibles que repercuten en la calidad del aire se encuentran a merced de las Políticas del Estado Peruano para el sector transportes, así como los Objetivos prioritarios de la Política Nacional de transporte urbano⁴, adicionalmente se consideran los Objetivos del desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (Tabla 2), los que a su vez van a condicionar las diversas perspectivas a las que se encuentra expuesto el parque automotor urbano.

Los escenarios son considerados según tipo de combustible y tipo de tecnología vehicular EURO vigente, identificándose al parque automotor urbano peruano, para ser más precisos, el limeño, bajo una tecnología desactualizada como la EURO III, mientras que en los

Tabla 1. Tendencias del consumo de combustibles-2019

Tendencias del consumo de combustibles
Vehículo que consume combustible fósil líquido con altos contenidos de contaminantes.
Vehículo que consume combustibles fósiles líquidos en proceso de mejora de su calidad.
Vehículo que consume combustibles fósiles líquidos de calidad mejorada.
Vehículo que consume solo combustibles fósiles gaseosos GNV o GLP.
Vehículo que consume 100% electricidad.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Aspectos Normativos que condicionan los escenarios que repercuten la calidad del aire

Políticas del Estado Peruano para el sector transportes	Objetivos prioritarios de la Política Nacional de transporte urbano	Objetivos del desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas
<ul style="list-style-type: none"> Política 8: Descentralización política, económica y administrativa. Política 11: Promoción de la igualdad de oportunidades sin discriminación. Política 19: Desarrollo Sostenible y Gestión Ambiental. Política 21: Desarrollo en infraestructura y vivienda. Política 24: Estado eficiente y descentralizado 	<ul style="list-style-type: none"> Contar con sistemas de transporte público eficaces para el desplazamiento de personas. Mejorar la gobernanza del transporte urbano de personas y mercancías. Desarrollar servicios de transporte urbano con adecuada infraestructura para los usuarios. Satisfacer las necesidades de transporte urbano de la población, en concordancia con el desarrollo urbano 	<ul style="list-style-type: none"> Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades. Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva, sostenible y fomentar la innovación. Objetivo 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros resilientes y sostenibles. Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones-MTC, 2019); (Sanahuja, 2015)

países vecinos como Chile predomina la norma EURO V para todas las categorías vehiculares desde el año 2013; y en el caso de Brasil, los vehículos en uso cuentan también con la tecnología EURO V desde el año 2012, cabe resaltar que en el Perú, recién a partir de marzo 2018 ingresaron los vehículos de la tecnología EURO IV, de allí el reconocimiento de cinco escenarios para cada vehículo de transporte urbano que transitan en Lima Metropolitana (Tabla 3).

La presente investigación consideró como objetivo analizar las tendencias y escenarios posibles a mediano plazo de la contaminación del aire por fuentes de origen automotor en Lima Metropolitana, para ello se consideró en primer lugar, identificar las tendencias y escenarios posibles a mediano plazo de la contaminación del aire por fuentes de origen automotor en Lima Metropolitana, en segundo lugar, calcular las concentraciones medias de los contaminantes identificados en la contaminación del aire, por fuentes de origen automotor, durante los años 2000 al 2015, respecto a los estándares máximos permitidos por la normativa nacional y la normativa internacional (OMS/EPA)5 y en tercer lugar, determinar la evolución de las concentraciones de los contaminantes para el quinquenio (2016-2020) según las proyecciones del definitivo establecimiento de la Tecnología del Combustible flexible. Es por ello que en la presente investigación, la hipótesis general es “Las tendencias y escenarios posibles a mediano plazo de la contaminación del aire por fuentes de origen automotor en Lima Metropolitana, están relacionados al uso de combustibles fósiles líquidos”. Así mismo, el trabajo se justifica porque permitirá la formulación de criterios para la toma competente de decisiones con respecto a la regulación y cambio progresivo del parque automotor con meta final en la propulsión eléctrica completa y la supresión de los combustibles fósiles en el entorno geográfico en estudio.

II. METODOS

La presente investigación se circunscribe dentro de un enfoque cuantitativo (Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, 2014), del tipo descriptivo (Bernal Torres, 2010). La población de estudio lo conformaron las registro de emisiones generadas por las unidades vehiculares registradas por la DIGESA comprendidas entre los años 2000 al 2015, no se ha determinado el tamaño de la muestra de las diferentes concentraciones emitidas por los tipos de combustibles como son: Compuestos orgánicos volátiles, Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono, Compuestos Cloro-Flúor-

Carbono, olores, ruido, vibración, etc., se han considerado las emisiones identificadas en las normas nacionales e internacionales (NO₂, SO₂, Pb, PM10, PM2.5, Ozono, etc.), así como las tecnologías utilizadas para el control de emisiones (EURO), la información provino tanto del Examen de Registros DIGESA, el Examen de Estándares Internacionales (OMS/EPA), así como del Examen del Juicio de Expertos (OMS, 2012).

En cuanto a las Técnicas de Recolección de Datos, se utilizó el análisis documental, para lo cual la información proveniente de la fuente informante DIGESA año 2000 al 2015, conllevó a utilizar a Fichas Uniformes de Registro, ese mismo procedimiento se utilizó para recoger datos homólogos de los estándares OMS/EPA, a partir de comunicados oficiales de las entidades internacionales. En relación al uso de la técnica para encuesta prospectiva a expertos (juicio de expertos), en el presente estudio en número de cinco, es siempre aproximativa y por ello requiere ajustarla en lo posible a la realidad, por lo cual es conveniente utilizar tres respuestas (OPTIMISTA, NORMAL y PESIMISTA) para cada pregunta, cuyos valores, en teoría tienen distribución de probabilidades de tipo BETA (en tres valores discretos). Los tres adjetivos indican, en este caso, “Condiciones” del entorno del que escapan al control y que tiene que aceptarse y adaptarse a ello. La Condición NORMAL indica: “Condiciones consideradas normales, es decir las que cabe esperar del promedio de tendencias actuales del comportamiento del parque automotor en estudio”. Obviamente, las otras dos son las condiciones inferiores (Optimista) y superiores (Pesimista) a las Normales, respectivamente. El experto juzgará, basado en su experiencia y conocimientos, que cabe esperar en cada una de estas tres coyunturas posibles y calificarlas con un número específico, posteriormente se expuso a las fórmulas de la Función de Probabilidades BETA, es posible obtener el valor medio y la varianza de estas tres respuestas a una pregunta dada y se halla, con los valores calculados, la respuesta final única para dicha pregunta.

III. RESULTADOS

Para identificar las tendencias y escenarios posibles a mediano plazo de la contaminación del aire por fuentes de origen automotor en Lima Metropolitana, como primera medida, se evaluaron las “Tendencias”, las mismas que se relacionan con el uso de los combustibles (Tabla 4) demostrándose que el porcentaje en uso de combustibles fósiles líquidos es del 98.92% y el porcentaje en uso de combustibles fósiles gaseosos es del 1.08%.

Tabla 3. Escenarios posibles que repercuten en la calidad del aire

Escenarios	Descripción
Primero	Consumo de combustibles fósiles líquidos con altos contenidos de contaminantes, y la tecnología del vehículo del tipo EURO III.
Segundo	Consumo de combustibles fósiles líquidos en proceso de mejora de su calidad, con la tecnología EURO III y la introducción progresiva de vehículos del tipo EURO IV.
Tercero	Consumo de combustibles fósiles líquidos de calidad mejorada, de la tecnología EURO IV y la introducción progresiva de la tecnología EURO V.
Cuarto	Consumo de combustibles fósiles gaseosos GNV o GLP.
Quinto	Consumo de energía eléctrica (100% eléctrico).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Distribución de unidades vehiculares según consumo por tipo de combustible-Año 2019

Tipo de combustible	N° Unidades Vehiculares	Porcentaje de unidades vehiculares/ Tipo de combustible
Gasolina	1,762,131	98.92%
Diésel 2	450,210	
GLP	15,881	
GNV	8,069	1.08%
Total	2,236,291	100%

En cuanto a la determinación del escenario actual, se evaluaron los resultados de la tendencia del consumo de combustible y los escenarios posibles a mediano plazo de la contaminación del aire por fuentes de origen automotor en Lima Metropolitana, identificándose que actualmente nos encontramos en el segundo escenario porque se continúa usando combustibles fósiles, con una mejora en su calidad según especificaciones técnicas de los combustibles

de PETRO PERÚ⁶ y con el ingreso de vehículos de la tecnología EURO IV⁷.

Para calcular las concentraciones medias de los contaminantes identificados en la contaminación del aire, por fuentes de origen automotor, durante los años 2000 al 2015, respecto a los estándares máximos permitidos por la normativa nacional y la normativa internacional (OMS/EPA), se realizó un análisis documental, tabulación y presentación de la data oficial registrada [2000 – 2015] proveniente de la Dirección General de Salud Ambiental en relación a la concentración media anual de los cinco contaminantes, medidos en el aire contaminado de Lima Metropolitana. (Tabla 5 y Tabla 6).

De la evaluación de las normas nacionales (Tabla 7), se puede observar que el parámetro Dióxido de Azufre ha bajado su grado de exigencia respecto a la norma derogada y la explicación a este hecho estaba fundamentada en las características de los combustibles que se producen en las refinerías del Perú.

Tabla 5. Concentración media anual de los cinco contaminantes, medidos en el aire de Lima Metropolitana, en el periodo [2000 – 2008]

Contaminante	Concentración Anual Media* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)								
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
NO ₂	130	45	26	39	48	47		35	40
SO ₂	52	36	18	46	43	32	42	38	33
Pb	0.21	0.22	0.16	0.21	0.24	0.19			
PM ₁₀								97.76	97.53
PM _{2.5}		55.44	42.12	57.80	60.25	65.37		68.17	73.71

Fuente: DIGESA, Años 2000-2008

Tabla 6. Concentración media anual de los cinco contaminantes, medidos en el aire de Lima Metropolitana, en el periodo [2009 – 2015]

Contaminante	Concentración Anual Media* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
NO ₂	31	25	15	22	23	23	19
SO ₂	21	12	8	11	13	8	8
Pb							
PM ₁₀	97.95	76.10	65.02	62.44	60.49	58.22	75.51
PM _{2.5}	53.55	34.21	41.92	38.80	39.26	34.68	28.62

Fuente: DIGESA, Años 2009-2015

Tabla 7. Estándares Nacionales de Calidad de Aire

Contaminante	Normas Nacionales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM Vigente	Decreto Supremo N° 074-2001-PCM Derogado	Decreto Supremo N° 069-2003-PCM Derogado
NO ₂	100	100	
SO ₂	250*	20*	
Pb	0.5		0.5
PM ₁₀	50	50	
PM _{2.5}	25		

Las muestras de dióxido de azufre corresponden a un muestreo de 24 horas

Fuente: Normas Legales- Gobierno del Perú (OMS, 2012)

Así mismo fue necesario comparar las concentraciones de los contaminantes máximos permisibles por parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental del Gobierno de los Estados Unidos (EPA), propuestos bajo la forma de estándares recomendados para todos los países y entidades interesadas (Tabla 8), sobre las concentraciones máximas, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que para la presente investigación han sido anualmente promediados, para los cinco contaminantes escogidos, y son considerados que no deben excederse para proteger la salud.

Tabla 8. Estándares Internacionales de Calidad de Aire

Contaminante	Normas Internacionales* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	OMS	EPA	Promedio
NO ₂	40	100	70
SO ₂	20	196	108
Pb	---	0,15	0,15
PM ₁₀	20	15	17,5
PM _{2.5}	10	12	11

Fuente: OMS – EPA

Lo anteriormente expresado conllevó a enunciar como Hipótesis de investigación: “Las concentraciones medias de los contaminantes identificados en el aire, por fuentes de origen automotor, durante los años 2000 al 2015 muestran resultados menores con el paso de los años

respecto a los estándares nacionales pero superiores a los estándares internacionales”. Para demostrar la VALIDEZ de esta afirmación se utilizó el método estadístico de KRUSKAL–WALLIS, para ello fue necesario presentar las concentraciones del NO₂ por agrupaciones (Tabla 9).

Para ello se enunció como hipótesis estadísticas:

Ho: No existe diferencia entre las tres épocas de medición del NO₂.

Hi: Existe diferencia entre las tres épocas de medición del NO₂.

El cálculo del H teórico o crítico con un nivel de significancia de **0,05** y con 2 grados de libertad permitió un valor de **Chi²_{0,05} = 5.99 (también llamado H crítico)**, a través de la aplicación de la fórmula para la obtención del índice Kruskal Wallis se obtuvo un H calculado=9.98, debido a que el H calculado > H crítico, entonces se rechaza la hipótesis nula (9.98>5.99), por lo tanto se concluye que las tres épocas de medición del NO₂ (tres columnas) son cualitativamente diferentes, y mutuamente independientes, pues carecen de correlación mutua de tipo Kruskal – Wallis.

En cuanto a la aplicación de la prueba de Kruskal–Wallis, para el caso del contaminante SO₂, el resultado es muy semejante al caso del NO₂ (Tabla 10).

Tabla 9. Concentraciones del NO₂, agrupadas en tres condiciones diferentes

Concentraciones antes del GNV y GLP :2000/2004			Concentraciones después del GNV y GLP:2005/2010			Concentraciones más recientes: 2011/2015		
Año	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango	Año	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango	Año	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango
2000	130	15	2005	47	13	2011	15	1
2001	45	12	2007	35	9	2012	22	3
2002	26	7	2008	40	11	2013	23	4
2003	39	10	2009	31	8	2014	23	5
2004	48	14	2010	25	6	2015	19	2
Suma de Rangos: 58			Suma de Rangos: 47			Suma de Rangos: 15		
Rango promedio:11.6			Rango promedio:9.4			Rango promedio:3.0		
Mediana: 45			Mediana: 35			Mediana: 23		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Concentraciones del SO₂, agrupada en tres condiciones diferentes

Concentraciones antes del GNV y GLP :2000/2004			Concentraciones después del GNV y GLP:2005/2010			Concentraciones más recientes: 2011/2015		
Año	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango	Año	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango	Año	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango
2000	52	15	2005	32	9	2011	8	1
2001	36	11	2007	38	12	2012	11	4
2002	18	7	2008	33	10	2013	13	6
2003	46	14	2009	21	8	2014	8	2
2004	43	13	2010	12	5	2015	8	3
Suma de Rangos: 60			Suma de Rangos: 44			Suma de Rangos: 16		
Rango promedio:12			Rango promedio:8.8			Rango promedio:3.2		
Mediana: 43			Mediana: 32			Mediana: 8		

Fuente: Elaboración propia

Para ello se enunció como hipótesis estadísticas:

Ho: No existe diferencia entre las tres épocas de medición del SO₂.

Hi: Existe diferencia entre las tres épocas de medición del SO₂.

El cálculo del H teórico o crítico con un nivel de significancia de **0,05** y con 2 grados de libertad permitió un valor de $\chi^2_{0,05} = 5.99$ (también llamado H crítico), a través de la aplicación de la fórmula para la obtención del índice Kruskal Wallis se obtuvo un H calculado=9.92, debido a que el H calculado > H crítico entonces se rechaza la hipótesis nula (9.98>5.99), por lo tanto se concluye que las tres épocas de medición del SO₂ (tres columnas) son cualitativamente diferentes, y mutuamente independientes, pues carecen de correlación mutua de tipo Kruskal – Wallis.

Hay pues, gran semejanza en la forma como se presentan, estos dos contaminantes (NO₂, SO₂) provenientes del parque automotor. Ambos tienen tendencia de crecimiento semejante.

En cuanto a los materiales particulados Pb, PM₁₀ y PM_{2.5}, no se le puede dar un tratamiento del tipo Kruskal-Wallis, pues tienen, además de su origen automotor, la particularidad

de estar prohibido el plomo y además provenir de las fábricas de baterías y reciclaje y los materiales particulados estar relacionados con la industria (cemento, sobre todo, las empresas dedicadas a la fundición de metales). Cabe aclarar que para estas no existen atenuantes como el GNV, GLP o GASHOLES a excepción de las fundiciones y por lo tanto deben ser corregidos por métodos diferentes. Con toda seguridad mediante la modernización urgente de las industrias que los producen (cemento, metalurgia, minerales de exportación, y mucho más).

Y en cuanto a determinar la evolución de las concentraciones de los contaminantes para el quinquenio (2016-2020) según las proyecciones del definitivo establecimiento de la Tecnología del Combustible flexible, se consideró la Tabulación y presentación de la data estimada respecto a las concentraciones óptimas (Z), desde el año 2016 al 2019, en el formato BETA de tres entradas probables por dato, tomando el juicio de los 5 expertos (Tablas 11, 12, 13, 14 y 15).

Posteriormente se procedió a tabular la data necesaria a partir del resumen de la evaluación de los cinco expertos y su interpretación (Tabla 16):

La actitud unánime de los 5 expertos muestra optimismo respecto a la posibilidad de bajar las concentraciones de

Tabla 11. Resumen Estimación por 5 expertos de la concentración media anual de contaminantes para Lima Metropolitana para el año 2016

Contaminantes	Experto H.R		Experto P.T.		Experto R.V.		Experto V.H.		Experto H.M.		Parámetros de Contaminantes en Lima Metropolitana Año 2016	
	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	Promedio BETA	Desviación Estándar
Estimación de los expertos												
Dióxido de azufre (SO ₂)	14.67	1.33	11.00	1.67	9.50	1.17	10.67	1.00	14.67	1.33	1.21	1.30
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	24.67	1.33	19.50	1.17	17.83	0.83	16.67	1.67	17.83	0.83	19.30	1.17
Plomo (Pb)	0.25	0.02	0.22	0.02	0.21	0.01	0.25	0.02	0.25	0.02	0.24	0.02
PM ₁₀	65.00	1.67	68.67	1.67	75.00	1.67	70.83	0.83	67.00	1.67	69.30	1.50
PM _{2.5}	34.67	1.33	30.00	1.67	39.50	1.17	37.00	1.67	40.00	1.67	36.23	1.50

Fuente: Juicio de Expertos

Tabla 12. Resumen de Estimación por 5 expertos de la Concentración media anual de contaminantes para Lima Metropolitana para el año 2017

Contaminantes	Experto H.R		Experto P.T.		Experto R.V.		Experto V.H.		Experto H.M.		Parámetros de Contaminantes en Lima Metropolitana Año 2017	
	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	Promedio BETA	Desviación Estándar
Estimación de los expertos												
Dióxido de azufre (SO ₂)	12.67	1.33	12.33	1.67	11.00	1.67	10.33	0.33	14.67	1.33	12.20	1.27
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	19.50	1.17	21.00	1.67	17.83	0.83	15.00	1.67	18.17	1.17	18.30	1.30
Plomo (Pb)	0.26	0.03	0.23	0.01	0.26	0.03	0.19	0.02	0.20	0.01	0.23	0.02
PM ₁₀	67.00	1.67	65.00	1.67	62.67	1.33	55.00	1.67	54.67	1.33	60.87	1.83
PM _{2.5}	37.00	1.67	34.67	1.33	39.50	1.17	30.00	1.67	32.17	0.83	34.67	1.33

Fuente: Juicio de Expertos

Tabla 13. Resumen de Estimación por 5 expertos de la Concentración media anual de contaminantes para Lima Metropolitana para el año 2018

Contaminantes	Experto H.R.		Experto P.T.		Experto R.V.		Experto V.H.		Experto H.M.		Parámetros de Contaminantes en Lima Metropolitana Año 2018	
	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	Promedio BETA	Desviación Estándar
Estimación de los expertos	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	Promedio BETA	Desviación Estándar
Dióxido de azufre (SO ₂)	10.00	1.67	9.00	0.33	7.83	0.83	9.33	1.33	10.50	1.17	9.30	1.07
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	20.00	1.67	19.50	1.17	20.00	0.67	17.83	0.83	12.17	0.83	17.90	1.03
Plomo (Pb)	0.18	0.01	0.20	0.01	0.17	0.02	0.15	0.02	0.13	0.01	0.16	0.01
PM ₁₀	55.00	1.67	60.00	1.67	50.83	0.83	44.67	1.33	50.00	1.67	52.10	1.43
PM _{2.5}	32.67	1.33	30.00	1.67	27.83	0.83	25.00	1.67	22.67	1.33	27.63	1.37

Fuente: Juicio de Expertos

Tabla 14. Resumen de Estimación por 5 expertos de la Concentración media anual de contaminantes para Lima Metropolitana para el año 2019

Contaminantes	Experto H.R.		Experto P.T.		Experto R.V.		Experto V.H.		Experto H.M.		Parámetros de Contaminantes en Lima Metropolitana Año 2019	
	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	Promedio BETA	Desviación Estándar
Estimación de los expertos	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	Promedio BETA	Desviación Estándar
Dióxido de azufre (SO ₂)	7.83	0.83	7.67	1.00	7.83	0.83	9.50	1.17	8.50	0.83	8.30	0.93
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	15	1.67	12.17	0.83	9.50	1.17	14.33	1.67	17.00	1.67	13.60	1.40
Plomo (Pb)	0.15	0.02	0.15	0.01	0.15	0.02	0.15	0.01	0.14	0.01	0.15	0.01
PM ₁₀	55	1.67	47.83	0.83	44.67	1.33	57.83	0.83	50.00	1.67	51.07	1.27
PM _{2.5}	24.67	1.33	22.00	0.67	24.67	1.33	27.83	0.83	25.00	1.67	24.83	1.17

Fuente: Juicio de Expertos

Tabla 15. Resumen de Estimación por 5 expertos de la Concentración media anual de contaminantes para Lima Metropolitana para el año 2020

Contaminantes	Experto H.R.		Experto P.T.		Experto R.V.		Experto V.H.		Experto H.M.		Parámetros de Contaminantes en Lima Metropolitana Año 2020	
	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	Promedio BETA	Desviación Estándar
Estimación de los expertos	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	PB	DE	Promedio BETA	Desviación Estándar
Dióxido de azufre (SO ₂)	7.83	0.83	7.67	1.00	8.17	1.17	6.17	1.17	7.83	0.83	7.50	1.00
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	14.67	1.33	14.17	0.83	10.83	0.83	19.50	1.17	15	1.67	14.83	1.17
Plomo (Pb)	0.15	0.02	0.11	0.01	0.11	0.01	0.15	0.02	0.14	0.01	0.13	0.01
PM ₁₀	52.17	0.83	52.17	0.83	53	1.67	54.67	1.33	55	1.67	53.40	1.27
PM _{2.5}	22.17	0.83	24.67	1.33	27	1.67	30.83	0.83	22.17	0.83	25.37	1.10

Fuente: Juicio de Expertos

Tabla 16. Resumen Estimación por 5 expertos de la Concentración media anual de contaminantes para Lima Metropolitana para el Quinquenio [2016 – 2020]

Parámetros de Contaminantes de origen vehicular en Lima Metropolitana, medidos en (µg/m ³) Años 2016 al 2020									
Año 2016		Año 2017		Año 2018		Año 2019		Año 2020	
Promedio BETA	Desviación Estándar	Promedio BETA	Desviación Estándar	Promedio BETA	Desviación Estándar	Promedio BETA	Desviación Estándar	Promedio BETA	Desviación Estándar
12.10	1.30	12.20	1.27	9.30	1.07	8.30	0.93	7.50	1.00
19.30	1.17	18.30	1.30	17.90	1.03	13.60	1.40	14.83	1.17
0.24	0.02	0.23	0.02	0.16	0.01	0.15	0.01	0.13	0.01
69.30	1.50	60.87	1.53	52.10	1.43	51.07	1.27	53.40	1.27
36.23	1.50	34.67	1.33	27.63	1.37	24.83	1.17	29.75	1.29

Fuente: Juicio de Expertos

estos cinco contaminantes peligrosos durante el quinquenio [2016 – 2020], periodo bajo el **supuesto que continuará aumentando la sustitución de los combustibles tradicionales** (gasolinas y diésel) **por los gaseosos GNV, GLP y los bio-combustibles** en el ámbito del tráfico vehicular en esta ciudad metropolitana.

Sin embargo, con respecto al material particulado y el plomo, la introducción del GNV y el GLP, como sustitutivo parcial de las gasolinas y el Diésel 2 en el tráfico rodado de Lima Metropolitana, no ha representado una respuesta efectiva a la contaminación que experimenta Lima desde hace decenios, sólo se trata de una leve atenuación y estabilización temporal de las tasas de su crecimiento. Por lo tanto, resulta imperativa encontrar la solución correcta que apunta hacia el cambio planificado, progresivo y a largo plazo (20 años) del parque automotor de esta ciudad, que sustituya a los motores de explosión, con combustible líquido o gaseoso o por motores eléctricos, cuyos prototipos se están adoptando en países desarrollados.

Para la etapa [2016-2020], los ítems gaseosos se estabilizan por debajo de los estándares nacionales a excepción del PM 10 y PM 2.5 y del Plomo cuyos resultados fueron comparados con las normas nacionales e internacionales (Tabla 17).

Los resultados para el PM 10 según las Guías de Calidad de Aire de la OMS indican que a nivel de países encontramos en el Objetivo Intermedio-2 (OI-2), este nivel reduce el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente. Respecto al PM 2.5 los resultados indican que estamos en el Objetivo Intermedio-1 (OI-1) es decir que estos niveles están asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las Guías de Calidad de Aire (SINIA, 2015).

IV. DISCUSIÓN

Con respecto al Dióxido de Nitrógeno (NO_2), el 93.33% de los datos de la DIGESA cumplen las normas nacionales y las normas EPA, y el 80% cumple con las normas de la OMS; respecto. Al parámetro Dióxido de Azufre (SO_2), ningún dato DIGESA supera las normas nacionales (porque los valores en la normativa nacional tienen una valla muy alta) y con respecto a las normas internacionales cumple en el 43.75% de las normas de la OMS. Respecto al parámetro Plomo, ningún dato DIGESA supera las normas nacionales, pero el 100% excede las normas EPA.

En relación al Material particulado PM 10, el 11.10% cumple las normas nacionales e incumple el 100% de las normas internacionales. Y en relación al Material particulado PM 2.5, el 100% supera las normas nacionales e internacionales. En cuanto a los particulados, PM 10, PM 2.5, estas partículas microscópicas resultan de la combustión incompleta de la gasolina y diésel y también de las industrias que usan leña y carbón, así como las plantas de elaboración de cementos, fundiciones y fábricas de baterías. Su erradicación resulta muy problemática, por tocar un aspecto vital de la actividad diaria de buena parte de la población, industrias que continúan usando tecnologías y máquinas de poca eficiencia energética. Estos resultados corroboran lo vertido por (Böhler-Baedeker et al., 2014; IPCC, 2014; Jia et al., 2018), quienes a través de sus estudios demuestran que existen una alta relación en el transporte vehicular y el cambio climático, identificándolo como el principal productor de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, el metano, el dióxido de nitrógeno, el ozono, etc. debido al uso de combustibles fósiles líquidos como la gasolina de 84 octanos y el Diésel B5; y combustibles gaseosos como el gas natural y el gas licuado de petróleo.

V. CONCLUSIONES

El analizar las tendencias y escenarios posibles a mediano plazo de la contaminación del aire por fuentes de origen automotor en Lima Metropolitana permitió identificar con respecto a las tendencias, que se continua con el consumo de uso de combustibles fósiles líquidos (98.92%) siendo un elemento que contribuye a ubicar a Lima en el escenario 2, consumo de combustibles fósiles líquidos en proceso de mejora de su calidad, con la tecnología EURO III y la introducción progresiva de vehículos del tipo EURO IV.

En cuanto al cálculo de las concentraciones medias de los contaminantes identificados en el aire, por fuentes de origen automotor, durante los años 2000 al 2015, a través de tratamiento estadístico se demostró resultados menores con el paso de los años respecto a los estándares nacionales y a los estándares internacionales en cuanto a la medición del SO_2 y del NO_2 , sin embargo, para los materiales particulados Pb, PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, se demostró resultados menores con el paso de los años pero superiores a los estándares internacionales, y para el caso de las normas nacionales solo cumplen los particulados Pb y PM_{10} ; pero no se expusieron a un tratamiento estadístico

Tabla 17. Evaluación de los resultados de los años 2016-2020 versus normativa

Contaminante	Resultado promedio Juicio de expertos en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Estándares OMS	Estándares EPA	Promedio estándares internacionales	Normas nacionales
NO_2	16.79	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
SO_2	9.88	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Pb	0.18	--	No Cumple	No Cumple	Cumple
PM_{10}	57.35	No Cumple	No Cumple	No Cumple	Cumple
$\text{PM}_{2.5}$	29.75	No Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple

Fuente: Elaboración propia

por su complejidad en sus métodos de medición (Espinoza-Guillen, 2018).

Y con respecto a la determinación de la evolución de las concentraciones de los contaminantes para el quinquenio (2016-2020) según las proyecciones del definitivo establecimiento de la tecnología del combustible flexible, bajo el juicio de expertos, se muestra optimismo en relación a la posibilidad de bajar las concentraciones de los cinco contaminantes peligrosos, (aun cuando los valores de los particulados bajen no cumplirán los estándares internacionales) bajo el supuesto que se aumentará la sustitución de los combustibles tradicionales (gasolina y diésel) por los gaseosos como GNV, GLP y los bio-combustibles.

VI. REFERENCIAS

- Bernal Torres, C. A. (2010). *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigación-F.G.-Arias-2012-pdf.pdf>
- Böhler-Baedeker, S., Kost, C., Merforth, M., & Kumar, K. (2014). Urban Mobility Plans National Approaches and Local Practice Moving Towards Strategic, Sustainable and Inclusive Urban Transport Planning. *Sustainable Urban Transport Technical Document #13*. <https://trid.trb.org/view/1336015>
- Dirección General de Salud Ambiental - DIGESA. (2011). *II Estudio de Saturación de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana y el Callao*. Ministerio de Salud Peru. http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/informes_tecnicos/Estudio_de_Saturacion_2012.pdf
- Espinoza-Guillen, J. A. (2018). Evaluación espacial y temporal del material particulado PM10 y PM2,5 en Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. *Facultad de Ciencias - Dpto. Acad. Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología UNALM*, 172. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3739>
- Hall, E. (2016). La energía eléctrica, motor impulsor del desarrollo tecnológico. *Revista Prisma Tecnológico*, Vol. 4(Núm. 1). <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/466>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- IPCC. (2014). Entrega concluyente del Quinto Informe de Evaluación: El cambio climático amenaza con impactos irreversibles y peligrosos, pero existen opciones para limitar sus efectos. *IPCC-Grupo Intergubernamental De Expertos, Sobre El Cambio Climático*, 1–5. <http://35.196.33.155/handle/11606/473>
- Izurieta, F., Corral, A., & Guayanlema, V. (2013). Identificación de las necesidades de eficiencia energética en el transporte. *I Congreso Internacional y Expo Científica*, 1, 9. https://www.researchgate.net/profile/Alvaro-Corral-Naveda/publication/283088854_Identificacion_de_las_necesidades_de_eficiencia_energetica_en_el_transporte/links/562a48ef08ae04c2aeb18211/Identificacion-de-las-necesidades-de-eficiencia-energetica-en-el-transporte.pdf
- Jia, S., Yan, G., & Shen, A. (2018). Traffic and emissions impact of the combination scenarios of air pollution charging fee and subsidy. *Journal of Cleaner Production*, 197, 678–689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.117>
- MTC. (2019). *Decreto Supremo N° 012-2019-MTC que aprueba la Política Nacional de Transporte Urbano* -. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-la-politica-nacional-de-transporte-decreto-supremo-n-012-2019-mtc-1759117-2/>
- OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. *Organización Mundial de La Salud*, 25. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?sequence=1
- Peña Vinasco, C. (2014). *Evaluación de la penetración del gas licuado de petróleo como combustible en el sector transporte en Colombia*. Universidad de Los Andes - Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/12651/u686682.pdf?sequence=1>
- PETROPERU. (2019). *Especificaciones Técnicas Gasolina 84 Octanos*. Petróleos Del Perú - MINEM. <https://www.petroperu.com.pe/Docs/spa/files/productos/et-g84.pdf>
- Sanahuja, J. A. (2015). De los Objetivos del Milenio al desarrollo sostenible: Naciones Unidas y las metas globales post-2015. *Centro de Educación e Investigación Para La Paz (CEIPAZ)*, 7, 49–83. <https://ceipaz.org/wp-content/uploads/2020/05/0.Completo-ANUARIO-2014-Def.pdf>
- SINIA. (2015). *Aprueban medidas destinadas a la mejora de la calidad ambiental del aire a nivel nacional*. Sistema Nacional de Información Ambiental - MINAM. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-medidas-destinadas-mejora-calidad-ambiental-aire-nivel-nacional>

