

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“ANÁLISIS CAUSA-EFECTO DE LAS EMISIONES DE PM_{2.5} DEL
TRANSPORTE PÚBLICO CONVENCIONAL A DIÉSEL EN LIMA
METROPOLITANA DURANTE EL PERIODO 2019-2023”**

Presentada por:

ADRIAN RAÚL QUINTANA AQUINO

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima - Perú

2024

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

ANÁLISIS CAUSA-EFECTO DE LAS EMISIONES DE PM2.5 DEL TRANSPORTE PÚBLICO CONVENCIONAL A DIÉSEL EN LIMA METROPOLITANA DURANTE EL PERIODO 2019-2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	15%	3%	3%	Armando Aramayo Bazzetti
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE	

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	www.coursehero.com Fuente de Internet	2%
3	orcid.org Fuente de Internet	2%
4	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	1%
6	ddd.uab.cat Fuente de Internet	1%
7	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina Trabajo del estudiante	1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ANÁLISIS CAUSA-EFECTO DE LAS EMISIONES DE PM 2.5 DEL
TRANSPORTE PÚBLICO CONVENCIONAL A DIÉSEL EN LIMA
METROPOLITANA DURANTE EL PERIODO 2019-2023”**

Presentada por:

ADRIAN RAÚL QUINTANA AQUINO

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Dr. Diego Alejandro Sotomayor Melo
PRESIDENTE

Mg. Sc. Vanessa Sofía Soberón Forsberg
MIEMBRO

Maest. Jerónimo García Villanueva
MIEMBRO

Mg. Sc. Armando Javier Aramayo Bazzetti
ASESOR

Este trabajo se lo dedico a mi familia, por haberme apoyado durante todo momento en mi formación y desarrollo personal y profesional. Ya sea a distancia, cuando llevaba de manera virtual las clases y en el desarrollo de toda la tesis. Todo se lo debo a ellos.

AGRADECIMIENTOS

Al MSc. Armando Aramayo Bazzetti, por su tiempo, el juicio crítico y el apoyo brindado en cada asesoría, para darle sentido a este tema tan amplio y abordarlo de la manera más correcta y precisa.

A la Universidad Nacional Agraria La Molina por la formación académica y por el grato ambiente universitario que propiciaron una etapa universitaria memorable.

A los expertos, quienes dieron su tiempo y sus puntos de vista para validar el modelo propuesto.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. El material particulado menor o igual a 2.5 micras (PM _{2.5}).....	4
2.1.1. Características básicas	4
2.1.2. Impactos en la salud.....	5
2.1.2.1. La asociación del PM _{2.5} con el COVID-19.....	7
2.1.3. Costo económico atribuible al PM _{2.5}	9
2.1.4. Niveles de concentración permitidos a nivel internacional	9
2.1.5. Niveles de concentración permitidos a nivel nacional	10
2.1.6. El PM _{2.5} y el transporte.....	11
2.2. El transporte público en Lima Metropolitana	11
2.2.1. Normativa de emisiones de PM _{2.5} en el sector transporte a nivel nacional	15
2.3. La situación actual o diagnóstico de Lima Metropolitana	17
2.4. El COVID-19 en Lima Metropolitana	20
2.4.1. Medidas de control implementadas	20
2.4.2. Los efectos del COVID-19 en la población.....	21
2.4.3. Los efectos del COVID-19 en las concentraciones de PM _{2.5}	24
2.5. La metodología de la dinámica de sistemas.....	25
2.6. Los diagramas causales	27
2.7. Los diagramas de acumulación y flujo y el modelo del sistema dinámico	30
2.8. Proceso de modelación de los sistemas dinámicos	32
III. METODOLOGÍA.....	34

3.1. Zona de estudio	34
3.2. Equipos y softwares	35
3.3. Datos.....	36
3.4. Método.....	38
3.4.1. Identificación de los factores que causan e influyen en la emisión de PM _{2.5} y estimación de sus aportes a las concentraciones ambientales, provenientes del transporte público convencional a diésel.....	38
3.4.1.1. Identificación de los factores que causan e influyen en la emisión de PM _{2.5} del transporte público convencional a diésel	38
3.4.1.2. Estimación de los valores de emisión de PM _{2.5} proveniente del transporte público convencional a diésel y su comparación con los valores publicados de la ATU	39
3.4.1.3. Estimación de las concentraciones aportadas al PM _{2.5} en el ambiente proveniente de las emisiones del transporte público convencional a diésel.....	40
3.4.2. Evaluación de la morbilidad y mortalidad asociada a la exposición de PM _{2.5} producida por el transporte público convencional a diésel....	41
3.4.2.1. Determinación de los principales efectos adversos en la salud por la exposición de PM _{2.5} en el ambiente	42
3.4.2.2. Estimación de casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de PM _{2.5} en el ambiente y su comparación con los valores de otros estudios relacionados	42
3.4.2.3. Estimación de los casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de PM _{2.5} en el ambiente contribuido por el transporte público convencional a diésel ..	48
3.4.3. Cuantificación del costo económico ambiental atribuido a la exposición de PM _{2.5} provenientes del transporte público convencional a diésel	48

3.4.3.1. Estimación del costo económico ambiental atribuible a la concentración de $PM_{2.5}$ en el ambiente y su comparación con otros estudios previos.....	48
3.4.3.2. Estimación del costo económico ambiental atribuible a la concentración de $PM_{2.5}$ en el ambiente debido a la contribución del transporte público convencional a diésel.....	52
3.4.4. Aplicación del modelo del sistema dinámico	53
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
4.1. Identificación de los factores que causan e influyen en la emisión de $PM_{2.5}$ y estimación de sus aportes a las concentraciones ambientales, provenientes del transporte público convencional a diésel.....	54
4.1.1. Identificación de los factores que causan e influyen en la emisión de $PM_{2.5}$ del transporte público convencional a diésel	54
4.1.2. Estimación de los valores de emisión de $PM_{2.5}$ proveniente del transporte público convencional a diésel y su comparación con los valores publicados de la ATU.....	56
4.1.3. Estimación las concentraciones aportadas al $PM_{2.5}$ en el ambiente proveniente de las emisiones del transporte público convencional a diésel	58
4.2. Evaluación de la morbilidad y mortalidad asociada a la exposición de $PM_{2.5}$ producida por el transporte público convencional a diésel.....	60
4.2.1. Determinación de los principales efectos adversos en la salud por la exposición de $PM_{2.5}$ en el ambiente	60
4.2.2. Estimación de casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de $PM_{2.5}$ en el ambiente y su comparación con los valores de otros estudios relacionados	62
4.2.3. Estimación de casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de $PM_{2.5}$ contribuido por el transporte público convencional a diésel en el ambiente.....	67

4.3.	Cuantificación del costo económico ambiental atribuido a la exposición de PM _{2.5} provenientes del transporte público convencional a diésel	69
4.3.1.	Estimación del costo económico ambiental atribuible a la concentración de PM _{2.5} en el ambiente y su comparación con otros estudios previos.....	69
4.3.2.	Estimación del costo económico ambiental atribuible a la concentración de PM _{2.5} en el ambiente contribuido por el transporte público convencional a diésel	72
4.4.	Aplicación del modelo del sistema dinámico	73
4.4.1.	Proyección del PBI local y la población en Lima Metropolitana para el periodo 2013 al 2040.....	73
4.4.2.	Proyección del número de viajes diarios por transporte público convencional y el PBI per cápita en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040	74
4.4.3.	Proyección de las emisiones de PM _{2.5} primario y NO _x del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana y su aporte en las concentraciones de PM _{2.5} del ambiente en el periodo 2013-2040.....	75
4.4.4.	Proyección de las concentraciones de PM _{2.5} del ambiente en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040.....	76
4.4.5.	Proyección del número de casos de morbilidad y mortalidad, y el costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040	79
4.4.6.	Proyección del número de casos de morbilidad y mortalidad, y el costo económico ambiental atribuido a la contribución de concentración de PM _{2.5} en el ambiente por parte del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040	82
V.	CONCLUSIONES.....	85
VI.	RECOMENDACIONES	86

VII. BIBLIOGRAFÍA	88
VIII. ANEXOS	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características básicas de PM _{2.5}	4
Tabla 2: Impactos en la salud a corto y largo plazo de PM _{2.5}	6
Tabla 3: Niveles máximos de la calidad de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) recomendados para los periodos de exposición a corto y largo plazo, y los objetivos intermedios	10
Tabla 4: Estándares de calidad ambiental para aire del parámetro PM _{2.5}	10
Tabla 5: Clasificación de las unidades del transporte público convencional	12
Tabla 6: LMPs para los vehículos de pasajeros con peso bruto vehicular (PBV) mayor a 2.5 t hasta 3.5 t y vehículos de carga con PBV < 3.5 t con motores con encendido por compresión	16
Tabla 7: LMPs para los vehículos de pasajeros o de carga mayores a 3.5 t de peso bruto vehicular (PBV) con motores con encendido por compresión	16
Tabla 8: Reporte de casos confirmados y fallecimientos por COVID-19 en Lima y Callao para el periodo 2020 - 2023	23
Tabla 9: Años de vida potencial perdidos y costo social por fallecimiento por COVID-19 para Lima y Callao en el 2020 y 2021	24
Tabla 10: Datos (variables) y sus fuentes de obtención referentes a Lima Metropolitana..	36
Tabla 11: Porcentaje de unidades a diésel de la flota total según tipo de unidad vehicular en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023.....	38
Tabla 12: Factores de emisión-concentración para las concentraciones de PM _{2.5}	41
Tabla 13: Las morbilidades consideradas, según sus efectos finales y coeficientes concentración-respuesta en base al rango de edades	44
Tabla 14: Tasa (cada 100 mil habitantes) por efecto final en la salud para Lima Metropolitana.....	39
Tabla 15: Concentración promedio de PM _{2.5} ambiental ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023	47
Tabla 16: Costos unitarios anuales por persona según tipo de morbilidad	50

Tabla 17: Costos anuales por persona según por mortalidad según grupos de edad para Lima Metropolitana	52
Tabla 18: Factores que causan e influyen en la emisión de PM _{2.5} proveniente del transporte público convencional a diésel	54
Tabla 19: Comparación de los valores de emisiones de PM _{2.5} (t/año) reportados por la ATU y los estimados en el presente estudio	56
Tabla 20: Emisiones de PM _{2.5} y NO _x (t/año) y su aporte a las concentraciones de PM _{2.5} en el ambiente (µg/m ³) proveniente de las emisiones del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019 - 2023	58
Tabla 21: Principales impactos negativos asociados a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana según efecto final de morbilidad y mortalidad	61
Tabla 22: Estimaciones de casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición de PM _{2.5} ambiental en Lima Metropolitana	62
Tabla 23: Casos de morbilidad y mortalidad asociado a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 – 2023	64
Tabla 24: Casos de morbilidad y mortalidad (por cada 100 mil habitantes) asociado a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 – 2023 ...	65
Tabla 25: Casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición a PM _{2.5} contribuido por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019-2023.....	68
Tabla 26: Casos de morbilidad y mortalidad (por cada 100 mil habitantes) asociados a la exposición a PM _{2.5} contribuido por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019-2023	68
Tabla 27: Los costos económicos ambientales (millones de dólares) asociados a la exposición de PM _{2.5} ambiental en Lima Metropolitana de la literatura revisada	70
Tabla 28: Estimaciones de los costos económicos ambientales (millones de dólares) atribuible a la concentración de PM _{2.5} en el ambiente en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023	71

Tabla 29: Costo económico ambiental (millones de dólares) atribuible al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019-2023	72
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Viajes motorizados diarios en Lima y Callao durante el periodo 1970–2018..	13
Figura 2:	Distribución de viajes en Lima y Callao para el 2019	14
Figura 3:	Cantidad de unidades del transporte público convencional según clase de vehículo para Lima y Callao para el 2018..	14
Figura 4:	El transporte público en Lima según la antigüedad de la flota y el uso de combustibles al 2020	15
Figura 5:	Emisiones de PM _{2.5} según tipo de fuente para Lima y Callao al 2016 (t/año, aporte porcentual)	17
Figura 6:	Emisiones de PM _{2.5} por categoría vehicular Lima y Callao al 2016 (t/año, aporte porcentual)	18
Figura 7:	Emisiones de PM _{2.5} por tipo de combustible Lima y Callao al 2016 (t/año)....	18
Figura 8:	Emisiones de PM _{2.5} por tecnología vehicular de vehículos a diésel en Lima y Callao al 2016 (t/año, aporte porcentual)..	19
Figura 9:	Emisiones de NOx según el tipo de combustible usado en Lima y Callao al 2016 (t/año).....	19
Figura 10:	Emisiones de NOx por categoría vehicular en Lima y Callao al 2016 (t/año) .	20
Figura 11:	Variación de casos confirmados acumulados de COVID-19 en Perú y Lima Metropolitana, el uso del transporte público, y el consumo eléctrico, frente a las medidas de control implementadas desde marzo hasta mayo del 2020..	21
Figura 12:	Variación de los casos confirmados de COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024.....	22
Figura 13:	Variación de los casos hospitalizados de COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024.....	22
Figura 14:	Variación de los fallecidos de COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024.....	23

Figura 15: Variación de los fallecidos de COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024.....	23
Figura 16: Dinámica de la variación de la temperatura global y sus efectos con la superficie glacial y el cambio climático	28
Figura 17: SFD de la población de infantes y adultos.....	31
Figura 18: Proceso de modelación de los sistemas dinámicos	33
Figura 19: Localización de la Región de Lima Metropolitana.....	34
Figura 20: Lima Metropolitana y sus distritos por zonas	35
Figura 21: Proyección del PBI local y la población en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040.....	73
Figura 22: Proyección del número de viajes diarios por transporte público convencional y el PBI per cápita en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040	74
Figura 23: Comportamiento de las emisiones de PM _{2.5} primario y NO _x del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana y su aporte en las concentraciones de PM _{2.5} del ambiente en el periodo 2013-2040.....	75
Figura 24: Proyección del aporte en las concentraciones de PM _{2.5} del ambiente del transporte público convencional a diésel, del resto de parque automotor, de las fuentes en área, de las fuentes fijas; y de la concentración base determinado por las variables meteorológicas y el entorno físico en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040	77
Figura 25: Proyección del número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040	79
Figura 26: Proyección de la acumulación del número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040.	81
Figura 27: Proyección del número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de	

PM _{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040.	82
---	----

Figura 28: Proyección de la acumulación del número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040.....	84
---	----

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Proceso de modelación	90
Anexo 2: Distribución de la flota vehicular del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023.....	162
Anexo 3: Factores de emisión del transporte público convencional a diésel	164
Anexo 4: Incertidumbres del modelo	166
Anexo 5: Diagrama cualitativo.....	168
Anexo 6: Diagrama cuantitativo	169

RESUMEN

El presente estudio identificó los principales factores que causan e influyen en la emisión de $PM_{2.5}$ y cuantificó el costo económico anual según los casos de morbilidad y mortalidad asociada al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana, mediante la metodología de sistemas dinámicos, durante el periodo 2019-2023. A través de la revisión bibliográfica, se estimaron: las emisiones y concentraciones de $PM_{2.5}$, los impactos en la salud y la valoración económica. Además, se aplicó un modelo dinámico para observar el comportamiento y generar proyecciones al 2040. Los resultados son expresados en promedio, la reducción general tomando en consideración los valores del 2023 frente al 2019 y la reducción específica por la inmovilización obligatoria del 2020 frente al 2019. Es así que, la emisión promedio fue de 207 t/año de $PM_{2.5}$ y su aporte a la concentración promedio fue de $0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos con una reducción general y específica del 43% y 61%, respectivamente. Los casos promedio de morbilidad, mortalidad a corto plazo y mortalidad largo plazo fueron de 4.2, 0.4 y 1.5 personas/100 mil habitantes al año; con una reducción general del 16%, 33% y 39%, respectivamente; mientras que, la reducción específica fue del 45%, 38% y 30%; respectivamente. Y el costo económico ambiental promedio fue de 31.9 millones de dólares/año, con una reducción general y específica del 10% y 43%. Asimismo, se determinó que, para el 2040, se proyectaría que, el número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y mortalidad a largo plazo acumularían 9 368, 770 y 2 436 personas afectadas, respectivamente; y el costo económico ambiental acumularía 524.6 millones de dólares. Se concluye que, medidas como la renovación vehicular son efectivas para aminorar las emisiones, y por consiguiente los efectos adversos en la salud y sus costos asociados.

Palabras clave: Concentración de $PM_{2.5}$, Sistemas Dinámicos, Morbilidad, Mortalidad, COVID-19, Costo ambiental.

ABSTRACT

This study identified the main factors that cause and influence the emission of PM_{2.5} and quantified the annual economic cost according to the cases of morbidity and mortality associated with conventional diesel public transport in Metropolitan Lima, using the dynamic systems methodology, during the period 2019-2023. Through the literature review, PM_{2.5} emissions and concentrations, health impacts and economic valuation were estimated. In addition a dynamic model was applied to observe the behavior and generate projections until 2040. The results are expressed in average, the overall reduction taking into consideration the values of 2023 versus 2019 and the specific reduction due to the mandatory immobilization of 2020 versus 2019. Thus, the average emission was 207 t/year of PM_{2.5} and its contribution to the average concentration was 0.42 µg/m³, both with an overall and specific reduction of 43% and 61%, respectively. The average cases of morbidity, short-term and long-term mortality were 455, 42 and 160 persons/ 100, 000 inhabitants per year, with an overall reduction of 16%, 33% and 39%, respectively, whereas the specific reduction was 45%, 38% and 30%, respectively. Furthermore, the average cost of air pollution was 31.9 million dollars/year, with an overall and specific reduction of 10% and 43%, respectively. Additionally, it was determined that, up to 2040, the number of cases of morbidity, short- and long-term mortality would accumulate 9 368, 770 and 2 436 people affected, respectively, and the cost of air pollution would accumulate 524.6 million dollars. In conclusion, measures such as vehicle renewal are effective in reducing emissions and, thus, the adverse effects on health and their associated costs.

Keywords: PM_{2.5} concentration, Dynamic Systems, Morbidity, Mortality, COVID-19, Cost of air pollution.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire ha sido una creciente preocupación en las recientes décadas, con un incremento en el número de casos de aguda polución del aire en variedad de ciudades a lo largo del mundo. Se estimó que, a nivel mundial, para el 2020, 7.4 mil millones de personas (97.3% de la población mundial) vivían en áreas donde las concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ exceden la concentración umbral ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que establece la Organización Mundial de la Salud (Greenstone, Hasenkopf, & Lee, 2022). Para el Perú, este escenario no es diferente, uno de los principales problemas ambientales que afronta Lima, su capital, es la mala calidad del aire.

En el 2017, Lima Metropolitana se ubicó en el puesto 16 respecto a las concentraciones de material particulado menor o igual a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), en una comparación entre las 39 mega ciudades del mundo (Silva et al., 2017). En concordancia a ello, la más reciente encuesta en Lima y Callao en el 2023, los habitantes señalaron que el cuarto problema más importante que afecta la calidad de vida en la ciudad es la contaminación ambiental con un 32.8%, y, dentro de este apartado consideran que, el principal problema ambiental más grave es la contaminación del aire por vehículos con un 50.7% (Lima Como Vamos, 2024).

Por otra parte, diversos estudios señalan que la alta concentración de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana ocasiona enfermedades isquémicas del corazón e infartos en adultos de edades entre los 18–64 años (Tapia et al., 2020); mientras que, para niños menores de 5 años, las principales enfermedades relacionadas son: la anemia (Morales-Ancajima et al., 2019), infecciones respiratorias agudas bajas, neumonía y bronquitis aguda (Dávila et al., 2020). Al respecto, estas enfermedades y muertes prematuras generan costos que afectan el crecimiento económico y el desarrollo sostenible de la sociedad. Por ejemplo, para un escenario medio y tomando en consideración un umbral de concentración de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el $PM_{2.5}$ generado

por el transporte vehicular en Lima Metropolitana ocasionaría un promedio de 10 556 muertes prematuras al año con un costo aproximado de 1 500 millones de dólares (tasa de cambio al 2017) (Industrial Economic [IEc], 2021).

Las causas de esta contaminación, exceso de concentraciones de $PM_{2.5}$, son diversas, así lo señala el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2021), que, a través de un inventario de emisiones para el año 2016, determinó que el parque automotor fue el principal contribuyente de la emisión de $PM_{2.5}$, con un 58%, frente al aporte de las industrias y fuentes en área (restaurantes y estaciones de servicio), con un aporte de 26% y 16%, respectivamente. En ese sentido, las categorías vehiculares que más emiten $PM_{2.5}$ son la categoría ómnibus, remolcador y camión. En cuanto al tipo de combustible usado, el diésel es el más contaminante. Por último, la antigüedad del vehículo agrava las emisiones siendo las unidades con 14 años a más (tecnología pre-Euro) las que más aportan a la emisión de este contaminante.

En esa misma línea, cabe resaltar el papel que juega el transporte público en Lima Metropolitana en materia de las emisiones de $PM_{2.5}$, principalmente por las características de su flota vehicular. Para el 2020, la Autoridad de Transporte Urbano (ATU, 2020) reportó que cerca del 29% de la flota total del transporte público convencional en Lima tenía más de 15 años de antigüedad y que el 89% usaba como combustible el diésel; no obstante, en la flota de antigüedad mayor a 15 años, la participación del diésel como combustible principal alcanzaba el 99.5%.

Por lo mencionado en los párrafos anteriores, el objetivo general de este estudio fue identificar los principales factores que causan e influyen en la emisión de $PM_{2.5}$ y cuantificar el costo económico anual según los casos de morbilidad y mortalidad asociada al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana, mediante la metodología de sistemas dinámicos durante el periodo 2019 - 2023. Y los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Identificar los factores que causan e influyen en la emisión de $PM_{2.5}$ y estimar sus aportes a las concentraciones ambientales, provenientes del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 - 2023.

- Evaluar la morbilidad y mortalidad asociada a la exposición de $PM_{2.5}$ ambiental producida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 - 2023.
- Cuantificar el costo económico ambiental anual atribuido a la exposición de $PM_{2.5}$ provenientes del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 - 2023.
- Aplicar la metodología de sistemas dinámicos para desarrollar un modelo que estime las emisiones de $PM_{2.5}$, su impacto en la salud y los costos económicos asociados anualmente, provenientes del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana, permitiendo proyecciones al 2040.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El material particulado menor o igual a 2.5 micras (PM_{2.5})

2.1.1. Características básicas

El material particulado de diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras (PM_{2.5}, por sus iniciales en inglés), también denominado partículas finas, son uno de los más comunes contaminantes atmosféricos. El PM_{2.5} puede ser formado como contaminante primario en el ambiente (generalmente emitido por la combustión) o ser un contaminante secundario producido a partir de óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos totales (HCT) y óxidos de azufre (SO_x) (Echániz, Rojas, & Garibay, 2012). En la tabla 1 se detallan algunas características importantes de las partículas finas.

Tabla 1: Características básicas de PM_{2.5}

Características	Descripción
Diámetro	Menor o igual de 2.5 μm
Compuesto o formado de	Sulfatos, nitratos, amonio, hidrógeno, carbono elemental, compuestos orgánicos, metales (como plomo, cadmio, vanadio, níquel, cobre, zinc, etc.), agua unida a partículas y compuestos orgánicos biogénicos.
Fuentes	Combustión de carbón, petróleo, gasolina, productos de transformación del NO _x y del dióxido de azufre (SO ₂), compuestos orgánicos (incluyendo orgánicos biogénicos, como los terpenos), procesos de altas de temperatura, fundiciones y acerías.
Tiempo de vida	Días a semanas

Continuación ...

Distancia de viaje	100 a 1000 km
--------------------	---------------

Adaptado de “Evaluación espacial y temporal del material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima Metropolitana” por Espinoza, 2018, *Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina*, p. 7.

2.1.2. Impactos en la salud

Ahora bien, el tamaño de las partículas influye en el comportamiento del contaminante en la atmósfera y su potencial de daño en los seres vivos por mayor ingreso en los organismos, en otras palabras, a menor tamaño de la partícula el ingreso en el sistema respiratorio es mayor (Lee & Greenstone, 2021), incluso alcanzando los sacos alveolares (Pozzer et al., 2022). Los efectos directos podrían ocurrir vía agentes que son capaces de cruzar el epitelio pulmonar hacia el sistema circulatorio, tales como constituyentes solubles del PM_{2.5} (por ejemplo, metales de transición e hidrocarburos aromáticos policíclicos), los cuales podrían contribuir al estado inflamatorio del sistema respiratorio a través del incremento del estrés oxidativo, potencialmente conduciendo a aumentos en los riesgos de la salud (Botto et al., 2023).

Según la Organización Mundial de la Salud [OMS o WHO, por sus iniciales en inglés] (2021), y la evidencia que ha recopilado en su publicación, hasta el 2021, la evidencia demuestra una relación causal entre la exposición de contaminación del aire por PM_{2.5} y todas las causas de mortalidad (casusas naturales), así también como las Infecciones Respiratorias Agudas de las vías Bajas o inferiores (IRAB), Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC), Enfermedades Isquémicas del Corazón (EIC), cáncer de pulmón y Accidentes Cerebrovasculares (ACV). Agregando a lo anterior, la evidencia sugiere también una relación para la diabetes tipo 2 (DT2), e impactos en la mortalidad neonatal por el bajo peso en recién nacidos y el corto periodo gestacional (GBD 2019 Risk Factors Collaborators, 2020). Incluso, se sostiene que la exposición a este contaminante podría incrementar a la incidencia y mortalidad de un número mayor de enfermedades que los actualmente considerados, tales como el Alzheimer y otras enfermedades neurológicas (Peter et al., 2019 como se citó en WHO, 2021).

Los estudios Globales de Carga de Enfermedades (GBD, por sus iniciales en inglés) otorgan una consistente y comparativa descripción de la carga de enfermedades y lesiones de múltiples factores de riesgo incluyendo la contaminación del aire (Pozzer et al., 2022). De este modo, se estimó que las concentraciones de PM_{2.5} para el 2019, a nivel mundial, contribuyeron con 118 millones de años de vida ajustados por discapacidad, dicho de otro modo, años perdidos de tener una condición óptima de salud (los cuales son la suma de los años perdidos debido a una muerte prematura y los años vividos con una discapacidad o enfermedad) y 4.14 millones de muertes prematuras, para la EPOC, ACV, tumores malignos de la tráquea, bronquios y pulmón, EIC, y la DT2 (GBD 2019 Risk Factors Collaborators, 2020). Aunque, los valores de las muertes prematuras pueden variar dependiendo de la metodología de estimación (Pozzer et al., 2022). Un par de ejemplos son del estudio de Burnett et al. (2018) que usando el Modelo Global de exposición por Mortalidad (GEMM, por sus iniciales en inglés) calculó unas 8.9 millones de muertes prematuras por año, debido a las enfermedades no transmisibles y las infecciones respiratorias agudas de las vías inferiores. En cambio, solo usando las 5 causas principales de muertes, producto de la EPOC, ACV, tumores malignos de la tráquea, bronquios y pulmón, y EIC; se estimó 6.9 millones de muertes prematuras por año. Para precisar que, los estudios anteriores consideraron una concentración umbral de PM_{2.5} de 2.4 µg/m³.

Los impactos también pueden categorizarse según el lapso de tiempo en el que se pueden registrar los efectos adversos en la salud. A manera de resumen breve, la tabla 2 muestra los impactos a corto y largo plazo de PM_{2.5} en la salud.

Tabla 2: Impactos en la salud a corto y largo plazo de PM_{2.5}

Conta- minante	Impactos a corto plazo	Impactos a largo plazo
PM_{2.5}	Mortalidad, admisión a hospitales por enfermedades respiratorias y cardiovasculares	Mortalidad en infantes y adultos por enfermedades cardiovasculares y cardiopulmonares, y en adultos por cáncer del pulmón

Adaptado de “Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica” por Echániz et al., 2012, *Instituto Nacional de Ecología – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, p. 19.

De este modo, la carga de enfermedades atribuibles al PM_{2.5} para el 2019, es estimado a ser comparable como uno de los mayores riesgos de la salud a nivel mundial, rivalizando con la dieta poco saludable y el consumo de tabaco (GBD 2019 Risk Factors Collaborators, 2020). Tal es el caso que, para el 2021, Greenstone & Hasenkopf (2023) postularon que la exposición a las concentraciones de PM_{2.5} en el ambiente fue la mayor amenaza global para la esperanza de vida, reduciendo 2.3 años de vida a nivel mundial, por delante del consumo de tabaco que redujo 2.2 años de vida.

2.1.2.1. La asociación del PM_{2.5} con el COVID-19

El Coronavirus 2 del Síndrome Respiratorio Agudo Severo (SARS-CoV-2, por sus iniciales en inglés) es un virus reportado por primera vez en diciembre de 2019 en Wuhan, provincia de Hubei en China, que produce la Enfermedad del Coronavirus 2019 (COVID-2019, por sus iniciales en inglés), el cual se esparció rápidamente a lo largo del mundo (Hadei et al., 2021; Botto et al., 2023). Asimismo, hasta febrero de 2023, se han reportado más de 750 millones de casos confirmados de COVID-19, y más de 6.5 millones de muertes en el mundo (Collivignarelli, Bellazzi, Caccamo, & Carnevale Miino, 2023). La manera de transmisión es a través de persona en persona mediante el contacto de superficies contaminadas, por partículas aerotransportadas (Hadei et al., 2021), y por los aerosoles producidos por los tosidios, estornudos, partículas de saliva emitidas al hablar y cantar por las personas previamente infectadas (Paital & Agrawal, 2021).

Numerosos estudios han abordado la relación causa-efecto de la contaminación del aire con los efectos de contagio, infección y letalidad del COVID-19. Marquès y Domingo (2021), mediante una revisión sistemática de la literatura, mencionan que, la evidencia sostiene que existe la relación de la incidencia o riesgo de adquirir COVID-19 (casos de contagio) y las concentraciones de material particulado (PM), principalmente de PM_{2.5}, pero también de PM₁₀. Los autores también sostienen que los casos de mortalidad tienen como principal riesgo la concentración de PM_{2.5} ambiental a la que se está expuesto. En concordancia con lo anterior, se determinó que, una elevación de 1 µg/m³ de PM_{2.5} en Estados Unidos para el

2020 estuvo asociado con el aumento del 8% de la tasa de muerte inducida por COVID-19 (Wu et al., 2020, como se citó en Paital & Agrawal, 2021).

Respecto al rol crónico del PM, Collivignarelli et al. (2023) destacan el impacto negativo de las exposiciones a corto y largo plazo de PM en el número de infectados de COVID-19 y la severidad de síntomas. Los autores sostienen que, a más alta y prolongada la exposición a PM, más son los riesgos de contraer la infección y mostrar síntomas severos de la enfermedad, incluyendo la muerte. Ya que, los síntomas severos podrían estar relacionados al estado inflamatorio de los pulmones y el sistema respiratorio en las personas que previamente estuvieron expuestas a concentraciones significativas de PM a corto plazo, mientras que a largo plazo tendría efectos en el sistema cardiovascular.

Paital y Agrawal (2021) explican que la asociación de PM_{2.5} y dióxido de nitrógeno (NO₂) con mayores tasas de tener síntomas severos del COVID-19, incluyendo la muerte (letalidad), podría estar explicado por la sobreexpresión de la Enzima Convertidora de Angiotensina 2 (ACE-2, por sus iniciales en inglés) en la superficie epitelial de las células del tracto respiratorio. Lo más importante que los autores hacen presente, es que la ACE-2 es un receptor para los grupos de coronavirus, incluyendo el SARS-CoV-2, y que hay una sobreexpresión de esta bajo las exposiciones crónicas a elevadas concentraciones de PM_{2.5} y NO₂; y para exposiciones subagudas de PM_{2.5} (Botto et al. 2023). En esa misma línea, Marchetti et al. (2023) encontraron que el PM_{2.5} promueve en un 1.5 veces la sobre expresión de la ACE-2, lo cual favorece a la entrada de las partículas de virus en las células alveolares del pulmón humano e incrementando su estado inflamatorio.

Sin embargo, a pesar de que algunos autores hayan encontrado relación entre las altas concentraciones de PM con un mayor número de infectados, Collivignarelli et al. (2023) declaran que, la influencia de las partículas por sí solas promoviendo las infecciones por el transporte del SARS-CoV-2 pueden ser consideradas no significativas basándose en los análisis estadísticos y numéricos de la revisión de diversos artículos publicados.

2.1.3. Costo económico atribuible al PM_{2.5}

La OMS (2021) considera que, la contaminación del aire produce impactos económicos relacionados a la condición de salud, afectación a los campos de cultivo, daño a las infraestructuras; además del impacto asociado al cambio climático y la degradación medio ambiental. Tal es el caso que, para el 2013, el Banco Mundial estimó un impacto económico global de 143 mil millones de dólares en pérdida de ingresos y de 3 550 mil millones de dólares en pérdida de bienestar por la exposición a PM_{2.5} (World Bank, 2016 como se citó en WHO, 2021).

Para ejemplificar tal afirmación, Liao et al. (2020) afirman que la exposición a concentraciones de PM_{2.5} anuales en la provincia de Gansu, China, durante el periodo 2015-2017, por encima del umbral de concentraciones establecidos por la OMS de 10 µg/m³ (valor establecido hasta el 2021); ocasionó gastos equivalentes al 6.45%, 6.28% y 5.93% del Producto Bruto Interno (PBI) regional, para el 2015, 2016 y 2017, respectivamente.

2.1.4. Niveles de concentración permitidos a nivel internacional

La Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus iniciales en inglés) publicó en el 2021 las directrices sobre la calidad del aire respecto a los niveles máximos de la concentración media diaria y media anual de PM_{2.5} en exteriores (en el ambiente), según la extensa revisión bibliográfica que respalda sus resultados en cuanto a los efectos en la salud, en base a la exposición a corto y largo plazo, respectivamente (WHO, 2021). Como los nuevos estándares varían en gran medida de los valores establecidos en la guía elaborada de 2005 (25 y 10 µg/m³ para los periodos de media diaria y media anual, respectivamente), se recomienda el uso de objetivos intermedios o provisional es para lograr los niveles de la guía actualizada (15 y 5 µg/m³ para los periodos de media diaria y media anual, respectivamente). La tabla 3 resume los valores de las concentraciones máximas de PM_{2.5}.

Tabla 3: Niveles máximos de la calidad de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) recomendados para los periodos de exposición a corto y largo plazo, y los objetivos intermedios

Contaminante	Periodo de exposición promedio	Objetivos intermedios				Nivel de referencia de la calidad del aire
		1	2	3	4	
PM _{2.5}	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas	75	50	37.5	25	15

Adaptado de “WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide” por WHO, 2021, *World Health Organization*, p. xvii.

2.1.5. Niveles de concentración permitidos a nivel nacional

En el Perú, el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM aprobó los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA-Aire), el cual establece 10 parámetros de referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental que tienen los titulares de actividades productivas, extractivas y de servicio, así también son aplicables a los que comprenden las emisiones de las actividades productivas, extractivas y de servicio. Los valores del ECA-Aire, así como los criterios de evaluación y método de análisis respecto al PM_{2.5} son mostrados en la tabla 4.

Tabla 4: Estándares de calidad ambiental para aire del parámetro PM_{2.5}

Parámetro	Periodo	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Criterios de evaluación	Método de análisis
PM _{2.5}	24 horas	50	No exceder más de 7 veces al año	Separación inercial / filtración
	Anual	25	Media aritmética anual	(Gravimetría)

Adaptado de “Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias” por Ministerio de Ambiente, 2017, *El Peruano*, p. 9.

2.1.6. El PM_{2.5} y el transporte

Rojas (2017) señala que, en zonas urbanas, el principal responsable de la contaminación del aire se da por el parque automotor, el cual emite sustancias sólidas y líquidas suspendidas en la atmósfera que forman parte del PM₁₀ y PM_{2.5}. Para explicar las emisiones de gases y partículas, primero se debe entender las consecuencias del proceso de combustión. El proceso de combustión principalmente genera dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), aunque también produce varios subproductos los cuales son generados, ya sea de la oxidación incompleta del combustible, como es el CO, HCT o PM; o de la oxidación de las especies no combustibles presentes en la cámara de combustión, NO_x provenientes del nitrógeno atmosférico (N₂) en el aire, los SO_x del azufre contenido en los combustibles y lubricantes, entre otros (European Environmental Agency [EEA], 2023).

Los autores Korc, Figari, Bravo y Pareja (2009) enfatizan que la calidad del aire en Lima Metropolitana se ha deteriorado en los últimos años, debido al incremento de los contaminantes del CO, NO_x, dióxido de azufre (SO₂) y PM. Esta contaminación se debe por el aumento del parque automotor que, excede la infraestructura vial, son numerosas las unidades muy antiguas, carecen de revisiones técnicas, usan combustibles contaminantes y, sobre todo, mantienen una oferta de transporte que supera a la demanda. Específicamente para el uso de los principales combustibles del parque automotor en Lima Metropolitana, como es el diésel, Choy (2014) refiere que, las partículas derivadas de la combustión de este combustible, las cuales tienen la denominación de material particulado del diésel, están inmersas en el rango del PM_{2.5}.

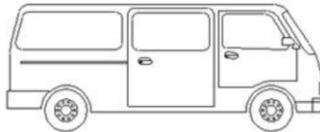
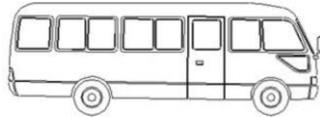
2.2. El transporte público en Lima Metropolitana

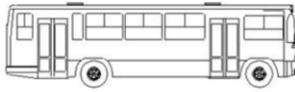
En diciembre del 2018, se creó la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao [ATU], denominándose como el “organismo técnico especializado, adscrito al Ministerio de Transportes y Comunicaciones, encargado de organizar, implementar y gestionar el Sistema Integrado de Transporte (SIT) de Lima y Callao” (2020, p. 13). El Sistema Integrado de Transporte está conformado por 6 componentes: red básica del metro de Lima y Callao,

corredor segregado de alta capacidad, corredores complementarios y transporte regular de pasajeros (incluye al transporte público), servicio de transporte especial, servicios de transporte no convencionales y modalidad activa (ATU, 2020).

Ahora bien, el transporte público está constituido por el transporte público convencional, los corredores complementarios, el metro y el metropolitano (Yunjung, 2020). Cabe precisar que, el término “transporte público convencional” hace alusión a la conformación de las unidades del tipo camioneta rural o combi, microbús o coaster y bus u ómnibus (ATU, 2020). La tabla 5 clasifica y representa a estos vehículos según la Resolución Directoral N° 4848-2006-MTC que aprueba la Directiva N° 002-2006-MTC/15 de clasificación vehicular y estandarización de características registrables vehiculares.

Tabla 5: Clasificación de las unidades del transporte público convencional

Carrocería	Categoría	Definición	Gráfico referencial
Camioneta rural o combi	M2	Vehículo de 10 – 16 asientos, incluyendo el asiento del conductor y no mayor a 4000 kg de peso bruto vehicular.	 
Microbús	M2 M3	Vehículo de 17 - 33 asientos incluyendo el asiento del conductor y no mayor a 7000 kg de peso bruto vehicular.	 

Bus u ómnibus	M3	<p>Vehículo acondicionado para el transporte de pasajeros dentro del radio urbano, de más de 33 asientos incluyendo el asiento del conductor. Excepcionalmente los vehículos de Clase I (con áreas para que pasajeros se transporten de pie, permitiendo el desplazamiento frecuente de estos), pueden tener 33 o menos asientos.</p>	 
---------------	----	---	---

Adaptado de “Clasificación vehicular y estandarización de características registrables vehiculares. Directiva N° 002-2006-MTC/15, aprobada mediante R.D. N° 4848-2006-MTC” por Tarazona, 2018, *Asociación Automotriz del Perú*, p. 15.

En ese contexto, es primordial reconocer la dinámica de viajes en Lima Metropolitana. De hecho, la Fundación TRANSITEMOS (2018) presentó el número de viajes motorizados diarios para Lima y Callao para el periodo 1970 – 2018, mostrado en la figura 1.

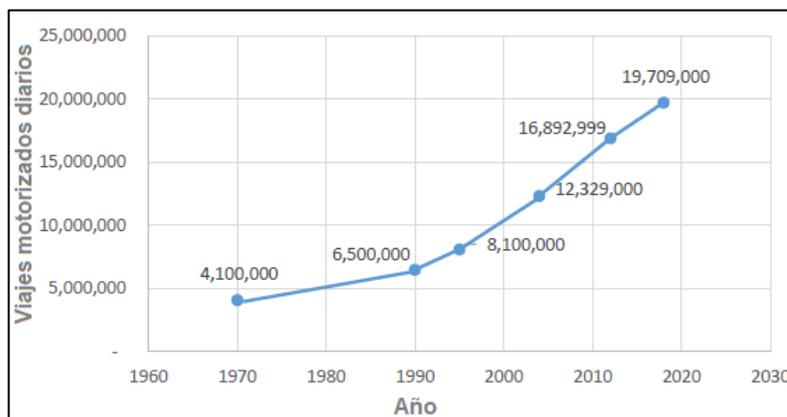


Figura 1: Viajes motorizados diarios en Lima y Callao durante el periodo 1970 – 2018. Adaptado de “Transporte Urbano Lima y Callao - 2018. Informe de observancia situación del transporte urbano en Lima y Callao – 2018” por Fundación TRANSITEMOS, 2018, p. 7.

Aunado a lo anterior, la figura 2 presenta la distribución de viajes (exceptuando los viajes a pie) en Lima y Callao para el 2019. Por si fuera poco, la participación del transporte público convencional es de un 59%, siendo la mayor modalidad de transporte usado, en Lima y Callao (ATU, 2020).

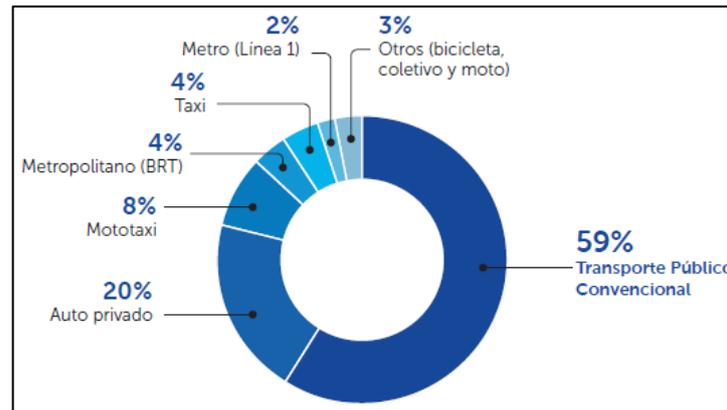


Figura 2: Distribución de viajes en Lima y Callao para el 2019. De “Tecnologías limpias para el transporte público en el Perú: El momento para el cambio” ATU, 2020, p. 21.

En relación a las categorías vehiculares y sus cantidades, la figura 3 ilustra las unidades del transporte público convencional según clase de vehículo para Lima y Callao para el 2018. Sobre todo, para el 2018, Lima tenía 15143 unidades distribuidas en 372 rutas, y el Callao tenía 10054 unidades en 144 rutas, siendo las combis las unidades más abundantes del transporte público convencional (MINAM, 2021).

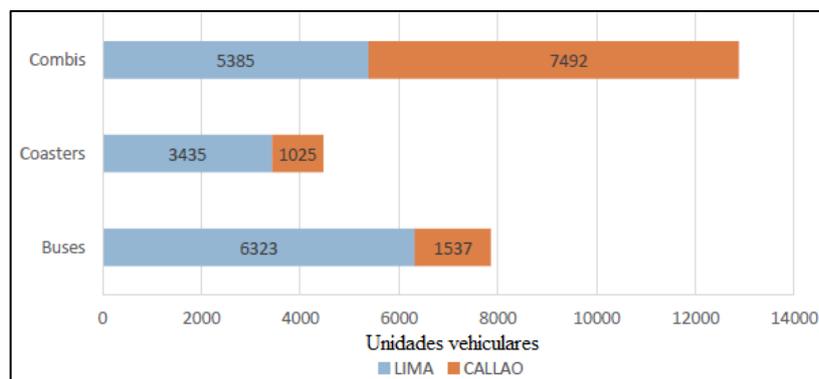


Figura 3: Cantidad de unidades del transporte público convencional según clase de vehículo para Lima y Callao para el 2018. Adaptado de “Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025” por MINAM, 2021, p. 42.

En relación a la antigüedad, la flota de transporte público de Lima y Callao tenía un promedio de 12.5 años de antigüedad para el 2018 (MINAM, 2021). Para el 2020, la ATU (2020) reportó que cerca del 29% de la flota del transporte público en Lima tenía más de 15 años de antigüedad, y que el 89% usaba como combustible el diésel; lo que es más importante es que, en la flota de antigüedad mayor a 15 años, la participación del diésel como combustible es hasta del 99.5%. La figura 4 ilustra la distribución en rangos de años de antigüedad y según el uso de combustible del transporte público en Lima al 2020.

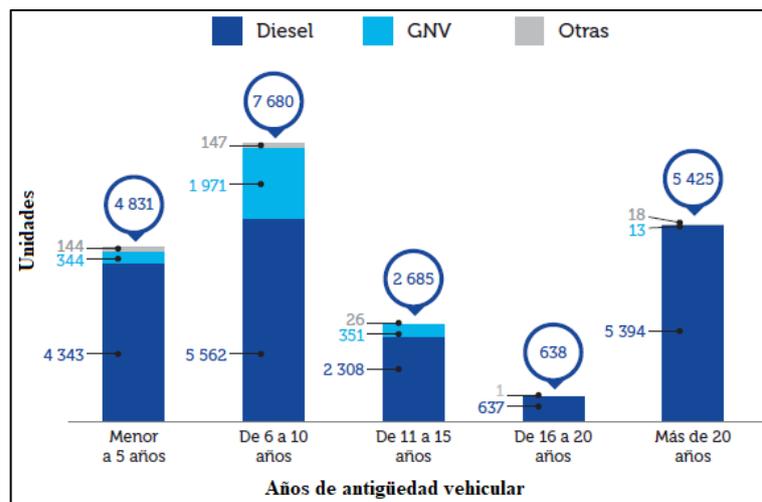


Figura 4: El transporte público en Lima según la antigüedad de la flota y el uso de combustibles al 2020. GNV = Gas natural vehicular. Adaptado de “Tecnologías limpias para el transporte público en el Perú: El momento para el cambio” por ATU, 2020, p. 21.

2.2.1. Normativa de emisiones de PM_{2.5} en el sector transporte a nivel nacional

En el sector automotor, la normativa referente a las emisiones contaminantes vehiculares (incluyendo al PM) inició con el Decreto Supremo (D.S) N° 047-2001-MTC, el cual estableció los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los vehículos automotores en circulación, nuevos a ser importados o ensamblados en Perú y vehículos automotores usados. En la actualidad, se actualizó al D.S. N° 010-2017-MINAM, el cual fue modificado por el D.S. 029-2021-MINAM que establece los LMPs de emisiones atmosféricas para los vehículos automotores a nivel nacional (por ejemplo, implementó el cronograma de la introducción del Euro 6 y VI). Sin embargo, para el 2024, el D.S. N° 003-2024-EM modificó los plazos para la comercialización de diésel con contenido de azufre no mayor de

10 ppm (obligatorio requerimiento para los vehículos Euro 6 y VI). De este modo, también, se aplazaron en 6 meses el cronograma presentado en el D.S. 029-2021-MINAM. En líneas generales, la tabla 5 presentan dichos niveles máximos en gramo por kilómetro recorrido (g/km) para los vehículos de pasajeros con Peso Bruto Vehicular (PBV) mayor a 2.5 t hasta 3.5 t y vehículos de carga con PBV < 3.5 t con motores con encendido por compresión, como son las combis o camionetas rurales. De igual manera, la tabla 6 presentan dichos niveles máximos en gramo del contaminante por potencia generada del motor (g/kW-h) para vehículos de carga mayores a 3.5 toneladas (t) de PBV con motores con encendido por compresión (vehículos a diésel), como son los microbuses y ómnibus.

Tabla 6: LMPs para los vehículos de pasajeros con peso bruto vehicular (PBV) mayor a 2.5 t hasta 3.5 t y vehículos de carga con PBV < 3.5 t con motores con encendido por compresión

Año de aplicación	Norma	PM^a (g/km)
Desde abril de 2018 hasta marzo de 2024	EURO IV o de mayor exigencia	0.06
Desde abril de 2025 en adelante*	EURO VI/A o de mayor exigencia	0.0045

Nota: ^aPeso de referencia > 1760 kg. * Modificación de aplazamiento por 6 meses determinado por el D.S. N°003-2024-EM. Adaptado de “Decreto Supremo N° 029-2021-MINAM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 010-2017-MINAM, establece Límites Máximos Permisibles de emisiones atmosféricas para vehículos automotores” por MINAM, 2021, *El Peruano*, p. 24.

Tabla 7: LMPs para los vehículos de pasajeros o de carga mayores a 3.5 t de peso bruto vehicular (PBV) con motores con encendido por compresión

Año de aplicación	Norma	PM (g/kW-h)
Desde abril de 2018 hasta marzo de 2024	EURO IV o de mayor exigencia	0.02
Desde abril de 2025 en adelante*	EURO VI/A o de mayor exigencia	0.01

Nota: * Modificación de aplazamiento por 6 meses determinado por el D.S. N°003-2024-EM. Adaptado de “D. S. N° 029-2021-MINAM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 010-2017-MINAM, establece Límites Máximos Permisibles de emisiones atmosféricas para vehículos automotores” por MINAM, 2021, *El Peruano*, p. 25.

2.3. La situación actual o diagnóstico de Lima Metropolitana

Consecuentemente con la información previamente recolectada, el diagnóstico de la gestión de la calidad ambiental del aire de Lima y Callao también contiene el inventario de emisiones presentado en MINAM (2021). Los resultados de la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$ por tipo de fuente para Lima y Callao en el 2016 son representados en la figura 5, resaltando que, el 58% aporte por las fuentes móviles (parque automotor). En concordancia, IEC (2021) estimó que las emisiones vehiculares del 2016 contribuyeron en un 58% a 67% de las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$.

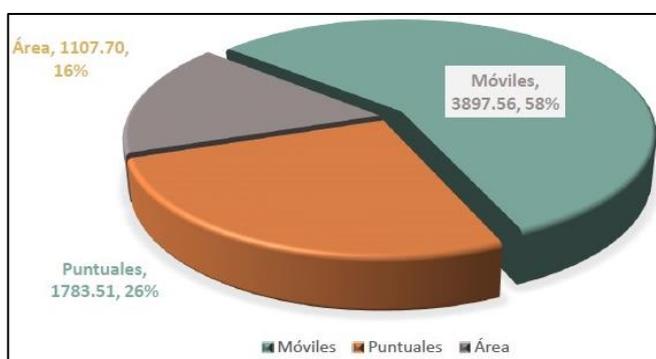


Figura 5: Emisiones de $PM_{2.5}$ según tipo de fuente para Lima y Callao al 2016 (t/año, aporte porcentual). De “Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025” por MINAM, 2021, p. 57.

La figura 6 representa el aporte a la emisión de $PM_{2.5}$ según categoría vehicular en Lima y Callao en el 2016. Para destacar que, los ómnibus son los mayores emisores de $PM_{2.5}$ con el 42% (MINAM, 2021).

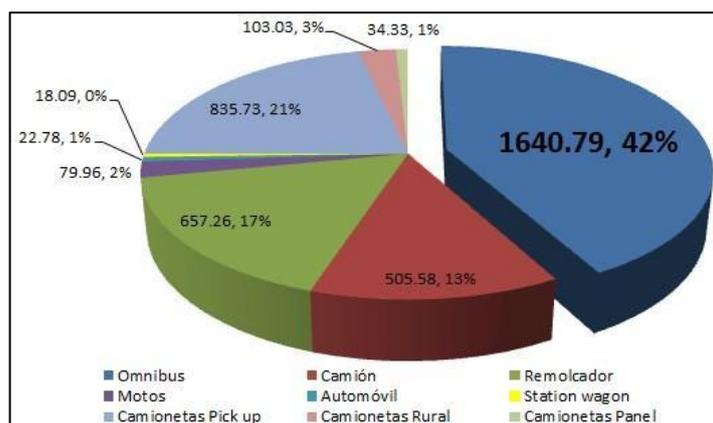


Figura 6: Emisiones de PM_{2.5} por categoría vehicular Lima y Callao al 2016 (t/año, aporte porcentual). Adaptado de “Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025” por MINAM, 2021, p. 46.

La figura 7 ilustra el aporte a las emisiones de PM_{2.5} según el tipo de combustible usado por el parque automotor en Lima y Callao en el 2016. Es de resaltar que, el diésel aporta el 97% de emisiones de PM_{2.5} (MINAM, 2021).

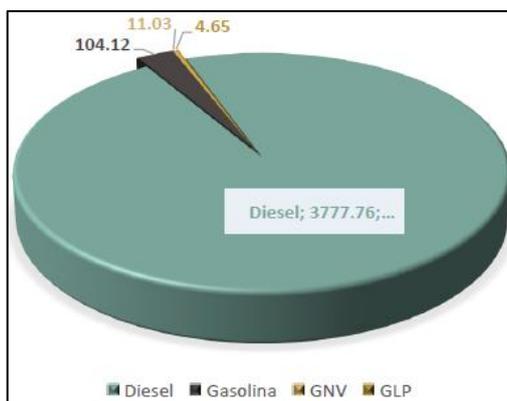


Figura 7: Emisiones de PM_{2.5} por tipo de combustible Lima y Callao al 2016 (t/año). GNV = gas natural vehicular. GLP = gas licuado de propano. De “Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025” por MINAM, 2021, p. 46.

La figura 8 ilustra el aporte de emisiones de PM_{2.5} según tecnología vehicular de vehículos a diésel en Lima y Callao en el 2016. La categoría pre-Euro corresponde a los vehículos fabricados en el periodo antes del 2000; Euro 1 y I en el periodo 2000-2002; Euro 2 y II, en el periodo 2003-2007; y Euro 3 y III, en el periodo del 2007-2016. Lo que es más importante es que, la tecnología Pre-Euro es la más contaminante aportando 65% de emisiones de PM_{2.5} (MINAM, 2021).



Figura 8: Emisiones de PM_{2.5} por tecnología vehicular de vehículos a diésel en Lima y Callao al 2016 (t/año, aporte porcentual). De “Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025” por MINAM, 2021, p. 47.

Por lo tanto, el diagnóstico llegó a la conclusión que las emisiones de PM_{2.5} para Lima y Callao en el 2016, según el inventario de emisiones, son principalmente aportados por las categorías de ómnibus, remolcador y camión a diésel con tecnología Pre-Euro (MINAM, 2021).

Del mismo modo se analizaron las emisiones de NO_x según el tipo de combustible usado y la categoría vehicular para Lima y Callao en el 2016, los cuales son representados en la figura 9 y 10, respectivamente. Destacando nuevamente, el aporte mayoritario del diésel con un 89% del total y a los ómnibus con un 42% del total de emisiones (MINAM, 2021).

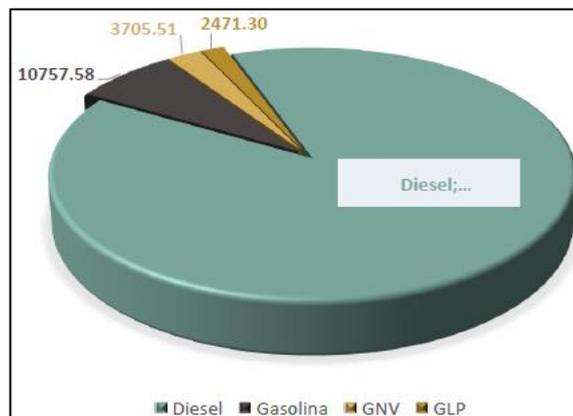


Figura 9: Emisiones de NO_x según el tipo de combustible usado en Lima y Callao al 2016 (t/año). GNV = gas natural vehicular. GLP = gas licuado de propano. “Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025” por MINAM, 2021, p. 47.

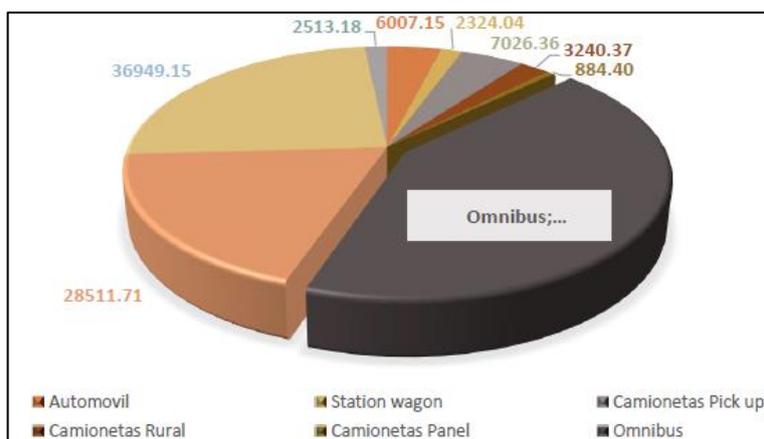


Figura 10: Emisiones de NOx por categoría vehicular en Lima y Callao al 2016 (t/año). De “Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025” por MINAM, 2021, p. 48.

2.4. El COVID-19 en Lima Metropolitana

2.4.1. Medidas de control implementadas

Después de que el primer caso de COVID-19 sea reportado el 6 de marzo de 2020 en el Perú, el gobierno, a través del Ministerio de Salud [MINSA] puso en operación el “Plan Nacional de Preparación y Respuesta frente al riesgo de introducción del Coronavirus 2019-nCoV” para fortalecer los sistemas de vigilancia, contención y respuesta (Rojas et al., 2021). El 11 de marzo, se decretó a nivel nacional el Estado de Emergencia Sanitaria, y el 15 de marzo se decretó el Estado de Emergencia Nacional, haciendo que el Perú sea el primer país en Sudamérica en tomar medidas estrictas para prevenir un aumento en los casos positivos de COVID-19 (Rojas et al., 2021). Esta medida incluía un distanciamiento social obligatorio (vía una cuarentena nacional), y un cierre de fronteras que empezaron desde el 16 de marzo (García, 2023). El 18 de marzo, se promulgó la inmovilización social obligatoria (toque de queda) para fortalecer la medida de distanciamiento social, que también involucraron la restricción al libre tránsito, el cierre de comercios y empresas (con la excepción de bancos, farmacias y negocios de venta de productos de primera necesidad) (Rojas et al., 2021; García, 2023). Además, el uso de vehículos particulares fue prohibido desde el 19 de marzo, salvo los vehículos necesarios para la provisión de los servicios básicos, cuya medida duró aproximadamente por 5 meses (Municipalidad de Lima, 2020; García, 2023).

2.4.2. Los efectos del COVID-19 en la población

En los primeros 15 días de promulgado el Estado de Emergencia Nacional la tasa de casos positivos por COVID-19 en la provincia de Lima alcanzó valores de 1338 por cada 100 mil habitantes, incremento mucho mayor al del resto del país con una tasa de 399 por cada 100 mil habitantes, de este modo, representaba el 58% de los casos a nivel nacional. (Vasquez-Apestequi et al., 2021). De manera más ilustrativa, la figura 11 muestra la variación de casos confirmados acumulados de COVID-19 en Perú y Lima Metropolitana, el uso del transporte público, y el consumo eléctrico (a nivel nacional), frente a las medidas de control implementadas desde marzo hasta mayo del 2020. Se hace hincapié que, la disminución del uso del transporte público en más del 50% a partir del Estado de Emergencia Nacional; de manera similar, el consumo o demanda de energía decae en aproximadamente un 40% a partir de esta medida, principalmente por el cese de las actividades productivas a nivel nacional.

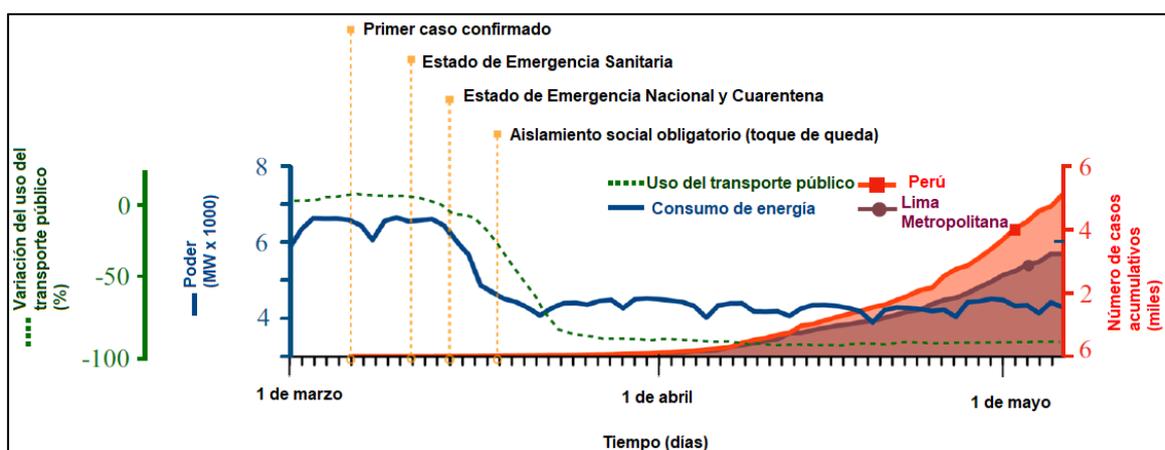


Figura 11: Variación de casos confirmados acumulados de COVID-19 en Perú y Lima Metropolitana, el uso del transporte público, y el consumo eléctrico, frente a las medidas de control implementadas desde marzo hasta mayo del 2020. Adaptado de “Effects of COVID-19 pandemic control measures on air pollution in Lima metropolitan area, Peru in South America” por Rojas et al., 2021, *Air quality, atmosphere, & health*, 14(6), p. 928.

En ese contexto, el Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades [CDC] del MINSA desarrolló una plataforma virtual para visualizar el registro (según región y a nivel nacional) del número de casos, defunciones, hospitalizaciones, internamientos por la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) por efecto del COVID-19; y, además, el número de vacunados contra el COVID-19 según el número de dosis aplicadas; durante el periodo 2020 a la actualidad (2024) destacando las 5 olas de COVID-19 ocurridas hasta el

2023 y la finalización de la Emergencia Sanitaria Internacional. En tal sentido, la figura 12, 13 y 14 permiten visualizar el comportamiento del número de casos confirmados, los hospitalizados y los fallecidos por COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024. Estas figuras permiten observar que las dos primeras olas de pandemia, durante el 2020 y 2021, fueron las más drásticas al ocasionar mayor número de hospitalizaciones y defunciones por COVID-19, demostrando la severidad de los síntomas y la letalidad del virus, a pesar de las medidas de control que se implementaron. En paralelo, la figura 15 representa la cantidad de personas vacunadas según esquema de vacunación (dosis aplicadas) para Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024. Es de notar que, desde julio de 2021 se hace significativa la tasa de vacunación con 2 dosis. Para el inicio del 2022, con un alto porcentaje haber completado el esquema de vacunación completo (2da dosis), inicia la tercera ola. Durante esta ola, a pesar de que el número de casos confirmados era mucho mayor que en las 2 anteriores olas, la cantidad de personas hospitalizadas y fallecidas presentaron valores muy inferiores, demostrando así, la eficacia de las vacunas aplicadas. Dicha tendencia se repitió y aseveró en la cuarta y quinta ola.

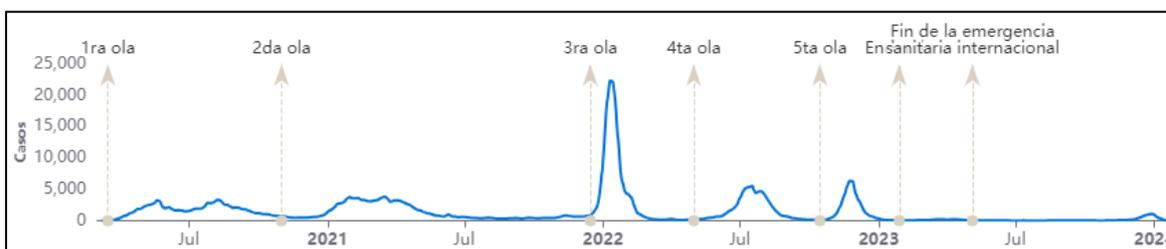


Figura 12: Variación de los casos confirmados de COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024. De “Sala COVID-19” por CDC – MINSa, 2024, 14 de marzo.

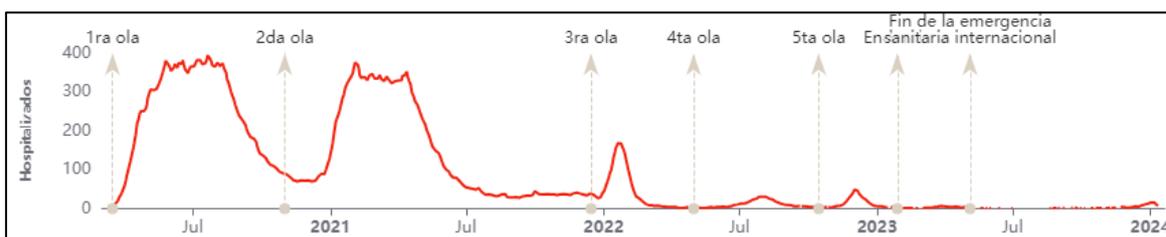


Figura 13: Variación de los casos hospitalizados de COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024. De “Sala COVID-19” por CDC – MINSa, 2024, 14 de marzo.

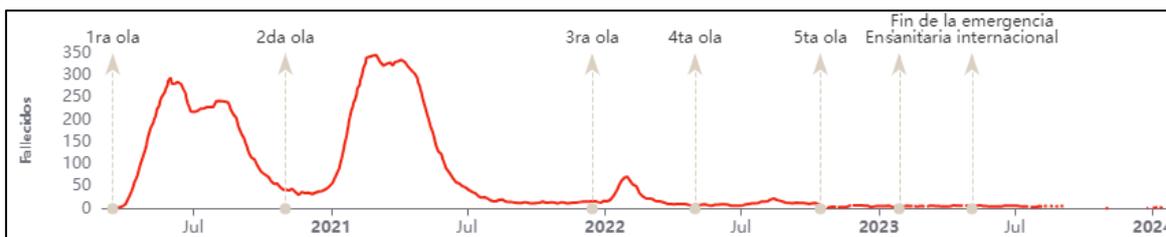


Figura 14: Variación de los fallecidos de COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024. De “Sala COVID-19” por CDC – MINSA, 2024, 14 de marzo.

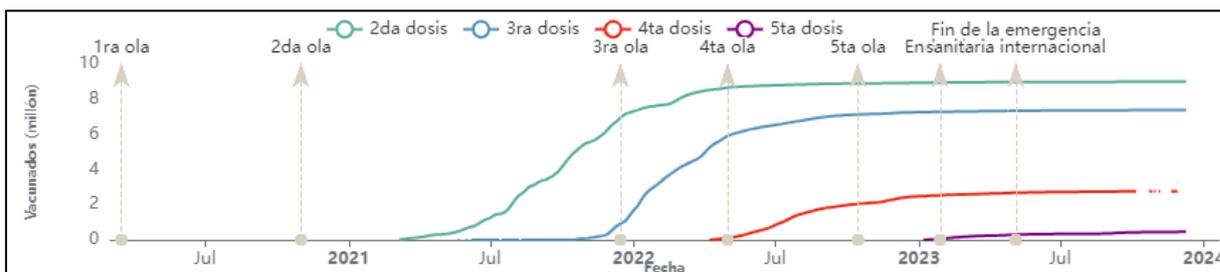


Figura 15: Variación de los fallecidos de COVID-19 en Lima Metropolitana durante el periodo 2020-2024. De “Sala COVID-19” por CDC – MINSA, 2024, 14 de marzo.

Profundizando más, la Tabla 8 muestra, a manera de resumen, el número de casos confirmados y fallecidos por COVID-19 en Lima y Callao para el periodo 2020 - 2023.

Tabla 8: Reporte de casos confirmados y fallecimientos por COVID-19 en Lima y Callao para el periodo 2020 - 2023

Provincia	2020		2021		2022		2023	
	C	F	C	F	C	F	C	F
Callao	46920	5334	61157	4917	58965	566	2139	139
Lima	455602	39497	564090	43010	944304	5640	51128	1453
Lima y Callao	502522	44831	625247	47927	1003269	6206	53267	1592

Nota: C = casos confirmados de COVID-19. F = fallecidos por COVID-19. Adaptado de “Sala situacional – COVID-19. SE 05-2024” por MINSA, 2024, pp. 11 y 23.

Las pérdidas de vidas humanas comentadas en párrafos anteriores, también generaron un costo social por el fallecimiento prematuro de cada habitante. En ese mismo contexto, Curro-Urbano et al. (2022) estimaron los años potencialmente perdidos de vida y el costo social por muerte prematura en el Perú, por efecto del COVID-19, a través del método del capital humano, en otras palabras, utilizaron un valor promedio estadístico de la vida humana (de

Seminario, 2017) para determinar el cálculo de ingresos dejados de percibir o potencial productivo por la muerte de una persona antes de alcanzar la esperanza máxima potencial promedio de vida. La tabla 9 resume los años de vida potencial perdidos (en miles de años) y costos sociales por fallecimiento por COVID-19 (en millones de dólares con tasa de cambio al 2007), calculados por los autores para Lima y Callao en el 2020 y 2021 (hasta el 31 de julio).

Tabla 9: Años de vida potencial perdidos y costo social por fallecimiento por COVID-19 para Lima y Callao en el 2020 y 2021

Provincia	2020		2021 ^a	
	AVPP	CSF	AVPP	CSF
Callao	46.1	471.5	52.6	458.7
Lima	378.5	3664.9	465.9	4112
Lima y Ca- llo	424.6	4136.4	518.5	4570.7

Nota: AVPP: Años de vida potencia perdidos por muerte por COVID-19 (miles de años). CSF: Costo social por fallecimiento por COVID-19 (en millones de dólares con tasa de cambio de 2007). ^a Calculados con los datos hasta el 31 de julio del 2021. Adaptado de “Costo social de las muertes prematuras por COVID-19 en el Perú” por Curro et al., 2022, *Cuerpo Med. HNAAA*, 15(1), pp. 29 y 31.

Mención aparte, el COVID-19 también tuvo un gran impacto en la salud mental. De acuerdo con Saavedra et al. (2022), en Lima Metropolitana, durante la pandemia de COVID-19, se incrementaron los niveles de estrés (de moderado a severo), mientras que, los indicadores de salud mental (como indicadores suicidas, problemas de sueño y violencia sistemática contra la mujer) aumentaron respecto a estudios previos. Adicionalmente, los autores dan a conocer que, el trastorno mental más frecuente fue el episodio depresivo, seguido por el trastorno de ansiedad generalizada.

2.4.3. Los efectos del COVID-19 en las concentraciones de PM_{2.5}

Vasquez-Apestequi et al. (2021) señalan que, desde el 16 de marzo, las concentraciones diarias de PM_{2.5} mostraron una gradual reducción, como consecuencia, no excedieron el ECA-

Aire de ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo de 24 horas). Asimismo, los autores afirman que, en promedio, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ registradas durante los primeros 15 días de promulgado el Estado de Emergencia Nacional, para la provincia de Lima, se redujeron en un 38% comparadas con las concentraciones históricas (2015-2019).

Igualmente, la Municipalidad de Lima (2020) analizó en el 2020, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ durante el periodo del 19 de febrero al 15 de marzo (un día antes del aislamiento social obligatorio), y desde el 16 de marzo hasta el 15 de abril (durante el aislamiento social obligatorio); para 8 estaciones de monitoreo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 4 estaciones de la Municipalidad Metropolitana de Lima, y 1 estación de la Embajada de los Estados Unidos. De este modo, enfatiza que, la reducción de $\text{PM}_{2.5}$ se dio en todas las estaciones evaluadas con un mínimo de 4.1% hasta 56.7%, la cual se debería principalmente a las medidas de inmovilización, como el aislamiento social obligatorio y la restricción del tránsito vehicular (menor flujo vehicular).

De manera similar, Rojas et al. (2021) evaluaron la calidad de aire en Lima Metropolitana durante el periodo antes de la cuarentena en el 2020, desde el 1 de febrero hasta el 15 de marzo; en el periodo durante la cuarentena, desde el 16 de marzo hasta el 30 de abril; y durante un periodo histórico del 2017 al 2019, desde el 16 de marzo al 30 de abril. Como resultado, para los registros de 5 estaciones del SENAMHI, obtuvieron que las concentraciones se redujeron entre un 31% hasta un 43% en comparación con las concentraciones registradas para las previas semanas y para el mismo periodo en el periodo 2017 al 2019. Los autores relacionan esta reducción debido a la cuarentena nacional implementada, el cual contuvo diversas medidas de confinamiento y la suspensión de actividades económicas.

2.5. La metodología de la dinámica de sistemas

Jay W. Forrester (1961), autor de la metodología de la dinámica de sistemas o sistemas dinámicos, la definió, en función para la gestión de industrias, como el estudio de la retroalimentación de información característica de la actividad industrial para mostrar cómo la estructura organizacional, amplificación en políticas y el desfase temporal de decisiones y

acciones, interactúan para influenciar el éxito de una empresa. En tal sentido, otorgó un singular esquema de trabajo para integrar las áreas funcionales de gestión – marketing, producción, búsqueda y desarrollo, e inversión de capital. Esta metodología de la dinámica de sistemas o sistemas dinámicos (SD) principalmente se enfoca en la estructura interna, el comportamiento del sistema y las interacciones entre las diferentes partes interesadas del sistema, con el fin de servir como una de explicación para representar efectos de toma de decisiones en sistemas complejos dinámicos (Thaller, Niemann, Dahmen, Clausen, & Leerkamp, 2017).

Richardson (2020) menciona que el enfoque de los sistemas dinámicos está fundado en el método científico, además que, la meta de un proyecto de SD (generalmente) es para: construir o elaborar el entendimiento teórico, implementar políticas para la mejora, y, en algunos casos, ambas metas son abordadas. Con el fin de lograr estas metas, el autor afirma que, los modeladores de SD buscan: incluir un amplio límite del modelo que captura importantes retroalimentaciones relevantes para conducir el problema; representar estructuras importantes en el sistema incluyendo acumulaciones y variables de estado, desfase, efectos no lineales; usar la toma de decisiones para los actores y agentes del sistema; un uso del más amplio rango de data empírica para la formulación del modelo; estimación de parámetros; y la generación de confianza en el modelo y en las conclusiones.

Por otra parte, Elsayah et al. (2017) destacan 3 alcances principales del uso de la metodología SD que permiten su aplicación en modelación de temas ambientales y la toma de decisiones, los cuales son: primero, los modelos SD son herramientas predictivas para la simulación de procesos biofísicos dentro de un sistema ambiental; segundo, su adecuado esquema holístico para examinar las interacciones de retroalimentación entre varios sistemas biofísicos y socioeconómicos; y tercero, ser una plataforma para la participación en la modelación para involucrar las partes interesadas y construir un entendimiento compartido de los sistemas.

Es por ello que, según Elsayah et al. (2017), la metodología SD ha sido ampliamente usada en un rango de problemas como: la gestión del agua urbana, las interacciones de las aguas subterráneas, la evaluación de la vulnerabilidad del cambio climático, problemas hídricos,

y, más recientemente, los problemas del nexo agua-energía-alimento. Además, los autores hacen hincapié de los retos que se afrontan en el uso del SD como una metodología de modelación medio ambiental. El principal reto es que los sistemas socio-ecológicos requieren datos de un amplio rango de fuentes y tipos de conocimiento, los cuales incluyen data cualitativa y cuantitativa de varios grupos de partes interesadas, incluyendo científicos, tomadores de decisiones, y miembros de la comunidad; para recolectar, sintetizar y usar estos datos en una adecuada manera. Así también, se deben combinar diferentes métodos conceptuales, numéricos, estadísticos, de participación, entre otros, en los diseños metodológicos apropiados que mejor se ajustan al contexto del estudio, los objetivos y limitaciones (incluyendo la disponibilidad de información).

Para concluir, se comentará los diagramas más usados en los SD. Lane (2000) argumenta que, un modelo SD es un conjunto de supuestos describiendo una situación problema, para simular las consecuencias de esta descripción, el modelo podría ser formulado como un conjunto de ecuaciones y codificadas en un determinado paquete de software. No obstante, el autor sostiene que una característica distinguible de los sistemas dinámicos es el uso de varios métodos de creación de diagramas para la conceptualización, representación y comunicación de los resultados. A pesar de que existe un amplio rango de instrumentos para el desarrollo de diagramas disponibles en el campo de SD, 2 métodos resaltan para Lane, los cuales son los más aceptados por la comunidad internacional de sistemas dinámicos: los diagramas causales y los diagramas de acumulación y flujo.

2.6. Los diagramas causales

Los diagramas causales, o más conocidos con la denominación en el idioma inglés de “Causal Loop Diagram (CLD)”, son una herramienta para modelar sistemas, utilizado para la exploración de variables cualitativas y relaciones de un sistema en interés (Laurenti, 2016). Videira, Schneider, Sekulova y Kallis (2014) y Jittrapirom, Knoflacher y Mailer (2017) definen a los CLD como herramientas conceptuales de comprensión en la cual una compleja cadena de relaciones de causa-efecto es rastreada minuciosamente mediante un set de variables que caracterizan a un problema dinámico, ayudando al proceso de toma de decisiones.

Dicho de otro modo, Ryan, Pepper y Munoz (2021) declaran que, los CLD son un tipo de modelo conceptual construido para proveer una perspectiva en las relaciones causales dentro de un sistema bajo examinación.

Dhirasasna y Sahin (2019) afirman que los CLD comprenden variables conectadas con flechas representando las relaciones causales, cada flecha es asignada con el símbolo de más “+”, para una relación directamente proporcional, o menos “-”, para una relación inversamente proporcional. En caso de que la relación tenga un impacto con un lapso de tiempo o desfase temporal, la flecha adquiere doble barra de manera perpendicular a la flecha de interrelación “//”. De la misma manera, los autores argumentan que, si las relaciones pueden ser rastreadas a la variable inicial entonces forma un bucle de retroalimentación, denominado bucle de refuerzo (para un bucle o ciclo que causa un crecimiento/decaimiento exponencial, denotado con la letra “R”) o un bucle de balance (para un bucle o ciclo que estabiliza un comportamiento en el tiempo, denotado con la letra “B”). Las denotaciones R y B aparecen en una flecha en dirección horaria y anti horaria, respectivamente. La figura 16 representa un ejemplo de CLD con la finalidad de distinguir las características antes señaladas.

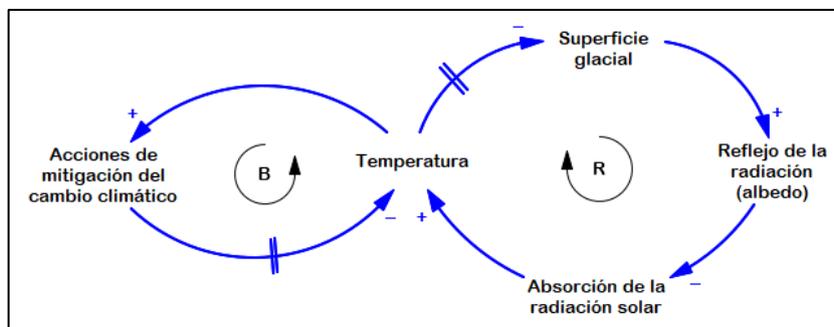


Figura 16: Dinámica de la variación de la temperatura global y sus efectos con la superficie glacial y el cambio climático. Nota: Se adicionaron los efectos de desfase temporal. El signo de menos (-) señala una relación inversamente proporcional. El signo de más (+) señala una relación directamente proporcional. B = bucle de retroalimentación de balance. R = bucle de retroalimentación de refuerzo. El signo de doble barra (//) representa un desfase temporal o lapso entre el efecto y la causa. Adaptado de “The Karma of Products: Exploring the Causality of Environmental Pressure with Causal Loop Diagram and Environmental Footprint” por Laurenti, 2016, Tesis doctoral, KTH Royal Institute of Technology, p. 24.

La figura 16 representa el comportamiento de 2 bucles de retroalimentación. El bucle de retroalimentación “B” representa el escenario en el que, si la temperatura global aumenta por encima de un nivel umbral (no dañino), las acciones de mitigación del cambio climáticas

son efectuadas en mayor medida (como la reforestación, uso de tecnologías en base a energías bajas en contenido de carbono, captura y almacén de carbono, entre otras). Y cuando estas medidas son implementadas en su totalidad (que probablemente tomen un lapso de tiempo de planeación y ejecución), la temperatura promedio se reducirá hasta alcanzar los niveles deseados. Por lo tanto, entre la interrelación de estas variables, se encuentra un balance o equilibrio con la influencia entre ellas mismas. En cambio, el bucle de retroalimentación “R” representa el escenario del calentamiento global (o era de hielo), en el que, si la temperatura global aumenta, esta producirá una reducción (en un lapso de tiempo) de la superficie glacial por derretimiento o fusión. A menor superficie glacial disminuye el albedo. A menor albedo, hay una mayor absorción de la radiación solar. A mayor radiación solar ocasiona una mayor temperatura promedio global. Observándose así, una cadena de efectos que amplifican o refuerzan el crecimiento o disminución de una variable (Laurenti, 2016).

Hidayatno, Destyanto y Fadhil (2019) resaltan que las ventajas de usar el CLD como forma de conceptualización de cualquier modelo son: sus características para ilustrar la interdependencia de variables y el concepto de retroalimentación los cuales son de importancia crítica en un sistema cerrado; también, permiten organizar el conocimiento del sistema de manera eficiente, dar una mayor y mejor comprensión de un sistema que de antemano se encuentra en exploración o que, no es muy clara su estructura. No obstante, es importante enfatizar que cada CLD ilustrado siempre refleja el punto de vista del modelador y las teorías que forman su base (Dhirasasna & Sahin, 2019; Peraphan et al.;2017).

Por último, referente al proceso de desarrollo de los CLD. Dhirasasna y Sahin (2019) agregan que los modeladores desarrollan, refinan y revalidan CLD varias veces a través de la revisión de literatura, observación, entrevistas, cuestionarios y consultas; y que el proceso de diseño de los CLD se sustenta en literatura existente y/o en el conocimiento cualitativo de las partes interesadas y expertos. Estos autores también expresan que, combinar los alcances cualitativos y cuantitativos complementan diferentes aspectos del sistema y profundizan la interpretación y entendimiento de los modeladores. Por último, indican que, los CLD permiten una eficiente transición entre los diagramas cualitativos hacia el diagrama cuantitativo final de acumulación y flujo, usados comúnmente en la simulación.

2.7. Los diagramas de acumulación y flujo y el modelo del sistema dinámico

Lin, Palopoli y Dadwal (2020) sostienen que es requerida una traducción o transformación del mapeo visual de CLD a diagramas que miden la acumulación y dispersión de recursos en el tiempo. De igual manera, Hosseinabad y Moraga (2017) señalan que el CLD es un paso inicial de los sistemas dinámicos que es usado para representar bucles de retroalimentación y relaciones entre variables, más no es suficiente en la representación del efecto de las políticas en el problema de la contaminación atmosférica, pero, mediante la utilización del diagrama de acumulación y flujo, la comprensión del modelo es enriquecida y simplificada.

Es así que, los modelos SD usan diagramas de acumulación y flujo (SFD, por sus iniciales en inglés), o también llamado “diagrama de Forrester”, para transformar modelos conceptuales en modelos matemáticos. Los SFD se conforman de 4 principales componentes: variables de acumulación, flujos, auxiliares y desfases (Lin et al. 2020).

Las variables de acumulación pueden ser entendidos como la variable memoria la cual transmite cada cierto lapso de tiempo, la cual, debido a sus características, definen el estado del sistema. Estas variables envían señales a todas las partes del sistema, y están representadas dentro de regiones rectangulares. En cambio, los flujos son variables que afectan la cantidad de la variable de acumulación, ocasionando un aumento (flujo de entrada) o reducción (flujo de salida) de estos, los cuales son representados como flechas negras que entran y salen de las variables de acumulación, respectivamente. Los componentes auxiliares son variables que influyen en los flujos, estas pueden ser valores constantes (exógenas) las cuales por lo general lo conforman las tasas o proporciones o variables influenciadas en el modelo (endógenas), las cuales no cambian la estructura matemática del sistema, pero sí ayuda en brindar transparencia para el modelo, estas son representadas como variables sin características especiales. Por último, las variables desfase temporal existen cuando el efecto ocurre en un periodo o lapso de tiempo desde la influencia de la variable causa, por ejemplo, las variables de desfase temporal existen donde hay un lapso de tiempo entre las intervenciones políticas

y cambio en un patrón de un comportamiento humano (Lin et al. 2020). A manera de ejemplo, el SFD de un modelo de la población de infantes y adultos se muestra en la figura 17.

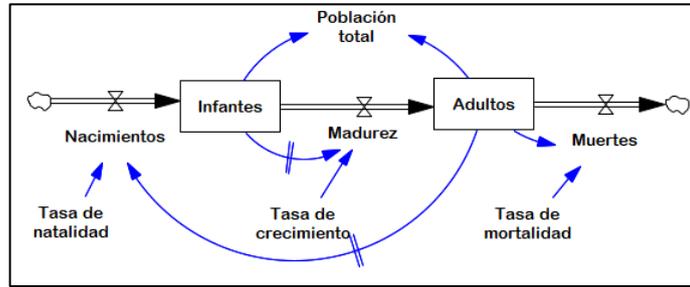


Figura 17: SFD de la población de infantes y adultos. Nota: Se adicionaron los efectos de desfase. El signo de doble barra (//) representa un desfase temporal o lapso entre el efecto y la causa. Adaptado de “Developing system dynamics models from causal loop diagrams” por Binder, Vox, Nelyazid, Haraldsson y Stevansson, 2004, *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamic Society*, p. 18.

La figura 17 representa el SFD de la población niñez-adulthood, el cual consiste en 2 variables de acumulación, infantes y adultos; 3 flujos, nacimientos, niños alcanzando la madurez y muertes; y 4 auxiliares, población total, tasa de natalidad, tasa de crecimiento y tasa de mortalidad. Esta expresa el proceso desde el nacimiento de niños, su crecimiento (madurez o envejecimiento), desarrollo de la adultez (personas adultas), y por último la muerte de estos (a una edad avanzada) (Binder et al., 2004).

El modelo SD usa al diagrama de acumulación y flujo para traducir el modelo conceptual en un modelo matemático, en otras palabras, el llamado modelo SD en sí, es la agregación de fórmulas matemáticas que vinculan los datos cuantitativos en el SFD. Por ende, las variables de acumulación pueden estar expresados matemáticamente como integrales y generalmente considerados como las variables estables del sistema (Lin et al., 2020). Por un lado, las variables de acumulación pueden ser explícitamente representados en su forma integral como en la ecuación (1) (Bala, Arshad, & Noh, 2017).

$$stock(t) = stock(t_0) + \int_{t_0}^t (flujo\ de\ entrada(t) - flujo\ de\ salida(t))dt \quad (1)$$

De otra manera, su forma diferencial está definida en la ecuación (2).

$$\frac{d(stock)}{dt} = flujo\ de\ entrada(t) - flujo\ de\ salida(t) \quad (2)$$

Los efectos combinados del flujo de entrada y salida representan las derivadas de la acumulación siendo cada uno cambios positivos (aumento de la variable de acumulación) y cambios negativos (reducción de la variable de acumulación), respectivamente. Además, podrían existir múltiples variables de flujos de entrada y salida asociados a una determinada variable de acumulación (Lin et al., 2020).

2.8. Proceso de modelación de los sistemas dinámicos

La modelación SD fue originalmente creada con el objetivo de simular los mecanismos emergentes y un medio para la explicación y comprensión de un sistema (Lin et al.; 2020). Sin embargo, existen múltiples maneras de realizar o dirigir el proceso de modelación SD. Desde el inicio del desarrollo de los sistemas dinámicos, diversos investigadores del campo han desarrollado guías para la construcción y la validación de los modelos SD, los cuales desde la perspectiva que la creación de modelos SD son procesos iterativos, resultan en que cada propuesta subsecuente aporta en una mejora de resultados y de modelos más sólidos (Engelbertink, 2019).

Sin perjuicio de lo anterior mencionado, el procedimiento establecido por Sterman (2000) es reconocido como un esquema predominante según Bérard (2013). Un claro ejemplo que sostiene esta afirmación es que aún al presente, se ha usado en los estudios de Amiri, Mehrjerdi, Jalalimanesh y Sadegheih, 2020; Suryani, Hendrawan, Adipraja, Wibisono y Dewi, 2021; y Harrison, Grant-Muller y Hodgson, 2021. Sterman (2000) divide el proceso de modelación de los sistemas dinámicos en 5 etapas: articulación del problema, hipótesis dinámica, formulación, validación, y formulación y evaluación de políticas; además, resalta que este proceso es iterativo (figura 18).



Figura 18: Proceso de modelación de los sistemas dinámicos. Adaptado de “Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World” por Sterman, 2000, *Irwin-McGraw-Hill*, p. 87.

III. METODOLOGÍA

3.1. Zona de estudio

La Región de Lima Metropolitana es el área de la provincia de Lima (capital del Perú), la cual está conformada por 43 distritos en un área de 2812 km², más el área de la Provincia Constitucional del Callao que cuenta con 7 distritos, con una extensión territorial de 137 km² (Dawidowski, Sánchez-Ccoyllo, & Alarcón, 2014; Espinoza, 2018; Rojas et al., 2021). La figura 19 muestra la localización de la Región de Lima Metropolitana, mientras que, la figura 20 ilustra la distribución de sus distritos por zonas.

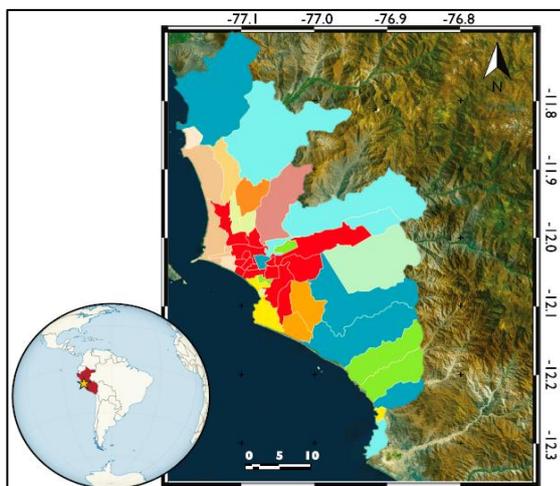


Figura 19: Localización de la Región de Lima Metropolitana. Adaptado de “Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru” por Silva et al, 2017, *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12), p. 4.

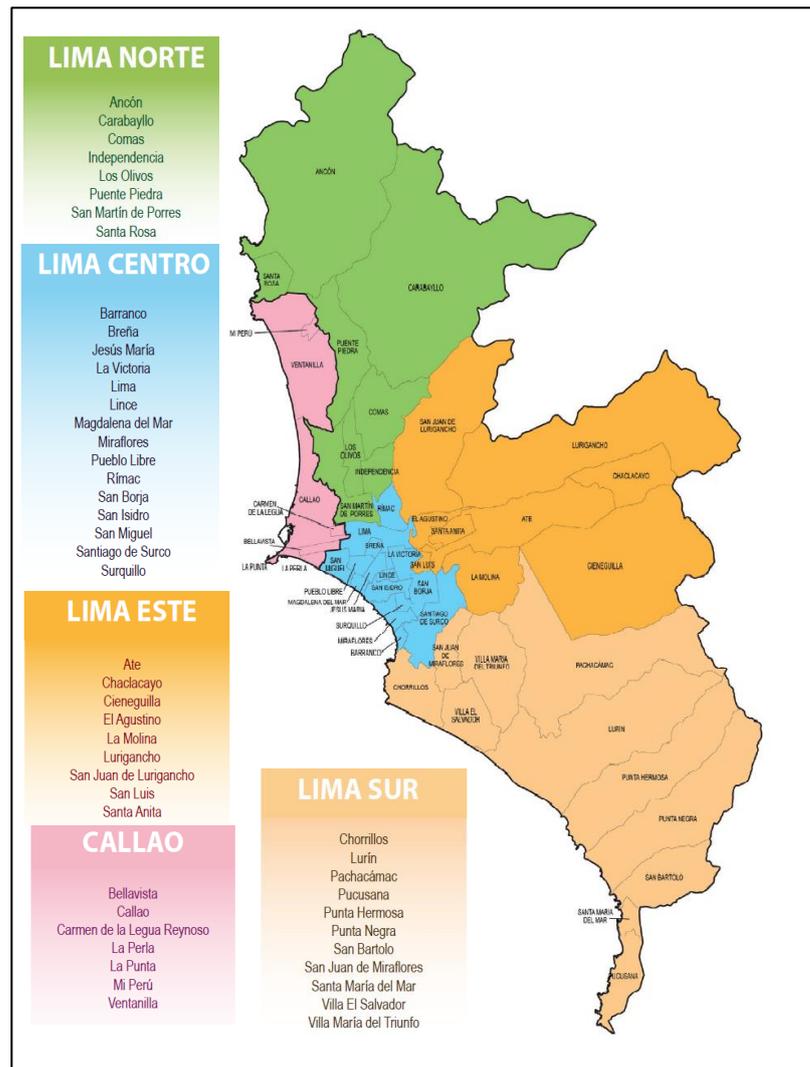


Figura 20: Lima Metropolitana y sus distritos por zonas. Adaptado de “Una Mirada a Lima Metropolitana” por Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2014, p. 9.

3.2. Equipos y softwares

Los materiales empleados para el desarrollo de la presente tesis fueron:

- 01 laptop
- Software: VensimPLE X64
- Software: Microsoft Word
- Software: Microsoft Excel

Sobre todo, es de destacar el uso del programa VensimPLE, debido a que por sus características se ajusta al propósito del estudio en la cual se requiere un software simple con

funciones de análisis de sensibilidad, interfaz intuitiva y que permiten la creación de modelos visuales para su presentación y exposición, además, se reconoce su eficiente funcionalidad en los estudios de los autores Dhirasasna y Sahin, 2019; Elsawah et al., 2017; Harrison et al., 2021 y Suryani et al., 2021.

3.3. Datos

Los datos expresados en variables y sus respectivas fuentes son resumidas en la tabla 10. Se precisa que, la mayoría de datos están publicados en plataformas virtuales del estado, pero en algunos casos se obtuvieron solicitando a la entidad pública mediante el uso de la Ley N° 27806, Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública (por ejemplo, para obtener información perteneciente a la ATU y MINAM).

Tabla 10: Datos (variables) y sus fuentes de obtención referentes a Lima Metropolitana

Datos (variables)	Fuentes
Población	INEI – Perú Compendio estadístico 2023
PBI local	INEI – Perú Compendio estadístico 2023
Tasa de viajes motorizados por persona por día	ATU – Indicadores – ATU. Reporte de viajes diarios de Lima y Callao al año 2019 Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC] – Reporte de seguimiento año 2020, 2021 y 2022 de la Política Nacional de Transporte Urbano
Preferencia por el TPC	ATU. Información solicitada
Proporción de unidades del TPC a diésel según tecnología vehicular	ATU. Información solicitada

Continuación ...

Distancia de viaje promedio por viaje por categoría vehicular y tasa de ocupación vehicular

MTC y GIZ - TRANSPerú – Sustainable Urban Transport NAMA Peru.

Agencia de Cooperación Internacional de Japón [JICA] y MTC. Encuesta de Recolección de Información Básica del Transporte Urbano en el Área Metropolitana de Lima y Callao – Informe Final 2013.

Factor de emisión según tecnología vehicular y según categoría vehicular

EEA - EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. 1.A.3.b.i-iv Road transport 2023.

Concentración de PM_{2.5} en el ambiente en Lima Metropolitana

MINAM. Información solicitada

INEI. Informes técnicos de estadísticas ambientales

Factor de emisión-concentración para las emisiones de PM_{2.5} y NO_x en concentración de PM_{2.5}

IEc (2021)

Factor dosis-respuesta y riesgo relativo para el efecto final de morbilidad y mortalidad por exposición al PM_{2.5}

Dávila, et al. (2020); Hadei et al. (2021); Chen et al. (2023); GBD 2019 Risk Factors Collaborators (2020); Dales et al. (2021); Tapia, et al. (2020); Liao et al. (2020); y Burnett et al. (2018).

Tasas de efecto final para la morbilidad y mortalidad en Lima Metropolitana según grupos de edad

MINSA - Repositorio Único Nacional de Información en Salud

Costos unitarios por enfermedad

Silva et al. (2021); MINAM (2014); Idrogo (2020); Koehring y Kielstra (2018); Sanabria et al. (2022); Camacho et al. (2018); Foo et al. (2016); y Licapa (2019)

Valor promedio estadístico de la vida

Seminario (2017) e IEc (2021)

Concerniente al transporte público convencional a diésel. La ATU brindó la información de la cantidad de unidades según tipo (combi o camioneta rural, microbús y ómnibus) y combustible (diésel, gasolina, gas licuado de propano-GLP, entre otros). La tabla 11 presenta las proporciones de unidades a diésel de la flota total según tipo de unidad vehicular en el periodo 2019-2023, y su promedio aritmético. Por ejemplo, señala que para el 2019, el 90% de unidades de la flota total de combis registradas por la ATU, son unidades a diésel, y que en promedio durante el periodo 2019-2023, en promedio el 93% de unidades de combis usan el diésel como combustible, mientras que, el resto de flota (7%) utiliza otros combustibles.

Tabla 11: Porcentaje de unidades a diésel de la flota total según tipo de unidad vehicular en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023

Año	Combis	Microbús	Ómnibus
2019	90%	88%	67%
2020	93%	92%	70%
2021	93%	91%	69%
2022	92%	87%	69%
2023	95%	95%	73%
Promedio	93%	91%	70%

3.4. Método

3.4.1. Identificación de los factores que causan e influyen en la emisión de PM_{2.5} y estimación de sus aportes a las concentraciones ambientales, provenientes del transporte público convencional a diésel

3.4.1.1. Identificación de los factores que causan e influyen en la emisión de PM_{2.5} del transporte público convencional a diésel

Mediante la revisión bibliográfica se determinó los principales factores que causan e influyen en la emisión de PM_{2.5} proveniente del transporte público convencional a diésel durante

el periodo 2019 – 2023. Para ello, se procedió a realizar una exhaustiva revisión bibliográfica mediante el uso del buscador Google Académico, con el fin de encontrar artículos publicados en revistas indexadas; el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación denominado ALICIA (Acceso Libre a la Información Científica) del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación [CONCYTEC]; y el Registro Nacional de Trabajos de Investigación [RENATI] de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria [SUNEDU]. De este modo, se eligió los trabajos de Choy, 2014; Carcelén, 2015; y Martínez, 2017; por ser los más relacionados en el contexto en estudio.

3.4.1.2. Estimación de los valores de emisión de PM_{2.5} proveniente del transporte público convencional a diésel y su comparación con los valores publicados de la ATU

Para este punto, se evaluaron los valores de emisión de PM_{2.5} proveniente del transporte público convencional reportados por la ATU, y se compararon con las estimaciones realizadas en el presente trabajo.

La estimación de emisiones se realizó a través de la metodología que se utilizó en el estudio de MTC – GIZ (2015), la cual establece que, para el caso de Lima Metropolitana, la estimación de las emisiones de cualquier contaminante en un periodo de tiempo debe comenzar por la población, multiplicada por la tasa de viajes, por la distancia recorrida promedio por cada viaje, por la tasa de ocupación (inversa) de cada vehículo, por el factor de emisión del contaminante por distancia recorrida del vehículo. La ecuación (3) resume el cálculo de emisiones para todo contaminante por los vehículos.

$$\frac{PM_{2.5}}{Año} = Personas * \frac{Viajes}{Persona*día} * \frac{365 Días}{Año} * \frac{P-km}{Viaje} * \frac{V-km}{P-km} * \frac{PM_{2.5}}{V-Km} \quad (3)$$

Tomando en consideración los valores de la Tabla 11 de la proporción de unidades a diésel. El siguiente punto a tomar en consideración fue la proporción de tecnología vehicular por tipo de unidad vehicular. Para ello, se estableció el siguiente patrón (en base a MINAM, 2021): categoría pre-Euro corresponde a los vehículos fabricados en el periodo antes del

2000; Euro 1 y I en el periodo 2000-2002; Euro 2 y II, en el periodo 2003-2007; Euro 3 y III, en el periodo del 2007-2017; y Euro 4/IV, en el periodo del 2018-2024. Aunque, se tiene en cronograma que desde el 2025 en adelante se permitirá solo la entrada de vehículos con tecnología Euro 6 y VI o con sistemas de control más estrictos. En el Anexo 2 y Anexo 3 se detallan la distribución tomada en consideración (brindada por la ATU) y los FE usados, respectivamente.

Además, se hizo una homologación frente a las categorías vehiculares. Para la combi o camioneta rural (vans) son aplicables bajo la norma Euro 1;2; ...6. Para el microbús (coaster) y ómnibus (bus) son aplicables la norma Euro I, II, ...VI, bajo la denominación “midibus”. Ya que especificar en este punto, ayudó a atribuir los factores de emisión con mayor claridad.

Por otra parte, las estimaciones de la población, la tasa de viajes, la distancia recorrida promedio por cada viaje, la tasa de ocupación (inversa) de cada vehículo, y el factor de emisión del contaminante por distancia recorrida del vehículo, son explicadas más a profundidad en el acápite Aplicación del modelo del sistema dinámico y Anexo 1.

3.4.1.3. Estimación de las concentraciones aportadas al PM_{2.5} en el ambiente proveniente de las emisiones del transporte público convencional a diésel

Se estimaron las concentraciones aportadas al PM_{2.5} en el ambiente proveniente de las emisiones del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019-2023, mediante los factores de emisión-concentración.

El paso de emisiones a concentraciones fue realizado tomando en consideración los factores de emisión-concentración (FEC) reportados en IEc (2021) para Lima Metropolitana. Para ello, se emplea la ecuación (4), que establece que, la contribución a la concentración ambiental (C^p) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es equivalente a las emisiones primarias para el contaminante p (E^p)

en toneladas al año dividido entre el Factor de Emisión-Concentración (FEC^p) para el contaminante p en unidades de toneladas al año por $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

$$C^p = \frac{E^p}{FEC^p} \quad (4)$$

Si bien IEC (2021) realizó las estimaciones de emisiones de $\text{PM}_{2.5}$, NO_x y SO_2 para su paso a concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ ambiental, se observó que el aporte del SO_2 es mínimo en comparación frente al aporte de los otros contaminantes. Por otra parte, la “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. 1.A.3.b.i-iv Road transport 2023” no presenta un método de cálculo específicamente para el SO_2 . Por último, acorde a lo estimado por Choy (2014), el transporte público aporta mínimamente a los SO_x . Por ende, las estimaciones se realizaron de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ ambientales proveniente de las emisiones vehiculares de $\text{PM}_{2.5}$ y NO_x , la tabla 12 establece los FEC^p utilizados.

Tabla 12: Factores de emisión-concentración para las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$

Contaminante	FEC (t/año por $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
$\text{PM}_{2.5}$	1148.106
NO_x	18867.925

3.4.2. Evaluación de la morbilidad y mortalidad asociada a la exposición de $\text{PM}_{2.5}$ producida por el transporte público convencional a diésel

Para la estimación de los casos de morbilidad y mortalidad por exposición a las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ ambiental contribuidas por el transporte público convencional a diésel, se utilizó un esquema de trabajo desde lo general a lo específico. Dicho de otro modo, en primer lugar, se determinó los casos de morbilidad y mortalidad por exposición a la concentración promedio anual de $\text{PM}_{2.5}$ ambiental en Lima Metropolitana. Posteriormente, se calculó los casos de morbilidad y mortalidad de manera proporcional a la contribución de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ aportadas por el transporte público convencional a diésel.

3.4.2.1. Determinación de los principales efectos adversos en la salud por la exposición de PM_{2.5} en el ambiente

A través de la revisión bibliográfica, es decir, la búsqueda de artículos en revistas indexadas como Scielo, Dialnet, SCOPUS; o publicaciones de la OMS y MINSA, que hayan evaluado el impacto en la salud mediante estudios de asociación, se determinó las principales asociaciones de la exposición a PM_{2.5} con respecto a los efectos adversos en la salud divididos en el efecto final comprobado como la morbilidad y la mortalidad en Lima Metropolitana.

3.4.2.2. Estimación de casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de PM_{2.5} en el ambiente y su comparación con los valores de otros estudios relacionados

Se estimó los casos por morbilidad y mortalidad asociados a la exposición a PM_{2.5} en Lima Metropolitana, comparando los resultados con estudios previos de: IEc, 2021; Sánchez, Ordoñez, Arratea, Marín y Reátegui, 2021; Silva et al., 2021; y C40 Cities, 2022. Estos estudios fueron seleccionados por que se realizaron para el área en estudio, el contaminante y con datos contemporáneos relativamente.

En cuanto a la ecuación para la estimación de la variación del impacto en la salud por variaciones en la concentración de determinado contaminante, Silva et al. (2021) destacan el uso de la ecuación (5) que establece que, el número de casos del efecto final j (ΔK^j) es proporcional a la relación de una población expuesta por la tasa del efecto final en evaluación (T^j) por la fracción atribuible a la población (PAF).

$$\Delta K^j = Población * T^j * PAF \quad (5)$$

La fracción atribuible a la población (PAF) está definida como la fracción del total del fallecimiento (o adquirir una morbilidad o impacto en la salud) atribuible a la exposición hacia el contaminante (Burnett et al. 2018). Adicionalmente, este es resultado de la función concentración-respuesta, la cual establece la ecuación (6), en la que, la PAF es equivalente a 1

menos la inversa del factor de Riesgo Relativo (RR^j) o el cociente de riesgo (el cociente de riesgo puede reemplazar el RR para tasas de efecto final < 0.1 , según Pozzer et al., 2022 y Burnett et al., 2018) para el contaminante j en evaluación.

$$PAF = \left(1 - \frac{1}{RR^j}\right) \quad (6)$$

En las investigaciones epidemiológicas, el RR está definido como la tasa de la probabilidad de fallecer (o adquirir una morbilidad o impacto en la salud) para una cierta edad (o rango de edad) dada una específica exposición al contaminante, entre la probabilidad de fallecer (o adquirir una morbilidad o impacto en la salud) a la misma edad (o rango de edad) asumiendo una exposición contrafactual en un grupo no expuesto al contaminante (Burnett et al. 2018). Pozzer, et al. (2022) declaran que, el RR ha sido ampliamente estudiado en diversas investigaciones en base a multitud de estudios epidemiológicos de efectos a largo plazo. Los autores sostienen que, la primera función de concentración-respuesta se datan desde el 2002, con la implementación de la función logarítmica lineal, ecuación (7), la cual comprende que, el RR^j está en función de la forma exponencial del factor dosis-respuesta (o coeficiente de concentración-respuesta) para el contaminante j (β^j) multiplicado por la diferencia de concentración actual del contaminante j (C) menos la concentración umbral del contaminante j (C^0). Se precisa que, la concentración umbral del contaminante es considerada como el valor que no es dañino o que no causa efectos adversos en la salud humana. Por otra parte, tanto Pozzer, et al. (2022) como Silva et al. (2021) reafirman su aún vigente uso como una de las principales funciones de concentración-respuesta.

$$RR^j = e^{\beta^j(C-C^0)} \quad (7)$$

Un caso específico de estimación del exceso de casos de mortalidad es el elaborado por Burnett et al. (2018), los cuales desarrollaron el Modelo Global de Exposición por Mortalidad (GEMM, por sus iniciales en inglés) para cuantificar el exceso de mortalidad por la exposición a largo plazo de $PM_{2.5}$ en el medio ambiente, el cual fue referenciado por la OMS (2021). Para ello, abarcan el grupo de mortalidad por enfermedades no transmisibles (en función a la totalidad de muertes por causas naturales) más las infecciones respiratorias de las vías inferiores o bajas (ENT + IRAB). La ecuación de GEMM (8) se basa en una subfunción de z , ecuación (9), en función a la variación de concentraciones actuales del contaminante j menos el umbral de concentraciones, y los parámetros θ^j , α^j , μ^j y ν^j , que fueron calculados en base a los resultados de los estudios epidemiológicos.

$$GEMM: RR^j(C) = e^{\frac{\theta^j * \ln(\frac{Z}{a^j + 1})}{(1 + e^{-\frac{(Z - \mu^j)}{v^j}})}} \quad (8)$$

$$Z = \max(0, C - C^0) \quad (9)$$

En ese contexto, la función logarítmica lineal fue utilizada para la estimación de los casos de morbilidad y mortalidad a corto plazo (el mismo año); mientras que, mediante el GEMM se estimó la mortalidad a largo plazo (efecto en 5 años). Aunado a lo anterior, para la estimación de los casos por morbilidad y mortalidad asociados a la exposición a PM_{2.5} en Lima Metropolitana se utilizaron los factores o coeficientes concentración-respuesta (descritas en la tabla 13) y las tasas de efecto final para Lima Metropolitana (tabla 14).

Tabla 13: Las morbilidades consideradas, según sus efectos finales y coeficientes concentración-respuesta en base al rango de edades

Rango de edades	Tipo de efecto final	Efectos finales (K^j)	Coficiente concentración-respuesta (β^j)	Fuente
		1. Asma		
Menos de 5 años	Morbilidad a corto plazo	2. Neumonía	1. 0.0095	Dávila, et al. (2020)
		2. Infecciones respiratorias agudas de las vías inferiores	2. 0.0157	
			3. 0.0058	
Mayores o igual a 25 años	Morbilidad a corto plazo	COVID-19	1. 0.0049 ^a	1. Lavigne et al. (2023)
			2. 0.0009 ^b	2. Chen et al. (2023)

Continuación ...

Morbilidad a mediano plazo	1. Enfermedad pulmonar obstructiva crónica.		GBD 2019 Risk Factors Collaborators (2020)
	2. Accidentes cerebrovasculares.		
	3. Enfermedades isquémicas del corazón.	1. 0.0109 2. 0.0175	
	4. Infecciones respiratorias de las vías inferiores.	3. 0.0154 4. 0.0045 5. 0.025	
	5. Diabetes Mellitus tipo 2.	6. 0.0144	
	6. Tumores malignos de la tráquea, bronquios y pulmón.		
Mortalidad a corto plazo	1. COVID-19	1. 0.0031	1. Dales et al. (2021)
	2. Enfermedades en el sistema respiratorio y circulatorio.	1. 0.0007 ^b 2. 0.0029	1. Chen et al. (2023) 2. Tapia, et al. (2020)
Mortalidad a largo plazo	Enfermedades no transmisibles más infecciones respiratorias de las vías inferiores (todas las causas no naturales)	Basado en la ecuación de GEMM	Burnett et al. (2018)

Continuación ...

Todas las edades	Morbilidad a corto plazo	1. Admisiones hospitalarias por enfermedades del sistema respiratorio.	1. 0.00604	Liao et al. (2020)
		2. Admisiones hospitalarias por enfermedades del sistema circulatorio.	2. 0.00697	

Nota: Los coeficientes concentración-respuesta son obtenidos en base a la función logarítmica lineal del riesgo relativo. GEMM = Modelo Global de Exposición por Mortalidad. Corto plazo = el efecto se da en el mismo año. Mediano plazo = el efecto se da un año después de la exposición. Largo plazo = el efecto se da 5 años después de la exposición. ^a fue calculado en base al odds ratio (OR), una aproximación del RR (siempre y cuando los valores sean muy reducidos). ^b es calculado en base a la reducción de riesgo por efecto de la vacunación.

Tabla 14: Tasa (cada 100 mil habitantes) por efecto final en la salud para Lima Metropolitana

Efecto final en la salud (K^j)	Tasa (T^j)
	0.11
	0.14
Hospitalización por COVID-19 ^a	0.09
	0.01
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica ^a	0.38
Accidentes cerebrovasculares ^a	0.06
Enfermedades isquémicas del corazón ^a	0.04
Infecciones respiratorias de las vías inferiores ^a	0.21
Diabetes Mellitus tipo 2 ^a	0.40
Tumores malignos de la tráquea, bronquios y pulmón ^a	0.01
Infecciones respiratorias agudas de las vías inferiores ^b	0.17
Neumonía ^b	0.01
Asma ^b	0.19
Admisiones hospitalarias por enfermedades del sistema respiratorio ^c	0.59
Admisiones hospitalarias por enfermedades del sistema circulatorio ^c	0.28

Continuación ...

Mortalidad por enfermedades del sistema respiratorio y circulatorio ^c	0.36
	0.44
	0.47
Mortalidad por COVID-19 ^a	0.06
	0.01
Mortalidad por enfermedades del sistema respiratorio y circulatorio ^c	1.06

Nota: ^a Mayor o igual a 25 años. ^b Menor a 5 años. ^c Todas las edades (0-99 años)

Por otro lado, cabe señalar que, debido al reducido número de registros diarios de monitoreos de la calidad del aire para la medición del PM_{2.5} durante el periodo en estudio, se dio el siguiente tratamiento de los datos. Las concentraciones de PM_{2.5} anuales fueron estimadas en base a la ponderación de las concentraciones diarias a un promedio mensual, siempre y cuando sean mayores a 15 días por estación. Posteriormente, se hizo la ponderación de las concentraciones mensuales a anuales, siempre y cuando sean mayores a 6 meses. Por último, se promedió entre las estaciones de monitoreo del SENAMHI que tenían valores significativos para el cálculo de la concentración anual de PM_{2.5} en Lima Metropolitana. Las concentraciones de PM_{2.5} ambiental en Lima Metropolitana en el periodo 2019 al 2023 son descritas en la tabla 15.

Tabla 15: Concentración promedio de PM_{2.5} ambiental (µg/m³) en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023

Año	Concentración de PM_{2.5} ambiental
2019	32.03
2020	19.92
2021	31.72
2022	31.62
2023	25.29

Por los demás datos involucrados como las estimaciones de la población, son más ampliamente discutidos en el acápite Aplicación del modelo del sistema dinámico y Anexo 1.

3.4.2.3. Estimación de los casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de PM_{2.5} en el ambiente contribuido por el transporte público convencional a diésel

En base a las concentraciones aportadas (de manera proporcional) se estimaron los casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición a PM_{2.5} contribuidos por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019-2023.

3.4.3. Cuantificación del costo económico ambiental atribuido a la exposición de PM_{2.5} provenientes del transporte público convencional a diésel

Se calculó el costo económico ambiental atribuido a la exposición de PM_{2.5} (o también referenciado como costo de la contaminación ambiental del aire) provenientes del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 – 2023. Para ello, en primer lugar, se cuantificó el costo económico ambiental, para una tasa de cambio promedio de 2022 (1 \$ = S/. 3.835), atribuido a la concentración promedio anual de PM_{2.5} ambiental en Lima Metropolitana. Después, se calculó el costo económico ambiental de manera proporcional a la contribución de las concentraciones de PM_{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel.

3.4.3.1. Estimación del costo económico ambiental atribuible a la concentración de PM_{2.5} en el ambiente y su comparación con otros estudios previos

Al respecto, MINAM (2014) menciona que para medir los riesgos a la salud atribuidos a la contaminación ambiental es necesario usar métodos directos e indirectos de valoración económica. Según Ripari, Moscoso y Elorza (2012) los métodos directos involucran los gastos

de prevención, detección, tratamiento, rehabilitación, cuidados paliativos, entre otros, de una determinada enfermedad. En otras palabras, los gastos de consumo de recursos y servicios usados en instituciones de salud u hogar para la detección y mitigación de la enfermedad. Por otra parte, está el método de la disposición a pagar, considerada como la máxima cantidad de dinero que están dispuestas a pagar las personas para disminuir el riesgo de tener una muerte prematura o la probabilidad de adquirir una enfermedad (MINAM, 2014).

Asimismo, MINAM (2014) sostiene que, de los métodos indirectos, el que más sobresale es el método de la función de daño, que determina los impactos físicos de la contaminación, en base a estudios epidemiológicos, a través del método del capital humano, el cual está asociado al ingreso dejado de percibir como resultado de una muerte prematura o al adquirir una morbilidad. En el caso de una muerte prematura, es el resultado del valor aproximado de ingresos que dejaría de generar una persona desde el momento que fallece hasta la culminación de la edad para trabajar (incapaz de generar mayores ingresos). Mientras que, para el caso de adquirir una morbilidad, esta pérdida de ingresos sería los días dejados de laborar por la afectación a la salud.

De este modo, mediante la ecuación (10) (también usado en Silva et al., 2021) se realizó el cálculo por costo anual de la morbilidad por persona.

$$CE = DH * CH + NV * CV + DP * IP + GM \quad (10)$$

CE= Costo unitario por casos por efecto de la morbilidad anual por persona

DH= Días de hospitalización al año

CH= Costo de hospitalización por día por persona

NV= Número de visitas médicas al año

CV= Costo por visita médica por persona

DP= Días dejados de laborar al año

IP= Ingresos no percibidos por día por persona

GM= Gasto promedio en medicamentos al año por persona

De manera similar, mediante la ecuación (11) (también usado en Silva et al., 2021 e IEC, 2021), se realizó el cálculo del costo anual de la mortalidad por persona.

$$CM = \text{Muerte prematura} * VEV \quad (11)$$

CM= Costo por muerte prematura

VEV= Valor promedio estadístico de la vida humana

Luego, se enlistó los principales costos a utilizar según morbilidad y el valor promedio estadístico de la vida humana, para la valoración de la mortalidad, en soles (S/.) a precios constantes del 2007, representados en la tabla 16 y 17, respectivamente.

Tabla 16: Costos unitarios anuales por persona según tipo de morbilidad

Tipo de morbilidad según rango de edad	Costo por hospitalización		Costo por visita médica		Ingresos no percibidos		Costo por medicamentos (S/.)	Costo total (S/.)	Referencia
	Días	Costo de hospitalización por día (S/.)	Días	Costo de visita médica por día (S/.)	Días	IPD (S/.)			
Infecciones respiratorias agudas (<5 años)	7	275	1	85	NA	NA	23	2033	Silva et al. (2021)
Neumonía (<5 años)	7	275	1	85	NA	NA	85	2095	Silva et al. (2021)
Asma (<5 años)	7	275	1	85	NA	NA	85	2095	Silva et al. (2021)

Continuación ...

Hospitalización por enfermedades al sistema respiratorio (todos los años)	8	146	NA	NA	13	Est.	NA	1561	MI-NAM (2014)
Hospitalización por enfermedades al sistema circulatorio (todos los años)	8	146	NA	NA	13	Est.	NA	1561	MI-NAM (2014)
Infecciones respiratorias de las vías inferiores (>25 años)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	176	Idrogo (2020)
Cáncer de tráquea, pulmón y bronquios (>25 años)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	23137	Koehring y Kielstra (2018)
Enfermedades isquémicas del corazón (>25 años) ^a	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	11475	Sanabria et al. (2022)
Accidentes cerebrovasculares (>25 años) ^b	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	17450	Camacho et al. (2018)
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (>25 años)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	10256	Foo et al. (2016)

Continuación ...

Diabetes mellitus tipo 2 (>25 años)	NA	602	Licapa (2019)						
Hospitalización por COVID-19	NA	64* IPD	Curro- Urbano et al. (2022)						

Nota: Los valores están en soles a precios constantes del 2007. Est = estimado en base al PBI per cápita, explicado en el Anexo 1. NA= no aplica. IPD = ingreso promedio diario. ^a Se utilizó una aproximación para el rango de edad seleccionado. ^b Es un valor aproximado.

Tabla 17: Costos anuales por persona según por mortalidad según grupos de edad para Lima Metropolitana

Rango de años de edad	Valor promedio estadístico de la vida humana	Fuente
Mayor o igual a 25 años	341172	IEc (2021)
Todas las edades (0-99 años)	465784	Seminario (2017)

Nota: Los valores están en soles a precios constantes del 2007.

Tomando en consideración todo lo anterior, se registraron y compararon los principales estudios que estimaron los costos económicos ambientales, los cuales son formados por la suma de los costos por morbilidad y los costos por mortalidad (muerte prematura), asociados a la exposición a PM_{2.5} en Lima Metropolitana, con las estimaciones realizadas en el presente trabajo.

3.4.3.2. Estimación del costo económico ambiental atribuible a la concentración de PM_{2.5} en el ambiente debido a la contribución del transporte público convencional a diésel

Se estimó el costo económico ambiental, el cual es formado por la suma del costo por morbilidad y el costo por mortalidad (muerte prematura), atribuible a la concentración de PM_{2.5}

en el ambiente contribuida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023.

3.4.4. Aplicación del modelo del sistema dinámico

El proceso de modelación para el desarrollo del modelo dinámico del transporte urbano convencional como emisor de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana son explicados en su totalidad en el Anexo 1.

Se presentaron las proyecciones del modelo del 2013 al 2040 para las variables de:

- Población.
- PBI local.
- PBI per cápita.
- Número de viajes motorizados del transporte público convencional por día.
- La emisión de $PM_{2.5}$ y NO_x del transporte público convencional a diésel.
- La concentración de $PM_{2.5}$ en el ambiente contribuida por el transporte público convencional a diésel.
- La concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana en el ambiente.
- Las concentraciones de $PM_{2.5}$ total contribuidas por el resto de parque automotor, el transporte público convencional a diésel, las fuentes en área, y las fuentes fijas. Y, la concentración base de $PM_{2.5}$ ambiental determinado por las variables meteorológicas y del entorno físico.
- Número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental (anual y acumulativo) atribuido a las concentraciones de $PM_{2.5}$.
- Número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental (anual y acumulativo) atribuido a las concentraciones de $PM_{2.5}$ aportadas por el transporte público convencional a diésel.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Identificación de los factores que causan e influyen en la emisión de PM_{2.5} y estimación de sus aportes a las concentraciones ambientales, provenientes del transporte público convencional a diésel

4.1.1. Identificación de los factores que causan e influyen en la emisión de PM_{2.5} del transporte público convencional a diésel

Mediante la revisión bibliográfica de las principales investigaciones correspondiente a las emisiones de PM por parte del transporte público en Lima Metropolitana, se pudo sintetizar los principales factores que causan e influyen en la emisión de PM_{2.5} proveniente del transporte público convencional a diésel, los cuales son resumidos en la tabla 18.

Tabla 18: Factores que causan e influyen en la emisión de PM_{2.5} proveniente del transporte público convencional a diésel

Factor	Fuente
Distancia recorrida por vehículo o actividad vehicular o nivel de actividad (km-vehículo/periodo de tiempo) *	Choy (2014), Carcelén (2015)
Tipo o modelo vehicular	Choy (2014), Carcelén (2015) y Martínez (2017)
Patrones de conducción (como perfil de velocidad, aceleración y desaceleración)	Choy (2014), Carcelén (2015) ^a y Martínez (2017)
Edad vehicular (relacionado con el kilometraje recorrido)	Choy (2014), Carcelén (2015) y Martínez (2017)

Continuación ...

Factores de emisión para el contaminante, según el tipo de vehículo y según el sistema de control de emisiones (g/km)	Choy (2014), Carcelén (2015)
Tipo de carretera	Martínez (2017)
Mantenimiento vehicular	Martínez (2017)
Flujo vehicular	Martínez (2017)
Rendimiento del combustible (km/galón)	Martínez (2017)
Factores de emisión para el contaminante, según el tipo de vehículo (g/galón)	Martínez (2017)
Combustible (tipo y composición)	Choy (2014), Carcelén (2015) y Martínez (2017)

Nota: *Factor de causa. ^a Carcelén solo considera los patrones de velocidad, más no aceleración.

Como se ha podido vislumbrar en la tabla 18, el factor causa es la distancia recorrida por cada vehículo, y son diversos los factores que influyen en las emisiones de PM_{2.5}, los cuales pueden ser diferenciados principalmente en los que están relacionados directamente a la unidad vehicular (como el tipo o modelo, la edad del vehículo, el mantenimiento vehicular, y el sistema de control de emisiones), el combustible (como el tipo, el rendimiento, la composición), los relacionados al tránsito vehicular (como la distancia promedio de recorrido, patrones de conducción y flujo vehicular) y los propios del entorno (como el tipo de carretera).

Para el presente estudio, se tomó en consideración principalmente los factores de: la distancia recorrida por cada vehículo (en función a los viajes realizados); el tipo o modelo vehicular entre combi, microbús y ómnibus; el sistema de control de emisiones (relacionado en base a la edad del vehículo); el combustible diésel (y las características de su composición); y la velocidad promedio.

4.1.2. Estimación de los valores de emisión de PM_{2.5} proveniente del transporte público convencional a diésel y su comparación con los valores publicados de la ATU

La tabla 19 muestra los valores de emisiones de PM_{2.5} (t/año) reportados por la ATU publicados en los reportes del seguimiento al Plan Nacional del Transporte Urbano [PNUT] para los años 2019, 2020, 2021 y 2022, comparados con los valores estimados del presente estudio.

Tabla 19: Comparación de los valores de emisiones de PM_{2.5} (t/año) reportados por la ATU y los estimados en el presente estudio

Fuente/parámetro	2019	2020	2021	2022
ATU	596	601.2	601.2	523.3
Valores estimados	310.49	120.28	225.57	201.1
Diferencia del valor estimado entre el teórico	52%	20%	38%	38%

Nota: ATU=Autoridad de Transporte Urbano

Respecto a la tabla 19, la ATU ha estimado las emisiones del transporte público convencional (de todos los combustibles) siguiendo la ecuación (12), que establece que las emisiones estimadas (t/año) es igual al factor de emisión (g/km) por la tasa de actividad (km/año) (distancia promedio recorrida por el vehículo en un periodo de tiempo) por la cantidad de unidades vehiculares; para ello implementa los FE de la “EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook” y utilizó una tasa de actividad de 120000 km al año.

$$EE = FE \times TA \quad (12)$$

EE = Emisiones estimadas (t/año)

FE = Factor de emisión (g/km)

TA= Tasa de actividad (km/año)

Cabe precisar que, para el 2020 y 2021 (ambos con mismos valores), semejó los resultados para un escenario sin pandemia.

Se hace hincapié que, la tasa de actividad es un valor aproximado que ha variado en la literatura revisada con valores muy por debajo del usado por la ATU, por ejemplo: PROTRANSPORTE (2005) usó 28180, 51779 y 97320 km/año para combis, microbús y ómnibus, respectivamente; Inca (2019) usó 25000 km/año para las camioneta rurales; Choy (2014) usó un promedio de 6.5 km/día (2372.5 km/año) y Carcelén (2015) usó 60000 km/año, para todo el transporte público convencional. De lo anterior expuesto, se resalta que, la diferencia de emisiones se debe principalmente a la tasa de actividad usada de 120000 km/año, ya que, proviene de un valor constante calculado del Proyecto Planificado ante el Cambio Climático del 2014, el cual duplica el valor calculado de las emisiones de la ATU respecto a las del presente trabajo (para el 2019 con 52%), dicha tasa de actividad debe de ser revisada y actualizada para tener mayor precisión ante los cálculos de emisiones como fuente confiable para nuevos inventarios de emisiones.

Por otro lado, debido a este análisis basado la tasa de actividad y no en un esquema de viajes, solo se puede considerar escenarios de cambio de la eficiencia de combustibles o la modernización de flota (o también la reducción por chatarreo), más no en el cambio de modo de transporte (la preferencia o elección de transporte), la frecuencia de viaje y tasa de ocupación vehicular (pasajeros transportados por vehículo) (MTC-GIZ, 2015). Cuyo análisis de escenario sería de gran importancia debido a la futura implementación de nuevos sistemas de transporte masivo (como las líneas de metro).

Otro punto de interés, es que debido al esquema de tasa de actividad no se ha podido calcular las emisiones para el periodo de cuarentena en 2020 ni para el 2021 (aún en pandemia), sin embargo, la ATU sí contaba con la cuantificación de viajes con el reporte de viajes de 2021. Un esquema basado en la cantidad de viajes hubiera permitido la estimación de emisión de contaminantes en estos periodos con grandes limitaciones en el transporte.

4.1.3. Estimación las concentraciones aportadas al PM_{2.5} en el ambiente proveniente de las emisiones del transporte público convencional a diésel

Como resultado, la tabla 20 muestra las concentraciones aportadas al PM_{2.5} (µg/m³) en el ambiente proveniente de las emisiones (t/año) de PM_{2.5} y NO_x del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019-2023.

Tabla 20: Emisiones de PM_{2.5} y NO_x (t/año) y su aporte a las concentraciones de PM_{2.5} en el ambiente (µg/m³) proveniente de las emisiones del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019 - 2023

Parámetro	2019	2020	2021	2022	2023	PA	DE
Emisión de PM _{2.5}	310.49	120.28	225.57	201.1	178.2	207.13	69.71
Emisión de NO _x	6048.6	2508.64	5088.09	4971.22	4913.64	4706.03	1312.47
Concentración de PM _{2.5} primario aportado por las emisiones de PM _{2.5}	0.27	0.1	0.19	0.17	0.15	0.18	0.06
Concentración de PM _{2.5} secundario aportado por las emisiones de NO _x	0.32	0.13	0.26	0.26	0.26	0.25	0.07
Concentraciones de PM _{2.5} total	0.59	0.23	0.45	0.43	0.41	0.42	0.13

Nota: PA = Promedio aritmético. DE = Desviación estándar.

Referente a la tabla 20, en términos generales, las emisiones de $PM_{2.5}$ y su aporte a las concentraciones de $PM_{2.5}$, presentan una clara tendencia de reducción con el pasar de los años, siendo el 2020 el año de menores emisiones (reducción del 61% frente al 2019) por las restricciones de transporte por el COVID-19 (contrastable con la Figura 11). Sin embargo, desde el 2021 en adelante, se flexibilizaron las medidas restrictivas favoreciendo el uso del transporte público. Como resultado, para los años 2021, 2022 y 2023, la reducción (en comparación con el 2019) fue de 27%, 35% y 43%, respectivamente. Esta tendencia de reducción, la cual se incrementa considerablemente, se debe principalmente a la renovación de la flota vehicular de las tecnologías más contaminantes (Euro 3 y III y anteriores) al Euro 4/IV, la cual emite a menores niveles (ATU, 2020).

Para las emisiones de NO_x y su aporte a las concentraciones, también presentan una tendencia de reducción con el pasar de los años, pero menos significativa que el $PM_{2.5}$. En el 2020, 2021, 2022 y 2023 se observó una reducción (en comparación con el 2019) del 59%, 16%, 18% y 19%, respectivamente. Esta disminución no fue tan notable como para el $PM_{2.5}$ debido a que los FE, se reducen en menor proporción para el NO_x (véase Anexo 3).

Por último, para las concentraciones totales de $PM_{2.5}$ en el ambiente, siguiendo el aporte de los contaminantes antes explicados, se redujo para el 2020, 2021, 2022 y 2023 en 61%, 24%, 27% y 31%, respectivamente.

Es importante precisar que, solo se ha considerado la proporción de la flota de transporte formal que tiene registro la ATU, existiendo un gran número de vehículos informales, los cuales según Carcelén (2015) alcanzaría a ser 3500 unidades para el 2023, el 8.6% de la flota total. Asimismo, se asume que todas las unidades vehiculares emiten según las emisiones establecidas a niveles teóricos, sin embargo, IEc (2021) señala que cerca del 25% de vehículos a diésel emite por encima de los límites de emisiones establecidos. De este modo, los valores de emisiones estarían sujetos a un grado de subestimación.

Mención aparte requiere las emisiones de NO_x . Por un lado, Carcelén (2015) estimó implementando un factor de corrección por antigüedad vehicular, que aumentó exponencialmente

todas las emisiones de contaminantes. Como resultado, estimó emisiones de 65315 t/año (para el año 2013) para el transporte público a diésel. Por otro lado, Martínez (2017) estimó basándose en un modelo de flujo vehicular para las redes de tránsito vehicular en Lima Metropolitana, que generó un aumento de las emisiones proyectadas, por las reducidas velocidades que se podrían llegar a tener en el tránsito vehicular a lo largo del día (considerando horas pico). El cual obtuvo valores de 99092 t/año y 123650 t/año, para el 2005 y el 2025, respectivamente; para el transporte público por buses. Por lo que, las estimaciones del presente estudio podrían tener aún mayores valores adicionando modelos de flujo vehicular y factores de corrección por la antigüedad vehicular, en otras palabras, la concentración aportada por el transporte público convencional podría llegar a ser más de $6.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (más de 11 veces de lo estimado en el presente estudio).

4.2. Evaluación de la morbilidad y mortalidad asociada a la exposición de $\text{PM}_{2.5}$ producida por el transporte público convencional a diésel

4.2.1. Determinación de los principales efectos adversos en la salud por la exposición de $\text{PM}_{2.5}$ en el ambiente

Tomando en consideración que, en Lima Metropolitana se han realizado diversas investigaciones que establecieron los impactos negativos a la salud por la exposición de $\text{PM}_{2.5}$ en el ambiente. La tabla 21 representa los principales impactos negativos asociados a la exposición de $\text{PM}_{2.5}$ ambiental en Lima Metropolitana según efecto final de morbilidad y/o mortalidad. Cabe precisar que, el Global Burden of Disease 2019 (GBD 2019), ofrece una perspectiva general en base a un meta-análisis a nivel global de las enfermedades más asociadas a la exposición de $\text{PM}_{2.5}$ a largo plazo, muy utilizado a nivel local como a nivel de país.

Tabla 21: Principales impactos negativos asociados a la exposición de PM_{2.5} en Lima Metropolitana según efecto final de morbilidad y mortalidad

Principales impactos negativos en la salud por grupos de edades	Morbilidad / Mortalidad	Fuente
Complicaciones de Infecciones Respiratorias Agudas - IRA a neumonía o Síndrome de Obstrucción Bronquial - SOB/Asma en niños menores de 5 años.	Morbilidad	Ordoñez-Aquino y Ordoñez (2023)
Visitas de emergencia por enfermedades cardiorrespiratorias (todas las edades).	Morbilidad	Tapia et al. (2019)
Exposición crónica a niveles elevados de PM _{2.5} están asociados a una mayor incidencia de contraer COVID-19 y su mortalidad.	Ambos	Vásquez-Apestequi et al. (2021)
Incremento de la prevalencia de anemia moderada y severa en niños menores de 5 años.	Morbilidad	Morales-Ancajima, et al. (2019)
Visitas de consulta externa para las infecciones respiratorias agudas de las vías inferiores, neumonía y asma, para niños menores de 5 años.	Morbilidad	Dávila, et al. (2020)
Feto pequeño para la edad gestacional (menos del décimo percentil) y recién nacidos de bajo peso (<2.5 kg).	Morbilidad	Tapia, et al. (2020)
Visitas de emergencia por casos de asma (todas las edades).	Morbilidad	Vu, et al. (2021)
Exacerbación del asma, empeoramiento de síntomas en asma controlado y afectación a la calidad de vida (promedio de edad 13.2 años)	Morbilidad	Hansel, et al. (2019)
Mortalidad por enfermedades cardiorrespiratorias en el corto plazo (todas las edades).	Mortalidad	Tapia, et al. (2020)

Continuación ...

Muertes, años de vida perdidos y años de vida ajustados por discapacidad por las siguientes enfermedades: EPOC, IRAB, tumor maligno de pulmón, EIC y ACV (mayor o igual a 25 años). Ambos WHO (2016) ^a

Nota: ^a El estudio hace referencia a una evaluación para el Perú (incluyendo a Lima). EPOC = Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica. IRAB = Infecciones Respiratorias Agudas de las vías Bajas. EIC = Enfermedades Isquémicas del Corazón. ACV = Accidentes Cerebrovasculares.

4.2.2. Estimación de casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de PM_{2.5} en el ambiente y su comparación con los valores de otros estudios relacionados

La tabla 22 muestra la comparación de las estimaciones de los casos de morbilidad y mortalidad atribuidos a la exposición de PM_{2.5} ambiental en Lima Metropolitana según los artículos científicos publicados.

Tabla 22: Estimaciones de casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición de PM_{2.5} ambiental en Lima Metropolitana

Tipo de impacto en la salud	Sánchez et al. (2021) ^a	Silva et al. (2021) ^b	IEc (2021) ^c	C40 Cities (2022) ^d
Morbilidad	NC	32043	NC	NC
Mortalidad a corto plazo	NC	225	CI: 1245 CM: 1272 CS: 1486	NC
Mortalidad a largo plazo	CI: 2848 CM: 4295 CS: 5603	NC	CI: 10556 CM: 10838 CS: 12016	3600

Nota: En Silva et al. (2021) se obtuvieron los resultados al dividir lo obtenido entre 0.57, como se indica en el mismo estudio. NC = no calculado. CI = cálculo inferior. CM = cálculo medio. CS = cálculo superior. ^a Concentración umbral de 10 µg/m³ y fue calculado para el año 2016. ^b Concentración umbral de 25 µg/m³ y fue

calculado para el año 2019. ^c Concentración umbral de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y fue calculado para el año 2019. ^d Concentración umbral de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y fue calculado para el año 2020.

En relación a la tabla 22, la diferencia entre mortalidad a corto y largo plazo es debido al uso del RR. Si el RR fue calculado mediante un estudio epidemiológico que se basó en la medición de concentraciones diarias o anuales, de este modo, se pueden notar los efectos adversos en el corto o largo plazo en el periodo de estudio, respectivamente.

Sánchez et al. (2021) estimaron las muertes prematuras en base a un umbral de concentración anual de $\text{PM}_{2.5}$ establecidos en los estándares de la OMS (vigentes hasta el 2021) de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, desarrollaron el cálculo de exceso de muertes (mortalidad) para la población adulta (mayor o igual a 30 años) en Lima Metropolitana, mediante el uso de la tasa de mortalidad para todas las causas naturales de 876 por cada 100 mil habitantes (propio del contexto de Lima Metropolitana) y un RR de la literatura revisada. Los valores presentados por el estudio son muy sólidos y representativos y usados de manera referencial.

Mientras que, Silva et al. (2021) desarrollaron los cálculos basándose en el umbral de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ establecido en los ECA-Aire vigente para Perú, de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al año. Asimismo, realizaron el cálculo de morbilidad para un amplio rango de morbilidades. Cabe considerar que, para el caso de estimaciones de casos de mortalidad (en su mayoría), usaron el/los RR para mortalidad a corto plazo de Tapia et al. (2020). Aunque, en algunas tasas de efecto final se basó en la información por país y en otras a nivel de ciudad. Como consecuencia, los valores del estudio son de manera referencial.

Por otro lado, IEc (2021) optó por estimar en base al umbral de concentraciones anuales de $\text{PM}_{2.5}$ establecidos en los estándares de la OMS (vigentes hasta el 2021) de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mediante el uso de tasas de mortalidad para Lima Metropolitana. Adicionalmente, decidió evaluar 3 causas de mortalidad, dos a largo plazo y uno a corto plazo, mediante concentraciones reportadas in situ y mediciones estimadas vía modelos satelitales. Las diferencias son notorias, para el corto plazo el número de casos alcanza a 1486 muertes prematuras atribuidas a la exposición de $\text{PM}_{2.5}$ en el ambiente, mediante el uso de RR de Tapia et al. (2020); y, para el largo plazo, el número de casos alcanza a las 12016 muertes prematuras, mediante el uso

del RR de Burnett et al. (2018). Como resultado, ofrece un análisis sólido y consistente, siendo estos los más próximos en exactitud y precisión al esperado para el contexto en estudio.

Por último, C40 Cities (2022) optó por estimar en base al umbral de concentraciones de PM_{2.5} establecidos en los estándares actuales de la OMS (desde el 2021) de 5 µg/m³ al año. De este modo, estimó 3600 muertes prematuras para las concentraciones estimadas vía satelital para el 2020, tomando en consideración los valores de RR y tasas de mortalidad de 26.2 por cada 100 mil habitantes del GBD 2019 Risk Factors Collaborators (2020), cuyos datos abordan a nivel de país, más no por ciudad, siendo este valor muy por encima al estándar. Además, las concentraciones calculadas fueron de 37 µg/m³, muy superior a las mediciones in situ reportadas por SENAMHI para el 2020, y a la reducción de concentraciones significativas reportadas por la Municipalidad de Lima (2020). Por lo tanto, sus valores son considerados de manera referencial.

Aunado a lo anterior, la tabla 23 presenta los resultados estimados por el presente estudio de casos de morbilidad y mortalidad a corto y largo plazo, asociado a la exposición de PM_{2.5} en el ambiente de Lima Metropolitana para el periodo 2019 al 2023, tomando en consideración un umbral de 5 µg/m³. Asimismo, la tabla 24 muestra los casos de morbilidad y mortalidad asociados tomando en consideración una tasa por cada 100 mil habitantes, para homogenizar la comparación de resultados por cada año.

Tabla 23: Casos de morbilidad y mortalidad asociado a la exposición de PM_{2.5} en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 – 2023

Parámetro	2019	2020	2021	2022	2023	PA	DE
Concentración promedio							
de PM _{2.5} ambiental (µg/m ³)	32.03	19.92	31.72	31.62	25.29	28.12	5.38
Morbilidad	31292	28290	27213	34666	31987	30690	2988
Mortalidad a corto plazo	2544	2572	4709	2707	2085	2923	1025

Continuación ...

Mortalidad a largo plazo ^a	12542	9196	12932	13143	11504	11863	1619
---------------------------------------	-------	------	-------	-------	-------	-------	------

Nota: PA = Promedio aritmético. DE = Desviación estándar. ^a Los impactos serán vistos en un plazo de 5 años a la exposición de la concentración. Los valores de morbilidad y mortalidad fueron calculados en base a una concentración umbral de 5 µg/m³.

Tabla 24: Casos de morbilidad y mortalidad (por cada 100 mil habitantes) asociado a la exposición de PM_{2.5} en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 – 2023

Parámetro	2019	2020	2021	2022	2023	PA	DE
Morbilidad	295.70	261.83	247.43	310.19	282.02	279.43	25.25
Mortalidad a corto plazo	24.04	23.80	42.82	24.22	18.38	26.65	9.36
Mortalidad a largo plazo ^a	118.52	85.11	117.58	117.60	101.43	108.05	14.68

Nota: PA = Promedio aritmético. DE = Desviación estándar. ^a Los impactos serán vistos en un plazo de 5 años a la exposición de la concentración. Los valores de morbilidad y mortalidad fueron calculados en base a una concentración umbral de 5 µg/m³.

Respecto a la tabla 23, la concentración promedio de PM_{2.5} ambiental en el periodo de estudio fue de 28 µg/m³ con una desviación estándar de 5.38 µg/m³. El cual supera el ECA-Aire que establece un máximo anual (concentración umbral) de 25 µg/m³, y supera en más de 5 veces el valor de 5 µg/m³ establecido en la guía de la OMS. Además, se registró una notable reducción del 2019 al 2020, del 38%. Aunque le permitió cumplir el ECA-Aire, está aún muy por encima del valor de valor umbral de la OMS (398% veces mayor). Finalmente, se menciona que no mantiene una tendencia en particular en los años de estudio.

Referente a la tabla 24, el número de casos por morbilidad, para el 2020, llegó a estar por debajo de los niveles antes de la pandemia (reducción de 11% frente al 2019), este dato se debió a la reducción de la concentración de PM_{2.5} en el 2020, su efecto en el corto plazo (para ese mismo año) atenuaron el incremento a pesar del impacto del COVID-19, aunque los efectos de las concentraciones del año anterior (efecto a largo plazo del 2019) no permitieron una mayor reducción. En el 2021, hubo una reducción aún mayor (16% frente al

2019), el cual se debió a la concentración del 2020, por el efecto a largo plazo de su reducción. Para el 2022, se obtuvo el valor pico (5% de exceso frente al 2019), incremento debido a la concentración de PM_{2.5} del año 2021 y de ese mismo año. No obstante, el 2023 mostró una reducción (5% frente al 2019), toda vez que, es afectado por las concentraciones del año anterior y un aumento leve en la población. Los resultados desde el 2022, son concordantes al estudio de Hancco et al. (2022), acerca del aumento de los casos por enfermedades no transmisibles después de la pandemia de COVID-19 en el Perú.

Valores obtenidos para la morbilidad son muy cercanos a los obtenidos por Silva et al. (2021), con un 97% (valor estimado entre el teórico) para el 2019. No obstante, se esperaría que los datos para un escenario de 5 µg/m³ sean mucho mayores a los obtenidos por los autores. En ese contexto, se resalta el hecho de que en Lima Metropolitana ocurren aproximadamente 30 mil personas afectadas al año (como mínimo) por contraer enfermedades atribuidas al exceso de concentración de PM_{2.5} por encima al valor guía de la OMS.

En el caso de la mortalidad a corto plazo, como los impactos dependen de las concentraciones de PM_{2.5} de ese mismo año, se distinguió un aumento para el año 2020 (1% de exceso frente al 2019), el cual pudo haber tenido valores hasta 50% menores, pero por efecto de la primera ola del COVID-19, no hubo una mayor reducción. De manera contrastante, Giani et al. (2020) determinaron que la reducción de concentración de PM_{2.5} (a corto plazo, días de febrero a marzo) que ocurrió en el 2020, para China y Europa, trajo como resultado que aproximadamente 24200 y 2190 muertes prematuras fueron evitadas, respectivamente. Mientras que, para el año 2021, la ocurrencia de la segunda ola (con mayor impacto que la primera), provocó un ascenso de casi el doble de los casos de mortalidad a corto plazo (78% de exceso frente al 2019). Estos valores demostrarían la asociación entre concentraciones de PM_{2.5} en el ambiente para el 2021 y las defunciones por COVID-19, tal y como se asoció en Dales et al. (2021). A partir del 2022, como resultado de la mayor proporción de vacunación ante el COVID-19, los casos por mortalidad a corto plazo volvieron a aproximarse a niveles antes de la pandemia. Para el 2022 se obtuvieron valores ligeramente elevado (1% de exceso frente al 2019). En cambio, para el 2023, se obtuvo un descenso moderado (24% frente al 2019).

Los casos de mortalidad a corto plazo superaron ampliamente a los resultados de Silva et al. (2021) por el hecho de tener un umbral de concentraciones 5 veces menor. Del mismo modo, hay un incremento de mil casos, aproximadamente, con respecto a IEc (2021), con un 171.2% (valor estimado entre el teórico del límite superior, véase Tabla 22) para el 2019, por considerar un umbral de concentraciones más estricto y a los casos por COVID-19.

En el caso de la mortalidad a largo plazo, es primordial aclarar que, los efectos fueron calculados en función a un lapso de 5 años, es decir, las concentraciones expuestas en el 2019 tienen efectos contabilizados desde el 2024, así sucesivamente. Al igual que en los casos de morbilidad, ocurrió una reducción para las concentraciones expuestas de 2020 (28% frente al 2019). Para contrastar este punto, Giani et. al. (2020) determinaron que la reducción de concentración de $PM_{2.5}$ (en el largo plazo, 1 año) que ocurrió en el 2020 para China y Europa, trajo como resultado que, aproximadamente 287000 y 29500 muertes prematuras fueron evitadas, respectivamente. Posteriormente, la mortalidad a largo plazo en Lima Metropolitana seguiría un patrón de reducción desde el 2021. Para el 2021, 2022 y 2023 hubo una disminución del 1%, 1% y 14%, en comparación con el 2019, respectivamente. Los cuales son proporcionales a las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$.

Respecto a la comparación, este tuvo ligeramente valores mayores a los reportados por IEc (2021), con un 0.4% (valor estimado entre el teórico del cálculo inferior) para el 2019, debido al uso de una concentración umbral más estricta.

4.2.3. Estimación de casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de $PM_{2.5}$ contribuido por el transporte público convencional a diésel en el ambiente

La tabla 24 muestra los casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición a la concentración de $PM_{2.5}$ contribuido por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019-2023, el cual fue calculado tomando en consideración que, el impacto en la salud es proporcional al aporte de concentraciones del total de $PM_{2.5}$

en el ambiente. Asimismo, la tabla 26 muestra los casos de morbilidad y mortalidad asociados tomando en consideración una tasa por cada 100 mil habitantes, para homogenizar la comparación de resultados por cada año.

Tabla 25: Casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición a PM_{2.5} contribuido por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019-2023

Tipo de impacto en la salud	2019	2020	2021	2022	2023	PA	DE
Morbilidad	576	326	386	471	518	455	100
Mortalidad a corto plazo	46	29	66	36	33	42	15
Mortalidad a largo plazo	193	138	178	166	127	160	27

Nota: PA = Promedio aritmético. DE = Desviación estándar. En base a una concentración umbral de 5 µg/m³.

Tabla 26: Casos de morbilidad y mortalidad (por cada 100 mil habitantes) asociados a la exposición a PM_{2.5} contribuido por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el periodo 2019-2023

Tipo de impacto en la salud	2019	2020	2021	2022	2023	PA	DE
Morbilidad	5.44	3.02	3.51	4.21	4.57	4.2	0.94
Mortalidad a corto plazo	0.43	0.27	0.60	0.32	0.29	0.4	0.14
Mortalidad a largo plazo	1.82	1.28	1.62	1.49	1.12	1.5	0.28

Nota: PA = Promedio aritmético. DE = Desviación estándar. En base a una concentración umbral de 5 µg/m³.

Referente a la tabla 26, para los casos de morbilidad, existe una reducción notable del 2019 al 2020 (45%), por las restricciones del uso del transporte público. No obstante, desde el 2021 en adelante, se flexibiliza el uso del transporte público, incrementando para este año las emisiones a las habituales, pero con una tendencia a la reducción desde el 2021 por la renovación de flota (véase la Tabla 20). Aunado a lo anterior, cabe señalar que, los valores van a tender también a simular el comportamiento general (al ser solo una proporción) de las concentraciones de PM_{2.5} total y además el crecimiento poblacional aumenta la cantidad de población expuesta y por lo tanto, un mayor número de casos se reportarán. Considerando

lo anterior descrito, se calculó que, para el 2021, 2022 y 2023, la reducción (en comparación con el 2019) se va atenuando, siendo del 36%, 23% y 16%, respectivamente.

Referente a los casos de mortalidad a corto, y tomando en consideración lo descrito en el párrafo anterior, para el 2020, la reducción (frente al 2019) fue del 38%. Para el 2021, hubo un aumento (frente al 2019) del 38%. Por último, para el 2022 y 2023, se obtuvo una reducción (frente al 2019) del 26% y 33%, respectivamente.

Referente a los casos a largo plazo para el 2020, la reducción es mucho más marcada y de manera creciente con los años, ya que no están contemplados los efectos del COVID-19. Para el 2020, 2021, 2022 y 2023, la reducción (frente al 2019) fue del 30%, 11%, 19% y 39%, respectivamente.

4.3. Cuantificación del costo económico ambiental atribuido a la exposición de PM_{2.5} provenientes del transporte público convencional a diésel

4.3.1. Estimación del costo económico ambiental atribuible a la concentración de PM_{2.5} en el ambiente y su comparación con otros estudios previos

La tabla 27 presenta las principales investigaciones que han estimado los costos asociados atribuibles a los casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición de PM_{2.5} ambiental en Lima Metropolitana, para la tasa de cambio de dólar al 2022. Es importante recordar que, la valoración económica brinda un valor aproximado en términos monetarios de la pérdida (o los beneficios potenciales) para la sociedad al reducir la contaminación hasta alcanzar estándares o umbrales establecidos como inocuos. Es decir que, los valores presentados en las tablas abajo representan para la población de Lima Metropolitana, la pérdida económica monetaria aproximada por los impactos en la salud por la exposición a niveles por encima de los estándares establecidos ya sean a nivel nacional o internacional, que causaron morbilidad y mortalidad. Y, que estos valores referenciales pueden servir para priorizar la asignación de recursos públicos disponibles a nivel de localidad.

Tabla 27: Los costos económicos ambientales (millones de dólares) asociados a la exposición de PM_{2.5} ambiental en Lima Metropolitana de la literatura revisada

Parámetro	Silva et al. (2021) ^a	IEc (2021) ^b	C40 Cities ^c
Costos económico ambiental	45.85	1 764.39	2 165

Nota: ^a En base a una concentración umbral de 25 µg/m³, calculado para el año 2019 y para la morbilidad y mortalidad. ^b En base a una concentración umbral de 10 µg/m³, calculado para el año 2019 y para la mortalidad a largo plazo. ^c En base a una concentración umbral de 5 µg/m³, calculado para el año 2020 y para la mortalidad. En Silva et al. (2021) se obtuvieron los resultados al dividir lo obtenido entre 0.57, como se indica en el mismo estudio. Asimismo, se usó una homogenización de precios de los diferentes autores de referencia a la tasa de cambio de dólares para el 2022.

A partir de la tabla 27, se establece que, tanto Silva et al. (2021) como IEC (2021) utilizaron los valores del valor estadístico de la vida de Seminario (2007). Sin embargo, los primeros utilizaron el valor estimado promedio de S/. 465 784 para el rango de edad 0-99 años, en cambio, el segundo solo utilizó un valor que promedia el valor en S/. 341 172 para el rango de edad de mayor o igual a 25 años, ambos valores a precios constantes de 2007. Por su parte, C40 Cities (2022) utilizó un valor mucho mayor de S/. 1 802 380.55, a precios constantes de 2007.

Los valores de costo por casos por mortalidad superan en gran medida a los costos por casos por morbilidad, es por ello que estos son los que principalmente determinan el costo económico ambiental, y, por ello, las estimaciones de Silva et al. (2021) son los menores frente a los otros dos estudios (además de haber usado un umbral de concentraciones de 25 µg/m³). Por otro lado, como C40 Cities (2022) utilizó un valor estadístico promedio de la vida que no tiene constatación en base a otra fuente bibliográfica, este es usado como valores referenciales.

La tabla 28 muestra los costos económicos ambientales estimados atribuible a la contaminación de PM_{2.5} en el ambiente en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023, para la tasa de cambio de dólar al 2022.

Tabla 28: Estimaciones de los costos económicos ambientales (millones de dólares) atribuible a la concentración de PM_{2.5} en el ambiente en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023

Parámetro	2019	2020	2021	2022	2023	PA	DE
Costo económico ambiental	2 099	1 902	2 458	2 156	2 146	2 152	199

Nota: PA = Promedio aritmético. DE = Desviación estándar. Los valores están en base a una tasa de cambio al 2022. Los valores fueron estimados en base a una concentración umbral de 5 µg/m³.

De la tabla 28, como los costos son evaluados anualmente, los casos de mortalidad a largo plazo consideran la exposición a la contaminación de hace 5 años. A pesar de ello, las variaciones por el impacto de la pandemia se hacen de notar. Es de resaltar que para el 2020, se observó una reducción (frente al 2019) del 9%. No obstante, debido a que las concentraciones vuelven a ascender desde el 2021, sumado a los impactos de morbilidad y mortalidad a corto plazo del COVID-19, los costos son mayores al del 2019. De este modo, se calculó para el 2021, 2022 y 2023, un aumento (frente al 2019) del 17%, 3% y 2%, respectivamente.

Los cálculos realizados se mantienen en el rango próximo entre los estudios revisados. Es así que, con costos superiores moderadamente a IEc (2021), con un 118.96% (valor estimado entre el teórico) para el 2019; y, muy próximos a C40 Cities (2022) con un 87.9% (valor estimado entre el teórico) para el 2020. Por lo tanto, se recalca que, aproximadamente 2 mil millones de dólares (tasa de cambio al 2022) son los costos económicos ambientales asociados a la exposición de PM_{2.5} ambientales en Lima Metropolitana.

Es de considerar que, los valores estimados están en base al enfoque del capital humano, no obstante, considerando los valores del enfoque del bienestar, los valores estimados por cada muerte prematura serían de 0.48 millones de dólares para una tasa de cambio del 2013 (Díaz, Silva, Mogollón & Orihuela, 2021) o 1.61 millones de dólares para una tasa de cambio del 2013 (IEc, 2021). Usando estos valores, los resultados se duplicarían y, hasta podrían llegar a ser más de 8 veces a los costos estimados en el presente estudio.

Los resultados hallados ayudarían para los análisis costo-beneficio para la implementación de medidas, proyectos, planes y programas para la mejora de la calidad de aire. Ya que como

expresa la ATU (2020) “las externalidades ambientales, como la contaminación y los impactos en la salud, suelen quedar fuera del cálculo de costos pues son difíciles de monetizar” (p. 55).

4.3.2. Estimación del costo económico ambiental atribuible a la concentración de PM_{2.5} en el ambiente contribuido por el transporte público convencional a diésel

El costo económico ambiental atribuible a la concentración de PM_{2.5} en el ambiente contribuido por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023, se encuentran descritas en la tabla 29.

Tabla 29: Costo económico ambiental (millones de dólares) atribuible al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019-2023

Parámetro	2019	2020	2021	2022	2023	PA	DE
Costo económico ambiental	38.7	22	34.9	29.3	34.8	31.9	6.5

Nota: PA = Promedio aritmético. DE = Desviación estándar. Los valores están en base a una tasa de cambio al 2022. Los valores fueron estimados en base a una concentración umbral de 5 µg/m³.

La tabla 29 muestra que para el 2020, se observó una reducción (frente al 2019) del 43%. No obstante, debido a que las concentraciones vuelven a ascender desde el 2021, sumado a los impactos de morbilidad y mortalidad a corto plazo del COVID-19 y las mayores emisiones del transporte público convencional a diésel, los costos son mayores al del 2019. De este modo, se calculó para el 2021, 2022 y 2023, un aumento (frente al 2019) del 10%, 24% y 10%, respectivamente.

Es de priorizar que, durante el periodo en estudio se estima que aproximadamente 19.5 mil millones de dólares (tasa de cambio al 2022) le cuesta al año como externalidad negativa por la contaminación ambiental a Lima Metropolitana. Y que tomando en consideración estos valores, se pueden priorizar los proyectos y medidas necesarias para mejorar la sostenibilidad del transporte público convencional.

4.4. Aplicación del modelo del sistema dinámico

4.4.1. Proyección del PBI local y la población en Lima Metropolitana para el periodo 2013 al 2040

La figura 21 ilustra el comportamiento y la proyección del PBI local (soles a precios constantes de 2007) y la población (personas) en Lima Metropolitana para el periodo 2013 al 2040.

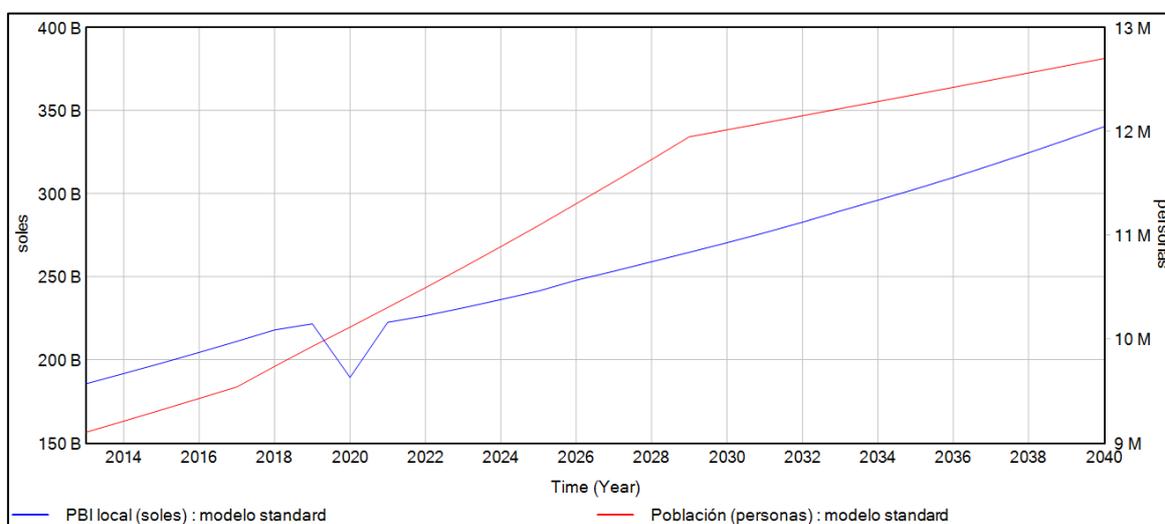


Figura 21: Proyección del PBI local y la población en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040. B = mil millones. M = millones. A precios constantes de 2007.

Respecto a la figura 21, de hecho, el 2020 fue el único año de caída o pérdida en el PBI local por las restricciones del COVID-19, principalmente para las actividades productivas, como se ilustró en la Figura 11 (acorde a Rojas et al., 2021). Así que, en general, la tendencia que se mantiene en el tiempo para ambas variables es de crecimiento constante. De este modo, en el periodo 2013 al 2040, el PBI local pasaría de ser 185.5 mil millones de soles a ser más de 340 mil millones de soles (aumento del 183%, a precios constantes de 2007); y la población en Lima Metropolitana pasaría de ser 9.1 millones de personas a ser más de 12.6 millones de personas (aumento del 38%).

4.4.2. Proyección del número de viajes diarios por transporte público convencional y el PBI per cápita en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040

A través de la figura 22, se puede observar el comportamiento y proyección del número de viajes diarios por transporte público convencional (viajes/día) y el PBI per cápita (soles/persona, a precios constantes de 2007) en Lima Metropolitana, en el periodo 2013-2040.

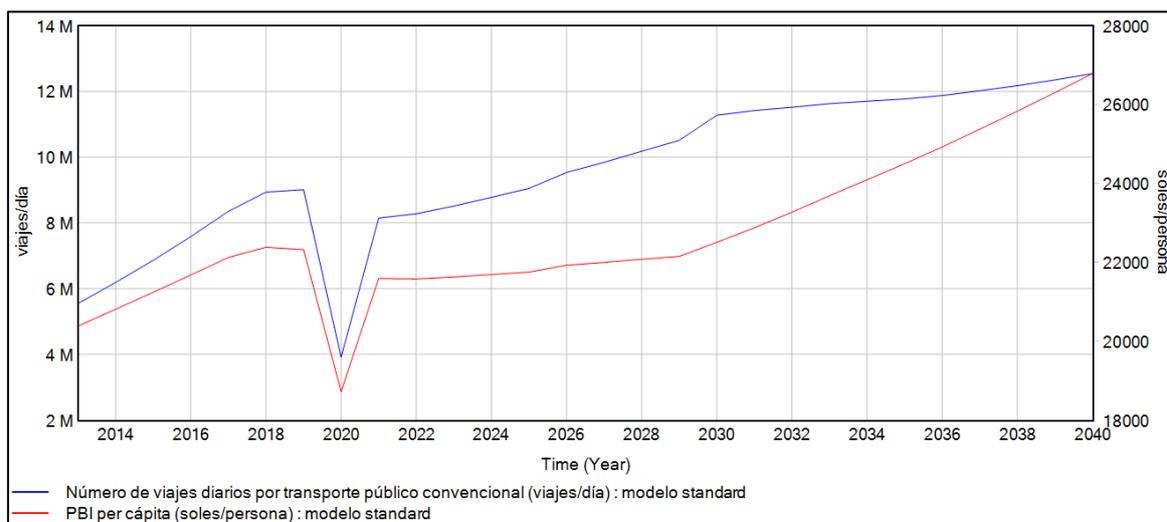


Figura 22: Proyección del número de viajes diarios por transporte público convencional y el PBI per cápita en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040. M = millones

De la figura 22, como se estableció que, el número de viajes diarios por transporte público convencional es resultado de una función en base al PBI per cápita en Lima Metropolitana en conjunto con la población (véase Anexo 1), se observa un patrón de comportamiento similar. No obstante, el PBI per cápita presenta un aumento continuo mínimo hasta el 2030 y de mayor pendiente para años posteriores, acorde con las proyecciones de Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN, 2023). Mientras que, el número de viajes diarios por el transporte público convencional presenta una menor pendiente de crecimiento debido al crecimiento poblacional. En el 2020, se observa el pico mínimo para ambas variables, debido a la restricción de las actividades económicas y las medidas de control de inmovilización social ante la pandemia del COVID-19, tal y como lo señala Rojas et al. (2021) y ATU (2021), también concordante con lo ilustrado en la Figura 11. Para el periodo 2013-2040, el número de viajes diarios por transporte público convencional pasaría de ser 5.5 millones a ser más de 12.5 millones de viajes por día (aumento del 127%), y el PBI per

cápita pasaría de ser S/. 20 000 a ser más de S/. 26 500 (aumento del 33%), equivalente a \$ 11 332 dólares (tasa de cambio al 2022).

4.4.3. Proyección de las emisiones de PM_{2.5} primario y NOx del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana y su aporte en las concentraciones de PM_{2.5} del ambiente en el periodo 2013-2040

Mediante la figura 23 se puede visualizar el comportamiento y proyección de las emisiones de PM_{2.5} primario y NOx (t/año) del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana y su aporte en las concentraciones de PM_{2.5} del ambiente (µg/m³) en el periodo 2013-2040.

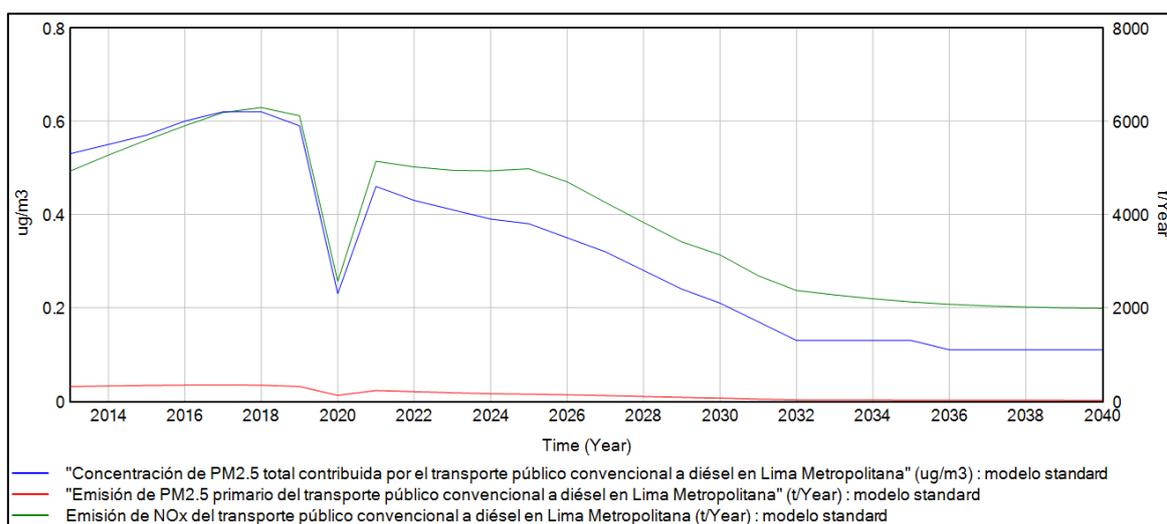


Figura 23: Comportamiento de las emisiones de PM_{2.5} primario y NOx del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana y su aporte en las concentraciones de PM_{2.5} del ambiente en el periodo 2013-2040.

Referente a la figura 23, las emisiones de PM_{2.5} fueron de más de 300 t al 2013 y para el 2040 fueron menores a 19 t (reducción del 94%), mostrando así una constante disminución desde el 2019 por el cambio (reemplazo) de unidades vehiculares a la tecnología vehicular Euro 4/IV, y a partir del 2025, con una reducción más significativa, por el cambio a Euro 6 y VI.

En el caso de las emisiones de NO_x, estas obtuvieron una tendencia aún creciente hasta el 2018, por el significativo aporte de tecnologías más contaminantes, pero, desde el 2019 en adelante, se observó una disminución, por el cambio de tecnología vehicular. Un ligero aumento se presentaría en el 2025, provocado por el aumento de la tecnología Euro III, en el caso de los ómnibus, que a partir de la entrada de vigencia del Euro VI, nuevamente adquiriría una reducción más drástica por los años subsiguientes. En resumen, desde el 2013 al 2040, el cambio sería desde 4 900 t a ser menos de 2 000 t (reducción del 59%). No pasa por desapercibido la gran reducción del 2020 por efecto del COVID-19.

Por último, la concentración de PM_{2.5} en el ambiente estuvo fuertemente influenciada por ambas emisiones desde el 2013 hasta el 2024, pero en adelante, fue principalmente a las emisiones de NO_x por ser más significativas, siendo su mayor valor en el 2018 con 0.65 µg/m³ y su menor valor en el 2040 con 0.12 µg/m³. Mostrando que desde el 2013, con un valor de 0.53 µg/m³, hasta el 2040, se reduciría en un 79%.

4.4.4. Proyección de las concentraciones de PM_{2.5} del ambiente en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040

Tomando en consideración el análisis en IEC (2021), la concentración de PM_{2.5} puede ser representada como la suma de aportes de fuentes de emisión y la concentración base controlada por las variables meteorológicas y del entorno físico. De este modo, la figura 24 ilustra el comportamiento y proyección de la concentración de PM_{2.5} en el ambiente (µg/m³) expresada como la suma de las concentraciones aportadas por las emisiones del transporte público convencional a diésel, el resto del parque automotor, las fuentes en área, las fuentes fijas, y la concentración base de PM_{2.5} ambiental determinado por las variables meteorológicas y del entorno físico.

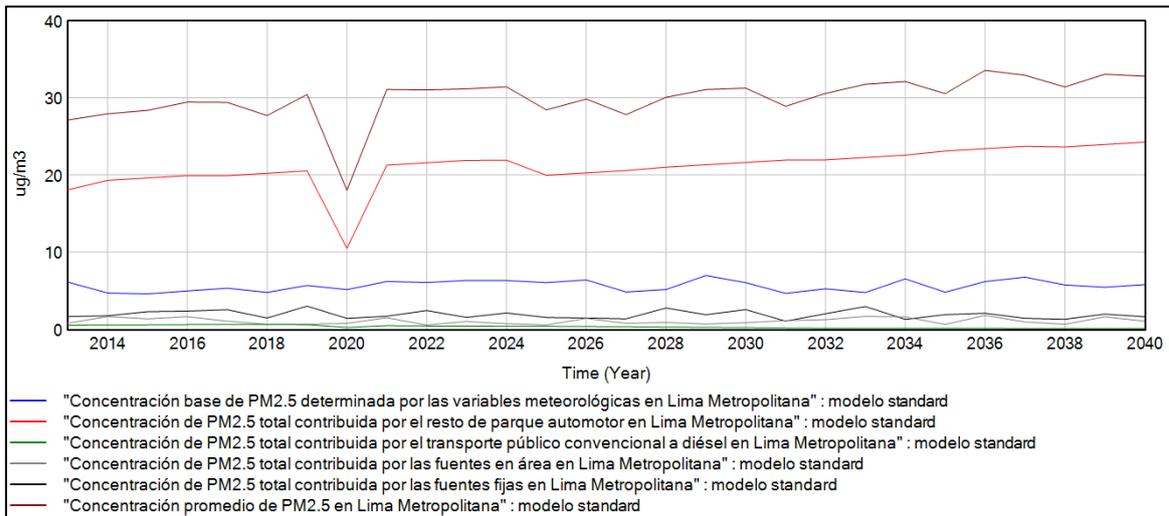


Figura 24: Proyección del aporte en las concentraciones de PM_{2.5} del ambiente del transporte público convencional a diésel, del resto de parque automotor, de las fuentes en área, de las fuentes fijas; y de la concentración base determinado por las variables meteorológicas y el entorno físico en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040

De la figura 24, las emisiones de PM_{2.5} por parte del resto del parque automotor que engloba a los vehículos particulares (automóviles y station wagon), vehículos de pasajeros (transporte turístico, escolar de personal, y transporte público exceptuando el transporte público convencional a diésel) y vehículos de carga (camionetas panel, camionetas pick up, camión, remolcador y semi remolque); es el que más aporta a las concentraciones de PM_{2.5} total en el ambiente con un aporte entre el 52% y el 86%, con un rango más amplio pero acorde a lo estimado en IEC (2021) (estableció que el 58% al 67% de las concentraciones de PM_{2.5} se debía a las emisiones del parque automotor). Para el 2025, se observa una disminución leve, por efectos de la entrada en vigencia de la tecnología Euro 6 y VI, y en adelante, presenta un continuo aumento por el continuo incremento del parque automotor, el cual va acorde a el escenario proyectado en MINAM (2021). En resumen, desde el 2013 al 2040, el cambio sería desde 18 µg/m³ a ser más de 24 µg/m³ (aumento del 33%).

En el caso de la concentración de PM_{2.5} total contribuida por el transporte público convencional a diésel, su aporte es mínimo comparado a las demás fuentes, aunque presenta un patrón representativo de disminución desde el 2019.

En el caso de la concentración de $PM_{2.5}$ total contribuida por las fuentes en área como son las emisiones por restaurantes – pollerías, principalmente, varían en un aporte de 0.54 a 1.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una tendencia aleatoria. Mismo patrón presenta la concentración de $PM_{2.5}$ total contribuida por las fuentes fijas como las fábricas industriales de cemento, harina de pescado, refinación de petróleo crudo, refinación de cobre y refinación de zinc; el cual varía entre los valores de 1 hasta 2.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de manera aleatoria.

En el caso de la concentración base de $PM_{2.5}$ determinada por las variables meteorológicas y el entorno físico, esta hace referencia a la concentración que existiría en Lima Metropolitana si no existieran fuentes de emisión antropogénicas de $PM_{2.5}$, ni de sus precursores, la cual estaría determinada por las fuentes naturales como el polvo (por la re suspensión de suelo y meteorización de rocas) y emisiones oceánicas, cuyas partículas y fuentes fueron identificadas en Ordoñez-Aquino y Sánchez-Ccoyllo (2018). Esta concentración fue estimada en función al complemento del total de emisiones teóricas menos las aportadas por el resto de fuentes de emisión. Sus valores oscilan desde 4.58 hasta 6.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, debiéndose esta fluctuación a la influencia de la altura de la capa límite planetaria, temperatura ambiental, punto de rocío, humedad relativa, velocidad y dirección de viento y presión en superficie según Vu et al. (2019); la cual está representada en base a una función aleatoria.

De esta manera, la concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana es resultado por la suma de los aportes antes mencionados. En resumen, desde el 2013 al 2040, el cambio sería desde 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a ser más de 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (aumento del 19%).

Es importante precisar que, las concentraciones de $PM_{2.5}$ total contribuida por el resto de parque automotor, el transporte público convencional a diésel, las fuentes en área, y las fuentes fijas tienen una caída en aportes para el 2020, por las restricciones que promulgó el estado como la inmovilización social obligatoria y la prohibición de vehículos particulares por la pandemia del COVID-19. En cambio, para el 2021 retoman los valores a las concentraciones habituales, datos acordes a lo demostrado por García (2023).

4.4.5. Proyección del número de casos de morbilidad y mortalidad, y el costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM_{2.5} en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040

A través de la figura 25, se puede observar el comportamiento y proyección del número de casos de morbilidad (personas/año), mortalidad a corto y largo plazo (personas/año), y su costo económico ambiental (dólares/año, tasa de cambio al 2022) atribuido a las concentraciones de PM_{2.5} en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040.

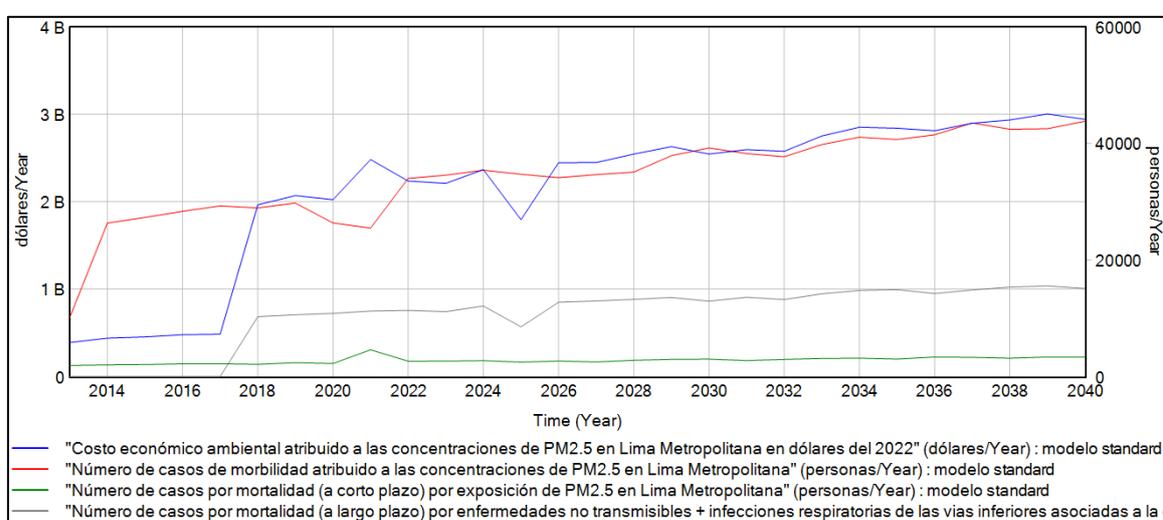


Figura 25: Proyección del número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM_{2.5} en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040. B = mil millones. Tasa de cambio al 2022.

Respecto a la figura 25, el número de casos de morbilidad atribuido a las concentraciones de PM_{2.5} durante el periodo 2013 – 2040 alcanzarían valores desde 10 146 hasta 43 799 personas afectadas por año (aumento del 332%). Siguiendo una tendencia de aumento progresivo impulsado por un aumento de la población expuesta (por los patrones de crecimiento poblacional) y el aumento de la concentración de PM_{2.5} en el ambiente.

El número de casos de mortalidad a corto plazo atribuido a las concentraciones de PM_{2.5} durante el periodo 2013 al 2040 alcanzarían valores desde 1 922 hasta 3 359 muertes prematuras por año (aumento del 75%). Esta simulación presenta una tendencia de aumento

progresivo impulsado por un aumento de la población expuesta (por los patrones de crecimiento poblacional) y el aumento de la concentración de $PM_{2.5}$ en el ambiente.

El número de casos de mortalidad a largo plazo atribuido a las concentraciones de $PM_{2.5}$ durante el periodo de concentraciones del 2013 al 2040 alcanzarían valores desde 10 278 hasta 16 305 personas afectadas al año (aumento del 59%). Cabe precisar que, se asume que los efectos de la población expuesta se presenten en un lapso de 5 años, por ello la concentración de $PM_{2.5}$ de 2013 tienen efecto a partir del 2018, y la concentración de 2040 tiene efecto en el 2045.

El costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el ambiente durante el periodo 2018 – 2040 alcanzarían valores de 1 964 hasta 2 940 millones de dólares (tasa de cambio de 2022) por año (aumento del 50%). Siguiendo una tendencia de ascenso progresivo desde el 2013 conforme al aporte de concentración de $PM_{2.5}$ en el ambiente y el aumento de la población. Es de resaltar que, los valores del 2013 hasta el 2017 no consideran el efecto de la mortalidad a largo plazo, por el lapso de 5 años, y, por ende, los costos están siendo subestimados en este periodo, y por eso, se estimó el aumento desde el 2018. En términos de porcentaje del PBI anual de Lima Metropolitana, el costo económico ambiental oscilaría entre el 1.7% al 2.6%.

Ahora bien, para el 2020, por los efectos de la propagación del COVID-19 (la primera ola), generó un aumento de casos infectados y muertes, por lo que, se visualiza un aumento en el número de casos de morbilidad, mortalidad a corto plazo y costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de $PM_{2.5}$; el cual fue atenuado por la disminución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ por las restricciones promulgadas por el Estado. Es importante señalar que, las variaciones en la concentración del 2020 tuvieron un efecto en los casos de mortalidad a largo plazo en el 2025, por el lapso de su función inherente, que hicieron que el costo económico ambiental alcance un valor de más de 1 794 millones de dólares (tasa de cambio de 2022), siendo su pico mínimo. Caso contrario se dio en el 2021, ya que se flexibilizaron las restricciones y volvieron a generarse las concentraciones de $PM_{2.5}$ habituales en los años posteriores. Además, el exceso de concentración de $PM_{2.5}$ (con respecto a los valores guía

de la OMS) podrían haber contribuido a la ocurrencia de los casos más severos (hospitalizados) y la mortalidad de la segunda ola, según la asociación de efectos propuestos por Dales et al. (2021) y Lavigne et al. (2023).

Se hace hincapié en que, los valores presentados son cálculos anuales, es decir las pérdidas ocurren por cada año, tomando en consideración que estos impactos son acumulativos en el periodo de tiempo. De este modo, la figura 26 exhibe los efectos acumulativos del número de casos de morbilidad (personas), mortalidad a corto y largo plazo (personas), y su costo económico ambiental (dólares, tasa de cambio al 2022) atribuido a las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ ambiental en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040.

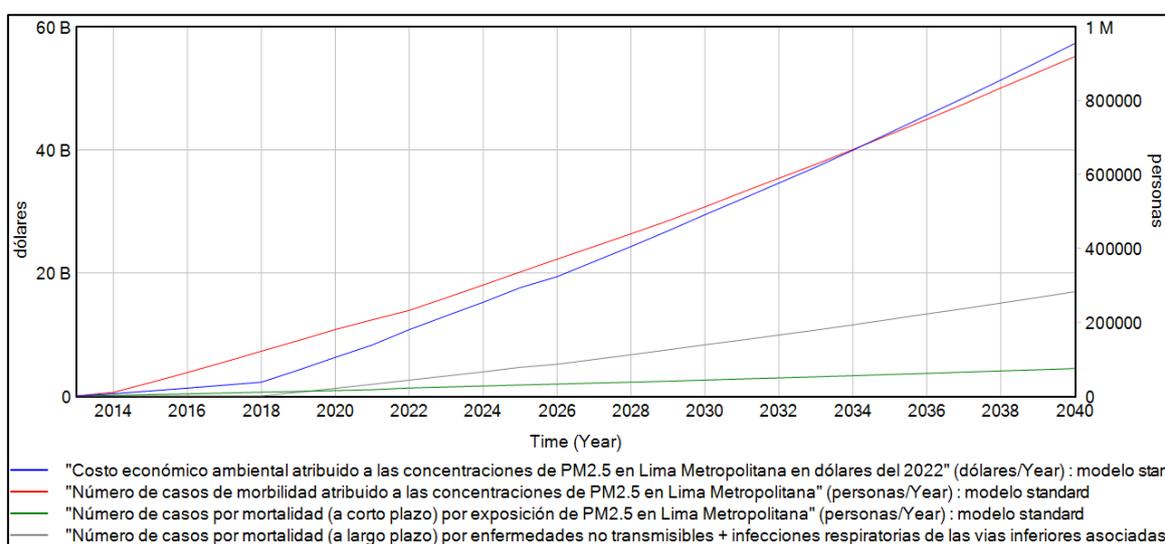


Figura 26: Proyección de la acumulación del número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040. B = mil millones. M = millones. Tasa de cambio al 2022.

Respecto a la figura 26, para el 2040, el número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo acumularían, desde el 2013 hasta el 2040, un total de 75 547, 92 083 y 282 473 personas afectadas, respectivamente; y para el costo económico ambiental acumularía 57.3 mil millones de dólares (a tasa de cambio de 2022).

4.4.6. Proyección del número de casos de morbilidad y mortalidad, y el costo económico ambiental atribuido a la contribución de concentración de PM_{2.5} en el ambiente por parte del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040

Tomando en consideración que la contribución de concentración de PM_{2.5} en el ambiente por parte del transporte público convencional a diésel es proporcional (como porcentaje) del total de morbilidad (personas/año), mortalidad y corto y largo plazo (personas/año), y costo económico ambiental (dólares/año, tasa de cambio al 2022); se calcularon sus aportes y son evidenciados en la figura 27.

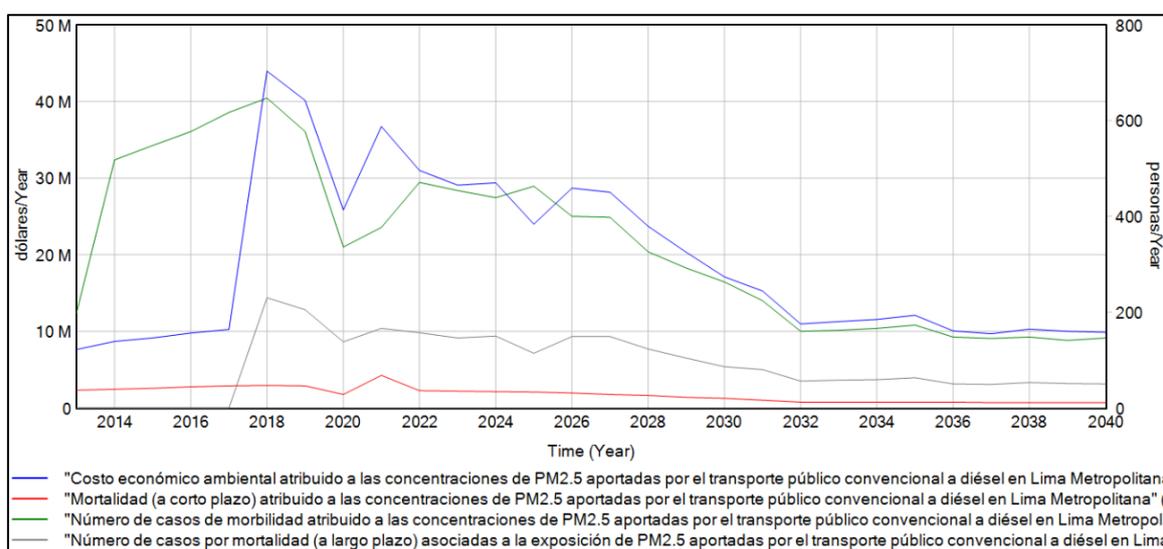


Figura 27: Proyección del número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM_{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040. M = millones.

Respecto a la figura 27, los casos de morbilidad atribuidos a las concentraciones de PM_{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel durante el periodo 2013 – 2040 alcanzarían valores desde 198 hasta 146 personas afectadas por año (reducción del 26%). Siguiendo una tendencia general de disminución progresiva desde el 2018 conforme al aporte de concentración de PM_{2.5} en el ambiente aportadas por el transporte público convencional a diésel. Pero, debido al gran crecimiento de los casos de morbilidad en general, su reducción no es mayor.

Los casos de mortalidad a corto plazo atribuidos a las concentraciones de $PM_{2.5}$ aportadas por el transporte público convencional a diésel durante el periodo 2013 – 2040 alcanzarían valores desde 37 hasta 11 personas afectadas por año (reducción del 70%). Siguiendo una tendencia de disminución progresivo desde el 2018 conforme al aporte de concentración de $PM_{2.5}$ en el ambiente aportadas por el transporte público convencional a diésel.

Los casos de mortalidad a largo plazo atribuidos a las concentraciones de $PM_{2.5}$ aportadas por el transporte público convencional a diésel durante el periodo 2018 – 2040 alcanzarían valores desde 230 hasta 54 personas afectadas al año (reducción del 77%). Siguiendo una tendencia de disminución progresivo desde el 2018 conforme al aporte de concentración de $PM_{2.5}$ en el ambiente aportadas por el transporte público convencional a diésel.

El costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de $PM_{2.5}$ aportadas por el transporte público convencional a diésel durante el periodo 2018 – 2040 alcanzarían valores desde 43.96 hasta 9.86 millones de dólares (tasas de cambio de 2022) por año (reducción del 78%). Siguiendo una tendencia de disminución progresivo desde el 2018, conforme al aporte de concentración de $PM_{2.5}$ en el ambiente aportadas por el transporte público convencional a diésel. En términos de porcentaje del PBI anual de Lima Metropolitana, el costo económico ambiental oscilaría entre el 0.003% al 0.0004%.

Cabe precisar que, para el 2020, por la reducción de concentración de $PM_{2.5}$ aportado por el transporte público convencional a diésel, se visualiza una reducción notable en el número de casos de morbilidad, mortalidad a corto plazo y largo plazo, y costo económico ambiental atribuido. Alcanzando valores de 336, 28 y 114 personas afectadas al año para el número de casos de morbilidad, mortalidad a corto plazo y mortalidad a largo plazo (la concentración del 2020 tuvo un efecto en los casos de mortalidad a largo plazo en el 2025), respectivamente; y de 15.8 millones de dólares (tasa de cambio de 2022) por año.

En la figura 28 se observa la proyección de la acumulación del número de casos de morbilidad (personas), mortalidad a corto y largo plazo (personas), y su costo económico ambiental (dólares, tasa de cambio al 2022) atribuido a las concentraciones de PM_{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040.

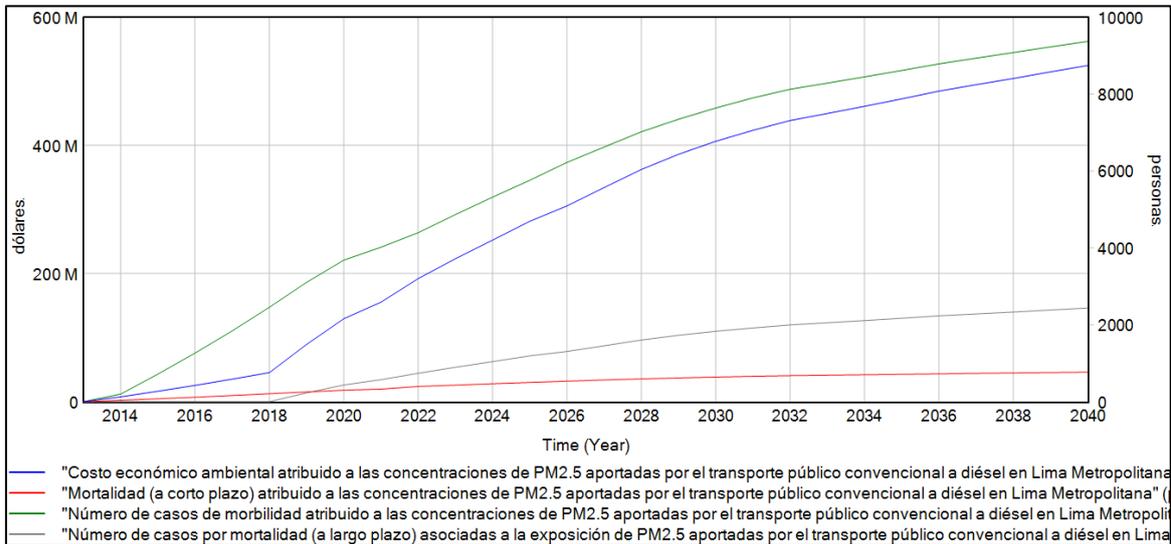


Figura 28: Proyección de la acumulación del número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo, y su costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM_{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2013-2040. M = millones.

De la figura 28, se resalta que, para el periodo 2013 al 2040, el número de casos de morbilidad, mortalidad a corto y largo plazo acumularían un total de 9 368, 770 y 2 436 personas afectadas, respectivamente; y el costo económico ambiental acumularía 524.6 millones de dólares (tasa de cambio de 2022).

V. CONCLUSIONES

- Se identificaron los factores que causan e influyen en la emisión de $PM_{2.5}$ y estimaron sus aportes a las concentraciones ambientales, provenientes del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 – 2023. Determinándose que, el factor que causa la emisión de $PM_{2.5}$ es la distancia recorrida por el vehículo, mientras que, diversos factores influyen en su emisión, tal es el caso de los que hacen referencia a la estructura y características de la unidad vehicular, el combustible, los relacionados al tránsito vehicular y los propios del entorno. A su vez, se encontró que, se emitió un promedio anual de 207 t/año de $PM_{2.5}$ y que el aporte promedio a la concentración de $PM_{2.5}$ ambiental fue de $0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al año. Además, las emisiones se redujeron en un 43% para los años en estudio. Esta reducción se debió principalmente a la renovación de unidades de tecnología vehicular pre-Euro, Euro 1/ I, Euro 2/ II, Euro 3/III; por la tecnología Euro 4/ IV. Adicionalmente, se destaca que, se presentó una reducción del aporte de emisiones y del aporte a las concentraciones entre el periodo 2019 y 2020 del 61%, el cual se debió a las restricciones de movilización por la pandemia, con menor número de viajes en el transporte público convencional.
- Se evaluaron la morbilidad y mortalidad asociada a la exposición de $PM_{2.5}$ ambiental producida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 - 2023. Se estimó que, en promedio los casos de morbilidad, mortalidad a corto plazo y largo alcanzaron valores de 4.2, 0.4 y 1.5 personas afectadas por cada 100 mil habitantes al año, respectivamente; y que, en comparación entre el 2023 y el 2019, los casos de morbilidad, mortalidad a corto plazo y largo disminuyeron en 16%, 33% y 39%, respectivamente. En especial, para el 2020 frente al 2019, la reducción fue de 45%, 38% y 30%, respectivamente.

- Se cuantificó el costo económico ambiental anual atribuido a la exposición de PM_{2.5} provenientes del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 - 2023. Se obtuvo que el promedio anual del costo económico ambiental fue de 31.9 millones de dólares, con una reducción del 10% comparando los años 2023 y 2019. Y, particularmente, la comparación del 2020 frente al 2019, tuvo una reducción del 43%.
- Se aplicó mediante la metodología de sistemas dinámicos, un modelo de emisiones de PM_{2.5}, su impacto en la salud y los costos económicos asociados anualmente, provenientes del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana, permitiendo proyecciones al 2040. De este modo, se determinó que para el 2040, el número de casos de morbilidad, mortalidad a corto plazo y mortalidad a largo plazo acumularían un total de 9 368, 770 y 2 436 personas afectadas, respectivamente; y el costo económico ambiental acumularía 524.6 millones de dólares. En tal sentido, las proyecciones permiten visualizar un escenario de externalidades negativas elevadas, que de no tomar acciones o medidas extras (más allá de la renovación vehicular del transporte público, el cual ya está en curso), estas se verían incrementando con el paso del tiempo. Además, resalta el gran impacto que tuvo la reducción de concentración de PM_{2.5} ambiental en Lima Metropolitana, con respecto a los impactos en la salud y costos asociados.

VI. RECOMENDACIONES

- Revisar (y de ser necesario actualizar) la tasa de actividad por cada tipo de vehículo haciendo énfasis en el transporte público.
- Comparar los resultados del presente estudio en función a una valoración económica basada en el enfoque del bienestar (usando la los valores de la disposición a pagar).
- Fomentar la investigación en temas de cuantificar los impactos de la contaminación ambiental como: el desarrollo de estudios epidemiológicos relacionados a la contaminación atmosférica (por ejemplo, estudios epidemiológicos de cohorte, series de tiempo, transversales, entre otros), para determinar la asociación; y la valoración económica de los impactos ambientales, de modo tal que, sean herramientas que faciliten el análisis costo-beneficio para mitigar las concentraciones de $PM_{2.5}$.
- Se debe implementar más estaciones de monitoreo de la calidad de aire (incluyendo a los de bajo costo); verificar que las estaciones estén en óptimo funcionamiento en todo momento (es decir, un adecuado mantenimiento); los datos como variables meteorológicas y concentración de contaminantes atmosféricos deben de ser abiertos al público en general, con registros en tiempo real e históricos para fomentar la investigación.
- Complementar el presente estudio mediante la aplicación de otras herramientas como por ejemplo: la aplicación de modelos de distribución espacial de la concentración de contaminantes atmosféricos, evaluar la exposición de la población especialmente en zonas de protección especial o cercanas a vías altamente concurridas, de este modo, estas permitirían una mejor estimación de los efectos adversos de la contaminación atmosférica; la aplicación de BenMAP-CE, para evaluar la implementación de medidas de mejora de la calidad de aire a nivel local; o la aplicación del software AirQ+ de la OMS para cuantificar los impactos en la salud.

- Aplicar y difundir la metodología de sistemas dinámicos para el análisis de problemas públicos siguiendo los pasos del proceso de modelación descritos en el presente estudio.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Amiri, A.; Mehrjerdi, Y. Z.; Jalalimanesh, A., & Sadegheih, A. (2020). Food system sustainability investigation using system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124040. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124040>
- Armah, F. A.; Yawson, D. O., & Pappoe, A. A. N. M. (2010). A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana. *Sustainability*, 2(1), 252–265. <https://doi.org/10.3390/su2010252>
- Assaad, R.; Dagli, C., & El-Adaway, I. H. (2020). A system-of-systems model to simulate the complex emergent behavior of vehicle traffic on an urban transportation infrastructure network. *Procedia Computer Science*, 168, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.277>
- ATU (2020). Tecnologías limpias para el transporte público en el Perú: El momento para el cambio. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2020218/Tecnolog%C3%ADas%20limpias%20para%20el%20transporte%20p%C3%BAblico%20en%20el%20Per%C3%BA.pdf>
- ATU (2021). Indicadores - ATU - Reporte de viajes Diarios de Lima y Callao al año 2019. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2005711/REPORTE%20DE%20VIAJES%20DIARIOS%20DE%20LIMA%20Y%20CALLAO.pdf>
- Bala, B. K.; Arshad, F. M., & Noh, K. M. (2017). System Dynamics. Modelling and Simulation. En *Springer Texts in Business and Economics*.
- Bérard, C. (2013). Group model building using system dynamics: An analysis of methodological frameworks. *Journal of Polymer Research*, 20(5), 35–45.

- Berry, H. L.; Waite, T. D.; Dear, K. B. G.; Capon, A. G., & Murray, V. (2018). The case for systems thinking about climate change and mental health. *Nature Climate Change*, 8(4), 282–290. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0102-4>
- Binder, T.; Vox, A.; Belyazid, S.; Haraldsson, H.; & Svensson, M. (2004). Developing system dynamics models from causal loop diagrams. En *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamic Society*, pp. 1-21. Recuperado de https://proceedings.systemdynamics.org/2004/SDS_2004/PAPERS/249BINDE.pdf
- Botto, L.; Lonati, E.; Russo, S.; Cazzaniga, E.; Bulbarelli, A.; & Palestini, P. (2023). Effects of PM_{2.5} Exposure on the ACE/ACE2 Pathway: Possible Implication in COVID-19 Pandemic. *International journal of environmental research and public health*, 20(5), 4393. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054393>
- Burnett, R.; Chen, H.; Szyszkowicz, M.; Fann, N.; Hubbell, B.; Pope, C. A.; ... Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(38), 9592–9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- C40 Cities. (2022). Lima: Evaluación de la campaña respira limpio – medición de emisiones vehiculares. Recuperado de <https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/3b23a6443cc224e3.pdf>
- Camacho S.; Maldonado N.; Bustamante J.; Llorente B.; Cueto E.; Cardona F., & Arango C. (2018). How much for a broken heart? Costs of cardiovascular disease in Colombia using a person-based approach. *PLoS One*, 19;13(12): e0208513. doi: 10.1371/journal.pone.0208513
- Carcelén, A. (2014). Estudio de las emisiones atmosféricas de buses urbanos con motores diesel en Lima y Callao en base a la metodología Copert. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5734>

- CDC – MINSA (2024, 14 de marzo). Sala COVID-19 – Actualización semanal. Semana epidemiológica: 10-2024 (09/03/2024). Recuperado de <https://www.dge.gob.pe/covid19.html>
- CEPLAN (2020). Perú 2050: tendencias nacionales con el impacto de la COVID-19. Documento de trabajo. Recuperado de http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/CEPLAN_2020_Peru%202050_tendencias_nacionales_con%20el%20impacto%20de%20la%20COVID-19.pdf
- CEPLAN (2023). Perú 2050: Escenarios alternativos de largo plazo – Actualización 2023. Documento de trabajo. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5604711/4973093-ceplan-escenarios-alternativos-de-largo-plazo-actualizacion-2023.pdf>
- Chaves, G. de L. D.; Fontoura, W. B., & Ribeiro, G. M. (2019). The Brazilian urban mobility policy: The impact in São Paulo transport system using system dynamics. *Transport Policy*, 73, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.09.014>
- Chen, M.; Ho, T., & Jan C. (2006). A system dynamic model of sustainable urban development: Assessing air purification policies at Taipei city. *Asian Pacific Planning Review*, 1(4). Recuperado de https://www.academia.edu/32616431/A_System_Dynamics_Model_of_Sustainable_Urban_Development_Assessing_Air_Purification_Policies_at_Taipei_City
- Chen, Z.; Sidell M. A.; Huang, B. Z.; Chow, T.; Martinez, M. P.; Lurmann, F.; Gilliland, F. D., & Xiang, A. H. (2023). The independent effect of COVID-19 vaccinations and air pollution exposure on risk of COVID-19 hospitalizations in Southern California. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2 (207). DOI: 10.1164/rccm.202206-1123LE
- Choy, L. (2014). Principales causas de la contaminación del aire y propuestas para su mitigación por efecto del parque automotor de transporte público de Lima cuadrada. [Universidad Nacional de Ingeniería]. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.14076/3423>

- Collivignarelli, M. C., Bellazzi, S., Caccamo, F. M., & Carnevale Miino, M. (2023). Discussion about the Latest Findings on the Possible Relation between Air Particulate Matter and COVID-19. *International journal of environmental research and public health*, 20(6), 5132. <https://doi.org/10.3390/ijerph20065132>
- Curro-Urbano, O. M.; Pacovilca-Alejo, O.V.; Pastor-Ramírez, N.; Cordova-Delgado, M.; Zea-Montesinos, C. C., Lacho-Gutiérrez, P.; Quispe-Ilanzo, M. P.; & Oyola-García, A. E. (2022). Costo social de las muertes prematuras por COVID-19 en el Perú. *Rev. Cuerpo Med. HNAAA*. 15(1), pp. 27-34. DOI: <https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2022.151.1146>
- Dawidowski, L.; Sánchez-Ccoyllo, O., & Alarcón, N. (2014). Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana. Informe final. Lima: SENAMHI/SAEMC. Recuperado de https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/454/Estimaci%C3%B3n-emisiones-vehiculares-Lima-Metropolitana_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Fuente:%20CO-NAM%202001.,en%20t%C3%A9rminos%20de%20CO2%20equivalente.
- Dales, R.; Blaco-Vidal, R.; Romero-Meza, R.; Schoen, S.; Lukina, A., & Cakmak, S. (2021). The association between air pollution and COVID-19 related mortality in Santiago, Chile: A daily time series analysis. *Environmental Research*, 198, 111284. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111284>
- Davila, J.; Tapia, V.; Vasquez, V.; Ordoñez, L.; Vu, B.; Steenland, K., & Gonzales, G. (2020). Erratum: Association of PM_{2.5} concentration with health center outpatient visits for respiratory diseases of children under 5 years old in Lima, Peru. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 19(7), 1–6. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-0569-0>
- Dhirasasna, N., & Sahin, O. (2019). A Multi-Methodology Approach to Creating a Causal Loop Diagram. *Systems*, 7(3), 42. <https://doi.org/10.3390/systems7030042>
- Díaz, S. E.; Silva, C.; Mogollón, R. J.; & Orihuela, C. E. (2021). Costo económico de la mortalidad por cáncer de pulmón asociado al material particulado en el área de Lima Metropolitana. *Natura@economía*, 6(1): 28-42. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ne.v6i1.1729>

- Du, L.; Li, X.; Zhao, H.; Ma, W., & Jiang, P. (2017). System Dynamic modelling of urban carbon emissions based on the regional National Economy and Social Development Plan: A case study of Shanghai city. *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.128.
- Duarte, E. (2011). El Transporte Público Colectivo en Bogotá, D.C. Una Mirada desde la Dinámica de Sistemas. A System Dynamics Model of Public Transportation in Bogotá, D.C. *Ingeniería*, 16(2), 18–34. <https://doi.org/10.14483/23448393.3831>
- Echániz, G.; Rojas, L., & Garibay, V. (2012). Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México. Recuperado de <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/220>
- EEA (2023). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. 1.A.3.b.i-iv Road transport 2023. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Elsawah, S.; Pierce, S. A.; Hamilton, S. H.; van Delden, H.; Haase, D.; Elmahdi, A., & Jakeman, A. J. (2017). An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environmental Modelling and Software*, 93, 127–145. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.001>
- Engelbertink, D. (2019). System Dynamics-based Scenario Planning. University of Twente. Recuperado de http://essay.utwente.nl/77106/1/Engelbertink_MA_Behavioural%20Management%20and%20Social%20sciences.pdf
- Ercan, T.; Onat, N. C., & Tatari, O. (2016). Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1260-1276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.051>

- Espinoza, J. (2018). Evaluación espacial y temporal del material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima Metropolitana (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3739#:~:text=En%20el%20presente%20estudio%20se%20realiz%C3%B3%20un,la%20calidad%20del%20aire%20de%20Lima%20Metropolitana.>
- Foo J.; Landis S. H.; Maskell J.; Oh Y-M.; van der Molen T.; Han M. K.; ... Punekar, Y. (2016). Continuing to confront COPD international patient survey: Economic impact of COPD in 12 countries. *PLoS ONE* 11(4): e0152618. doi:10.1371/journal.pone.0152618
- Forrester, J. W. (1961). Industrial Dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 48:10, 1037-1041. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600946
- Fundación TRANSITEMOS. (2018). Transporte Urbano Lima y Callao - 2018. Informe de observancia situación del transporte urbano en Lima y Callao - 2018. Recuperado de <https://transitemos.org/download/situacion-del-transporte-informe-por-transitemos/?wpdmdl=4089&masterkey=5bd09ae5224bc>
- García, A. B. (2023). Evaluación de la influencia de la pandemia por el Sars CoV-2 en la variación temporal de PM_{2.5} en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa. (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5870>
- GBD 2019 Risk Factors Collaborators (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*. 396(10258):1223-1249. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30752-2
- Gelves, O. M.; Sanabria, P. A.; Guerrero, X. L., & Garzón, A. (2023). Estimación de las emisiones de material particulado generado por el transporte público en Bogotá mediante la dinámica de sistemas. *Avances Investigación En Ingeniería*, 20(1). DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.9683>

- Giani, P., Castruccio, S., Anav, A., Howard, D., Hu, W., & Crippa, P. (2020). Short-term and long-term health impacts of air pollution reductions from COVID-19 lockdowns in China and Europe: a modelling study. *The Lancet. Planetary health*, 4(10), e474–e482. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30224-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30224-2)
- Goodarzi, F.; Ershadi, M.; Arsanjani, M. A., & Firouzshahi, M. (2016). System dynamic modeling of air pollution in megacities: An investigation in megacity of Tehran. *Journal of applied Environmental and Biological Science*, 6(8) 7-13. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/341932311>
- Greenstone, M.; Hasenkopf, C.; & Lee, K. (2022). Annual Update 2022. En *Air Quality Life Index*. Recuperado de https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2022/06/AQLI_2022_Report-Global.pdf
- Greenstone, M., & Hasenkopf, C. (2023). Annual Update 2023. En *Air Quality Life Index*. Recuperado de https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2023/08/AQLI_2023_Report-Global.pdf
- Gupta, M.; Bandyopadhyay, K. R.; y Singh, S. K. (2019). Measuring effectiveness of carbon tax on Indian road Passenger transport: A system dynamics approach. *Energy Economics* 81. 341-354. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.03.013>
- Guzman, L. A., & Orjuela, J. P. (2017). Linking a transport dynamic model with an emissions model to aid air pollution evaluations of transport policies in Latin America. *Transportmetrica B*, 5(3), 270–285. <https://doi.org/10.1080/21680566.2016.1169954>
- Hadei, M.; Hopke, P. K.; Shahsavani, A.; Raeisi, A.; Jafari, A. J.; Yarahmadi, M.; Farhadi, M.; ... Aghazadeh M. (2021). Effect of short-term exposure to air pollution on COVID-19 mortality and morbidity in Iranian cities. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19:1807-1816. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00736-4>
- Hanco-Saavedra, J. A.; Zárate-Scarsi B. T.; Ortega-Guillén E.; Saavedra-Muñoz M. J.; Alcántara-Valdivia P. E.; Sánchez-Ramírez M. A.; Pajuelo-Mendoza M.; Moreno-Garrido Z., & Vera-Flores M. (2022). Situación de las enfermedades no transmisibles

en el Perú durante la pandemia de COVID-19. *Diagnóstico*, 61(4). Recuperado de <http://revistadiagnostico.fihu.org.pe/index.php/diagnostico/article/view/421>

Hansel, N. N.; Romero, K. M.; Pollard, S. L.; Bose, S.; Psoter, K. J.; Underhill, L.; Johnson, C.; ... Checkley, W. (2019). Ambient Air Pollution and Variation in Multiple Domains of Asthma Morbidity among Peruvian Children. *Ann Am Thorac*, 16(3), 348-355. doi: 10.1513/AnnalsATS.201807-448OC. PMID: 30365919; PMCID: PMC6394121.

Haraldsson, H. V. (2004). Introduction to system thinking and causal loop diagram. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/258261003>

Harrison, G.; Grant-Muller, S. M., & Hodgson, F. C. (2021). A review of transport-health system dynamics models. *Journal of Transport and Health*, 22(July), 101138. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101138>

Hidayatno, A.; Destyanto, A. R., & Fadhil, M. (2019). Model conceptualization on e-commerce growth impact to emissions generated from urban logistics transportation: A case study of Jakarta. *Energy Procedia*, 156, 144–148. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.119>

Hospitalizados, vacunados y fallecidos por COVID-19 – [Ministerio de Salud – MINSA] (2024, 15 de febrero). Plataforma Nacional de Datos Abiertos. Recuperado de <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/hospitalizados-vacunados-y-fallecidos-por-covid-19>

Hosseinabad, E. R., & Moraga, R. J. (2017). A System Dynamics Approach in Air Pollution Mitigation of Metropolitan Areas with Sustainable Development Perspective: A Case Study of Mexico City. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 7(12), 164–174. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/319454100_Air_Pollution_Mitigation_in_Metropolitan_Areas_Using_System_Dynamics_Approach

Idrogo, C. A. (2020). Costo por enfermedades respiratorias agudas para personas que no cuentan con seguro de salud público o privado en José Leonardo Ortiz (Tesis de

- pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12423/3959>
- IEc (2021). Assessing the mortality burden of air pollution in Lima-Callao. Final Report. Recuperado de https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-06/documents/lima_megacities_technical_report_20210514_english_0.pdf
- Inca, L. (2019). Actualización del inventario de emisiones de los contaminantes locales del aire procedentes del parque automotor para el área metropolitana de Lima y Callao (Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur). Recuperado de <https://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/210>
- INEI (2014). Una Mirada a Lima Metropolitana. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1168/libro.pdf
- INEI (2023). Perú compendio estadístico 2023. Sistema Estadístico Nacional. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Compendio2023/COMPENDIO2023.html
- INEI (2024). Estadísticas Ambientales. Informe técnico. Diciembre 2023. N° 01 enero 2024. Recuperado de <https://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/informe-de-estadisticas-ambientales-enero-2024.pdf>
- Jia, S.; Liu, X., & Yan, G. (2019). Effect of APCF policy on the haze pollution in China: A system dynamics approach. *Energy Policy*, 125, 33-34. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.012>
- JICA - MTC (2005). Plan Maestro de Transporte Urbano Para El Área Metropolitana de Lima y Callao En La República Del Perú (Fase 1) - Informe Final. Recuperado de https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11798261_04.pdf
- JICA - MTC (2013). Encuesta de Recolección de Información Básica Del Transporte Urbano En El Área Metropolitana de Lima y Callao - Informe Final. Recuperado de https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12087532_01.pdf

- Jilesen, R. (2018). Solving messy information problems by a combination of big data analytics and system dynamics. (Tesis de maestría. Recuperado de <https://theses.uhn.nl/server/api/core/bitstreams/b6c57d02-9f1e-4f47-9296-bf60ec403c63/content>)
- Jittrapirom, P.; Knoflacher, H., & Mailer, M. (2017). Understanding decision makers perceptions of Chiang Mai city's transport problems an application of Causal Loop Diagram (CLD) methodology. *Transportation Research Procedia*, 25, 4438–4453. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.350>
- Koehring, M., & Kielstra, P. (2018). El cáncer de pulmón en América Latina: Es tiempo de dejar de mirar hacia otro lado. Recuperado de <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/5604.pdf>
- Korc, M.; Figari, A.; Bravo, A., & Pareja, J. (2009). VI-105 -Diagnostico de las emisiones del parque automotor del área metropolitana de Lima y Callao. *Abes*, XXVII(x), 1–4. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Marcelo_Korc/publication/228713296_VI-105-DIAGNOSTICO_DE_LAS_EMISIONES_DEL_PARQUE_AUTOMOTOR_DEL_AREA_METROPOLITANA_DE_LIMA_Y_CALLAO/links/02e7e53a85b78a42a1000000.pdf
- Lane, D. C. (2000). Diagramming conventions in system dynamics. *The Journal of the Operational Research Society*, 51(2), 241–245. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600864>
- Lara, D. V. R., & Rodrigues Da Silva, A. N. (2021). A system dynamics model of urban mobility resilience when exposed to fuel-related threats. November, 0–6. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/355927116_A_system_dynamics_model_of_urban_mobility_resilience_when_exposed_to_fuel-related_threats
- Laurenti, R. (2013). Applications of systems thinking within the sustainability domain product design, product systems and stakeholder perspectives. (Tesis de pregrado) [KTH Royal Institute of Technology]. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A622211&ydswid=-7284>

- Laurenti, R. (2016). *The Karma of Products: Exploring the Causality of Environmental Pressure with Causal Loop Diagram and Environmental Footprint* (Tesis de doctorado). KTH Royal Institute Of Technology. Recuperado de <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:916120/FULLTEXT02.pdf>
- Lavigne, E.; Ryti, N.; Gasparri, A.; Sera, F.; Weichenthal, S.; Chen, H.; ... Stieb, D. (2023). Short-term exposure to ambient air pollution and individual emergency department visits for COVID-19: a case-crossover study in Canada. *Thorax* 2023; 78:459-466. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2021-217602>
- Lee, K., & Greenstone, M. (2021). Annual Update 2021. En *Air Quality Life Index*. Recuperado de https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2021/08/AQLI_2021-Report.EnglishGlobal.pdf
- Liao, Q.; Jin, W.; Tao, Y.; Qu, J.; Li, Y.; & Niu, Y. (2020). Health and economic assessment of PM_{2.5} pollution during 2015-2017 in Gansu province, China. *International journal of environmental research and public health*, 17(9), 3253. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093253>
- Licapa, D. O. F. (2019). *Impacto económico de la diabetes mellitus tipo 2 en el Perú en el año 2017*. (Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.14138/1755>
- Lima Como Vamos (2024). *Lima y Callao según sus habitantes. Reporte urbano de percepción ciudadana 2023. Reporte urbano de percepción ciudadana – Edición 13*. Recuperado de <https://www.limacomovamos.org/wp-content/uploads/2024/01/EncuestaLCV2023.pdf>
- Lin, G.; Palopoli, M., & Dadwal, V. (2020). From Causal Loop Diagrams to System Dynamics Model in a Data-Rich Ecosystem. *Leveraging Data Science for Global Health*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47994-7>
- Marchetti, S., Gualtieri, M., Pozzer, A., Lelieveld, J., Saliu, F., Hansell, A. L., Colombo, A., & Mantecca, P. (2023). On fine particulate matter and COVID-19 spread and severity: An in vitro toxicological plausible mechanism. *Environment international*, 179, 108131. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108131>

- Marqués, M., & Domingo, J. L. (2022). Positive association between outdoor air pollution and the incidence and severity of COVID-19. A review of the recent scientific evidences. *Environmental research*, 203, 111930. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111930>
- Martinez-Moyano, I. J., & Richardson, G. P. (2013). Best practices in system dynamics modeling. *System Dynamics Review*, 29(2), 102–123. <https://doi.org/10.1002/sdr.1495>
- Martínez, M. (2017). Transporte público de buses versus congestión y contaminación en Lima y Callao. *Economía*, 40(79), 47–86. <https://doi.org/10.18800/economia.201701.002>
- McGill, E.; Er, V.; Penney, T.; Egan, M.; White, M.; Meier, P.; ... Peticrew, M. (2021). Evaluation of public health interventions from a complex systems perspective: A research methods review. *Social Science & Medicine*, 272, 113697. doi:10.1016/j.socscimed.2021.1136
- MINAM (2014). Estudio De Morbilidad Por Efectos De La Contaminación Del Aire En La Salud De Las Personas. Recuperado de <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/76>
- MINAM (2017). Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias. *El peruano*, 11. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-003-2017-MINAM.pdf>
- MINAM (2021). Decreto Supremo N° 029-2021-MINAM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 010-2017-MINAM, establece Límites Máximos Permisibles de emisiones atmosféricas para vehículos automotores. *El peruano*. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2258043/DS.%20029-2021-MINAM.pdf.pdf?v=1634524243>
- MINAM. (2021). Resolución Ministerial N° 142-2021-MINAM: Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025. Recuperado de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2090922/PAMCA_Lima-Callao.pdf.pdf?v=1629305191

- Mingers, J., & White, L. (2010). A review of the recent contribution of systems thinking to operational research and management science. *European Journal of Operational Research*, 207(3), 1147–1161. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.12.019>
- Ministerio de Energía y Minas [MINEM] (2024). D. S. N° 003-2024-EM: Decreto Supremo que modifica los plazos para el uso y la comercialización de Diesel, Gasolinas y Gasoholes de bajo azufre no mayor de 10 ppm. *Sistema Peruano de Información Jurídica*. Recuperado de <https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H1368851>
- MINSA (2024). Sala situacional – COVID-19. SE 05-2024. Recuperado de <https://www.dge.gob.pe/portal/docs/tools/coronavirus/coronavirus070224.pdf>
- Morales-Ancajima, V.; Tapia, V.; Vu, B.; Liu, Y.; Alarcón-Yaquetto, D., & Gonzales, G. (2019). Increased Outdoor PM_{2.5} Concentration Is Associated with Moderate/Severe Anemia in Children Aged 6-59 Months in Lima, Peru. *Journal of Environmental and Public Health*, 2019, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/6127845>
- Morbilidad General a Nivel Nacional (2024, 31 de enero). MINSA-REUNIS. Recuperado de https://www.minsa.gob.pe/reunis/data/morbilidad_HIS.asp
- MTC y GIZ (2015). TRANSPerú – Sustainable Urban Transport NAMA Peru. [Recuperado de https://changing-transport.org/wp-content/uploads/2015_Capone_Velez-moro_FullConceptTransPeru.pdf](https://changing-transport.org/wp-content/uploads/2015_Capone_Velez-moro_FullConceptTransPeru.pdf)
- MTC (2020). Política Nacional de Transporte Urbano - PNTU. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1648403/Difusi%C3%B3n%20de%20la%20PNTU.pdf.pdf>
- MTC (2021). Reporte anual de seguimiento de la Política Nacional de Transporte Urbano. Periodo 2020. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1920947/Reporte%20de%20Anual%20Seguimiento%20PNTU.pdf?v=1622511285>

- MTC (2022). Reporte anual de seguimiento año 2021 de la Política Nacional de Transporte Urbano. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3414536/Informe%20de%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20Resultados%202021.pdf?v=1657810366>
- MTC (2023). Reporte anual de seguimiento año 2022 de la Política Nacional de Transporte Urbano. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4653113/Reporte%20de%20Seguimiento%20A%C3%B1o%202022%20PNTU.pdf?v=1686061496>
- Municipalidad de Lima (2020). Evaluación de la Calidad del aire en el Contexto del Covid-19 Retos para una mejora ambiental. Recuperado de <https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/a523801703430117.pdf>
- Ordoñez-Aquino, C., & Sánchez-Ccoyllo, O. (2018). Caracterización química - morfológica del PM_{2.5} en Lima Metropolitana mediante microscopia electrónica de barrido (MEB). *Acta Nova*, 8(3), 397-420. Recuperado en 05 de marzo de 2024, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892018000100008&lng=es&tlng=es.
- Ordoñez-Aquino, C., & Ordoñez, L. A. (SE 48 - 2023). Enfermedades respiratorias y calidad del aire en Lima Sur, Perú (2018-2019). Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (CDC) – MINSA. *Boletín Epidemiológico del Perú*. (32). Recuperado de https://www.dge.gob.pe/epipublic/uploads/boletin/boletin_202348_08_160102.pdf
- Osses, M.; Rojas, N.; Ibarra, C.; Valdebenito, V.; Laengle, I.; Pantoja, N.; Osses, D.; Basoa, K.; Tolvett, S.; Huneus, N.; Gallardo, L.; & Gómez, B. (2022). High-resolution spatial-distribution maps of road transport exhaust emissions in Chile, 1990–2020. *Earth System Science Data*, 14(3), 1359–1376. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1359-2022>
- Pacsi, S. A. (2016). Análisis Temporal Y Espacial De La Calidad Del Aire Determinado Por Material Particulado PM₁₀ y PM_{2.5} En Lima Metropolitana. *Anales Científicos*, 77(2), 273. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i2.699>

- Paital, B., & Agrawal, P. K. (2021). Air pollution by NO₂ and PM_{2.5} explains COVID-19 infection severity by overexpression of angiotensin-converting enzyme 2 in respiratory cells: a review. *Environmental chemistry letters*, 19(1), 25–42. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01091-w>
- Peters, D. (2014). The application of systems thinking in health: Why use systems thinking? *Health Research Policy and Systems*, 12(1), 51. <https://doi.org/10.1186/1478-4505-12-51>
- Pizarro, D. (2017). Modelo de dinámica de sistemas para la adaptación al cambio climático de la ganadería altoandina (Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12390/242>
- Pozzer, A; Anenberg, S. C.; Dey, S.; Haines, A.; Lelieveld, J.; & Chowdhury, S. (2023). Mortality Attributable to Ambient Air Pollution: A Review of Global Estimates. *GeoHealth*, 7(1), e2022GH000711. <https://doi.org/10.1029/2022GH000711>
- Prieto, K. A., & Ordoñez, I. S. (2021). Estimación de emisiones vehiculares mediante modelo dinámico de sistemas en la carretera Central en la ciudad de Lima – Perú noviembre 2020. (Tesis de titulación, Universidad Peruana Unión). Recuperado de https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/4720/Keren_Tesis_Liceciatura_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- PROTRANSPORTE (2005). Estudio de corredores complementarios. Informe final. Resumen Ejecutivo. Recuperado de https://protransporte.gob.pe/pdf/info/publi1/CC_RESUMEN%20EJECUTIVO.pdf
- Proust, K., & Newell, B. (2020). Constructing Influence Diagrams and Causal Loop Diagrams. ANU Fenner School of Environment & Society. Recuperado de <http://hdl.handle.net/1885/201846>
- Rassafi, A. A.; Jafari, M. O., & Javanshir, H. (2014). An appraisal of sustainable urban transportation: Application of a system dynamic model. *International Journal of Transportation Engineering*, 1(2). Recuperado de http://www.ijte.ir/article_6708_868f47e7fb28872f3abb1ccbe15b6680.pdf

- Rees, D.; Masari, E., & Appleton-Dyer, S. (2020). Transport impacts on wellbeing and liveability: literature summary (September 2020). [NZ Transport Agency research report 669. www.nzta.govt.nz](https://www.nzta.govt.nz/research-reports/669/)
- Richardson, G. P. (2020). Core of System Dynamics. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, 1–10. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_536-4
- Ripari, N.; Moscoso, N., & Elorza, M. (2012). Costos de enfermedades: una recisión crítica de las metodologías de estimación. *Lecturas de Economía*, 77, 253-282. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-25962012000200008
- Rivera, J. (2012). Modelo de identificación de factores contaminantes atmosféricos críticos en Lima – Callao. En *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/3109>
- Rojas, F. (2017). Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en Lima Metropolitana (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3271>
- Rojas, J. P.; Urdanivia, F. R.; Garay, R. A.; García, A. J.; Enciso, C.; Medina, E. A.; ... Leiva-Guzmán, M. A. (2021). Effects of COVID-19 pandemic control measures on air pollution in Lima metropolitan area, Peru in South America. *Air quality, atmosphere, & health*, 14(6), 925–933. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-00990-3>
- Ryan, E.; Pepper, M., & Munoz, A. (2021). Causal Loop Diagram Aggregation Towards Model Completeness. *Systemic Practice and Action Research*, 34(1), 37–51. <https://doi.org/10.1007/s11213-019-09507-7>
- Saavedra, J. E., Aliaga Giraldo, K., Castillo Martell, W. H., Huamán Pineda, J., Luna Solís, Y., Nicolás Hoyos, Y., ... & Zevallos Bustamante, S. (2020). Estudio epidemiológico sobre el impacto de la pandemia COVID-19 en la salud mental de la población de Lima Metropolitana. DOI: <https://doi.org/10.33734/diagnostico.v6i1i3.374>

- Sanabria-Montañez C.; Cabrejos J.; Olortegui A.; San Juan H.; Lama M., & Villamonte R. (2022). Patrones de costos de atención a pacientes con enfermedades isquémicas del corazón en el Instituto Nacional Cardiovascular, 2019. *An Fac med*, 83(2):104-11. DOI: <https://doi.org/10.15381/anales.v83i2.23187>
- Sánchez-Ccoyllo, O. R.; Ordoñez-Aquino, C. G.; Arratea-Morán, J.; Marín-Huachaca, N. S., & Reátegui-Romero, W. (2021). Describing aerosol and assessing health effects in Lima, Peru. *International Journal of Environmental Science and Development*, 12, 12. doi: 10.18178/ijesd.2021.12.12.1361
- Sayyadi, R., & Awasthi, A. (2017). A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. *International Journal of Modelling and Simulation*, 37(1), 25–35. <https://doi.org/10.1080/02286203.2016.1219806>
- Seminario L. B. (2017). Estimación del costo social por fallecimiento prematuro. Recuperado de https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/parametros_evaluacion_social/Valor_Estadistico_Vida.pdf
- Shahgholian, K., & Hajhosseini, H. (2009). A dynamic model of air pollution, health and population growth using system dynamics: a study on Tehran-Iran (with computer simulation by the software VensimPLE). *International Journal of Computer and Systems Engineering*, 3(11). Recuperado de <http://scholar.waset.org/1307-6892/15736>
- Silva, C.; Mogollon, R. J.; Estefanía, S., & Chumpitaz, C. M. (2021). Costo de la contaminación de aire por material particulado generado por el transporte vehicular en Lima Metropolitana. *Natura@economía*, 6(2). DOI: <http://dx.doi.org/10.21704//ne.v6i2.1944>
- Silva, J.; Rojas, J.; Norabuena, M.; Molina, C.; Toro, R., & Leiva-Guzmán, M. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6327-2>

- Sopha, B. M., & Ma'mun, S. (2020). System dynamics simulation of private and public transportation in a developing country. *AIP Conference Proceedings*, 2223(April). <https://doi.org/10.1063/5.0000818>
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. En *Irwin-McGraw-Hill*.
- Sterman, J. (2002). *System Dynamics: System Thinking and Modelling for a Complex World*. En *Masachusetts Institute of Technology Engineering Systems Division*. <https://doi.org/10.1021/ed025p187>
- Sukarno, I.; Matsumoto, H., & Susanti, L. (2016). Transportation energy consumption and emissions - a view from city of Indonesia. *Future Cities and Environment*, 2(0), 6. <https://doi.org/10.1186/s40984-016-0019-x>
- Suryani, E.; Hendrawan, R. A.; Adipraja, P. F. E.; Wibisono, A., & Dewi, L. P. (2021). Urban mobility modeling to reduce traffic congestion in Surabaya: a system dynamics framework. *Journal of Modelling in Management*, 16(1), 37–69. <https://doi.org/10.1108/JM2-03-2019-0055>
- Taibi, E. (2010). A system dynamics energy model for a sustainable transportation system. Proceeding of the 28th International Conference of the System Dynamics Society, July 25-29. Recuperado de <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-273300>
- Tapia, V.; Carbajal, L.; Vásquez, V.; Espinoza, R.; Vásquez, C.; Steenland, K., & Gonzales, G. (2018). Reordenamiento Vehicular Y Contaminación Dióxido De Azufre Y Dióxido De Nitrógeno En Lima Nitrogen Dioxide in Metropolitan Lima, Peru. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 35(2), 190–198. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3250.190>
- Tapia, V.; Steenland, K.; Sarnat, S. E.; Vu, B.; Liu, Y.; Sánchez-Ccoyllo, O.; Vásquez, V., & Gonzales, G. (2019). Time-series analysis of ambient PM_{2.5} and cardiorespiratory emergency room visits in Lima, Peru during 2010–2016. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. <https://doi.org/10.1038/s41370-019-0189-3>

- Tapia, V.; Steenland, K.; Vu, B.; Liu, Y.; Vásquez, V., & Gonzales, G. (2020). PM_{2.5} exposure on daily cardio-respiratory mortality in Lima, Peru, from 2010 to 2016. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 19(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00618-6>
- Tapia, V. L.; Vásquez, B. V.; Vu, B.; Liu, Y.; Steenland, K., & Gonzales, G. F. (2020). Association between maternal exposure to particulate matter (PM_{2.5}) and adverse pregnancy outcomes in Lima, Peru. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* (30), 689–697. <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0223-5>
- Tarazona, E. M. (2018). Clasificación vehicular y estandarización de características registrables vehiculares. Directiva N° 002-2006-MTC/15, aprobada mediante R.D. N° 4848-2006-MTC. Escuela de Capacitación. Asociación Automotriz del Perú. Recuperado de <https://aap.org.pe/download/conferencias/2-AAP-Estandarizaci%C3%B3n.pdf>
- Tasas de Mortalidad (2024, 31 de enero). MINSA-REUNIS. Recuperado de https://www.minsa.gob.pe/reunis/data/tasas_mortalidad.asp
- Thaller, C.; Niemann, F.; Dahmen, B.; Clausen, U., & Leerkamp, B. (2017). Describing and explaining urban freight transport by System Dynamics. *Transportation Research Procedia*, 25, 1075–1094. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.480>
- Vasquez-Apestequi, B. V.; Parras-Garrido, E.; Tapia, V.; Paz-Aparicio, M. Rojas, J. P.; Sanchez-Ccoyllo, O. R., & Gonzales, G. F. (2021). Association between air pollution in Lima and the high incidence of COVID-19: findings from a post hoc analysis. *BMC Public Health*. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-11232-7>
- Videira, N.; Schneider, F.; Sekulova, F., & Kallis, G. (2014). Improving understanding on degrowth pathways: An exploratory study using collaborative causal models. *Futures*, 55, 58–77. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2013.11.001>
- Vu, B. N.; Sánchez, O.; Bi, J. Xiao, Q.; Hansel, N. N.; Checkley, W.; Gonzales, G. F.; Steenland, K., & Liu, Y. (2019). Developing an advanced PM_{2.5} exposure model in Lima, Peru. *Remote Sensing*, 11, 641. doi:10.3390/rs11060641

- Vu, B. N.; Tapia, V.; Ebel, S.; Gonzales, G. F.; Liu, Y., & Steenland, K. (2021). The association between asthma emergency department visits and satellite-derived PM_{2.5} in Lima, Peru. *Environmental Research*, (199), 111226. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111226>
- Wang, J.; Lu, H., & Peng, H. (2008). System dynamics model of urban transportation system and its application. *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 8(3), 83-89. [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(08\)60027-6](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(08)60027-6)
- WHO (2016). Ambient air pollution: A global assesment of exposure and burden of disease. Recuperado de <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1>
- WHO (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. En *World Health Organization*. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
- Widener, M., & Hatzopoulou, M. (2016). Contextualizing research on transportation and health: A systems perspective. *Journal of Transport and Health*, 3(3), 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2016.01.008>
- Xue, Y.; Cheng, L.; Wang, K.; An, J., & Guan, H. (2020). System dynamics análisis of the relationship between transit metrópolis construction and sustainable development of urban transportation – Case study of Nanchang city, China. *Sustainability*, 12, 3028. doi:10.3390/su12073028
- Yang, Y.; Zhang, P., & Ni, S. (2014). Assessment of the Impacts of Urban Rail Transit on Metropolitan Regions Using System Dynamics Model. *Transportation Research Procedia*, 4, 521–534. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.040>
- Yao, C.; Wang, T.; Cao, H., & Yang, Y. (2020). Research on Air Pollution Control Measures Based on System Dynamics A Case Study of Beijing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 440(4), 0–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/440/4/042038>

Yungung, R. U. (2020). Adressing Lima's bus transportation fiasco. Recuperado de:
https://ash.harvard.edu/files/ash/files/sypa_final_version_-_march_18.pdf

Zhou, Y., & Zhou, J. (2017). Urban atmospheric environmental capacity and atmospheric environmental carrying capacity constrained by GDP-PM_{2.5}. *Ecological Indicators*, 73, 637–652. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Proceso de modelación

El proceso de modelación para desarrollar el modelo dinámico del transporte urbano convencional como emisor de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana consistió en el desarrollo de 4 pasos o etapas, los cuales son:

1. Articulación del Problema
2. Formulación de la hipótesis dinámica
3. Formulación de un modelo de simulación
4. Validación

1.1. Articulación del Problema

La figura 1 representa, mediante un flujograma, el proceso de articulación del problema.

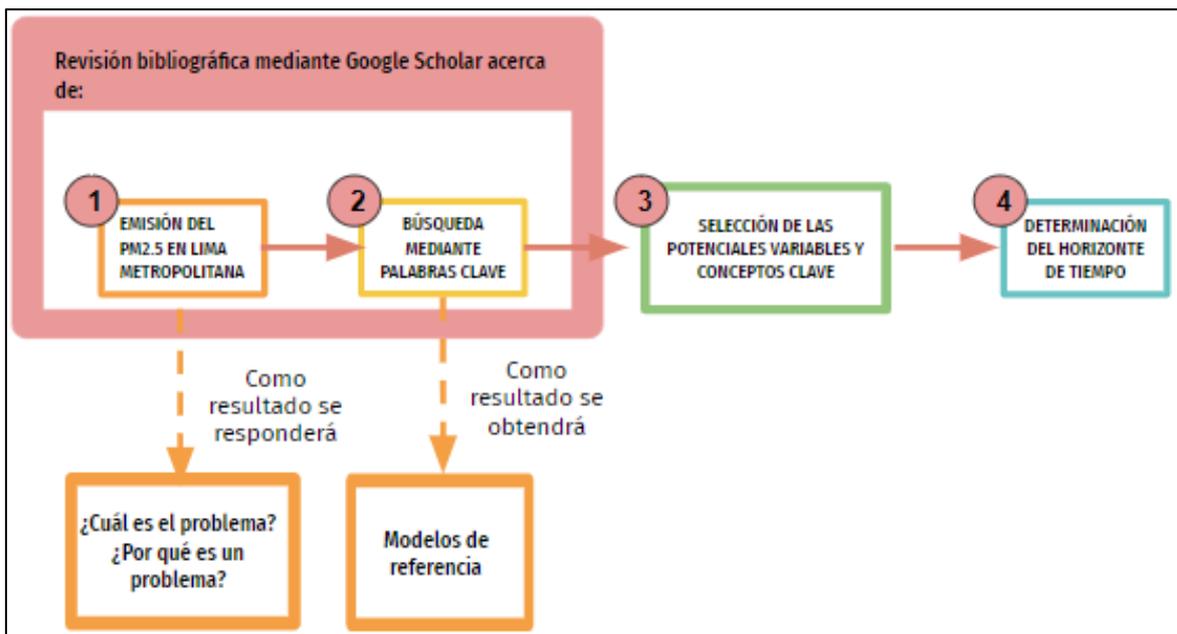


Figura 1: Proceso de la articulación del problema

En esta primera etapa, se procedió a realizar una exhaustiva revisión bibliográfica mediante el uso del buscador Google Académico, con el fin de encontrar artículos publicados en revistas indexadas; el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación denominado ALICIA del CONCYTEC; el RENATI de la SUNEDU; la Referencia, The Networked Digital Library of Theses and Dissertations [NDLTD]; entre otros.

En otras palabras, se buscó los principales estudios que hacen alusión a la emisión de PM_{2.5} en Lima Metropolitana desde los años 2000 en adelante, en relación al transporte urbano, así también, su relación con el sistema socioeconómico (población e ingresos). Como resultado, se respondió concisamente a los siguientes cuestionamientos que definieron el problema: ¿cuál es el problema? y ¿por qué es un problema? La búsqueda de los principales estudios en referencia a la emisión de PM_{2.5} en Lima Metropolitana fueron los descritos en la tabla 1.

Tabla 1: Principales estudios revisados en referencia a la emisión de PM_{2.5} en Lima Metropolitana

Título	Descripción	Fuente
Plan de acción para el mejoramiento de la calidad de aire de Lima y Callao 2021 – 2025.	Un instrumento de gestión, el cual contiene el diagnóstico de la gestión de la calidad del aire de Lima – Callao y propone el plan y programa de acción para la mejora de la calidad de aire.	Resolución Ministerial N° 142-2021-MI-NAM
Principales ideas		

Respecto a la calidad del aire:

Los valores de las concentraciones ambientales del PM₁₀ y PM_{2.5} exceden los ECA-Aire vigentes tanto para el periodo de 24 horas (50 µg/m³) como para el anual (25 µg/m³).

Respecto al inventario de emisiones:

Se encuentra que el parque automotor aporta con un 58% de las emisiones totales de PM_{2.5}, en cambio, las fuentes fijas y las fuentes de área con un 26% y 16%, respectivamente.

Asimismo, el uso del diésel como combustible es el que más aporta a las emisiones de PM_{2.5}, con un 97% del total.

Las categorías vehiculares que más emiten PM_{2.5} son los ómnibus, camionetas pick-up, remolcador y camión.

Por último, la tecnología vehicular Pre-Euro aporta con un 65% de las emisiones totales, seguido del Euro 3/III.

Respecto a las mediciones vehiculares:

24% de los vehículos a diésel sobrepasan las emisiones de contaminantes normadas por los LMP correspondientes.

Además, el 98% de los vehículos a diésel que excedían las emisiones de LMP tenían un certificado de inspección técnica vehicular vigente.

Respecto a la línea epidemiológica:

Del 2010 al 2016 se han registrado un mayor número de defunciones causadas por las infecciones respiratoria aguda baja y las enfermedades isquémicas del corazón. No obstante, concluyen que se requiere el desarrollo de estudios epidemiológicos para determinar los casos de mortalidad atribuible a la contaminación del aire.

Tan solo para el PM₁₀ se estimó que, los costos por morbilidad y mortalidad anual en el 2013 fueron de 929 506 925 dólares (tasa de cambio al 2019) llegando a ser el 0.9% del PBI de Lima.

Continuación ...

Título	Descripción	Fuente
Assesing the mortality burden of air pollution in Lima-Callao	<p>Reporte preparado para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) como parte del programa EPA's Megacities Partnership en Lima, Perú.</p> <p>Presenta los resultados de la evaluación de la mortalidad atribuida a las concentraciones de PM_{2.5} en la región. Además, emplea un inventario de emisiones y técnicas de modelación de la calidad del aire, a nivel distrital, para analizar el aporte de las concentraciones de PM_{2.5} asociados a las emisiones del parque automotor de carretera. Incluso, evalúan mediante subconjuntos del parque automotor, dependiendo de escenarios de cumplimiento de los LMPs. De este modo, destacan los beneficios potenciales, en función a muertes prematuras y costo social, asociados con el aumento de fiscalización y mayores programas de inspección y mantenimiento.</p>	IEc (2021)
Principales ideas		

Continuación ...

Respecto al inventario de emisiones y su aporte a la concentración de PM_{2.5} en el ambiente:

Se estima que, más del 35% del parque automotor a diésel supera los LMPs en la región.

Se destaca que, menos del 20% de la flota del parque automotor son vehículos a diésel mientras que los vehículos a gasolina son más del 70%. No obstante, los vehículos a diésel aportan con más del 85% de las emisiones de contaminantes tales como las camionetas pick-up, ómnibus, camiones y remolcadores.

Se estima que 14.5 µg/m³ (58%) a 16.7 µg/m³ (67%) de las concentraciones de PM_{2.5} en el ambiente, resultan de las emisiones del parque automotor de carretera en la región.

Respecto al impacto en la salud y los costos asociados de las concentraciones de PM_{2.5}:

Las emisiones de PM_{2.5} del parque automotor en Lima Callao producen de 5 150 a 6 200 muertes prematuras anualmente (por enfermedades no transmisibles e infecciones de las vías respiratorias bajas) respecto a la concentración umbral de 10 µg/m³, equivalente a 710 a 860 millones de dólares en costos económicos (tasa de cambio al 2017).

Título	Descripción	Fuente
Costo de la contaminación del aire por material particulado generado por el transporte vehicular en Lima Metropolitana	Artículo científico que estima el costo económico (por morbilidad y mortalidad) de la contaminación del aire por el PM ₁₀ y PM _{2.5} aportado por el parque automotor en Lima Metropolitana durante el periodo 2010 al 2019.	Silva et al. (2021)

Principales ideas

Continuación ...

Durante el periodo en estudio se encontró que, existe una asociación de 128.1 muertes/año y 18 264.4 casos de morbilidad/año asociados a las emisiones de PM_{2.5}, por parte del parque automotor en Lima Metropolitana, respecto a la concentración umbral de 25 µg/m³. Los costos asociados alcanzarían los 27 millones de dólares (tasa de cambio al 2016) para el PM_{2.5} en el 2016.

Además, concluyen que, al no haberse encontrado una tendencia, ya sea creciente o decreciente, del costo económico ambiental con relación al crecimiento poblacional o el aumento del parque automotor o medidas regulatorias del parque automotor; vinculan que el vector predominante son las dinámicas atmosféricas en Lima Metropolitana.

Título	Descripción	Fuente
Describing aerosol and assessing health effects in Lima, Peru	Artículo científico que determina las características químicas-morfológicas del PM ₁₀ . Así también, estima la cantidad de muertes que pueden ser evitadas, a través de las reducciones de concentraciones de PM _{2.5} en el ambiente.	Sánchez et al. (2021)

Principales ideas

Se estimó que para el 2016, para la mortalidad asociada a la exposición del PM_{2.5} (por todas las causas), se tendría un promedio de 718, 1 246 y 4 295 muertes prematuras evitadas en Lima Metropolitana, si el promedio anual de las concentraciones habría sido reducido de 26.53 µg/m³ hasta 23.88 µg/m³, 21.22 µg/m³ y 10 µg/m³, respectivamente.

Título	Descripción	Fuente
Lima: Evaluación de la campaña respira limpio – Medición de emisiones vehiculares	Reporte de asistencia técnica de Calidad del aire de C40, el cual resume los hallazgos de los potenciales beneficios en términos de calidad de aire, impactos en la salud y beneficios económicos asociados de la campaña Respira Limpio de la Municipalidad Metropolitana de Lima, Perú	C40 Cities (2022)

Principales ideas

Continuación ...

Se calculó que, en el 2020, el PM_{2.5} aportó con 3600 muertes prematuras en Lima, siendo su costo económico asociado en 9.4 mil millones de soles (precios corrientes al 2020).

Título	Descripción	Fuente
Air quality life index 2023 – Annual Update	Reporte del índice de contaminación tomando en consideración la contaminación ambiental por PM _{2.5} usando la métrica de años de esperanza de vida perdidos a nivel global.	Greenstone y Hasenkopf (2023)

Principales ideas

Se calculó que para el 2021, si la capital del Perú, Lima, llegara a reducir (permanentemente) las concentraciones anuales de PM_{2.5} al umbral que establece la guía de la OMS de 5 µg/m³, los ciudadanos limeños tendrían 2.3 años más de esperanza de vida. Asimismo, destaca que principalmente las emisiones vehiculares son los responsables de la pobre calidad de aire.

Título	Descripción	Fuente
Reporte de seguimiento año 2022 – Política Nacional de Transporte urbano ^a	Reporte de los avances alcanzados para el año 2022 en el marco de la Política Nacional de Transporte urbana aprobada por D.S. N° 012-2010-MTC.	MTC (2023)

Principales ideas

Se calculó que, para el 2022, el transporte convencional emitió un total de 523.3 toneladas de PM_{2.5}, siendo el mayor aportante de emisiones (más del 97%) frente a otros servicios de transporte público como son los corredores complementarios, COSAC, Línea 1 y taxis. Adicionalmente, se estimó que, las emisiones per cápita serían de 0.147 g de PM_{2.5} por pasajero para el transporte convencional.

Nota: ^a La información es complementada con el Informe N° D-000033-2023-ATU/DAAS-SDAA de la ATU (2023). ECA-Aire = Estándar de Calidad Ambiental del Aire. LMP = Límite Máximo Permisible. MINAM = Ministerio del Ambiente. MTC = Ministerio de Transporte y Comunicaciones. D.S = Decreto Supremo.

Respecto a los estudios mencionados, se precisa que, el problema principal en materia de calidad ambiental en Lima Metropolitana son las elevadas concentraciones de PM_{2.5} que provienen principalmente de las emisiones del parque automotor de carretera. Asimismo, es considerado un problema debido a que ocasiona impactos en la salud como es los casos atribuidos de morbilidad y mortalidad, los cuales pueden ser expresados en términos económicos en millones de soles o dólares.

En segundo lugar, se buscó en el idioma español, como en el inglés, respecto a las palabras clave de búsqueda como: “sistema dinámico” o “system dynamics”, “causal loop diagram”, “stock and flow diagram”; conjuntamente con las siguientes palabras clave: “transporte” o “transport” o “urban movility”; “contaminación del aire” o “air pollution”. Como resultado, se revisaron los principales artículos científicos y tesis, nacionales e internacionales, que hayan sido publicados en internet con un periodo de antigüedad de hasta los años 2000. Estos estudios fueron tomados como modelos de referencia para la elaboración del propio, y sentaron la base para seleccionar las variables y conceptos claves a elegir. Los principales trabajos de investigación referentes a sistemas dinámicos y contaminación del aire revisados son los expuestos en la tabla 2. Cabe mencionar que el CLD hace referencia a la representación cualitativa o conceptual de los sistemas, el cual es representado por variables interconectadas mediante flechas que señalan relaciones directamente/indirectamente proporcionales según el uso de signos de más/menos, y que, además, son útiles para identificar los bucles de retroalimentación de refuerzo/balance. Por otro lado, el SFD hace referencia a la representación cuantitativa de los sistemas, el cual es representado por variables de acumulación, de flujo, tasas y desfase temporal. Para mayor información respecto a estas herramientas para la modelación, véase los acápites 2.6. Los diagramas causales y 2.7. Los diagramas de acumulación y flujo y el modelo del sistema dinámico.

Tabla 2: Trabajos de investigación de sistemas dinámicos revisados

Autor(es)	Año	Lu- gar	Herra- mientas usadas	Título
Sayyadi y Awasthi	2016	LNE	CLD y SFD	A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning.

Continuación ...

Duarte	2011	Bogotá (Colombia)	CLD y SFD	El Transporte Público Colectivo en Bogotá, D.C. Una Mirada desde la Dinámica de Sistemas
Jittrapirom, Knoflachner y Mailer	2017	Chiang Mai (Tailandia)	CLD	Understanding decision makers perceptions of Chiang Mai city's transport problems an application of Causal Loop Diagram (CLD) methodology
Armah, Yawson y Pappoe	2010	Accra (Ghana)	CLD	A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana
Thaller, et al.	2017	Berlín (Alemania)	CLD	Describing and explaining urban freight transport by System Dynamics
Laurenti	2013	LNE	CLD	Applications of systems thinking within the sustainability domain product design, product systems and stakeholder perspectives.
Widener y Hatzopoulou	2016	LNE	CLD	Contextualizing research on transportation and health: A systems perspective.
Rivera	2012	Lima – Callao (Perú)	CLD y SFD	Modelo de identificación de factores contaminantes atmosféricos críticos en Lima – Callao
Yao, Wang, Cao y Yang	2020	Beijín (China)	CLD y SFD	Research on Air Pollution Control Measures Based on System Dynamics A Case Study of Beijing
Suryani, Hendrawan, Adipraja, Wibisono y Dewi	2021	Surabaya (Indonesia)	CLD y SFD	Urban mobility modeling to reduce traffic congestion in Surabaya: a system dynamics framework.
Chaves, Fontoura y Ribeiro	2019	Región Metropolitana de Sao Paulo (Brasil)	SFD	The Brazilian urban mobility policy: The impact in São Paulo transport system using system dynamics
Guzman y Orjuela	2016	Bogotá (Colombia)	CLD	Linking a transport dynamic model with an emissions model to aid air pollution evaluations of transport policies in Latin America
Rees, Masari y Appleton-Dyer	2020	Aotearoa (Nueva Zelanda)	CLD	Transport impacts on wellbeing and liveability: literature summary.

Continuación ...

Lara y Da Silva	2021	LNE	CLD	A system dynamics model of urban mobility resilience when exposed to fuel-related threats.
Prieto y Ordoñez	2020	Lima (Perú)	SFD	Estimación de emisiones vehiculares mediante modelo dinámico de sistemas en la carretera Central en la ciudad de Lima – Perú noviembre 2020
Du, Li, Zhao, Ma y Jiang	2017	Shanghai (China)	SFD	System Dynamic modelling of urban carbon emissions based o the regional National Economy and Social Development Plan: A casestudy of Shanghai city
Shahgholian y Hajihosseini	2009	Tehran (Iran)	CLD y SFD	A dynamic model of air pollution, health and population growth using system dynamics: a study on Tehran-Iran (with computer simulation by the software VensimPLE)
Gupta, Bandyopadhyay y Singh	2019	India	CLD y SFD	Measuring effectiveness of carbon tax on Indian road Passenger transport: A system dynamics approach
Wang, Lu y Peng	2008	Dalian (China)	CLD y SFD	System dynamics model of urban transportation system and its application
Goodarzi, Ershadi, Arsanjani y Firouzshahi	2016	Tehran (Iran)	CLD y SFD	System dynamic modeling of air pollution in megacities: An investigation in megacity of Tehran
Harrison, Grant-Muller y Hodgson	2021	LNE	CLD	A review of transport-health system dynamic models
Zhou y Zhou	2017	Wuhan (China)	SFD	Urban atmospheric environmental capacity and atmospheric environmental carrying capacity constrained by GDP–PM _{2.5}
Hosseinabad y Moraga	2017	Ciudad de México (México)	CLD y SFD	A System Dynamics Approach in Air Pollution Mitigation of Metropolitan Areas with Sustainable Development Perspective: A Case Study of Mexico City
Sopha y Ma'mun	2020	Yogyakarta (Indonesia)	SFD	System dynamics simulation of private and public transportation in a developing country

Continuación ...

Yang, Zhang y Ni	2014	Guangzhou (China)	CLD y SFD	Assessment of the Impacts of Urban Rail Transit on Metropolitan Regions Using System Dynamics Model
Sukarno, Matsumoto y Susanti	2016	Padang (Indonesia)	CLD y SFD	Transportation energy consumption and emissions - a view from city of Indonesia
Chen, Ho y Jan	2006	Taipei (Taiwan)	CLD y SFD	A system dynamic model of sustainable urban development: Assessing air purification policies at Taipei city
Ercan, Onat y Tatari	2016	Estados Unidos	CLD y SFD	Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach
Jia, Liu y Yan	2019	China	CLD y SFD	Effect of APCF policy on the haze pollution in China: A system dynamics approach
Rassafi, Jafari y Javanshir	2014	Mashhad (Irán)	CLD y SFD	An appraisal of sustainable urban transportation: Application of a system dynamic model
Xue, Cheng, Wang, An y Guan	2020	Nanchang (China)	CLD y SFD	System dynamics análisis of the relationship between transit metropolis construction and sustainable development of urban transportation – Case study of Nanchang city, China
Gelves, Sanabria, Guerrero y Garzón	2023	Bogotá (Colombia)	CLD	Estimación de las emisiones de material particulado generado por el transporte público en Bogotá mediante la dinámica de sistemas

Nota: CLD = Causal Loop Diagram. SFD = Stock and Flow Diagram. LNE = Lugar no específico. GDP = Gross Domestic Product. APCF = Air Pollution Charging Fee

En tercer lugar, tomando en consideración las variables más usuales, sus interrelaciones y los conceptos que envuelven; se seleccionaron las potenciales variables y conceptos clave que fueron seleccionados para el desarrollo del modelo propio. Las potenciales variables, concepto e interrelaciones encontradas en la revisión de literatura son descritas en la tabla 3.

Tabla 3: Potenciales variables, conceptos e interrelaciones revisadas

Potenciales variables	Concepto	Interrelaciones
PBI local	El Producto Bruto Interno expresa el nivel económico a nivel de región (en términos macroeconómicos).	Tiene relación directamente proporcional con el PBI per cápita y es afectado negativo por las externalidades de los costos por contaminación ambiental.
PBI per cápita	Medida del nivel económico que tiene cada persona en la región (un indicador macroeconómico). En otras palabras, es un indicador de nivel adquisitivo.	Es directamente proporcional al PBI local, pero inversamente proporcional a la cantidad de población. Por otra parte, es directamente proporcional a la cantidad de viajes realizados per cápita.
Población	Población total en la región.	Mantiene una relación inversamente proporcional con el PBI per cápita y tiene relación directamente proporcional con la cantidad de viajes realizados.
Número de viajes motorizados	Viajes realizados por transporte motorizado por la población en función del nivel de ingresos.	Es directamente proporcional al PBI per cápita y a la distancia de viaje recorrida. Influencia a la distancia de viaje recorrida.
Distancia de viaje	Distancia de viaje recorrida promedio de la población en su día a día.	Es directamente proporcional al número de viajes y a la emisión de PM _{2.5} .
Antigüedad / tecnología vehicular	Proporción de unidades según antigüedad vehicular que se puede interpretar en tecnología vehicular.	Es directamente proporcional a la emisión de PM _{2.5} .

Continuación ...

Emisión de PM _{2.5}	Emisión de PM _{2.5} producto de la combustión incompleta en el motor.	Es directamente proporcional a la distancia de viaje recorrida y la tecnología vehicular. Asimismo, es directamente proporcional a la concentración de PM _{2.5}
Concentración de PM _{2.5}	Concentración ambiental promedio anual de PM _{2.5} en la región.	Es directamente proporcional a la distancia a la emisión de PM _{2.5} . También mantiene una relación directamente proporcional con la cantidad de casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición de PM _{2.5}
Casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición de PM _{2.5}	Casos de morbilidad y mortalidad atribuibles a la exposición de las concentraciones ambientales de PM _{2.5} que superen el umbral inocuo en la región.	Son directamente proporcional a la concentración de PM _{2.5} . A su vez, tienen relación directamente proporcional a los costos por contaminación ambiental. Para los casos de mortalidad, estos mantienen una relación inversamente proporcional con la población.
Costos por contaminación ambiental	Valorización económica de los casos de morbilidad y mortalidad atribuible a la exposición de PM _{2.5} que tienen un impacto negativo en la economía de la región.	Son directamente proporcional a los casos de morbilidad y mortalidad asociados a la exposición de PM _{2.5} , no obstante, tienen una relación inversamente proporcional con el PBI local.

Nota: PBI = Producto Bruto Interno.

Tomando en consideración las variables y conceptos determinados, se estableció que el alcance del modelo está enmarcado en la población y la economía local como puntos de partida para la dinámica de viajes en la modalidad de transporte público convencional, emisiones, concentraciones de $PM_{2.5}$, efectos por morbilidad y mortalidad que se hayan probado la asociación científicamente, y el costo económico ambiental asociado. Por lo tanto, no se incluyeron, demás dinámicas que alteren a la economía, la sociedad, cultura, política, salud, fenómenos atmosféricos anómalos u otros impactos de la contaminación (como daños físicos a la infraestructura, impactos a la salud mental, o impactos sobre la flora y fauna).

Por último, se trabajó con un horizonte de tiempo de 20 años, es decir hasta el 2040. Toda vez que, se estima que los patrones de viaje, tasas y dinámica no cambien en gran medida en la región hasta esa fecha.

1.2 Formulación de la hipótesis dinámica

La figura 2 representa, mediante un flujograma, el proceso de formulación de la hipótesis dinámica.

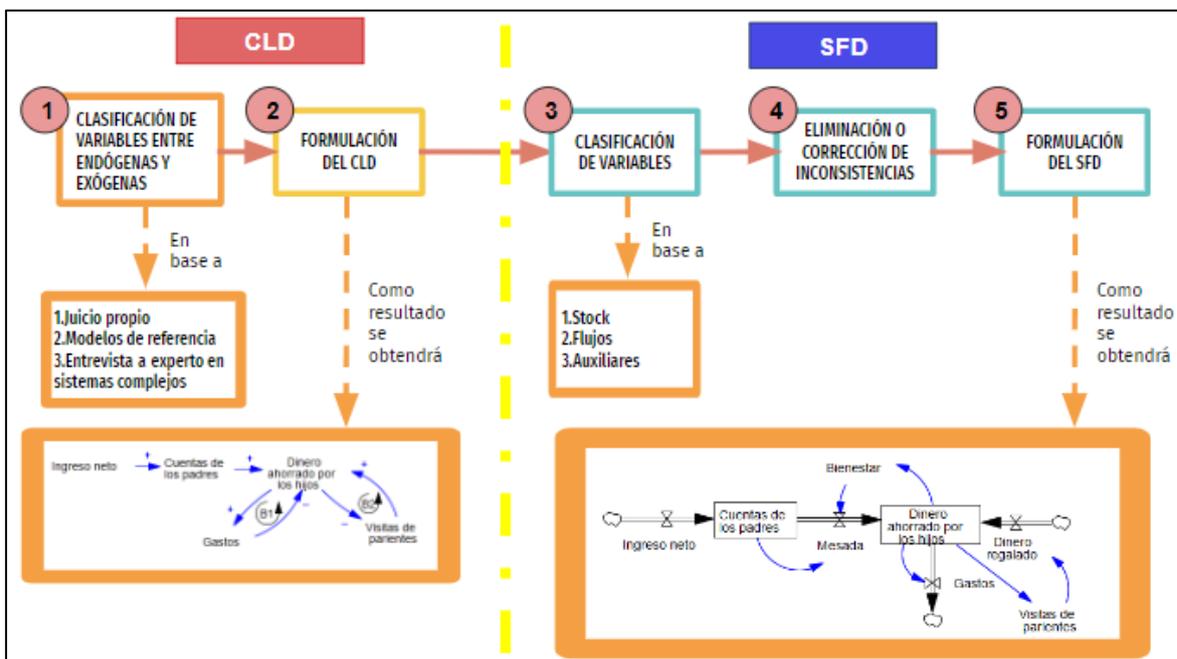


Figura 2: Proceso de formulación de la hipótesis dinámica

En primer lugar, las variables clave identificadas en el paso anterior, fueron clasificadas en variables endógenas (variables que son generadas principalmente dentro del sistema por la interacción de otras variables) y exógenas (variables que surgen por factores externos al sistema), con el fin de conocer su posición en la formulación del Causal Loop Diagram (CLD) o diagrama causal. Para este fin, se realizó la clasificación a juicio propio, tomando como base los demás modelos de referencia. La clasificación de las variables en endógenas, exógenas y excluidas son mostrados en la tabla 4.

Tabla 4: Clasificación de variables para el diagrama causal

Variables endógenas	Variables exógenas	Variables excluidas
PBI local	Preferencia de modo de viaje	Condiciones políticas, normativas y cualquier regulación adicional
Ingresos	Proporción de la flota a diésel (según categoría vehicular)	Variables meteorológicas anómalas
PBI per cápita	Distancia de recorrido promedio por viaje (según categoría vehicular)	Expansión territorial urbana
Población	Proporción de la flota según tecnología vehicular a diésel (según categoría vehicular)	La contribución de otros contaminantes para la formación de PM _{2.5} en el ambiente
Crecimiento poblacional	Factores de emisión de PM _{2.5} y NO _x según tecnología vehicular a diésel (según categoría vehicular)	Otros impactos en la salud de la exposición al PM _{2.5} como el Alzheimer y enfermedades de salud mental

Continuación ...

Tasa de viajes motorizados por persona	Factor emisión-concentración $PM_{2.5}$ para las emisiones vehiculares de $PM_{2.5}$ y NO_x en Lima Metropolitana	Otros impactos por exposición al $PM_{2.5}$ como el daño material, la suciedad, o el impacto en la flora y fauna.
Número de viajes motorizados	Concentración de $PM_{2.5}$ en la atmósfera atribuido al resto de fuentes en Lima Metropolitana	La exacerbación de una condición de salud a causa de la exposición a $PM_{2.5}$.
Viajes en transporte público convencional (según categoría vehicular)	Concentración base de $PM_{2.5}$ en la atmósfera en Lima Metropolitana (determinada por las variables meteorológicas y del entorno físico)	Desarrollo de áreas verdes
Distancia viajada (según categoría vehicular)	Tasa de morbilidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana	Tráfico vehicular
Emisión de $PM_{2.5}$ y NO_x (según categoría vehicular)	Tasa de mortalidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana	Inversión en el transporte (como apoyo a la electromovilidad)
Concentración de $PM_{2.5}$ en la atmósfera atribuido al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana	Costos unitarios promedio por el tratamiento, días de hospitalización, visitas, uso de medicamentos y otros por morbilidad	Precio del diésel o elasticidad de viajes en base a la variación de precios
Concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana	Promedio del Valor Estadístico de la Vida Humana en Lima Metropolitana	Tarifa del costo de viajes

Continuación ...

Riesgo relativo por efecto de morbilidad por exposición al PM _{2.5} en Lima Metropolitana	Desarrollo de infraestructura vial
Riesgo relativo por efecto de mortalidad por exposición al PM _{2.5} en Lima Metropolitana	Variables económicas como el empleo o nivel salarial
Número de casos por morbilidad por exposición al PM _{2.5} en Lima Metropolitana	Dinámica de viajes del resto de modalidades de transporte
Número de casos por mortalidad por exposición al PM _{2.5} en Lima Metropolitana	Dinámicas de migración
Costo económico por morbilidad por exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana	
Costo económico por mortalidad por exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana	
Costo económico ambiental por exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana	

Nota: PBI = Producto Bruto Interno.

De este modo, se establecieron las principales variables que afectan al modelo, definiendo así, los límites del modelo. Cabe precisar que, algunos autores sí consideran las variables excluidas en el presente modelo, por el alcance y problema establecidos para cada investigación.

En segundo lugar, se desarrolló el modelo conceptual mediante la formulación del CLD. La formulación del CLD consistió en la esquematización, a través del programa VensimPLE, entre las variables y las interrelaciones que gobiernan en la emisión de $PM_{2.5}$ por parte del transporte público convencional, considerando el sistema socioeconómico y ambiental. Dicho de otro modo, se plasmó cada variable en una hoja en blanco, y luego se establecieron las interrelaciones mediante el dibujo de flechas entre las variables independientes y dependientes. Luego, se asignó el signo (+) o menos (-) para señalar si es una relación proporcional o inversamente proporcional, respectivamente. Además, se incluyó a las flechas de interrelaciones el siguiente símbolo (//), para destacar la ocurrencia de un lapso de tiempo entre la causa y el efecto.

El diagrama conceptual o diagrama cualitativo o CLD desarrollado mediante el programa VensimPLE es representado en su amplitud a través de subsistemas que explican la dinámica de viajes y su relación con las emisiones; la dinámica de emisiones en relación a las concentraciones de $PM_{2.5}$; la dinámica de concentraciones de $PM_{2.5}$ y su relación con los impactos de salud y económicos, tanto para el $PM_{2.5}$ total en el ambiente en Lima Metropolitana y para las concentraciones de $PM_{2.5}$ atribuidos exclusivamente al transporte público convencional a diésel; los bucles de retroalimentación de balance B1 y B2. Los mencionados subsistemas son ilustrados en las figuras 3, 4, 5, 6, 7 y 8, respectivamente.

Referente al bucle de retroalimentación R1, R2 y B3, como estas expresan relaciones usuales en cualquier sistema, estas relaciones no se profundizan con mayor énfasis debido a su poca relevancia en el problema abordado.

La figura 3 muestra la dinámica de viajes en el transporte público a diésel y su relación con las emisiones de $PM_{2.5}$ y NO_x . La estimación de las emisiones estuvo basada en función a

la cantidad de viajes realizados, el cual es fundamentalmente determinado por la población y la economía local (PBI local), cuyo sistema de metodología es recomendado para la región de Lima Metropolitana según se señala en MTC-GIZ (2015).

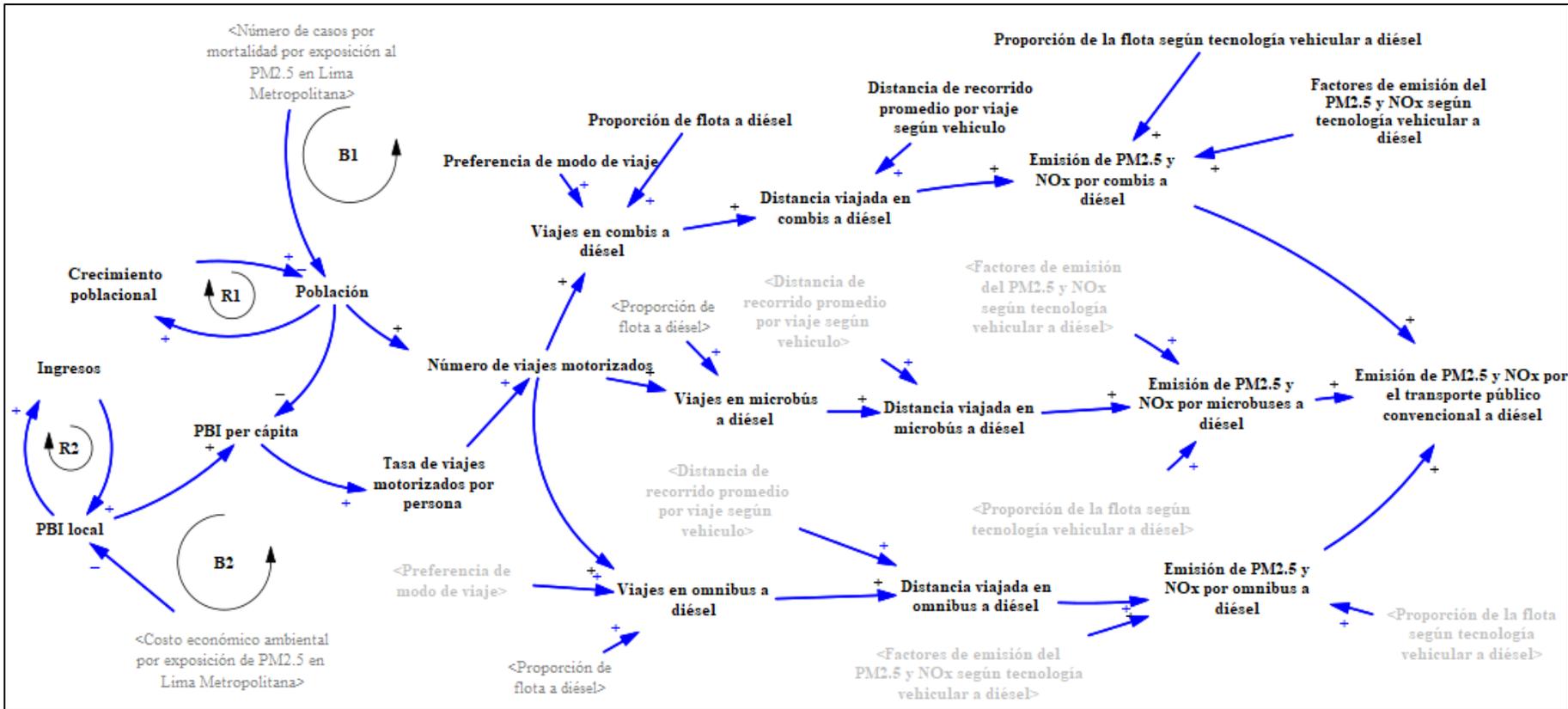


Figura 3: Diagrama conceptual – dinámica de viajes y emisión de PM_{2.5} y NO_x del transporte público convencional a diésel. El signo de menos (-) señala una relación inversamente proporcional. El signo de más (+) señala una relación directamente proporcional. B = bucle de retroalimentación de balance. R = bucle de retroalimentación de refuerzo. PBI = Producto Bruto Interno. < > = Variable sombra, es decir, representa a una variable que ya fue presentada previamente en el modelo.

La lectura del diagrama causal es el siguiente:

1. La variable “población” está determinada principalmente por el “crecimiento poblacional”. Dichas variables forman el bucle de retroalimentación de refuerzo “R1”, que puede ser entendido como, a una mayor población aumenta la cantidad de nacimientos (que es, generalmente, mucho mayor a la cantidad de defunciones). El cual, es abarcado como incremento poblacional, que, a su vez, aumentará la población nuevamente para el siguiente año. Cabe precisar que, solo ha sido considerada su reducción por la variable “Número de casos por mortalidad por exposición al PM_{2.5} en Lima Metropolitana”.
2. La variable “PBI local” está determinada principalmente por los “ingresos”. Dichas variables forman el bucle de retroalimentación de refuerzo “R2”, que puede ser entendido como, a un mayor desarrollo de la economía local aumenta la cantidad de ingresos que se obtiene (que es, frecuentemente, mucho mayor a la cantidad de pérdidas). El cual es interpretado como los ingresos netos, que, a su vez, aumentará la economía local nuevamente para el siguiente año. Cabe precisar que, solo es reducido por la variable “costo económico ambiental por exposición de PM_{2.5} en Lima Metropolitana”.
3. A mayor “población” reducirá el “PBI per cápita”, ya que el “PBI local” generado se distribuirá en un mayor número de personas.
4. A más “PBI per cápita”, aumentará la “tasa de viajes motorizados por persona”, fundamentado en el trabajo de JICA (2005).
5. A mayor “población” y/o mayor “tasa de viajes motorizados por persona” aumentará el “número de viajes motorizados”.
6. A un mayor “número de viajes motorizados” y/o “preferencia de modo de viaje” y “proporción de flota a diésel” aumentará los “viajes en combis a diésel” (como un ejemplo de modalidad de categoría vehicular del transporte público).
7. A más “viajes en combis a diésel” y/o “distancia de recorrido promedio por viaje según vehículo” aumentará la “distancia viajada en combis a diésel”.
8. A mayor “distancia viajada en combis a diésel” y/o “proporción de la flota según tecnología vehicular a diésel” y/o “factores de emisión del PM_{2.5} y NOx según tecnología vehicular a diésel” aumentará la “emisión de PM_{2.5} por combis a diésel”.
9. A mayor “emisión de PM_{2.5} y NOx por combis a diésel” aumentará la “emisión de PM_{2.5} y NOx por el transporte público convencional a diésel”.

La figura 4 muestra el paso de emisiones de PM_{2.5} y NO_x a concentraciones de PM_{2.5} mediante los factores de emisión-concentración del reporte de IEc (2021), calculados para Lima Metropolitana. Adicionalmente, la formación de la concentración promedio ambiental de PM_{2.5} en Lima Metropolitana por el aporte de la concentración base de PM_{2.5} determinado por las variables meteorológicas y del entorno físico y la concentración de PM_{2.5} en la atmósfera atribuido al resto de fuentes en Lima Metropolitana.

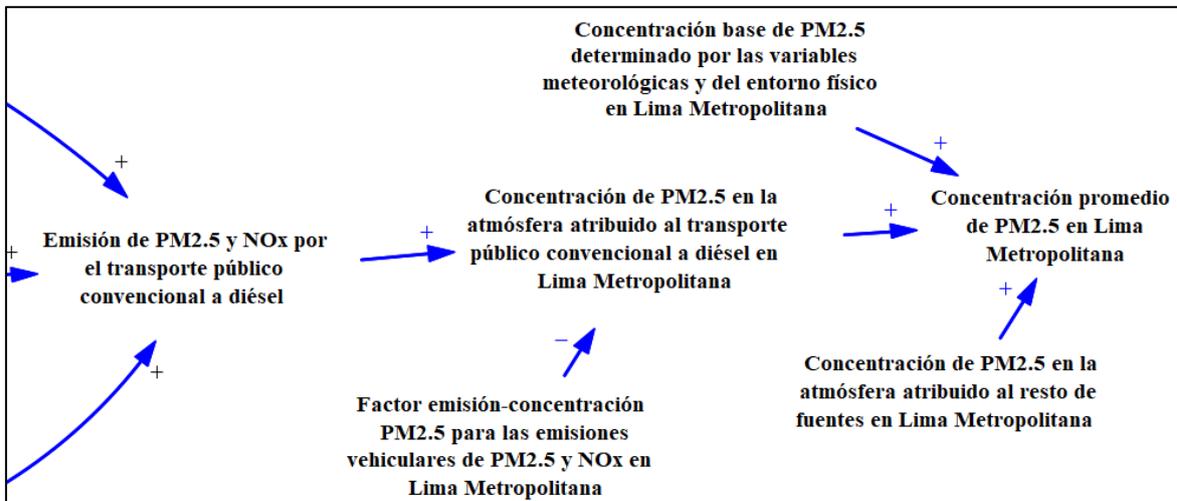


Figura 4: Dinámica conceptual – dinámica de emisiones de PM_{2.5} y NO_x y concentración de PM_{2.5} en Lima Metropolitana. El signo de menos (–) señala una relación inversamente proporcional. El signo de más (+) señala una relación directamente proporcional.

La lectura del diagrama causal es el siguiente:

10. A mayor “emisión de PM_{2.5} y NO_x por el transporte público convencional a diésel” aumentará la “concentración de PM_{2.5} en la atmósfera atribuido al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana”. Pero, a un mayor “factor de emisión-concentración de PM_{2.5} para las emisiones vehiculares en Lima Metropolitana” reducirá la “concentración de PM_{2.5} en la atmósfera atribuido al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana”.
11. A una mayor “concentración de PM_{2.5} en la atmósfera atribuido al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana” y/o “concentración de PM_{2.5} en la atmósfera atribuido al resto de fuentes en Lima Metropolitana” y/o “concentración base de PM_{2.5} determinado por las variables meteorológicas y del entorno físico en Lima

Metropolitana” aumentará la “concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”.

Basado en la función de asociación del cambio de la incidencia de impactos adversos en la salud producido por los cambios en las concentraciones ambientales del contaminante usado en MINAM (2014), IEc (2021) y Silva et al. (2021). Se realizó la estimación de exceso de casos de morbilidad y mortalidad (a corto y largo plazo). Posteriormente, se calculó el costo económico por mortalidad en función del promedio de valor estadístico de la vida humana calculado por Seminario (2017), y costos referenciales de la revisión de literatura para los costos directos e indirectos asociados a la morbilidad. Por último, la suma de los costos por mortalidad y morbilidad formaron el costo económico ambiental por exposición de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana. La figura 5 ilustra la dinámica de la concentración de $PM_{2.5}$, el impacto de salud y el costo económico ambiental asociado.

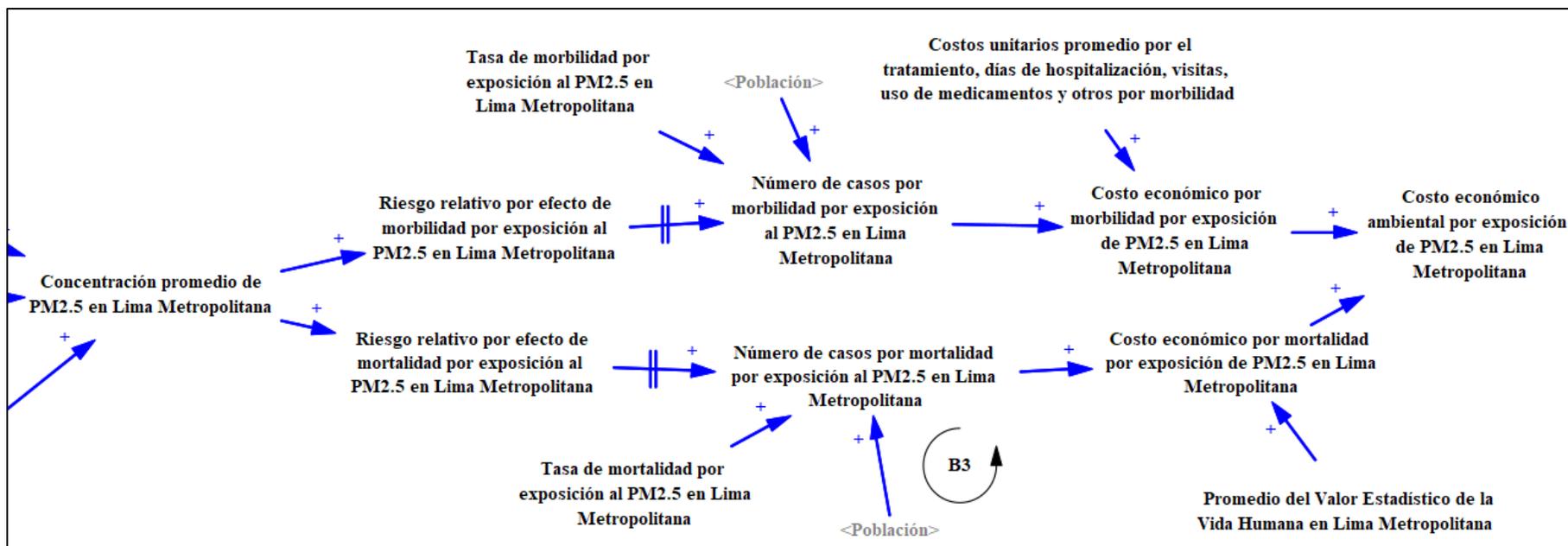


Figura 5: Diagrama conceptual - dinámica de la concentración de PM_{2,5}, el impacto de salud y el costo económico ambiental asociado. El signo de menos (-) señala una relación inversamente proporcional. El signo de más (+) señala una relación directamente proporcional. B = bucle de retroalimentación de balance. < > = Variable sombra, es decir, representa a una variable que ya fue presentada previamente en el modelo. El signo de doble barra (//) representa un desfase temporal o lapso entre el efecto y la causa.

La lectura del diagrama causal es el siguiente:

12. A mayor “concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” aumentará el “riesgo relativo por efecto de morbilidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” y el “riesgo relativo por efecto de mortalidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”.
13. A mayor “riesgo relativo por efecto de morbilidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” y/o “tasa de morbilidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” y/o “población” aumentará, tomando en consideración un lapso de tiempo de exposición a corto y mediano plazo, el “número de casos por morbilidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”.
14. A mayor “riesgo relativo por efecto de mortalidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” y/o “tasa de mortalidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” y/o “población” aumentará, tomando en consideración un lapso de tiempo a corto y largo plazo, el “número de casos por mortalidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”. En este caso se formaron los bucles de retroalimentación “B1” y “B3”. El bucle B1 es abordado ampliamente líneas abajo. El bucle B3 expresa que, a mayor población, mayor número de muertes y, por ende, menor población (aunque a una menor escala que el propio aumento).
15. A un mayor “número de casos por morbilidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” y/o “costos unitarios promedio por el tratamiento, días de hospitalización, visitas, uso de medicamentos y otros, por movilidad” aumentará el “costo económico por morbilidad por exposición de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”.
16. A un mayor “número de casos por mortalidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” y/o “promedio del valor estadístico de la vida humana en Lima Metropolitana” aumentará el “costo económico por mortalidad por exposición de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”.
17. A un mayor “costo económico por morbilidad por exposición de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” y/o “costo económico por mortalidad por exposición de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” aumentará el “costo económico ambiental por exposición de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”. Formando así el bucle de retroalimentación B2, el cual es abordado más ampliamente, líneas abajo.

Después, se estimó la contribución de las emisiones de PM_{2.5} de transporte público convencional a diésel como un porcentaje directamente proporcional de la totalidad de casos por morbilidad, mortalidad y costo económico ambiental en base a su aporte a las concentraciones ambientales de PM_{2.5} (figura 6).

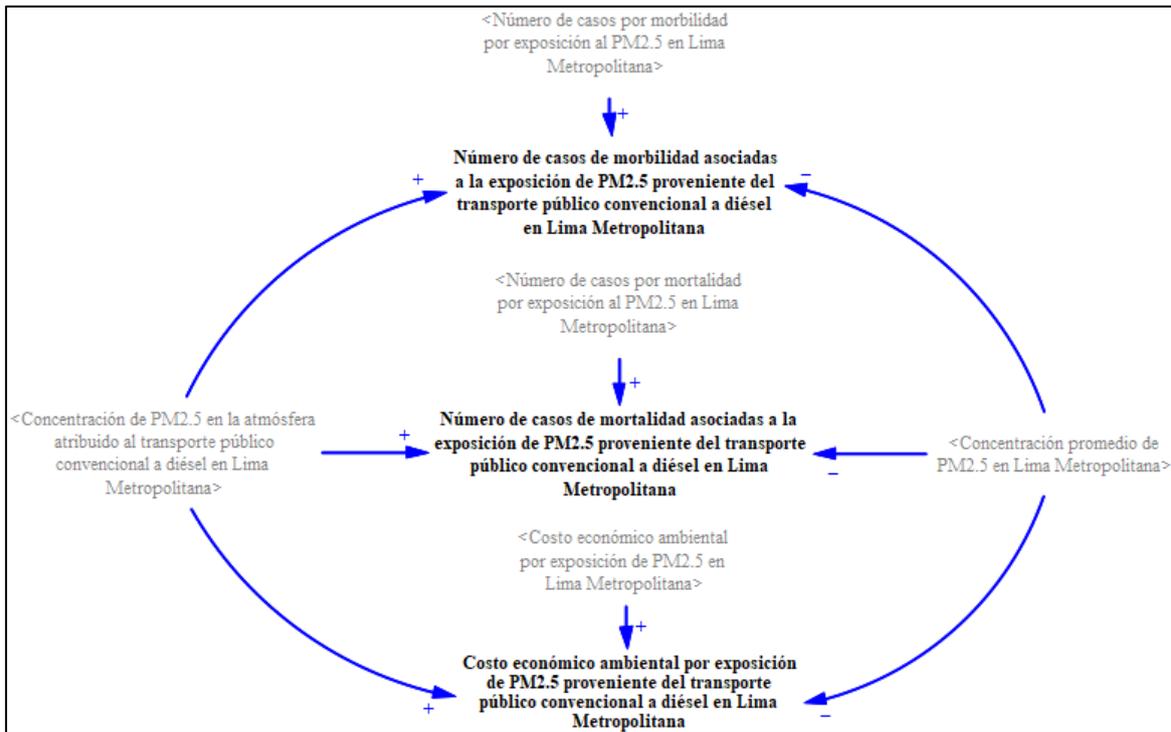


Figura 6: Diagrama conceptual – impactos en la salud y costo ambiental asociado de la contribución de concentración PM_{2.5} del transporte público convencional a diésel. El signo de menos (-) señala una relación inversamente proporcional. El signo de más (+) señala una relación directamente proporcional. < > = Variable sombra, es decir, representa a una variable que ya fue presentada previamente en el modelo.

La lectura del diagrama causal es el siguiente:

18. A mayor “concentración de PM_{2.5} en la atmósfera atribuido al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana” y/o “número de casos por morbilidad por exposición al PM_{2.5} en Lima Metropolitana” aumentará el “número de casos de morbilidad asociadas a la exposición de PM_{2.5} proveniente del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana”, pero, este será disminuido por la “concentración promedio de PM_{2.5} en Lima Metropolitana”.
19. A mayor “concentración de PM_{2.5} en la atmósfera atribuido al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana” y/o “número de casos por mortalidad por

exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” aumentará el “número de casos de mortalidad asociadas a la exposición de $PM_{2.5}$ proveniente del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana”, pero, este será disminuido por la “concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”.

20. A mayor “concentración de $PM_{2.5}$ en la atmósfera atribuido al transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana” y/o “número de casos por morbilidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana” aumentará el “costo económico ambiental por exposición de $PM_{2.5}$ proveniente del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana”, pero, este será disminuido por la “concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”.

El bucle de retroalimentación de balance “B1” originado por el crecimiento de la “población”, el cual aumentará el “número de casos por mortalidad por exposición al $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”, y en retorno sería la disminución de la “población” (figura 7).

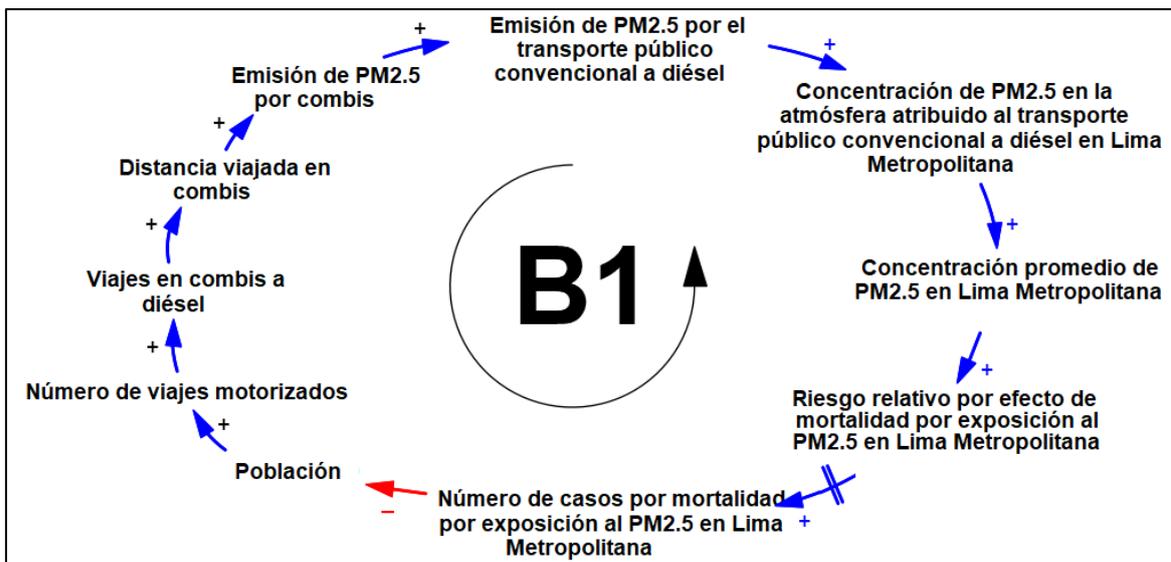


Figura 7: Bucle de retroalimentación de balance B1. El signo de menos (-) señala una relación inversamente proporcional. El signo de más (+) señala una relación directamente proporcional. B = bucle de retroalimentación de balance. El signo de doble barra (//) representa un desfase temporal o lapso entre el efecto y la causa.

El bucle de retroalimentación de balance “B2” hallado fue entre el aumento del “PBI local” el cual aumentará el “costo económico ambiental por exposición de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana”, y en retorno ocasionará la disminución del “PBI local”.

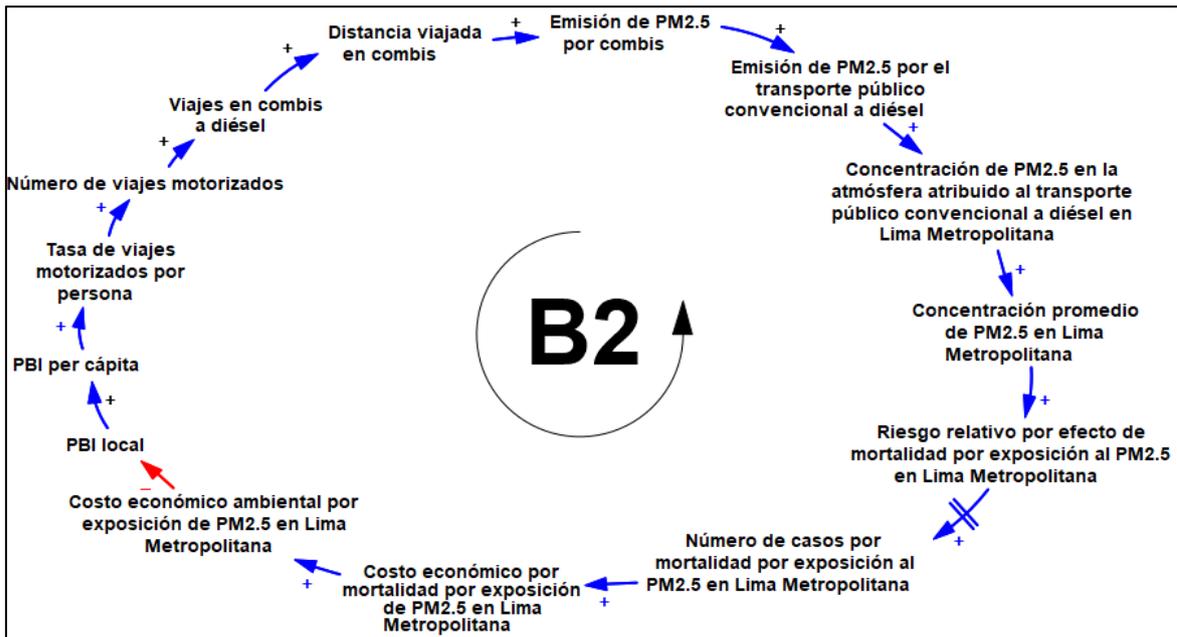


Figura 8: Bucle de retroalimentación de balance B2. El signo de menos (-) señala una relación inversamente proporcional. El signo de más (+) señala una relación directamente proporcional. B = bucle de retroalimentación de balance. R = bucle de retroalimentación de refuerzo. El signo de doble barra (//) representa un desfase temporal o lapso entre el efecto y la causa.

Ahondando más en los bucles de retroalimentación B1 y B2. La tabla 5 describe la estructura de los ciclos o bucles de retroalimentación y su fuente de evidencia.

Tabla 5: Descripción de la estructura de los bucles de retroalimentación y su fuente de evidencia

Descripción	Fuentes de evidencia
B1. El incremento de la población genera un mayor número de viajes realizados motorizados, los cuales, a su vez, aumentan los viajes en los vehículos del transporte público convencional a diésel. De esta manera, hay una mayor distancia recorrida en vehículos, y, por ende, mayor emisión de PM _{2.5} . Un aumento en las emisiones de PM _{2.5} ocasionan un mayor aporte a la concentración ambiental de PM _{2.5} en la región. Como consecuencia, aumenta el valor del riesgo relativo por efecto de mortalidad y, este a su vez, aumenta el número de muertes por contaminación ambiental. Y, en retorno, este reducirá la población.	Chen et al., 2006; Jia et al., 2019; Shahgholian y Hajihosseini, 2009; Wang et al., 2008; Harrison et al., 2021; Rivera (2012); Sayyadi y Awasthi, 2016; Yang et al., 2014.

Continuación ...

B2. El incremento del PBI local genera un mayor PBI per cápita (con una mayor posibilidad de gasto en servicios de transporte), y, por ende, una mayor tasa de viajes motorizados que realiza cada persona. Asimismo, aumenta la cantidad de viajes realizados, los cuales, aumentan los viajes en los vehículos del transporte público convencional a diésel.

De esta manera, hay una mayor distancia recorrida, y, por lo tanto, una mayor emisión de PM_{2.5}. Un aumento en las emisiones de PM_{2.5} ocasionan un mayor aporte a la concentración ambiental de PM_{2.5} en la región. Como consecuencia, aumenta el valor del riesgo relativo por efecto de mortalidad (el cual también puede seguir la ruta de morbilidad) y, este a su vez, aumenta el número de muertes (o de casos de morbilidad) por contaminación ambiental. Estos efectos adversos ocasionan costos económicos asociados, los cuales son agrupados en costo económico ambiental por exposición a PM_{2.5}. Y, en retorno, este reducirá el PBI local.

Jia et al., 2019; Wang et al., 2008; Harrison et al., 2021; Sayyadi y Awasthi, 2016; Yang et al., 2014.

Nota: PBI = Producto Bruto Interno.

Es resaltante mencionar que, en la revisión de literatura autores como Xue et al. (2020) establecen la relación de retroalimentación de refuerzo (1).

PBI local →(+) inversión en transporte público →(+) viajes en transporte público →(-) viajes en vehículos particulares →(+) contaminantes →(-) PBI local (i)

Es decir que, este esquema plantea que a un mayor crecimiento económico regional aumentarán las políticas orientadas a fortalecer el transporte público con la finalidad de reducir el transporte con vehículos particulares. El cual, aumentaría la recaudación regional y, por ende, generaría un mayor crecimiento económico regional, formando un ciclo que refuerza el efecto en el largo plazo.

No obstante, el crecimiento económico regional, también aumenta el PBI per cápita lo que aumenta el poder adquisitivo para comprar vehículos particulares, y como resultado, aumentan los viajes en autos particulares, dicho esquema también es abordado en el mismo estudio en el esquema cuantitativo. Por lo que, existe la posibilidad de ocurrencia de estos 2 escenarios al mismo tiempo. Sin embargo, al tratar temas de intervención de políticas, medidas, e inversión pública, así como otras modalidades de viaje que no sea el transporte público convencional a diésel, escapa de los límites del modelo en estudio, y, por consiguiente, no son abordados.

Por otra parte, autores como Wang et al. (2008) y Jia et al. (2009) señalan que el crecimiento del PBI aumentaría la tasa de inmigración y, como consecuencia, mayor población. Incluso Harrison et al. (2021) destacan que existiría, además, la relación de a más población, más PBI local, formando un ciclo retroalimentación de refuerzo, explicado por el aumento de la producción de actividades económicas fortaleciendo así, el aumento del PBI local en retorno. No obstante, al involucrar variables fuera de los límites (excluidos) del modelo, estos han sido no considerados.

El siguiente paso fue, partiendo del modelo conceptual, nuevamente se clasificaron las variables en variables de acumulación, flujos y auxiliares, con el fin de, servir de información de entrada para formular el SFD. Para tal finalidad, se utilizó el concepto de la variable de acumulación, flujos y auxiliares. Como resultado de la nueva clasificación, las variables de acumulación, fueron “PBI local” y “población”; flujos fueron “ingresos”, “pérdidas”, incremento poblacional” y “defunciones por contaminación ambiental”; y auxiliares, siendo el resto de variables.

Luego, se procedió a eliminar o corregir cada inconsistencia mediante la eliminación o adición de variables y/o enlaces. Como consecuencia, se obtuvo el CLD estructurado. Esta versión de CLD estructurado tiene la característica de presentar coherencia sintáctica en estructura, para que, en quinto lugar, se reformuló (esquematisó) nuevamente en el programa VensimPLE, para obtener el diagrama en diseño de SFD.

En el paso de eliminación o corrección de inconsistencia, se amplió más la cantidad de variables a usar para especificar y/o aclarar relaciones que quedaron establecidos en sentido amplio en el diagrama conceptual. Por ejemplo, se adicionó la variable “deflactor” y “tasa de cambio de dólares 2022” como variables auxiliares que se interrelacionan con el “costo económico ambiental”, el cual no estaba contemplado en el diagrama conceptual. No obstante, permite comprender mejor esta relación, debido a que los precios son manejados homogéneamente en el modelo en soles (S/.) a precios constantes de 2007, pero, para presentar la información se requiere una medida monetaria más actualizada para que pueda ser contratada, como son los dólares.

Como paso siguiente, se esquematizó el diagrama cuantitativo o SFD o diagrama de Forrester, el cual es representado como subsistemas en las figuras 9, 10, 11, 12 y 13.

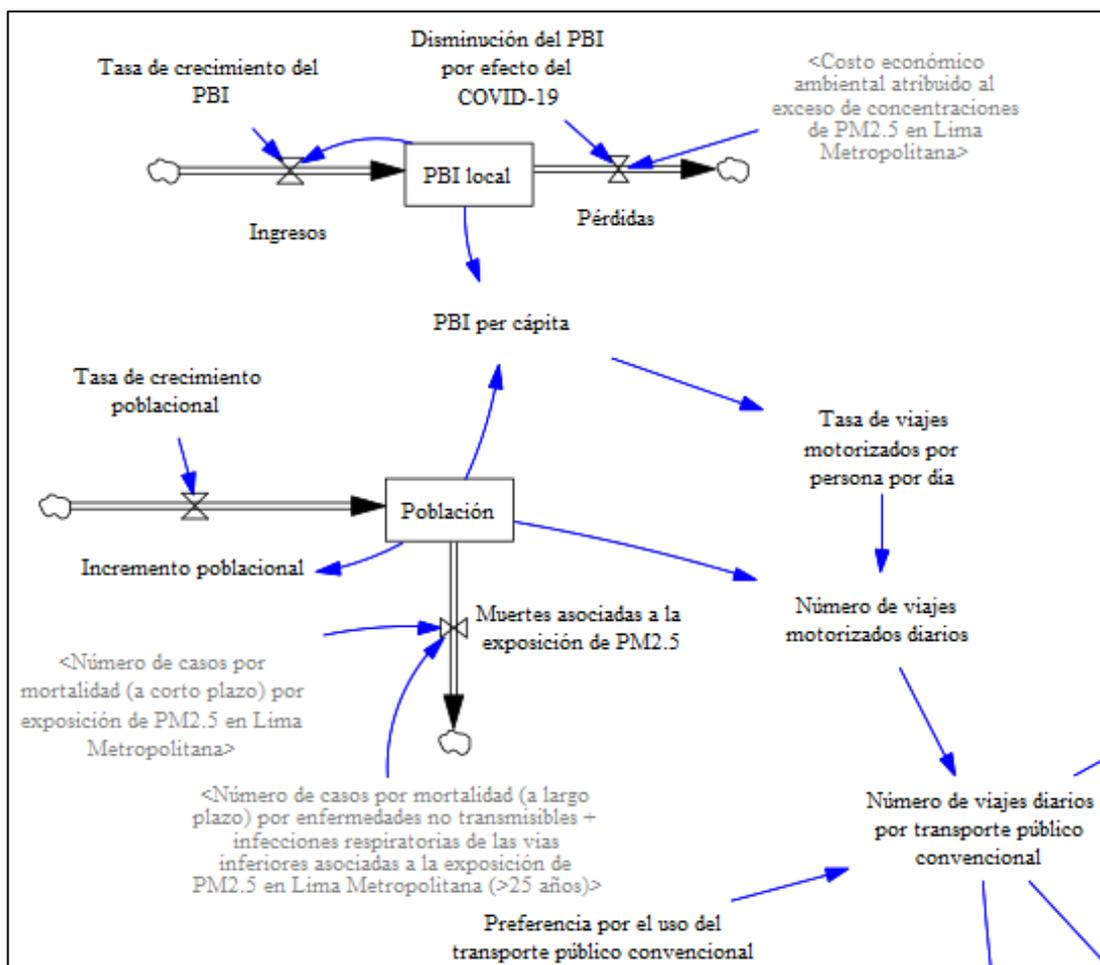


Figura 9: Diagrama cuantitativo – dinámica del transporte público convencional a diésel. < > = Variable sombra, es decir, representa a una variable que ya fue presentada previamente en el modelo.

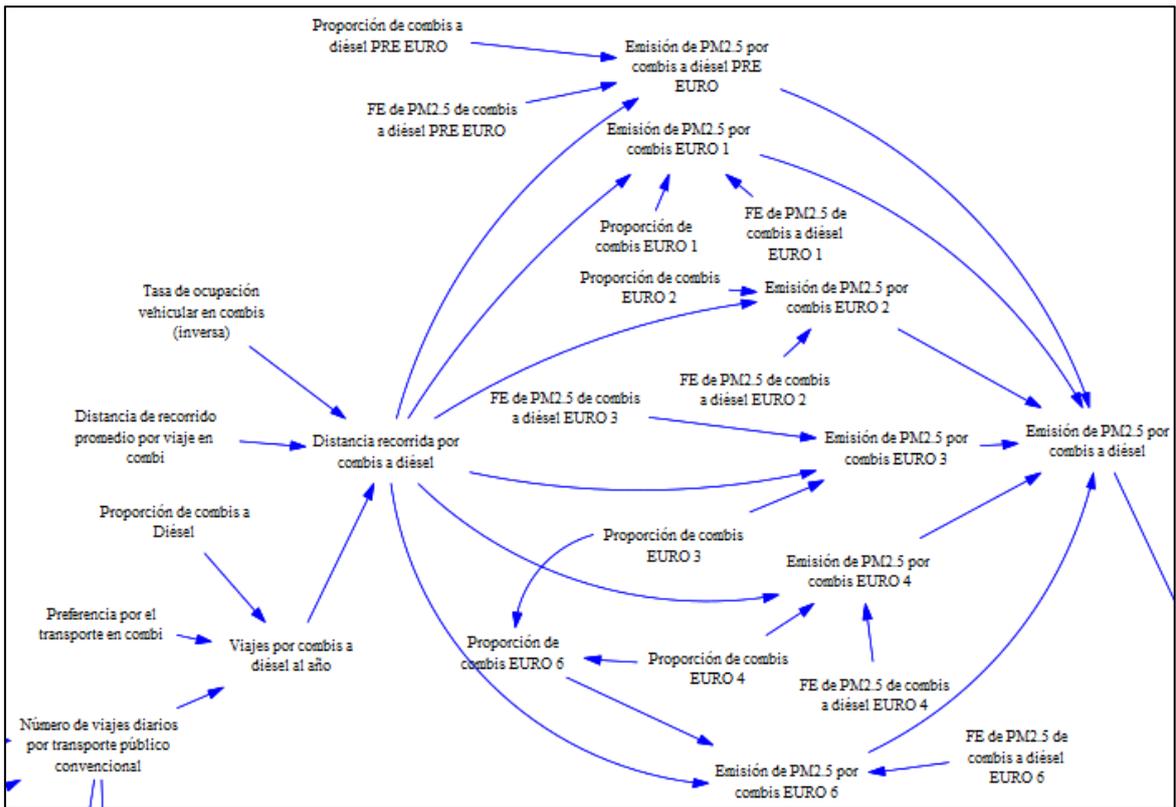


Figura 10: Diagrama cuantitativo – dinámica de viajes y emisión de $PM_{2.5}$ del transporte público convencional a diésel

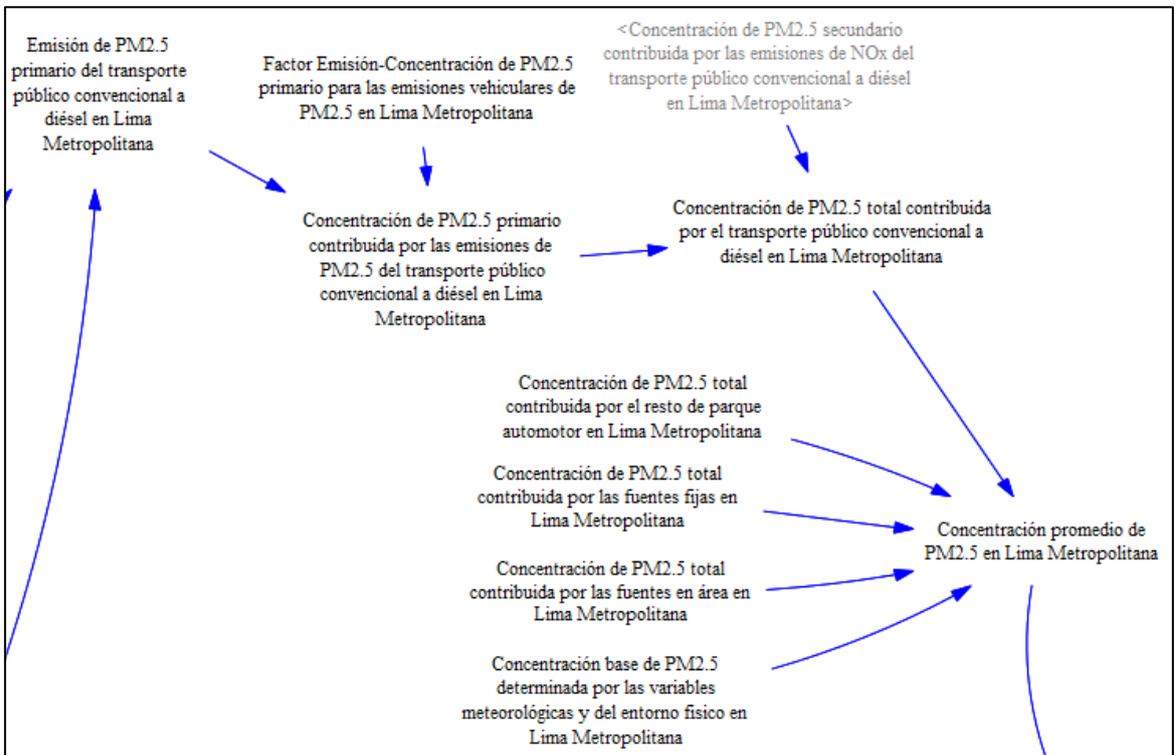


Figura 11: Dinámica cuantitativo – dinámica de emisiones y concentración de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana. < > = Variable sombreada, es decir, representa a una variable que ya fue presentada previamente en el modelo.

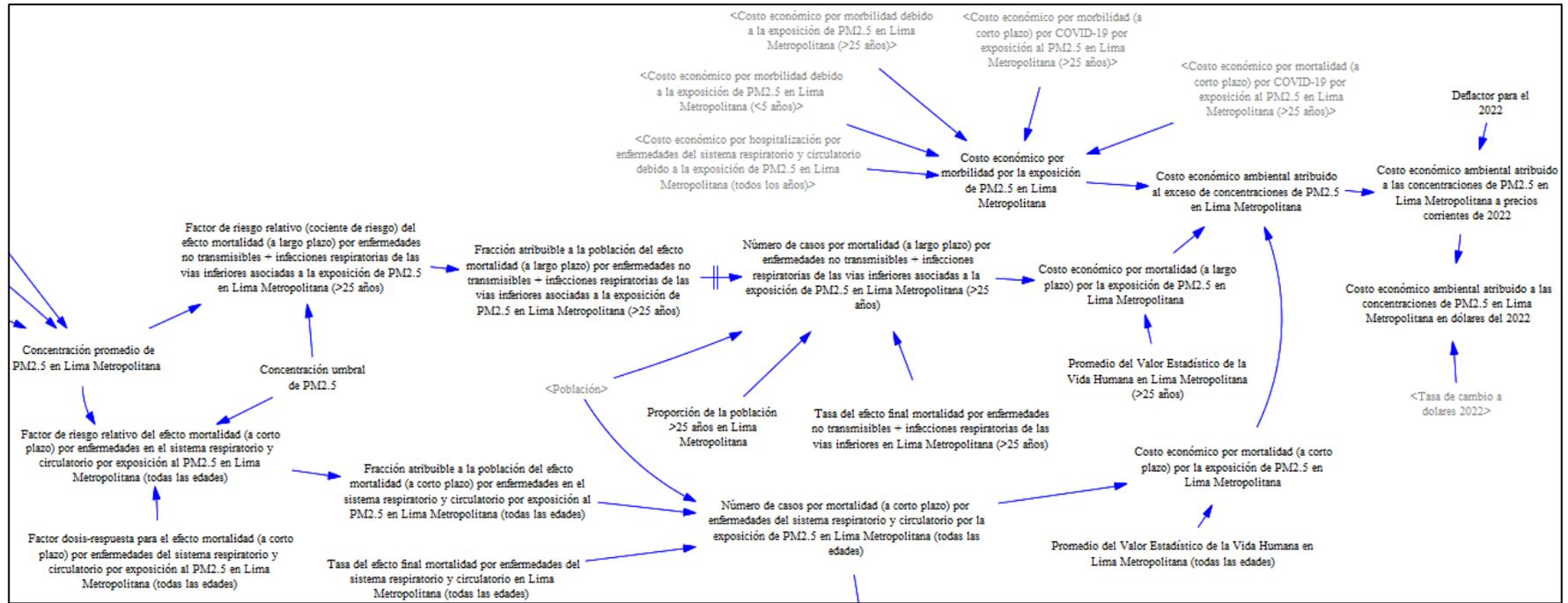


Figura 12: Diagrama cuantitativo - el impacto de salud y el costo económico ambiental asociado por la exposición a PM_{2.5} en Lima Metropolitana. < > = Variable sombra, es decir, representa a una variable que ya fue presentada previamente en el modelo.

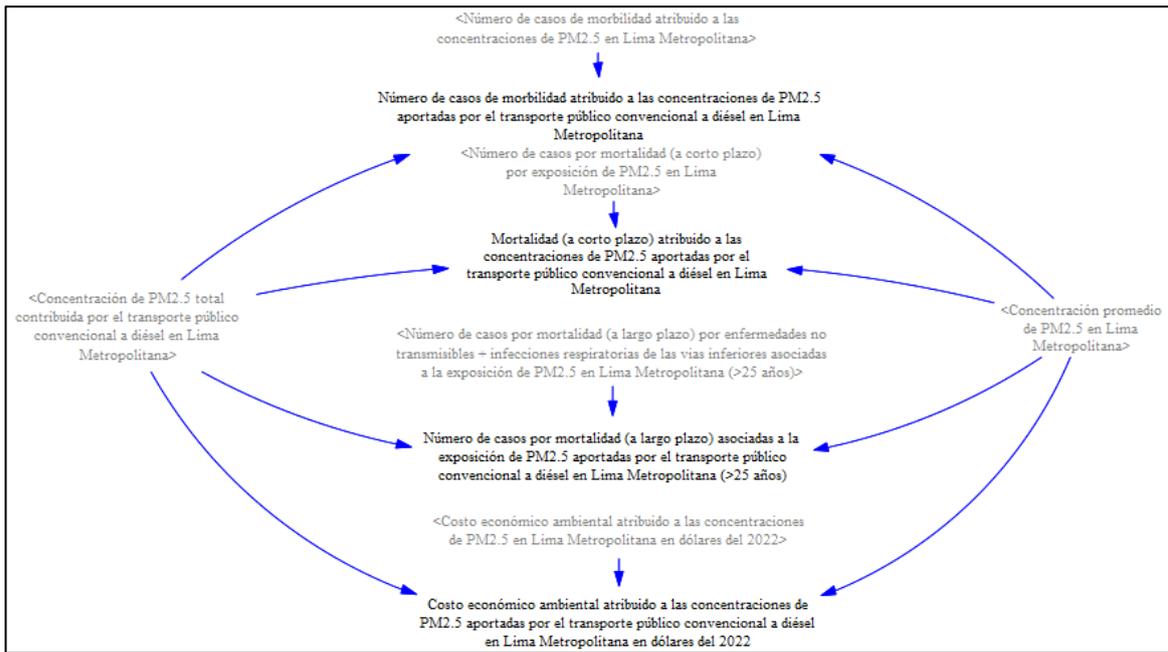


Figura 13: Diagrama cuantitativo – impactos en la salud y costo ambiental asociado de la contribución de concentración $PM_{2.5}$ del transporte público convencional a diésel. < > = Variable sombra, es decir, representa a una variable que ya fue presentada previamente en el modelo.

1.3 Formulación de un modelo de simulación

En este paso se seleccionaron los parámetros y tasas que intervendrán en el modelo, los cuales se acoplaron al modelo, mediante ecuaciones matemáticas, con la finalidad de cuantificar el SFD (la figura 14 resume el proceso).

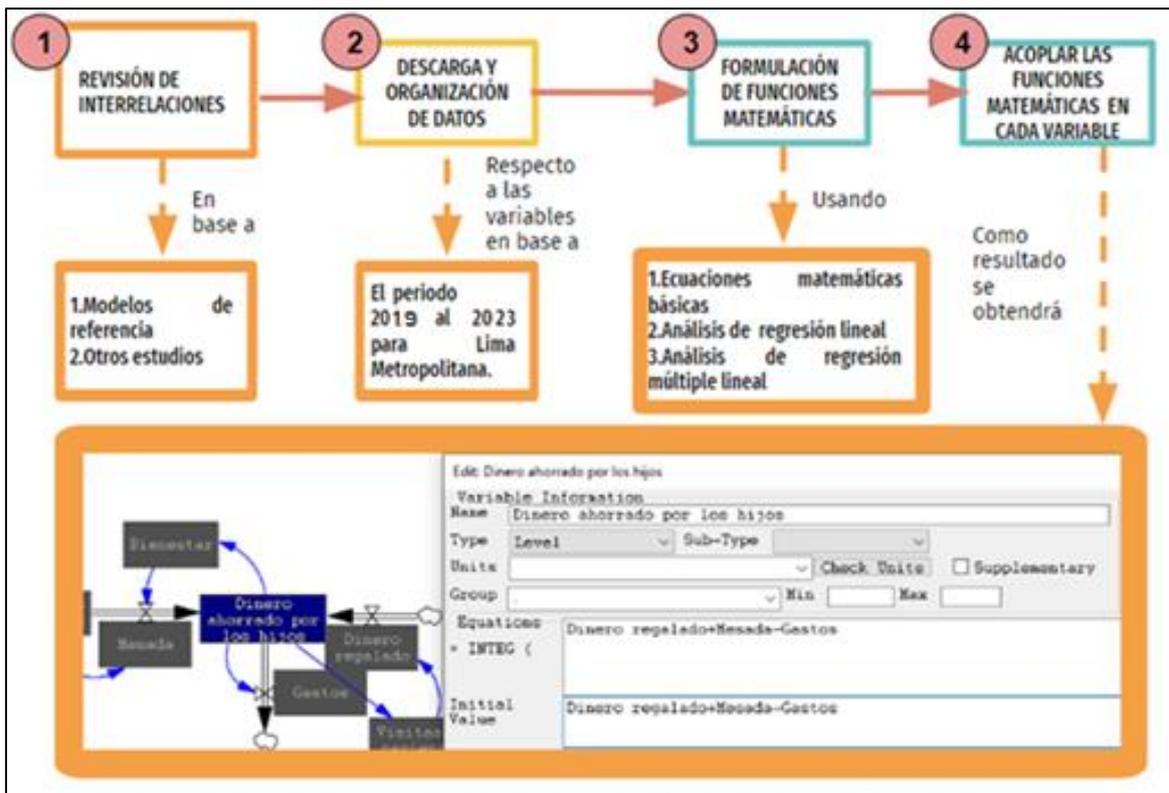


Figura 14: Proceso de formulación de un modelo de simulación

Para tal fin, en primer lugar, se revisaron las interrelaciones o funciones que se establecieron en los modelos de referencia revisados, así también como en otros estudios que hayan analizado las relaciones (sin aplicar necesariamente los modelos dinámicos). En segundo lugar, se descargó y organizó todos los datos relevantes en el periodo 2019–2023 para Lima Metropolitana. En tercer lugar, mediante Microsoft Excel se relacionaron determinadas variables mediante el uso de ecuaciones matemáticas básicas, análisis de regresión lineal y análisis de regresión múltiple lineal; para la obtención de determinados parámetros o constantes, además de, establecer las funciones que vincularon las variables dependientes en función a las variables independientes. En cuarto lugar, las ecuaciones o constantes fueron acopladas en el modelo esquematizado del SFD en el programa VensimPLE, en otras palabras, fueron insertadas en cada variable.

Cabe precisar que en este paso ya se cuantificaron todos los valores, por lo que, en este paso se llegó a determinar el costo económico anual según los casos de morbilidad y mortalidad asociada del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana durante el periodo 2019 – 2023. El resultado de este proceso fue establecer las ecuaciones, los valores

iniciales y las tasas necesarias para que el modelo pueda arrojar valores estimados. Dichos inputs se establecieron en base a la revisión bibliográfica. El listado de estos datos es descrito en la tabla 6.

Tabla 6: Ecuaciones implementadas según cada variable

Tipo (Valores iniciales)	Denominación	Unidades	Ecuación
Stock (1.86e+11)	PBI local	soles	INTEGRAL(Ingresos-Pérdidas)
Auxiliar	Tasa de crecimiento del PBI	fraction/ Year	IF THEN ELSE(Time<2019,0.038,IF THEN ELSE(Time=2019 , 0 , IF THEN ELSE(Time=2020 , 0.2 ,IF THEN ELSE(Time<2024, 0.044 , 0.045))))
Flujo	Ingresos	soles/ Year	PBI local*Tasa de crecimiento del PBI
Auxiliar	Disminución del PBI por efecto del COVID-19	soles/ Year	IF THEN ELSE(Time=2019 , 2.74283e+10 , 0)
Flujo	Pérdidas	soles/ Year	Disminución del PBI por efecto del COVID-19+Costo económico ambiental atribuido al exceso de concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana
Auxiliar	Tasa de crecimiento poblacional	fraction/ Year	IF THEN ELSE(Time<2017 , 0.012 ,IF THEN ELSE(Time<2019 , 0.021 ,IF THEN ELSE(Time<2029, 0.02 , 0.007)))
Stock (9.1e+06)	Población (Lima Metropolitana)	personas	INTEGRAL(Incremento poblacional-"Muertes asociadas a la exposición de PM _{2.5} ")
Flujo	Incremento poblacional	personas/ Year	Tasa de crecimiento poblacional*Población
Flujo	Muertes asociadas a la exposición de PM _{2.5}	personas/ Year	"Número de casos por mortalidad (a largo plazo) por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores asociadas a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana (>25 años)" +"Número de casos por mortalidad (a corto plazo) por exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana"
Auxiliar	PBI per cápita	soles/ persona	PBI local/Población

Continuación ...

Auxiliar	Tasa de viajes motorizados por persona por día	viajes/ (día*personas)	IF THEN ELSE(Time<2030,1.6e-06*(PBI per cápita/12)^2-0.002*(PBI per cápita/12) ,(1.6e-06*(PBI per cápita/12)^2-0.002*(PBI per cápita/12))/(1+((Time-2030)^1.12)/17))
Auxiliar	Número de viajes motorizados diarios	viajes/ día	Población*Tasa de viajes motorizados por persona por día
Auxiliar	Preferencia por el uso del transporte público convencional	fraction	0.5
Auxiliar	Número de viajes por transporte público convencional	viajes/ día	Número de viajes motorizados*Preferencia por el uso del transporte público convencional
Auxiliar	Preferencia por el transporte en combi	fraction	0.24
Auxiliar	Proporción de combis a diésel	fraction	0.93
Auxiliar	Viajes por combis a diésel al año	viajes/ Year	Proporción de combis a Diésel*Número de viajes diarios por transporte público convencional*Preferencia por el transporte en combi*365
Auxiliar	Distancia de recorrido promedio por viaje en combi	km/ viaje	7.1
Auxiliar	Tasa de ocupación vehicular en combis (inversa)	fraction	1/15
Auxiliar	Distancia recorrida por combis a diésel	km/ Year	Distancia de recorrido promedio por viaje en combi*Viajes por combis a diésel al año*"Tasa de ocupación vehicular en combis (inversa)"
Auxiliar	Proporción de combis a diésel PRE EURO	fraction	IF THEN ELSE((101.413-0.0500945*Time)<0 , 0 , IF THEN ELSE((101.413-0.0500945*Time)>1 , 1 , 101.413-0.0500945*Time))
Auxiliar	FE de PM _{2.5} de combis a diésel PRE EURO	g/km	0.324
Auxiliar	Emisión de PM _{2.5} por combis PRE EURO	t/Year	Distancia recorrida por combis a diésel*FE de PM _{2.5} de combis a diésel PRE EURO*Proporción de combis a diésel PRE EURO/1e+06

Continuación ...

Auxiliar	Emisión de PM _{2.5} por combis a diésel	t/Year	("Emisión de PM _{2.5} por combis a diésel PRE EURO"+"Emisión de PM _{2.5} por combis EURO 1"+"Emisión de PM _{2.5} por combis EURO 2"+"Emisión de PM _{2.5} por combis EURO 3"+"Emisión de PM _{2.5} por combis EURO 4"+"Emisión de PM _{2.5} por combis EURO 6")
Auxiliar	Emisión de PM _{2.5} primario del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana	t/Year	INTEGER(("Emisión de PM _{2.5} por combis a diésel"+"Emisión de PM _{2.5} por microbus"+"Emisión de PM _{2.5} por omnibus")*100)/100
Auxiliar	Factor Emisión-Concentración de PM _{2.5} primario para las emisiones vehiculares de PM _{2.5} en Lima Metropolitana	(t/Year)/ (µg/m ³)	1148.11
Auxiliar	Concentración de PM _{2.5} primario contribuida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana	µg/m ³	INTEGER(("Emisión de PM _{2.5} primario del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana"/"Factor Emisión-Concentración de PM _{2.5} primario para las emisiones vehiculares de PM _{2.5} en Lima Metropolitana")*100)/100
Auxiliar	Concentración de PM _{2.5} total contribuida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana	µg/m ³	INTEGER(("Concentración de PM _{2.5} primario contribuida por las emisiones de PM _{2.5} del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana "+"Concentración de PM _{2.5} secundario contribuida por las emisiones de NOx del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana")*100)/100
Auxiliar	Concentración base de PM _{2.5} determinada por las variables meteorológicas y del entorno físico en Lima Metropolitana	µg/m ³	RANDOM NORMAL(4.5 , 7 , 5.5 , 4.3 , 5.5)
Auxiliar	Concentración de PM _{2.5} total contribuida por el resto de parque automotor en Lima Metropolitana	µg/m ³	IF THEN ELSE(Time=2020, (-605.227+0.31*Time)/2 , IF THEN ELSE(Time>2024 , RANDOM UNIFORM(-606+0.3088*Time , -605+0.3088*Time , -605.227+0.3088*Time) , RANDOM UNIFORM(-606+0.31*Time , -605+0.31*Time , -605.227+0.31*Time)))

Continuación ...

Auxiliar	Concentración de PM _{2.5} total contribuida por las fuentes fijas en Lima Metropolitana	μg/m ³	IF THEN ELSE(Time=2020 , (2.808)/2 , RANDOM UNIFORM(1 , 3 , 1))
Auxiliar	Concentración de PM _{2.5} total contribuida por las fuentes en área en Lima Metropolitana	μg/m ³	RANDOM NORMAL(4.5 , 7 , 5.5 , 4.3 , 5.5)
Auxiliar	Concentración promedio del PM _{2.5} en Lima Metropolitana	μg/m ³	Concentración base de PM _{2.5} determinada por las variables meteorológicas y del entorno físico en Lima Metropolitana"+"Concentración de PM _{2.5} total contribuida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana"+"Concentración de PM _{2.5} total contribuida por el resto de parque automotor en Lima Metropolitana"+"Concentración de PM _{2.5} total contribuida por las fuentes en área en Lima Metropolitana"+"Concentración de PM _{2.5} total contribuida por las fuentes fijas en Lima Metropolitana
Auxiliar	Concentración umbral de PM _{2.5}	μg/m ³	5
Auxiliar	Factor de riesgo relativo (cociente de riesgo) del efecto mortalidad (a largo plazo) por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores asociadas a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana (>25 años)	fraction	EXP(0.143*LN(MAX(0,"Concentración promedio de PM _{2.5} en Lima Metropolitana"- "Concentración umbral de PM _{2.5} ")/1.6+1)/(1+EXP(-(MAX(0,"Concentración promedio de PM _{2.5} en Lima Metropolitana"- "Concentración umbral de PM _{2.5} ")-15.5)/36.8)))
Auxiliar	Fracción atribuible a la población del efecto mortalidad (a largo plazo) por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores asociadas a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana (>25 años)	fraction	1-1/"Factor de riesgo relativo (cociente de riesgo) del efecto mortalidad (a largo plazo) por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores asociadas a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana (>25 años)"

Continuación ...

Auxiliar	Tasa del efecto final mortalidad por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores en Lima Metropolitana (>25 años)	fraction/ Year	0.01/1
Auxiliar	Proporción de la población >25 años en Lima Metropolitana	fraction	0.596/1
Auxiliar	Número de casos por mortalidad (a largo plazo) por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores asociadas a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana (>25 años)	personas/ Year	DELAY FIXED(INTEGER(Población*"Proporción de la población >25 años en Lima Metropolitana"*"Tasa del efecto final mortalidad por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores en Lima Metropolitana (>25 años)"*"Fracción atribuible a la población del efecto mortalidad (a largo plazo) por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores asociadas a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana (>25 años)") , 5 , 0)
Auxiliar	Promedio del Valor Estadístico de la Vida Humana en Lima Metropolitana (>25 años)	soles/ persona	341172
Auxiliar	Costo económico por mortalidad (a largo plazo) por la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana	soles/ Year	"Número de casos por mortalidad (a largo plazo) por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores asociadas a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana (>25 años)"*"Promedio del Valor Estadístico de la Vida Humana en Lima Metropolitana (>25 años)"
Auxiliar	Costo económico ambiental atribuido al exceso de concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana	soles/ Year	"Costo económico por morbilidad por la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana"+"Costo económico por mortalidad (a largo plazo) por la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana"+"Costo económico por mortalidad (a corto plazo) por la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana"
Auxiliar	Deflactor para el 2022	Fraction	1.64/1

Continuación ...

Auxiliar	Costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana a precios corrientes de 2022	soles/ Year	"Costo económico ambiental atribuido al exceso de concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana" *Deflactor para el 2022
Auxiliar	Tasa de cambio a dólares 2022	soles/ dólares	3.835/1
Auxiliar	Costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana en dólares del 2022	dólares/ Year	"Costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana a precios corrientes de 2022"/Tasa de cambio a dólares 2022
Auxiliar	Número de casos de morbilidad atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana	personas/ Year	INTEGER("Concentración de PM _{2.5} total contribuida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana"*"Número de casos de morbilidad atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana" /"Concentración promedio de PM _{2.5} en Lima Metropolitana")
Auxiliar	Mortalidad (a corto plazo) atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana	personas/ Year	INTEGER("Concentración de PM _{2.5} total contribuida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana"*"Número de casos por mortalidad (a corto plazo) por exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana" /"Concentración promedio de PM _{2.5} en Lima Metropolitana")
Auxiliar	Número de casos por mortalidad (a largo plazo) asociadas a la exposición de PM _{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana (>25 años)	personas/ Year	INTEGER("Concentración de PM _{2.5} total contribuida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana"*"Número de casos por mortalidad (a largo plazo) por enfermedades no transmisibles + infecciones respiratorias de las vías inferiores asociadas a la exposición de PM _{2.5} en Lima Metropolitana (>25 años)"/ "Concentración promedio de PM _{2.5} en Lima Metropolitana")
Auxiliar	Costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} aportadas por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en dólares del 2022	dólares/ Year	"Concentración de PM _{2.5} total contribuida por el transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana"*"Costo económico ambiental atribuido a las concentraciones de PM _{2.5} en Lima Metropolitana en dólares del 2022" /"Concentración promedio de PM _{2.5} en Lima Metropolitana"

Nota: PBI= Producto Bruto Interno. INTEGER = Función de redondeo al entero próximo. FE = factor de emisión

1.4. Validación

Con el fin de comprobar la validez del modelo, se sometió a prueba de los siguientes 5 tests (la figura 15 representa el proceso de validación).



Figura 15: Proceso de validación. SD = Sistema Dinámico.

- **Idoneidad de los límites:** Esta prueba comprueba si todas las estructuras relevantes son incorporadas en el modelo para representar el correcto nivel de agregación, y si encaja para representar el sistema propuesto (Heinen, 2021). Esta se llevó a cabo mediante la revisión de literatura y entrevista a expertos (en sistemas dinámicos, investigadores en materia de impactos de la contaminación ambiental y valoración económica, entre otros). En ese sentido, se expresó mediante una tabla, los comentarios de los expertos con el fin de expresar seguridad en el modelo desarrollado, tal y como se realizó en Jilesen (2018). Para este fin, se empleó un formato de entrevista, a un investigador en sistemas dinámicos para el transporte público (experto 1) y una investigadora de los impactos en la salud por exposición de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana (experto 2). La tabla 7 resume los principales comentarios respecto a la comprobación de si el modelo contiene las estructuras relevantes, las relaciones son coherentes, y la lectura es clara.

Tabla 7: Resumen de entrevista a expertos para validar la idoneidad de los límites

N°	Interrogante	Experto 1	Experto 2
1	¿Considera que el cálculo de emisiones mediante viajes es claro, coherente y representativo?	Si es claro y coherente	Sí
2	¿Le agregaría o quitaría alguna(s) variable(s) o interrelación (es)?	Agregaría la introducción de buses eléctricos.	No
3	¿Considera que el cálculo de emisiones a concentraciones es claro, coherente y representativo?	Si es coherente	Sí
4	¿Le agregaría o quitaría alguna(s) variable(s) o interrelación (es)?	No agregaría ninguna variable	Incluiría variables meteorológicas
5	¿Considera que el cálculo de concentraciones a impactos negativos en la salud es claro, coherente y representativo?	Si es coherente y valido, está muy bien utilizar el Delay (como función de desfase temporal)	Sí
6	¿Le agregaría o quitaría alguna(s) variable(s) o interrelación (es)?	No agregaría	Sí
7	¿Considera que el cálculo de la valoración económica de costos asociados a la contaminación ambiental es claro, coherente y representativo?	Es coherente, sugiero agregar una variable de inversión si existen políticas del estado en invertir en tecnologías más limpias	Sí
8	¿Le agregaría o quitaría alguna(s) variable(s) o interrelación (es)?	No agregaría	No
9	¿Considera que el cálculo de los impactos de salud y económicos atribuidos al transporte convencional a diésel es claro, coherente y representativo?	Es claro y coherente	Sí
10	¿Le agregaría o quitaría alguna(s) variable(s) o interrelación (es)?	No agregaría	No

Continuación ...

11	¿Considera que hay una sobreestimación, subestimación o incertidumbre para alguna variable presentada en especial?	No existe sobreestimación y subestimación siempre y cuando exista un sustento estadístico relacionado a las distribuciones que se utilizan en el modelo	No
12	Respecto al bucle de retroalimentación B1 (bucle de balance de la población), ¿lo considera claro, coherente y representativo?	Se considera claro y coherente	Sí
13	Respecto al bucle de retroalimentación B2 (bucle de balance del ámbito económico), ¿lo considera claro, coherente y representativo?	Si se considera claro y coherente	Sí
14	¿Considera que algún bucle más ocurre en la realidad? ¿Entre que variables ocurriría?	-	-
15	Comentario libre	-	Considerar que los años desde el 2020 fue un periodo de pandemia y sería conveniente hacer comparaciones antes y después de la pandemia.

Referente a los comentarios del experto 1, sobre la adición de buses eléctricos. Si bien permite mayor precisión y visualización de los cambios en el modo de transporte al futuro, debido a su poca incursión en el presente y la falta de certeza de su evolución en Lima Metropolitana, se ha considerado no implementarlo en el presente estudio. Del mismo modo, se involucró la política de estado en inversión en tecnologías más limpias establecido por ley de la implementación de tecnología Euro 6 o VI, desde el 2024 según el D.S. N° 029-2021-MINAM.

Referente a los comentarios del experto 2, la inclusión de variables meteorológicas se adoptó en la variable “concentración base de PM_{2.5} determinado por las variables meteorológicas y del entorno físico en Lima Metropolitana”. Además, se realizó el hincapié en evaluar la influencia del efecto de la pandemia y su alteración en las variables en estudio.

- **Reproducción del comportamiento:** Parte de la validación, es comparar el comportamiento simulado del modelo con el comportamiento actual del sistema (Sterman, 2000). Además, esta comparación debe basarse en herramientas estadísticas para corroborar la habilidad de reproducir el comportamiento. Mediante indicadores como la tasa de error y la varianza de error, se determinó si los resultados estimados son estadísticamente similares a los datos reales. Para ello, los valores modelados y los valores históricos fueron obtenidos para el periodo, con el objetivo de compararlos. Para ello se consideró apropiado usar los datos del periodo del 2013 – 2023 (aproximadamente 10 años). Posteriormente, se procedió a calcular la tasa de error y la varianza de error, descritos en la tabla 8. En esa misma línea, cabe recalcar que, Suryani et al. (2021) mencionan que un modelo es válido, si la tasa de error es $\leq 5\%$ y la varianza del error es $\leq 30\%$.

Tabla 8: La tasa de error y la varianza del error

Fórmula	Descripción
$\frac{[\bar{S} - \bar{A}]}{\bar{A}}$	Tasa de error: Es una comparación de la diferencia entre el promedio del modelo y el promedio de los datos reales, sobre el promedio de los datos reales.
$\frac{[Ss - Sa]}{Sa}$	La varianza del error: Es una comparación de la diferencia entre la desviación estándar del modelo y la desviación estándar de los datos reales, sobre la desviación estándar de los datos reales.

Nota: S = Desviación estándar. Adaptado de “Urban mobility modeling to reduce traffic congestion in Surabaya: a system dynamics framework”, por Suryani et al., 2021, *Journal of Modelling in Management*, 16(1), p. 16.

Tomando en consideración las variables para las que se posee información para el periodo 2013 al 2023, se seleccionó la variable población, PBI local, número de viajes motorizados

diarios, número de viajes diarios por transporte público convencional y concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana. De los cuales, la población, se maneja una comparación entre los valores estimados con la tasa de crecimiento promedio para los valores entre el censo del 2007 al 2017, para luego seguir con las estimaciones publicadas del INEI y la proyección del CEPLAN (2020) para el 2025. Para el PBI local, se compararon con las recopiladas en el INEI del 2013 hasta el 2022. Para el número de viajes motorizados diarios, número de viajes diarios por transporte público convencional, se comparó con los valores reportados por Fundación Transitemos y la ATU. Por último, la concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana se comparó con los valores medidos por los valores reportados por la Red de Vigilancia Sanitaria de la Calidad del Aire de Lima y Callao de la Dirección General de Salud Ambiental [DIGESAS] – MINSA, para el 2013; de los datos del SENAMHI, para los datos del 2014 al 2019; y los brindados por MINAM, para el periodo 2020 al 2023. La tabla 9 resume las tasas de error y varianzas de error para la validación de la reproducción del comportamiento para las variables antes descritas.

Tabla 9: Tasa de error y varianza de error para la validación de la reproducción del comportamiento

Variable	Periodo en comparación	Tasa de error	Varianza de error
Población	2013-2023 y 2025	3.59%	29.73%
PBI local	2013-2022	0.60%	0.62%
Número de viajes motorizados diarios	2018-2020	1.33%	18.72%
Número de viajes diarios por transporte público convencional	2018-2020	2.64%	24.24%
Concentración promedio de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana	2013-2023	0.26%	11.01%

Nota: PBI = Producto Bruto Interno

Como se puede observar, las tasas de error son menores a 5% y las varianzas de error son menores al 30%, por lo que, el modelo demuestra que simula el comportamiento actual y real del sistema, validando sus estimaciones.

- **Consistencia dimensional:** El test de consistencia dimensional, verifica el balance de las dimensiones de las variables en ambos lados de una ecuación (Amiri et al., 2020). El balance de las dimensiones de las variables será revisado por el comando “Units checks” incorporado en el programa VensimPLE, el cual emite determinados reportes para corroborar los resultados, tal y como se realizó en Sopha y Ma´Mun (2020).

Mediante el uso de la función “Units Check” del programa VensimPLE, se verificó el balance de las ecuaciones escritas, si bien no se obtuvo un reporte con 0 errores, pero los que permanecieron solo obedecieron a las diferencias de unidades en las variables que se calcularon en base a regresiones lineales y múltiples que se necesitaron para el cálculo de tasa de viajes, proporciones de tecnología vehicular, concentración de PM_{2.5} total contribuida por el resto de parque automotor en Lima Metropolitana y los factores de riesgo relativo.

- **Condiciones extremas:** El modelo debe ser probado bajo condiciones extremas, es decir, condiciones que no podrían ser vistas antes en el mundo real, como el supuesto de, que pasaría en el modelo de ventas de carros si se incrementa el precio de los carros por un factor de un billón. A pesar de que, estas condiciones nunca se vieron, se tiene la certeza de cuál será el comportamiento del sistema, la demanda de los carros de la firma debe de caer a cero (Sterman, 2000). Por lo tanto, el test de condiciones extremas consiste en verificar que el modelo corra apropiadamente con valores extremos, como el 0 y valores muy por encima a los de la realidad, para ello, ciertos parámetros asumirán estos valores, y se analizará el comportamiento resultado, tal y como se realizó en Heinen (2021).

Tomando en consideración las variables exógenas o tasas de distancia de viaje promedio y la concentración umbral de PM_{2.5}. Estos se sometieron a valores mínimos de 0 en ambos casos, y de 100 km para la distancia de viaje promedio, y de 100 µg/m³ para la concentración umbral de PM_{2.5}. Por ejemplo, ante valores de 0 para la distancia de viaje promedio corresponden a nulas emisiones, mientras que a valores de 100 km para la distancia de viaje promedio aumentarían significativamente el nivel de emisiones; por otra parte, ante valores de

0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el umbral de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en el ambiente, significaría que los impactos en la salud se agraven y por ende mayor costo económico ambiental, mientras que, ante valores de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ corresponden a no tener ningún impacto en la salud y tener nulo costo económico ambiental. La figura 16 ilustra las variaciones ante condiciones extremas de distancia de viaje promedio de 0 km/viaje y 100 km/viaje y sus efectos en las emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ (t/año). En cambio, la figura 17 ilustra las variaciones ante condiciones extremas de concentración umbral de $\text{PM}_{2.5}$ de 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y sus efectos en el costo económico ambiental (dólares/año).

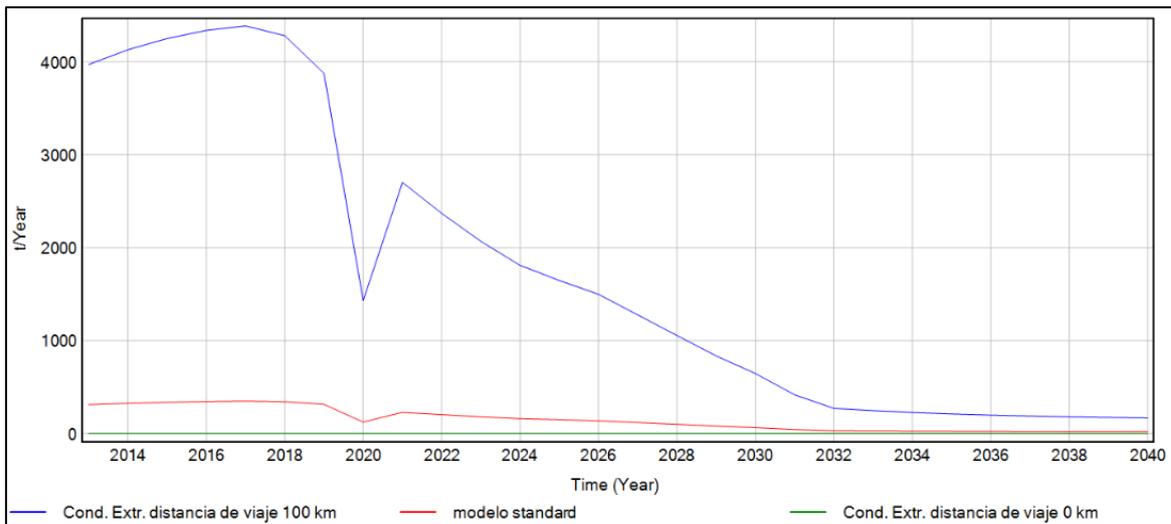


Figura 16: Condiciones extremas para la distancia de viaje promedio y su efecto en las emisiones

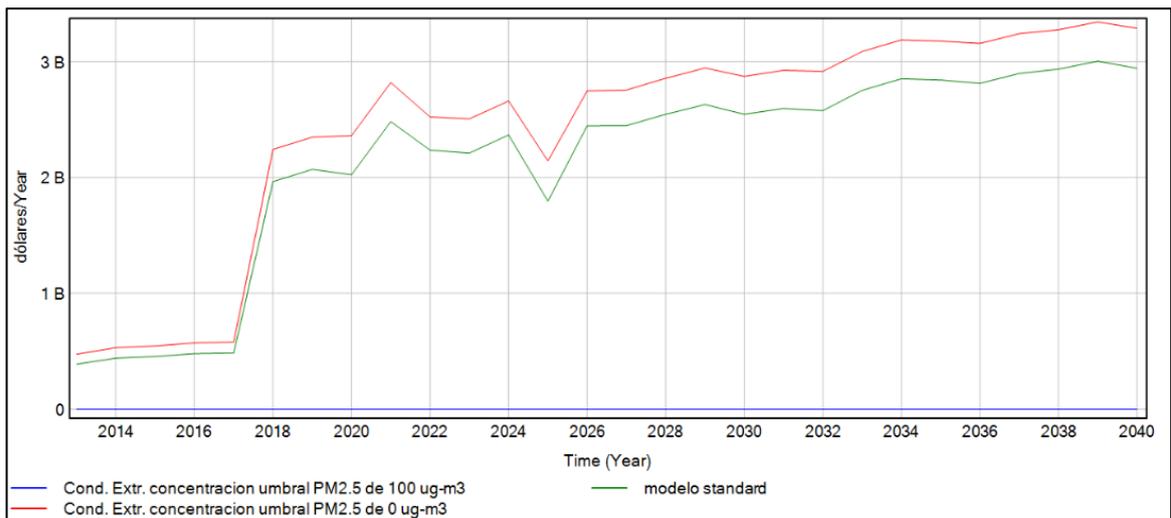


Figura 17: Condiciones extremas para la concentración umbral de $\text{PM}_{2.5}$ y su efecto en el costo económico ambiental

- **Evaluación de la estructura:** El test de evaluación de la estructura consiste en comparar la forma de las ecuaciones del modelo con las relaciones del sistema real, ya que, las interrelaciones usadas en las ecuaciones del modelo deben estar acorde al conocimiento descriptivo del sistema (Amiri et al., 2020). Para ello, los autores sostienen que todas las relaciones deben estar bien razonadas y en base a información disponible, además, la estructura del modelo debe contener los objetivos y limitaciones del sistema real. Para este fin, se analizó un horizonte de tiempo mayor (hasta el 2060) para verificar que el comportamiento del sistema mantenga coherencia y certidumbre en el largo plazo, tal y como se realizó en Heinen (2021).

El modelo fue comparado para un periodo hasta el 2060, con motivo de evaluar el comportamiento si se mantiene en un plazo aún mayor. Para ello, las figuras 18 y 19 muestran las emisiones de PM_{2.5} y NOx (t/año), y el nivel de concentración de PM_{2.5} total (µg/m³); y el costo económico ambiental (dólares/año), número de casos de mortalidad a corto y largo plazo y número de casos de morbilidad (personas/año), respectivamente.

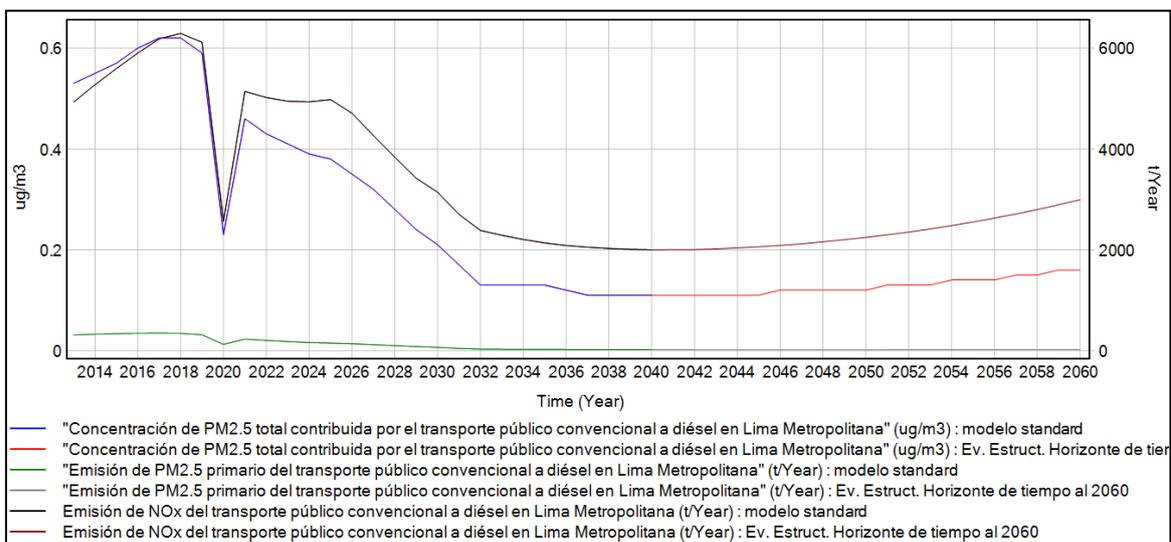


Figura 18: Evaluación de la estructura mediante un horizonte de tiempo al 2060 para las emisiones de PM_{2.5}, NOx y la concentración de PM_{2.5} total

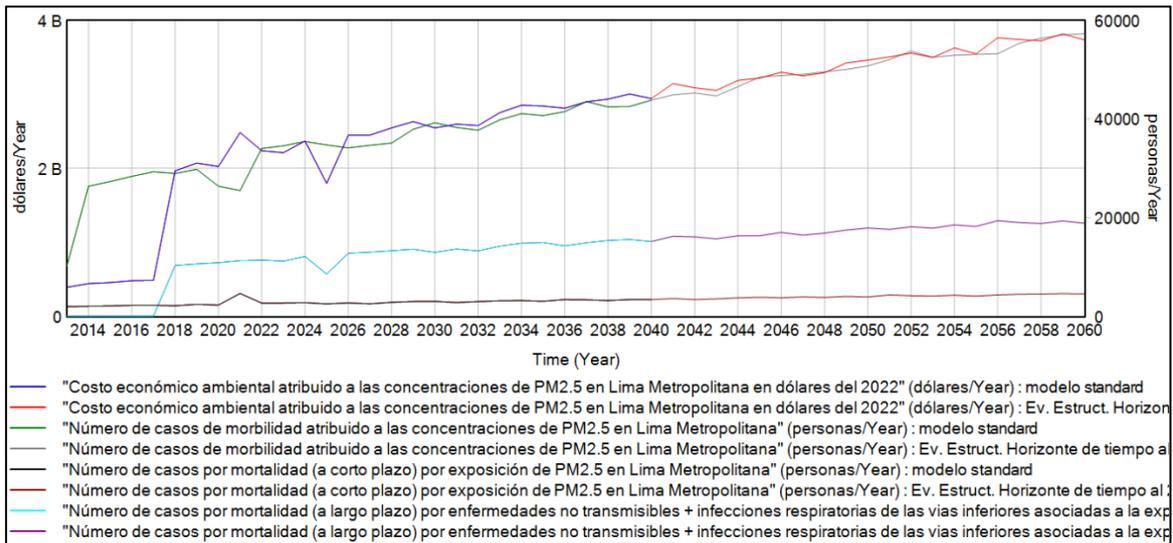


Figura 19: Evaluación de la estructura mediante un horizonte de tiempo al 2060 para el costo económico ambiental, número de casos de mortalidad a corto y largo plazo, y número de casos de morbilidad. B = mil millones.

Es resaltante que, desde el 2041 y el 2048 las emisiones de NOx y PM_{2.5} aumentan, respectivamente. Toda vez que, la cantidad de emisiones del Euro 6/VI vuelven a ser significativas con el aumento de número de viajes. Del mismo modo, estas emisiones aumentan proporcionalmente las concentraciones de PM_{2.5} manteniendo su tendencia. Este patrón recibe la explicación, que, si bien la medida de renovación vehicular tendrá un efecto positivo hasta el largo plazo. No basta con limitarse solo a esta, es totalmente necesario complementar con otras medidas como la electromovilidad o aumentar los proyectos de transporte público masivo como las líneas de metro, entre otras soluciones.

Por otra parte, el costo económico ambiental, número de casos de mortalidad a corto y largo plazo, y número de casos de morbilidad muestran un aumento continuo de crecimiento, impulsado por el aumento de concentraciones de PM_{2.5} total y el aumento de población. Lo cual indica, que los impactos solo serán mayores con el pasar de los años, y es necesario, priorizar la mitigación de los efectos adversos de manera imperativa e inmediata.

Una vez el modelo haya sido validado por los test antes mencionados, se puede indicar que el modelo SD ha sido completamente desarrollado.

Anexo 2: Distribución de la flota vehicular del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana en el periodo 2019-2023

Tabla 1: Distribución de la flota vehicular del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el año 2019

Tipo de vehículo	Pre-Euro	Euro 1/I	Euro 2/II	Euro 3/III	Euro 4/IV	Total
Camioneta rural	1577	15	13	4411	341	6357
Microbús	3158	464	258	3431	160	7471
Ómnibus	387	15	131	4135	575	5243
Camioneta rural (proporción)	0.248	0.002	0.002	0.694	0.054	1
Microbús (proporción)	0.423	0.062	0.035	0.459	0.021	1
Ómnibus (proporción)	0.074	0.003	0.025	0.789	0.110	1

Tabla 2: Distribución de la flota vehicular del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el año 2020

Tipo de vehículo	Pre-Euro	Euro 1/I	Euro 2/II	Euro 3/III	Euro 4/IV	Total
Camioneta rural	1603	16	10	4436	358	6423
Microbús	3122	467	252	3323	162	7326
Ómnibus	566	14	127	4257	649	5613
Camioneta rural (proporción)	0.250	0.002	0.002	0.691	0.056	1
Microbús (proporción)	0.426	0.064	0.034	0.454	0.022	1
Ómnibus (proporción)	0.101	0.002	0.023	0.758	0.116	1

Tabla 3: Distribución de la flota vehicular del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el año 2021

Tipo de vehículo	Pre-Euro	Euro 1/I	Euro 2/II	Euro 3/III	Euro 4/IV	Total
Camioneta rural	1335	11	13	4261	355	5975
Microbús	2827	429	241	3200	158	6855
Ómnibus	595	23	113	4361	681	5773
Camioneta rural (proporción)	0.223	0.002	0.002	0.713	0.059	1
Microbús (proporción)	0.412	0.063	0.035	0.467	0.023	1
Ómnibus (proporción)	0.103	0.004	0.020	0.755	0.118	1

Tabla 4: Distribución de la flota vehicular del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el año 2022

Tipo de vehículo	Pre-Euro	Euro 1/I	Euro 2/II	Euro 3/III	Euro 4/IV	Total
Camioneta rural	912	12	9	4413	510	5856
Microbús	2294	389	193	2678	239	5793
Ómnibus	241	22	130	4886	1020	6299
Camioneta rural (proporción)	0.156	0.002	0.002	0.754	0.087	1
Microbús (proporción)	0.396	0.067	0.033	0.462	0.041	1
Ómnibus (proporción)	0.038	0.003	0.021	0.776	0.162	1

Tabla 5: Distribución de la flota vehicular del transporte público convencional a diésel en Lima Metropolitana para el año 2023

Tipo de vehículo	Pre-Euro	Euro 1/I	Euro 2/II	Euro 3/III	Euro 4/IV	Total
Camioneta rural	870	12	14	4568	580	6044
Microbús	2426	416	217	2506	302	5867
Ómnibus	279	25	174	5388	1206	7072
Camioneta rural (proporción)	0.144	0.002	0.002	0.756	0.096	1
Microbús (proporción)	0.413	0.071	0.037	0.427	0.051	1
Ómnibus (proporción)	0.039	0.004	0.025	0.762	0.171	1

Anexo 3: Factores de emisión del transporte público convencional a diésel

Tabla 1: Factores de emisión de PM_{2.5} (g/km) según tipo y categoría vehicular y sistema de control

Tipo de transporte público convencional	Categoría – Segmento ^a	Sistema de control	Factor de emisión ^b	Factor de emisión corregido ^c
		Pre-Euro o convencional	0.289	0.324
Combi (o camioneta rural)	Vehículo liviano comercial – N1-I	Euro 1	0.073	0.082
		Euro 2	0.060	0.068
		Euro 3	0.036	0.042
		Euro 4	0.035	0.046
		Euro 6	0.0001	0.0002
		Pre-Euro o convencional	0.965	0.926
Microbús (o coaster) y ómnibus (o bus)	Bus - Midibus <= 15 t	Euro I	0.321	0.308
		Euro II	0.153	0.147
		Euro III	0.159	0.156
		Euro IV	0.038	0.038
		Euro VI	0.007	0.007

Nota: ^a La categoría está basado en la guía de EEA (2023). ^b Calculado en función a una pendiente de 0; una carga de 0.5; una velocidad mínima y máxima de 15 km/h y 22 km/h, respectivamente. ^c Calculado tomando en consideración las correcciones por el combustible (entre el documento citado y las características del diésel en el Perú) y el porcentaje de biodiésel.

Tabla 2: Factores de emisión de NOx (g/km) según tipo y categoría vehicular y sistema de control

Tipo de transporte público convencional	Categoría – Segmento ^a	Sistema de control	Factor de emisión ^b	Factor de emisión corregido ^c
Combi (o camioneta rural)	Vehículo liviano comercial – N1-I	Pre-Euro o convencional	0.7	0.645
		Euro 1	0.8	0.801
		Euro 2	0.9	0.881
		Euro 3	0.9	0.843
		Euro 4	0.7	0.710
		Euro 6	0.6	0.606
Microbús (o coaster) y ómnibus (o bus)	Bus - Midibus <= 15 t	Pre-Euro o convencional	10.9	11.377
		Euro I	8.1	8.506
		Euro II	8.9	9.298
		Euro III	8.1	8.478
		Euro IV	4.8	5.077
		Euro VI	1.1	1.205

Nota: ^a La categoría está basado en la guía de EEA (2023). ^b Calculado en función a una pendiente de 0; una carga de 0.5; una velocidad mínima y máxima de 15 km/h y 22 km/h, respectivamente. ^c Calculado tomando en consideración las correcciones por el combustible (entre el documento citado y las características del diésel en el Perú) y el porcentaje de biodiésel.

Anexo 4: Incertidumbres del modelo

Tabla 1: Descripción de las incertidumbres o limitaciones del modelo SD

Limitación potencial/fuente del error	Resultado	Incidencia en las estimaciones del modelo
Distancia recorrida por viaje	Incierto	La distancia recorrida según modo de viaje podría ser mayor o menor, debido a que se utiliza el valor del JICA - MTC (2005), no existiendo valores actualizados.
Factores de emisión	Incierto	Las emisiones podrían ser mayores o menores, debido a que no hay factores de emisiones estimados empíricamente para la flota vehicular del transporte público convencional según tecnología vehicular y según combustible usado en Lima Metropolitana. Se asume que todos los vehículos según tecnología vehicular Euro emiten homogéneamente según los factores de emisión de la guía de EEA (2023). No obstante, reportes del MINAM (2021), correspondiente a las revisiones técnicas vehiculares, señalan que, cerca del 38% de vehículos a diésel superan los LMP para los vehículos en circulación.
Emisiones vehiculares según tecnología vehicular	Subestimado	Las concentraciones atribuidas a las emisiones podrían ser mayores o menores. IEC (2021) señala que se asumen condiciones meteorológicas similares de Valparaíso, Chile, con las de Lima Metropolitana. Sin embargo, para una mayor exactitud con el área de estudio, se debería de establecer un específico Factor emisión-concentración.
Factores emisión-concentración	Incierto	Las concentraciones ambientales de PM _{2.5} en Lima Metropolitana podrían ser mayores o menores. Debido a que la información brindada por las entidades públicas, han tenido varios días que no se tienen datos en la toma de muestras diarias, las cuales son numerosas y no permiten tener la mayor precisión y exactitud al momento de ponderación para calcular el promedio anual.
Concentración de PM _{2.5} en el ambiente	Incierto	

Continuación ...

Efectos en la morbilidad no están cuantificadas al 100% de la realidad	Incierto	<p>Los casos de morbilidad podrían ser mayores o menores. Toda vez que, la evidencia epidemiológica ha demostrado la relación de un mayor número de enfermedades no fatales asociadas a la exposición de PM_{2.5}, tales como el: la disminución de peso del recién nacido, reducción del tiempo gestacional, Alzheimer, entre otros; según el grupo etario y enfermedades preexistentes; o incluso, el agravamiento de los mismos. Los cuales no fueron estimados en su totalidad debido a la falta de información de la tasa de efecto final para Lima Metropolitana. Asimismo, para algunos efectos se ha elegido factores RR referente a estudios extranjeros, por lo que, los valores son referenciales.</p>
Efectos en la mortalidad no están cuantificadas al 100% de la realidad	Incierto	<p>Los casos de mortalidad podrían ser mayores o menores. Toda vez que, se ha tomado en consideración la función de Burnett et al. (2018), los cuales se basan en una estimación de un meta-análisis de RR a nivel global. No obstante, no hay estudios epidemiológicos realizados para cuantificar el impacto a largo plazo en Lima Metropolitana, específicamente.</p>
Promedio del Valor Estadístico de la Vida Humana	Subestimado	<p>IEc (2021) señala que el MINAM para el análisis de la implementación del Euro 6, utilizó un Promedio del Valor Estadístico de la Vida Humana, por lo menos, 10 veces mayor al usado en el presente estudio. Por otra parte, la literatura señala que el método de la disposición a pagar por reducir la probabilidad de muerte podría ser significativamente diferente al Promedio del Valor Estadístico de la Vida.</p>
Costos constantes	Incierto	<p>Los costos actualizados podrían ser mayores o menores. Las tasas de costos o gastos se tomaron de diversas fuentes ya sean aplicados específicamente para Lima Metropolitana o los referidos a la región del Perú, por lo que, puede tener gran variación con la realidad.</p>

Nota: RR = Riesgo Relativo. MINAM = Ministerio del Ambiente

Anexo 5: Diagrama cualitativo

