

# **PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**Escuela de Posgrado**



Análisis de los beneficios de la implementación de un sistema de transporte urbano: Línea 1 del Metro de Lima

Tesis para obtener el grado académico de Maestra en Desarrollo Ambiental que presenta:

**Lisbeth Milagros Morales Lavado**

Asesora:

**Nadia Rosa Gamboa Fuentes**

Lima, 2024

Asam.

## RESUMEN

El transporte urbano permite el desarrollo económico y social en las ciudades, empero el modelo actual provoca externalidades negativas como accidentes de tránsito (daños humano y material), congestión vehicular (reducción de velocidad de circulación) y daño ambiental (aumento de emisiones locales y globales).

Los efectos asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes del aire (CA) han generado preocupación y demandan a la comunidad internacional luchar contra el cambio climático y la contaminación del aire. Por ello, el Perú ha ratificado el Acuerdo de París y se ha comprometido a alcanzar las metas planteadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como ha establecido esfuerzos nacionales en la Política Nacional de Transporte Urbano (PNTU) y Política Nacional del Ambiente (PNA).

Por ello, la presente investigación tiene como objetivo el análisis de los beneficios ambientales debido a la reducción de emisiones de GEI, en términos de su aporte de CO<sub>2</sub>, y de CA, en PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, por la operación de la Línea 1 del Metro de Lima. Asimismo, se presenta este caso de estudio como un insumo que sirva de referencia a los tomadores de decisión para conocer los beneficios de la reducción de emisiones de un sistema de transporte urbano sostenible y su impulso para otras ciudades del país.

La metodología aplicada en la investigación involucra la estimación de la línea base (sin operación de la Línea 1), estimación de las emisiones producto de la operación de la Línea 1 (directas e indirectas), la estimación de la reducción de emisiones (variación de ambos escenarios). De igual modo, se incluye una descripción de la calidad de aire de la ciudad y, finalmente, una evaluación del costo social evitado por la reducción de emisiones de la Línea 1.

Los resultados obtenidos muestran que las emisiones reducidas por la operación de la Línea 1, en el periodo de evaluación acumulado 2015 a 2030, son 576 088 tCO<sub>2</sub>; 316,15 tPM<sub>2,5</sub>; 13 414,80 tNO<sub>x</sub> y 54,89 tSO<sub>2</sub>. De igual

forma, se estima que el costo social evitado acumulado, en el mismo periodo, es de S/.15 432 425 por CO<sub>2</sub>; S/. 76 185 860 por PM<sub>2,5</sub>; S/. 24 959 716 por NO<sub>x</sub> y S/. 499 356 por SO<sub>2</sub>, haciendo un total de S/. 117 077 358.

Finalmente, en esta investigación se explican la importancia y las dificultades en la estimación de emisiones de un sistema de transporte urbano, así como la importancia de la operación de la Línea 1 como un sistema de transporte urbano sostenible, que es pionero en el país y que debería ser promovido en Lima y en otras ciudades importantes a nivel nacional.



## ABSTRACT

Urban transportation allows economic and social development in cities; however, the current model causes negative externalities such as traffic accidents (human and material damage), vehicular congestion (reduced traffic speed), and environmental damage (increased local and global emissions).

The effects associated with emissions of greenhouse gas emissions (GHG) and air pollutants (AP) have generated concern and demand that the international community fight against climate change and air pollution. For this reason, Peru has ratified the Paris Agreement and has committed to achieving the goals set out in the Sustainable Development Goals, as well as establishing national efforts in the National Urban Transportation Policy and National Environmental Policy.

Therefore, the objective of this research is to analyze the environmental benefits due to the reduction of GHG emissions, in terms of their contribution of CO<sub>2</sub>, and AP, in PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>2</sub>, due to the operation of Line 1 of the Lima Metro. Likewise, this case study is presented as an input that serves as a reference for decision-makers to learn about the benefits of reducing emissions from a sustainable urban transportation system and its promotion for other cities in the country.

The methodology applied in the research involves the estimation of the baseline (without operation of Line 1), estimation of emissions resulting from the operation of Line 1 (direct and indirect), estimation of the reduction of emissions (variation of both scenarios). Likewise, a description of the air quality of the city is included and, finally, an evaluation of the social cost avoided by the reduction of emissions of Linea 1.

The results obtained show that the emissions reduced by the operation of Line 1, in the accumulated evaluation period from 2015 to 2030, are 576,088 tCO<sub>2</sub>; 316.15 tPM<sub>2.5</sub>; 13,414.80 tNO<sub>x</sub>, and 54.89 tSO<sub>2</sub>. Similarly, is estimated the accumulated avoided social cost, in the same period, is S/.15,432,425

per CO<sub>2</sub>; S/. 76,185,860 per PM<sub>2,5</sub>; S/. 24,959,716 for NO<sub>x</sub> and S/. 499,356 per SO<sub>2</sub>, making a total of S/. 117,077,358.

Finally, this research explains the importance and difficulties in estimating emissions of an urban transportation system, as well as the importance of the operation of Line 1 as a sustainable urban transportation system, a pioneer in the country, that should be promoted in Lima and other important cities at the national level.





### **Agradecimiento**

A Dios que me permitió superar los desafíos. A mi madre, por su amor y apoyo incondicional. A Renzo, por su ayuda y paciencia. A mis amigos y colegas que colaboraron en el desarrollo de la tesis, por su apoyo y orientación. A mi asesora, la dra. Nadia Gamboa por su apoyo y orientación para desarrollar la presente tesis.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1. TEMA Y PROBLEMÁTICA</b> .....	3
<b>1.1. PROBLEMÁTICA SOCIOAMBIENTAL</b> .....	3
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	5
<b>1.3. OBJETIVOS</b> .....	8
1.3.1. Objetivo general .....	8
1.3.2. Objetivos específicos .....	8
<b>1.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	8
1.4.1. Pregunta principal .....	8
1.4.2. Preguntas específicas .....	8
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	10
<b>2.1. ENFOQUES ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO</b> .....	10
2.1.1. Cambio climático .....	10
2.1.2. Gases de efecto invernadero .....	10
2.1.3. Mitigación del cambio climático .....	11
2.1.4. Contexto normativo internacional sobre cambio climático .....	12
2.1.5. Contexto normativo nacional sobre cambio climático .....	13
<b>2.2. ENFOQUES ASOCIADOS A LA CALIDAD DE AIRE</b> .....	14
2.2.1. Contaminación del aire .....	14
2.2.2. Efectos de la contaminación del aire .....	16
2.2.3. Contexto internacional sobre calidad de aire .....	18
2.2.4. Contexto normativo nacional sobre calidad de aire .....	19
<b>2.3. TRANSPORTE URBANO</b> .....	20
2.3.1. Transporte en ciudades .....	20
2.3.2. Transporte ferroviario .....	22
<b>2.4. EXTERNALIDADES</b> .....	23
2.4.1. Externalidades del transporte .....	23
2.4.2. Externalidades del transporte ferroviario .....	26
<b>2.5. ESTIMACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSPORTES URBANO</b> .....	27
2.5.1. Experiencias de estimación de emisiones en ciudades de Latinoamérica .....	27
2.5.2. Experiencias de estimación de emisiones en Perú .....	28
<b>CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO</b> .....	31
<b>3.1. CONTEXTO DEL CASO DE ESTUDIO</b> .....	31

3.1.1.	Inicios de la Línea 1 .....	31
3.1.2.	Construcción .....	32
3.1.3.	Contrato de concesión .....	33
3.2.	<b>CARACTERÍSTICAS DEL SERVICIO</b> .....	33
3.2.1.	Área del servicio .....	33
3.2.2.	Características técnicas .....	34
3.2.3.	Operación .....	36
3.3.	<b>COMPONENTE AMBIENTAL</b> .....	37
3.3.1.	Instrumento de gestión ambiental .....	37
3.3.2.	Impactos ambientales identificados .....	37
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA</b> .....		39
4.1.	<b>DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	39
4.1.1.	Tipo y diseño de investigación .....	39
4.1.2.	Escala espacial y temporal .....	39
4.1.3.	Recolección de información .....	39
4.1.4.	Metodología de investigación .....	40
4.1.5.	Alcances y limitaciones de la investigación .....	41
4.2.	<b>METODOLOGÍAS APLICADAS</b> .....	42
4.2.1.	Metodología para la estimación de emisiones .....	42
4.2.1.1.	Cálculo de las emisiones de línea base .....	42
4.2.1.2.	Cálculo de las emisiones del proyecto .....	45
4.2.1.3.	Cálculo de las emisiones fugitivas .....	46
4.2.1.4.	Cálculo de reducción de emisiones .....	47
4.2.2.	Metodología para describir la calidad de aire .....	47
4.2.3.	Metodología para estimar los costos sociales .....	47
4.2.4.	Fuente de información .....	48
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....		49
5.1.	<b>RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	49
5.1.1	Emisiones de línea base .....	49
5.1.2	Emisiones de la Línea 1 .....	54
5.1.3	Reducción de emisiones .....	60
5.1.4	Descripción de la calidad de aire .....	61
5.1.5	Evaluación del costo social .....	67
5.1.6	Entrevistas .....	68
5.2.	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	69
5.2.1	Línea 1 como sistema de transporte sostenible .....	69

5.2.1.1.	Enfoque ambiental .....	69
5.2.1.2.	Enfoque social .....	70
5.2.1.3.	Enfoque económico .....	71
5.2.2.	Reducción de emisiones de la Línea 1 .....	72
5.2.3.	Descripción de la calidad de aire .....	74
5.2.4.	Costo social .....	76
5.2.5.	Hallazgos del proceso de estimación de emisiones .....	77
5.2.5.1.	Importancia de la estimación de emisiones .....	77
5.2.5.2.	Dificultades identificadas para la estimación de emisiones .....	80
<b>CONCLUSIONES</b> .....		82
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		85
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		86
<b>ANEXOS</b> .....		96
<b>ANEXO 1: Parámetros utilizados para la estimación de emisiones</b> .....		96
A.	Número de pasajeros .....	96
B.	Parámetros de transporte .....	97
C.	Factor de emisiones de CO <sub>2</sub> , PM <sub>2,5</sub> , NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> .....	99
D.	Factor de emisión por km y categoría vehicular (FE <sub>km,i,y</sub> ) .....	101
E.	Factor de emisión por km pasajero y categoría vehicular (FE <sub>pkm,i,y</sub> ) ..	105
F.	Parámetros para el cálculo del FE de CO <sub>2</sub> del SEIN .....	109
G.	Factor de emisión del SEIN .....	113
<b>ANEXO 2: Parámetros usados para costo social</b> .....		114
A.	Información usada para el costo social .....	114
<b>ANEXO 3: Información sobre calidad de aire</b> .....		115
A.	Ubicación de las estaciones de calidad de aire .....	115
B.	Mapa de ubicación de las estaciones de calidad de aire .....	116
C.	Resultados de monitoreo de calidad de aire .....	117
<b>ANEXO 4: Protocolo de consentimiento informado para entrevistas</b> .....		119

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Porcentaje de atribución de muertes por factor de riesgo global al 2013 ....	17
<b>Figura 2:</b> <i>Costos promedio de externalidad de transporte de pasajeros, año 2008</i> ....	26
<b>Figura 3:</b> Estaciones de la operación de la Línea 1.....	34
<b>Figura 4:</b> <i>Evolución del tráfico de pasajeros entre los años 2012 al 2021 (En miles de pasajeros)</i> .....	36
<b>Figura 5:</b> <i>Esquema de la metodología de la estimación de los beneficios de la Línea 1</i> .....	40
<b>Figura 6:</b> <i>Emisiones de CO<sub>2</sub> de la línea base (BE)</i> .....	52
<b>Figura 7:</b> <i>Emisiones de CA de la línea base (BE)</i> .....	53
<b>Figura 8:</b> <i>Esquema de las emisiones directas e indirectas de la Línea 1</i> .....	54
<b>Figura 9:</b> <i>Emisiones de CO<sub>2</sub> de la Línea 1 (PE)</i> .....	58
<b>Figura 10:</b> <i>Emisiones de CA (PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>) de la Línea 1 (PE)</i> .....	59
<b>Figura 11:</b> <i>Concentraciones promedio anual de PM<sub>2,5</sub> del 2014-2022</i> .....	62
<b>Figura 12:</b> <i>Concentraciones promedio anual de NO<sub>2</sub> del 2014-2022</i> .....	64
<b>Figura 13:</b> <i>Concentraciones 24 horas de SO<sub>2</sub> del 2016-2021</i> .....	66
<b>Figura 14:</b> <i>Costo social asociado a GEI y CA evitado por la Línea 1</i> .....	68
<b>Figura 15:</b> <i>Estaciones de monitoreo de calidad de aire de Lima y Callao</i> .....	116



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Descripción de los principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes.....	15
<b>Tabla 2:</b> Clasificación de los costos del transporte .....	24
<b>Tabla 3:</b> Infraestructura y equipamiento de la Línea 1 .....	35
<b>Tabla 4:</b> Información requerida para la investigación y la fuente de información .....	48
<b>Tabla 5:</b> Emisiones de línea base de GEI y CA de los años 2015-2030 .....	52
<b>Tabla 6:</b> Emisiones directas de CO <sub>2</sub> de los años 2015-2030 .....	56
<b>Tabla 7:</b> Emisiones indirectas de GEI y CA de los años 2015-2030 .....	57
<b>Tabla 8:</b> Emisiones del proyecto de GEI y CA de los años 2015-2030 .....	58
<b>Tabla 9:</b> Reducción de emisiones de GEI y CA de los años 2015-2030 .....	60
<b>Tabla 10:</b> Costo social de la operación de la Línea 1 de los años 2015-2030 .....	67
<b>Tabla 11:</b> Número de pasajeros transportados por la Línea 1 .....	96
<b>Tabla 12:</b> Número de vehículos por categoría vehicular y tipo de combustible .....	97
<b>Tabla 13:</b> Tasa de ocupación promedio por categoría vehicular .....	97
<b>Tabla 14:</b> Consumo específico de combustible por categoría vehicular y tipo de combustible .....	97
<b>Tabla 15:</b> Factor de mejora tecnología por categoría vehicular .....	98
<b>Tabla 16:</b> Años de mejora anual por categoría vehicular .....	98
<b>Tabla 17:</b> Distancia total manejada por sub-categoría de buses .....	98
<b>Tabla 18:</b> Factor de emisión de CO <sub>2</sub> por tipo de combustible y valor calorífico neto ...	99
<b>Tabla 19:</b> Factor de emisión de contaminantes atmosféricos (PM <sub>2,5</sub> , NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> ) por tipo de combustible .....	100
<b>Tabla 20:</b> FE <sub>km,i,y</sub> de CO <sub>2</sub> de los años 2015 al 2030 (g CO <sub>2</sub> /km) .....	101
<b>Tabla 21:</b> FE <sub>km,i,y</sub> de PM <sub>2,5</sub> de los años 2015 al 2030 .....	102
<b>Tabla 22:</b> FE <sub>km,i,y</sub> de NO <sub>x</sub> de los años 2015 al 2030 .....	103
<b>Tabla 23:</b> FE <sub>km,i,y</sub> de SO <sub>2</sub> de los años 2015 al 2030 .....	104
<b>Tabla 24:</b> FE <sub>pkm,i,y</sub> de CO <sub>2</sub> de los años 2015 al 2030 .....	105
<b>Tabla 25:</b> FE <sub>pkm,i,y</sub> de PM <sub>2,5</sub> de los años 2015 al 2030 .....	106
<b>Tabla 26:</b> FE <sub>pkm,i,y</sub> de NO <sub>x</sub> de los años 2015 al 2030 .....	107
<b>Tabla 27:</b> FE <sub>pkm,i,y</sub> de SO <sub>2</sub> de los años 2015 al 2030 .....	108
<b>Tabla 28:</b> Volúmenes de combustibles consumidos para la generación de electricidad del SEIN .....	109
<b>Tabla 29:</b> Valor calorífico neto (VCN) de los combustibles producidos en Perú.....	110
<b>Tabla 30:</b> Factores de emisión de CO <sub>2</sub> .....	110
<b>Tabla 31:</b> Energía eléctrica generada por el SEIN .....	111
<b>Tabla 32:</b> Emisión de CO <sub>2</sub> según tipo de combustible del SEIN .....	112
<b>Tabla 33:</b> FE de CO <sub>2</sub> del SEIN de los años 2015 al 2030 .....	113
<b>Tabla 34:</b> Factores de costo social por tonelada de CA y GEI .....	114
<b>Tabla 35:</b> Tipo de cambio promedio del dólar americano (US\$) .....	114
<b>Tabla 36:</b> Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad .....	115
<b>Tabla 37:</b> Monitoreo de calidad de aire de PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) .....	117
<b>Tabla 38:</b> Monitoreo de calidad de aire de NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) .....	117
<b>Tabla 39:</b> Monitoreo de calidad de aire de SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) .....	118

## ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

AATE	Autoridad Autónoma del Proyecto Especial Sistema Eléctrico de Transporte Rápido Masivo de Lima y Callao
ATU	Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao
BE	Línea base
BRT	Bus de tránsito rápido ( <i>bus rapid transit</i> )
BNE	Balance Nacional de Energía
CA	Contaminantes del aire
CAF	Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
COSAC	Corredor segregado de alta capacidad
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental
DPE	Emisiones directas
ECA	Estándares de calidad ambiental
EIA-sd	Evaluación de Impacto Ambiental semidetallado
ER	Reducción de emisiones
FE	Factor de emisión
GEI	Gases de efecto invernadero
GTM-NDC	Grupo de trabajo multisectorial de las contribuciones determinadas a nivel nacional
IGA	Instrumento de gestión ambiental
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
IPE	Emisiones indirectas
LE	Emisiones fugitivas
Línea 1	Línea 1 del Metro de Lima
LMCC	Ley Marco sobre Cambio Climático
M	Millones
MINAM	Ministerio del Ambiente
MINEM	Ministerio de Energía y Minas
MINSA	Ministerio de Salud
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
NDC	Contribuciones determinadas a nivel nacional ( <i>Nationally determined contributions</i> )
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud

OSITRAN	Organismo de Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte Uso Público
PE	Emisiones del proyecto
PKM	Pasajero-kilómetro
PM <sub>10</sub>	Material particulado menor que 10 $\mu$
PM <sub>2,5</sub>	Material particulado menor que 2,5 $\mu$
PNA	Política Nacional del Ambiente
PNTU	Política Nacional de Transporte Urbano
PT	Programación Tentativa
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
t	Toneladas
UNFCCC	<i>United Nations Framework on Climate Change</i>
VCS	<i>Verified Carbon Standard</i>



## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Lima es la capital del país y concentra la mayoría de todas las actividades de trabajo, educación, salud, cultura y entretenimiento, lo que ha propiciado patrones de movimiento de personas y bienes desde zonas de la periferia hacia las denominadas Lima Centro (zona histórica y de comercios) y Lima Moderna (zona empresarial), propiciando un impacto positivo en la economía y sociedad. No obstante, el transporte urbano en las ciudades también genera externalidades negativas como el congestionamiento vehicular, los accidentes de tránsito, las emisiones, entre otros, agudizado por un parque automotor antiguo y que consume combustibles fósiles.

La triple crisis planetaria fue alertada por Naciones Unidas, que advierte que el cambio climático, la contaminación y la pérdida de biodiversidad son problemas que se interrelacionan y que deben resolverse pronto para tener un futuro viable en el planeta (United Nations, 2022). En ese sentido, las acciones que se desarrollen desde el sector transporte deben buscar la mitigación de parte de la problemática asociada con la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI) y de los contaminantes del aire (CA) procedentes del transporte, por su impacto en el cambio climático y contaminación del aire, respectivamente.

Dado este contexto, el Perú, como miembro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y al ratificar el Acuerdo de París, se ha comprometido a reducir sus emisiones de GEI y, para esto, ha propuesto contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC), siendo una de ellas la implementación de la Línea 1 del Metro de Lima (Línea 1). La implementación de las NDC de mitigación en el sector transporte tendrá un impacto en el cumplimiento de la ambición climática nacional al 2030, así como al lograr las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los objetivos de la Política Nacional de Transporte Urbano (PNTU) y la Política Nacional del Ambiente (PNA).

Por ello, el desarrollo de estimación de emisiones, inventario de emisiones, huellas de carbono, entre otros mecanismos de cuantificación de emisiones,

ha cobrado mayor relevancia en los últimos años, motivado por los compromisos nacionales e internacionales asumidos por el país, y busca ser una herramienta para la planeación de políticas sectoriales con un valor para la salud de la población y el ambiente. Debido a eso, se hace necesario desarrollar estimaciones con mayor detalle y confiabilidad que permitan plantear propuestas más amplias que consideren otros aspectos, como el impacto local y global.

En ese sentido, la presente investigación busca resaltar la importancia de un transporte sostenible, a través de los beneficios ambientales, sociales y económicos generados por la Línea 1 del Metro de Lima (en adelante, Línea 1). Por otro lado, con este análisis también se busca propiciar políticas referidas a la reducción de GEI y CA para mostrar los impactos que tiene un sistema de transporte masivo en términos de emisiones y de qué manera este beneficio tiene un impacto positivo en la sociedad, lo que podría contribuir a la implementación de sistemas de transporte urbano sostenibles a nivel nacional.

Para tales efectos, en el capítulo 1 se expone la problemática identificada, la justificación, los objetivos y las preguntas de investigación, en tanto en el capítulo 2 se presenta el marco teórico que considera los enfoques asociados al cambio climático, calidad de aire, transporte urbano, externalidades y la estimación de emisiones de transporte. En los capítulos 3 y 4 se describen las características de la Línea 1 y la metodología aplicada, respectivamente. Por último, en el capítulo 5 se reportan los resultados obtenidos y se desarrolla la discusión de estos, lo que conduce a las conclusiones de la presente tesis.

## **CAPÍTULO 1. TEMA Y PROBLEMÁTICA**

### **1.1. PROBLEMÁTICA SOCIOAMBIENTAL**

Los crecimientos económico y demográfico, a nivel mundial, son los impulsores más importantes del incremento de las emisiones de GEI por la quema de combustibles fósiles. El aumento de las emisiones antropogénicas anuales de GEI, entre los años 2000 y 2010, proviene directamente de los sectores energía, transporte, industria y vivienda (IPCC, 2014, p. 8). Asimismo, las emisiones antropogénicas son las responsables de la mayor parte del calentamiento global promedio observado en las últimas décadas, generando una variación en el clima de la Tierra (Finn, 2013).

Al reconocerse el cambio climático como una amenaza global, se creó la CMNUCC que tiene por objetivo estabilizar las concentraciones de GEI atmosféricos para no llegar a un nivel de interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático mundial (Ministerio del Ambiente, 2016b, p. 38). Mientras que, con la ratificación del Acuerdo de París, los países miembros asumieron el compromiso de presentar sus NDC ante la CMNUCC. Por ello, con el fin de trabajar las NDC a nivel nacional, se conformó un grupo de trabajo multisectorial (GTM-NDC) que aprobó el informe final con las medidas de mitigación y adaptación priorizadas por los sectores. Entre ellas, nueve NDC de mitigación están a cargo del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) a través de sus diversas dependencias (Ministerio del Ambiente, 2018).

De estas medidas de mitigación, tres están relacionadas al sistema de transporte urbano en Lima, siendo las siguientes programaciones tentativas (PT): PT 01 “Sistemas Integrados de Transporte de Lima”, PT 02 “Metropolitano y su ampliación”, y PT 03 “Línea 1 y Línea 2 del Metro de Lima y Callao”. La PT 03 se encuentra parcialmente ejecutada, dado que la Línea 1 se encuentra en etapa de operación y la Línea 2 en la etapa de construcción.

De manera global, existe una tendencia a vivir en ciudades y, para el caso de Perú, de acuerdo al censo de población del año 2017, 79,3% de la población vive en áreas urbanas del país, además 58% vive en la costa, seguido de 28,1% en la sierra y 13,9% en la selva (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018). Por esa razón, la población peruana se encuentra principalmente en las ciudades, en expansión y, por tanto, se hace necesario implementar un transporte urbano adecuado para cubrir las necesidades de movilización de las personas.

Adicionalmente, la PNTU, ha identificado que el crecimiento de las ciudades ha agravado los problemas del transporte urbano, “con servicios de baja calidad, inexistencia de sistemas de transporte público estructurados, (...), generando graves problemas de congestión, altos niveles de siniestralidad e importantes niveles de emisiones de GEI y otros contaminantes, que se traducen en un elevado costo social” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2019, p. 14). Y, en la PNA al 2030 se identifica como problema público la “disminución de los bienes y servicios que proveen los ecosistemas que afectan el desarrollo de las personas y la sostenibilidad ambiental” (Ministerio del Ambiente, 2021c, p.4).

En el sistema económico de todos los países, el transporte es un componente esencial ya que ayuda al movimiento de personas y bienes. No obstante, a pesar del impacto positivo en la economía existen muchos desafíos asociados en los ámbitos global, regional y local, como el aumento de los accidentes de tránsito, la congestión vehicular, la contaminación del aire y acústica, y las emisiones de CO<sub>2</sub> y contaminantes que afectan el ambiente y la salud de las personas, respectivamente (Santos, Behrendt, & Teytelboym, 2010; Vajjarapu & Verma, 2022).

Es así que la Comisión Multisectorial para la Gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao (2019) realizó una estimación de los contaminantes del aire para Lima y Callao para el año 2016. De todos los tipos de fuentes de contaminación (móvil, puntual y área) existentes, la móvil es la más relevante en todos los parámetros evaluados (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO y CN), ya que aporta más de 50% de las emisiones contaminantes.

Es claro que la combustión de combustibles fósiles por parte del parque automotor en Lima y Callao genera grandes cantidades de emisiones contaminantes.

Adicionalmente, se realizó un estudio de morbilidad en el año 2014 para conocer los efectos del material particulado en Lima Metropolitana, estimándose que 5071 de admisiones hospitalarias serían por afecciones respiratorias y cardiovasculares, en tanto que la mortalidad atribuible a los niveles de material particulado fue de 1657 muertes (Ministerio del Ambiente, 2014).

El mayor volumen de población en Perú vive en zonas urbanas, por lo que es necesario implementar sistemas de transporte masivos y eficientes, no solo para brindar el servicio de movilización de personas, sino para que este servicio público contribuya con mejorar la calidad ambiental y enfrentar el cambio climático.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Con la ratificación del Acuerdo de París, el Perú se comprometió a reducir en 30% sus emisiones de GEI al año 2030 como meta no condicionada, es decir, impulsado por el esfuerzo del gobierno peruano, y una meta condicionada de 10% por el financiamiento internacional (Ministerio del Ambiente, 2021c).

Complementariamente, el país busca alcanzar las metas planteadas en la ODS 3 (reducir las muertes y enfermedades por contaminación del aire), ODS 11 (acceso a un transporte sostenible) y ODS 13 (acciones de mitigación al cambio climático), que buscan mejorar la salud de la población, desarrollar ciudades con menos emisiones y realizar acciones para combatir el cambio climático, respectivamente.

Además, se cuenta con la Ley Marco sobre Cambio Climático (LMCC) para la implementación de las medidas de mitigación y adaptación. En esa línea, el MTC ha identificado NDC de mitigación, con el objetivo de sumar a los

esfuerzos del país para reducir los GEI por la implementación de sistemas de transporte urbano masivo en la ciudad de Lima y Callao.

Sumado a lo mencionado, la PNTU tiene por objetivo al año 2030 “Dotar a las ciudades de sistemas de transporte seguros, confiables, inclusivos, accesible (...), económica y ambientalmente sostenibles”, y espera “una disminución real de, por lo menos, 30%, en el tiempo dedicado diariamente al transporte por los usuarios; disminución del número de muertes a un nivel de 5 por 100,000 habitantes; y 20% de reducción de emisiones de GEI” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2019, p.53). En tanto que la PNA tiene por objetivo “mejorar la calidad de vida de las personas, garantizando la existencia de ecosistemas saludables, viables y funcionales en el largo plazo; y el desarrollo sostenible del país, mediante la prevención, protección y recuperación del ambiente y sus componentes (...)” (Ministerio del Ambiente, 2009, p.10).

Debido a los compromisos internacionales de lucha contra el cambio climático con la implementación de las NDC, así como por la normativa nacional que impulsa la generación de sistemas de transporte urbano sostenibles ambientalmente que busca reducir emisiones, se están identificando e implementando medidas mitigación para el sector transporte urbano en Lima: las Líneas 1 y 2 del Metro, el Sistema Integrado de Transporte de Lima y el Metropolitano.

La NDC de mitigación correspondiente a la Línea 1 es el sistema de transporte urbano que se encuentra en operación, cuenta con 26 estaciones, con un recorrido de Villa El Salvador a San Juan de Lurigancho de 34 kilómetros (OSITRAN, 2022b).

Por otro lado, la adopción de una política climática tiene la capacidad de generar cobeneficios porque va más allá de la protección de los resultados adversos relacionados con el clima, puede promover acciones ambiciosas y transformadoras (Negev et al., 2022, p. 256). Es, pues, fundamental que el sector transporte trabaje en la identificación e implementación de medidas

de mitigación que produzcan impactos ambientales, sociales y económicos positivos.

Ante la urgencia de atención a la crisis climática, los expertos coinciden en que son necesarias investigaciones para demostrar y cuantificar los beneficios potenciales de las diferentes medidas de acción. Mientras que los tomadores de decisión necesitan identificar sinergias en las políticas sectoriales y comprender cómo las políticas relacionadas con el cambio climático pueden ayudar a alcanzar otros objetivos en temas de seguridad energética, económicos, resiliencia, entre otros (Negev et al., 2022, p. 259). Es por ello que, para la implementación de más medidas de mitigación en el transporte urbano, se hace necesario contar con información técnica que muestre los beneficios de su ejecución dado que contribuyen contra el cambio climático, y también reducen otros contaminantes del aire.

A pesar de que es conocido que los sistemas de transporte masivo eficientes aportan en la mejora de la calidad del aire, en la disminución de la contaminación sonora, fomenta la educación vial, entre otros, estas externalidades positivas no han sido analizadas con el fin de impulsar políticas, programas y/o proyectos de mejora de transporte urbano. Por esta razón, es importante identificar de manera cuantitativa los beneficios sociales y ambientales que permitan mejorar los indicadores para implementar este tipo de intervenciones a nivel nacional.

Por todas las razones anteriores, esta investigación propone analizar la Línea 1 porque es uno de los sistemas de transporte masivo en operación que tiene la ciudad y el país, que atiende una demanda de viajes urbanos de manera rápida, inclusiva y segura. Además, es un sistema que usa energía eléctrica como fuente para sus operaciones por lo que las emisiones de GEI y CA para la ciudad son cero y, finalmente, porque es una medida de mitigación que el Estado peruano ha presentado como parte de sus compromisos ante la comunidad internacional.

En ese sentido, la investigación buscará analizar los beneficios ambientales de la operación de la Línea 1, la misma que se encuentra en operación,

evidenciando los beneficios en términos de reducción de GEI y CA y su impacto. De esta manera, el resultado del análisis de este caso de estudio servirá de referencia a los formuladores de políticas, programas y proyectos para conocer los beneficios de la implementación de proyectos de transporte urbano sostenible en otras ciudades del país.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Analizar los beneficios ambientales de la implementación de un sistema de transporte urbano masivo como la Línea 1 del Metro de Lima.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Estimar la reducción de emisiones de GEI y CA por la operación de la Línea 1.
- Describir el estado de la calidad de aire de la ciudad para conocer su relación con la reducción de emisiones de CA debido a la operación de la Línea 1.
- Evaluar el costo social por la reducción de emisiones de la operación de la Línea 1.

### **1.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1. Pregunta principal**

- ¿Cuáles son los beneficios ambientales de la implementación de un sistema de transporte urbano masivo como la Línea 1?

#### **1.4.2. Preguntas específicas**

- ¿Cuál es la reducción de emisiones de GEI y CA seleccionados debido a la operación de la Línea 1?
- ¿Cuál es el impacto en la calidad de aire debido a la operación de la Línea 1?

- ¿Cuál es el costo social generado por la reducción de GEI y CA debido a la operación de la Línea 1?



## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ENFOQUES ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO**

#### **2.1.1. Cambio climático**

En el artículo 1° de la CMNUCC se define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992, p. 3)

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) lo define como:

“Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo” (IPCC, 2013, p.188).

En cambio en el glosario de términos de la LMCC se define como “cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que produce una variación en la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempos comparables” (Ministerio del Ambiente, 2018, p.8).

#### **2.1.2. Gases de efecto invernadero**

La CMNUCC define a los GEI como “aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja” (Naciones Unidas, 1992, p. 4).

En tanto el IPCC lo define como:

“Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. Además, la atmósfera contiene cierto número de gases de efecto invernadero enteramente antropógeno, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, y contemplados en el Protocolo de Montreal” (IPCC, 2013, p.193).

Para efectos de la presente investigación, los GEI estudiados son los emitidos por la combustión de hidrocarburos producida por los vehículos usados en el transporte urbano, así como aquellos emitidos por la generación de energía por lo que, por cuestiones metodológicas, sólo se calculará el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

### **2.1.3. Mitigación del cambio climático**

El IPCC define la mitigación como “una intervención humana encaminada a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero” (IPCC, 2015, p. 4). En tanto las emisiones de GEI antrópicas anuales se han incrementado en “10 GtCO<sub>2eq</sub> entre 2000-2010 que corresponde directamente a los sectores de energía (47%), industria (30%), transporte (11%) y edificios (3%) (...) y el crecimiento económico y demográfico son causantes del aumento de CO<sub>2</sub> derivadas de la quema de combustibles fósiles” (IPCC, 2015, p.8).

La continua emisión de GEI “causará un mayor calentamiento y cambios duraderos en el sistema climático, generando que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para la población y el ecosistema. Para contener el cambio climático se hará necesario reducir sustancial y sostenidamente los GEI” (IPCC, 2014, p.8).

En el numeral 5.23 del artículo 5° del Reglamento de la LMCC se establece que la reducción de emisiones de GEI es el “resultado de la intervención humana orientada a reducir las emisiones de GEI provenientes de las actividades productivas y/o económicas, (...) contribuyendo dichas intervenciones a lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera” (Ministerio del Ambiente, 2019).

#### **2.1.4. Contexto normativo internacional sobre cambio climático**

En 1988 se estableció el IPCC y sus evaluaciones son la base científica de las negociaciones internacionales sobre cambio climático. En 1992 se adaptó el texto de la CMNUCC que entró en vigor en 1994 luego de que 196 países miembros, conocidos como las “Partes”, firmaron el tratado y se estableció que se reúnan anualmente en la Conferencia de las Partes (COP) para negociar respuestas multilaterales al cambio climático. En 1997 se adoptó el Protocolo de Kioto, primer tratado internacional de reducción de los GEI a nivel mundial, entrando en vigor en el 2005. En la COP 20 en Lima se sentaron las bases para establecer un nuevo acuerdo de reducción de emisiones, y en la COP 21, en Francia, 195 países acordaron combatir el cambio climático y generar acciones e inversiones hacia un futuro sostenible, resiliente y con bajas emisiones de carbono, adoptando el Acuerdo de París (United Nations Framework on Climate Change (UNFCCC), s/f-b).

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre la lucha contra el cambio climático de naturaleza vinculante que entró en vigor el 4 de noviembre de 2016 y cuyo objetivo es limitar el calentamiento mundial por debajo de 2 °C, haciendo el esfuerzo a 1,5 °C, comparado con los niveles preindustriales. Por lo que los países miembros de la CMNUCC proponen alcanzar los máximos de sus emisiones de GEI lo más pronto posible para lograr un planeta con clima neutro para el año 2050. Asimismo, es un hito para la comunidad internacional porque es la primera vez que un acuerdo vinculante se hace con todos los países a fin de combatir el cambio climático y buscar adaptarse a sus efectos (United Nations Framework on Climate Change (UNFCCC), s/f-a).

Funciona en un ciclo de cinco años de medidas de mitigación y adaptación cada vez más ambiciosas que los países miembros llevan a cabo y en el 2020 presentaron sus planes de acción climática, llamados NDC. Estas son compromisos internacionales donde los países comunican las medidas que aplicaran para reducir sus emisiones de GEI a fin de alcanzar los objetivos del Acuerdo y las acciones que tomarán para crear resiliencia y adaptación a los efectos del cambio climático (United Nations Framework on Climate Change (UNFCCC), s/f-a).

### **2.1.5. Contexto normativo nacional sobre cambio climático**

El Perú ratifica el Acuerdo de París mediante Decreto Supremo N°058-2016-RE y así se constituye como una norma vinculante para el país, asumiendo el proceso de presentar, actualizar e implementar sus NDC ante la CMNUCC, de acuerdo con lo estipulado por las partes.

A fin de dar inicio con las actividades que den cumplimiento a las NDC, se creó de manera temporal el grupo de trabajo multisectorial (GTM-NDC) para generar información técnica y orientar la implementación de las NDC. Como parte de sus funciones está la elaboración de una PT (hoja de ruta) para propiciar las condiciones habilitantes que permitan la implementación de las NDC a corto y mediano plazo (Ministerio del Ambiente, 2016).

En 2018 el GTM-NDC aprobó el informe final que contiene medidas de mitigación y adaptación, priorizados por los sectores y se identificaron nueve NDC de mitigación a cargo de MTC. Tres son los sistemas de transporte urbano en Lima Metropolitana: PT 01 Sistemas Integrados de Transporte de Lima, PT 02 Metropolitano y su ampliación y PT 03 Línea 1 y 2 del Metro (Ministerio del Ambiente, 2018).

La LMCC, Ley N° 30754, tiene por objetivo:

“Establecer los principios, enfoques y disposiciones generales para coordinar, articular, diseñar, ejecutar, reportar, monitorear, evaluar y difundir las políticas públicas para la gestión integral, participativa y transparente de las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático, a fin de reducir la vulnerabilidad del país al cambio climático, aprovechar las oportunidades del

crecimiento bajo en carbono y cumplir con los compromisos internacionales asumidos por el Estado ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, con enfoque intergeneracional” (Congreso de la República del Perú, 2018, p.3).

El Reglamento de la LMCC, aprobado mediante Decreto Supremo N° 013-2019-MINAM, busca normar las disposiciones dada en la ley para “planificar, articular, ejecutar, monitorear, evaluar, reportar y difundir las políticas públicas para la gestión integral del cambio climático” (p.3). Se establecen las funciones de las autoridades sectoriales, destacando aquellas referidas a “diseñar y definir medidas de adaptación y mitigación que conforman las NDC (...) de conformidad con los lineamientos elaborados por la autoridad nacional en materia de cambio climático” (p.7), además de “monitorear, evaluar y reportar la implementación de sus medidas de mitigación y adaptación, así como las políticas, planes y proyectos que incorporar medidas de mitigación y adaptación en marco de sus competencias” (p.7) (Ministerio del Ambiente, 2019).

## **2.2. ENFOQUES ASOCIADOS A LA CALIDAD DE AIRE**

### **2.2.1. Contaminación del aire**

“La contaminación del aire (tanto el exterior como en interiores) es la presencia en él de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera”, mientras tanto los contaminantes más preocupantes para la salud pública, por provocar enfermedades respiratorias y de otro tipo, son el material particulado, el ozono (O<sub>3</sub>), el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) (Organización Mundial de la Salud, s/f).

Así mismo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) precisa que la calidad del aire está relacionada estrechamente con el clima del planeta y los ecosistemas, dado que muchas fuentes de contaminación atmosférica emiten GEI (Organización Mundial de la Salud, s/f).

*Committee of the Environmental and Occupational Health Assembly of the American Thoracic Society (1996)* menciona que la contaminación del aire es el resultado de la combustión de combustibles fósiles generados por los tubos de escape de los vehículos, y son los mayores contribuyentes de CO, NO<sub>x</sub>, hidrocarburos y material particulado.

Los contaminantes atmosféricos medidos normalmente en la atmósfera urbana provienen de fuentes móviles (transporte) y fijas (industrias, residencias y residuos), y se distinguen entre contaminantes primarios y secundarios. En la Tabla 1 se describen los principales contaminantes atmosféricos y las fuentes de emisión, en particular los vehículos (Ballester, 2005).

**Tabla 1:** Descripción de los principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes

Contaminante	Formación	Estado físico	Fuentes
Partículas en suspensión (PM10), humos negros	Primaria y secundaria	Sólido, líquido	Vehículos, procesos industriales, humo de tabaco
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Primaria	Gas	Procesos industriales, vehículos
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Primaria y secundaria	Gas	Vehículos, estufas y cocinas a gas
Monóxido de carbono (CO)	Primaria	Gas	Vehículos, combustiones en interiores, humo de tabaco
Compuestos orgánicos volátiles (COV <sub>s</sub> )	Primaria y secundaria	Gas	Vehículos, industria, humo de tabaco, combustiones en interiores
Plomo (Pb)	Primaria	Sólido (partículas finas)	Vehículos, industria
Ozono (O <sub>3</sub> ) troposférico	Secundaria	Gas	Vehículos (secundarios a foto-oxidación de NO <sub>x</sub> y COV <sub>s</sub> )

Fuente: Ballester (2005)

De acuerdo a la OMS, los contaminantes del aire con mayor evidencia de daño contra la salud pública son el material particulado (PM), CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> (WHO, s/f).

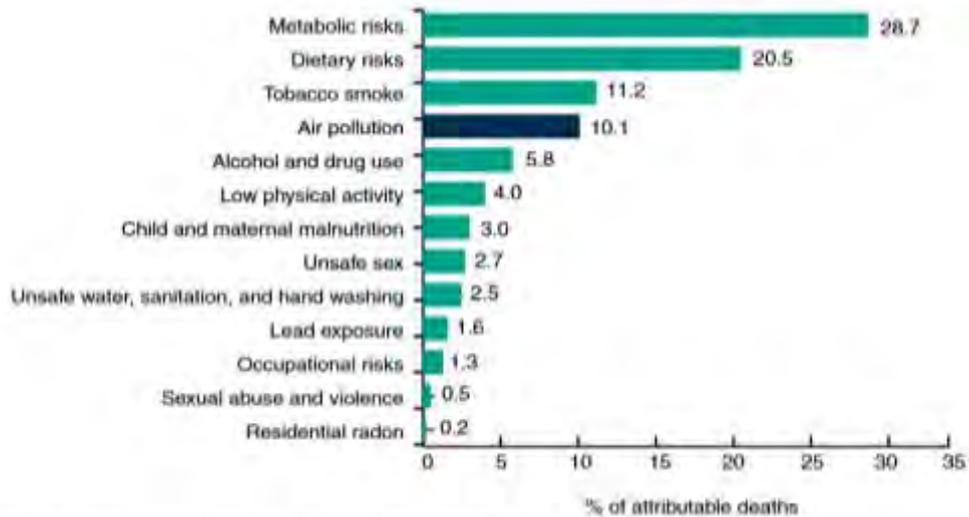
De acuerdo a Vallero (2014), la atmósfera es un sistema altamente complejo, que consta de muchos sistemas interconectados y diversas escalas. Con respecto a estas últimas se pueden dividir en escala personal, microambiental y ambiental y, a su vez, el aire ambiental se puede clasificar en local, urbano, regional, continental y global. La contaminación del aire en área urbana es generalmente de dos tipos: por contaminantes primarios (liberados directamente de las fuentes) y por contaminantes secundarios (formados por reacciones químicas de los contaminantes primarios). Como los vehículos motorizados son una fuente importante de CO, se pueden formar *hot spots* de altas concentraciones, especialmente en las intersecciones de las vías. Con respecto a la contaminación del aire a escala global, los fenómenos globales como el clima pueden ser sensibles a los efectos de los contaminantes del aire, por lo que la respuesta del clima varía frente a diferentes contaminantes; algunos conducen al enfriamiento mientras que otros conducen al calentamiento de la troposfera.

En lo referente al impacto de los contaminantes del aire en una escala específica, para efectos de la presente investigación se estudiarán los contaminantes del aire PM<sub>2,5</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, los cuales se consideran como contaminantes del aire a escala urbana por sus efectos sobre la salud de la población, sobre todo, en lo relacionado con problemas respiratorios y cardiovasculares.

### **2.2.2. Efectos de la contaminación del aire**

La contaminación del aire es reconocida como uno de los mayores riesgos para la salud; tanto los contaminantes de interior como de exterior incrementan el riesgo de las personas a contraer alguna enfermedad (World Bank Group et al., 2016). Por ejemplo, “el material particulado fino generado en las ciudades y las zonas rurales causan accidentes cerebrovasculares, cáncer de pulmón, cardiopatías y enfermedades respiratorias agudas y crónicas” (Organización Mundial de la Salud, s/f).

La exposición a la contaminación del aire es el cuarto riesgo fatal para la salud detrás de los riesgos metabólicos, dietéticos y del humo del tabaco (World Bank Group et al., 2016) , como se observa en la figura 1.



Sources: World Bank and IHME, using data from IHME, GBD 2013.

**Figura 1:** Porcentaje de atribución de muertes por factor de riesgo global al 2013

Fuente: World Bank Group et al., (2016)

De acuerdo con *Committee of the Environmental and Occupational Health Assembly of the American Thoracic Society* (1996), desde la perspectiva de la salud pública, la contaminación del aire es un tema relevante, dado que el ozono, aerosoles ácidos y partículas totales pueden ser responsables de los efectos adversos para la salud en los niveles actuales de exposición. Grandes cantidades de población están expuestas a contaminantes ambientales en exteriores con efectos adversos; por ello, se realizan estudios médicos, toxicológicos y epidemiológicos para evaluar los efectos de los contaminantes inhalados.

De igual modo, la contaminación del aire es particularmente dañina para las personas con enfermedades cardíacas o pulmonares crónicas, las mujeres embarazadas, los adultos mayores y los niños, los trabajadores y población que laboran en las vías públicas son los grupos más susceptibles (Muñoz. et al., 2007).

### **2.2.3. Contexto internacional sobre calidad de aire**

La OMS precisa que la contaminación del aire es el segundo factor de riesgo para las enfermedades no transmisibles, por lo que tomar medidas es crucial para proteger la salud de las personas. La mitigación de las emisiones procedentes de fuentes de contaminación exterior requiere la adopción de normativas de todo nivel en sectores como energía, transporte, desechos, planificación urbana y agricultura. La priorización de acciones en el transporte urbano, métodos limpios de generación eléctrica, implementación de sendas para peatones y carriles para bicicletas, utilización de vehículos con motores diésel más limpios, vehículos de bajas emisiones, entre otros, son ejemplos para el transporte (Organización Mundial de la Salud, 2022).

En el año 2015 los Estados Miembros de las Naciones Unidas adoptaron 17 ODS con el fin de erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos, como parte de la Agenda 2030. Es una norma de naturaleza declarativa, es decir no vinculante, pero que, en la práctica, se están implementando las metas planteadas en las ODS.

Así, el ODS 3, “Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades”, esencial para el desarrollo sostenible, plantea nueve metas, en particular, la 3.9: “Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo” (Naciones Unidas, s/f).

El ODS 11, “Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles”, propone siete metas, siendo la 11.2: “Proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad (...)” y la 11.6: “Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo” (Naciones Unidas, s/f).

El ODS 13, “Acción por el clima”, propone tres metas, siendo la 13.2 “Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales” y la 13.3: “Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana” (Naciones Unidas, s/f).

Por lo que Perú, como miembro parte de las Naciones Unidas, se ha adherido a esta norma declarativa y tiene el encargo específico de reducir el número de muertes y enfermedades relacionadas a la contaminación del aire con la finalidad de cumplir con el ODS 3, dar acceso de transporte urbano para la mejora de la calidad de aire con el ODS 11, e incorporar medidas de mitigación al cambio climático con el ODS 13.

#### **2.2.4. Contexto normativo nacional sobre calidad de aire**

La Constitución Política del Perú, en su artículo 2°, inciso 22, establece que toda persona tiene derecho “A la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”; por otra parte, el artículo 67° establece que “El Estado determina la política nacional del ambiente. Promueve el uso sostenible de sus recursos naturales” (Congreso de la República del Perú, 1993, p. 15 y 46), es decir, el Estado peruano busca garantizar que las personas disfruten de un medio ambiente sano que les permita desarrollarse correctamente, aprobando para ello la PNA.

La primera PNA se aprobó mediante Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM con el objetivo general de “mejorar la calidad de vida de las personas, garantizando la existencia de ecosistemas saludables, viables y funcionales en el largo plazo; y el desarrollo sostenible del país, mediante la prevención, protección y recuperación del ambiente y sus componentes (...)” (Ministerio del Ambiente, 2009, p.10), en tanto la PNA al 2030, ahora vigente, aprobada mediante Decreto Supremo N° 023-2021-MINAM, contiene nueve objetivos prioritarios siendo el OP3: “Reducir la contaminación del aire, agua y suelo” que busca “ (...) reducir los niveles de morbilidad y mortalidad, tanto

en enfermedades gastrointestinales como en enfermedades respiratorias a nivel nacional” (Ministerio del Ambiente, 2021c, p.182).

Asimismo, en el 2001 se aprobó el “Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire” mediante Decreto Supremo N° 074-2001-PCM; en el transcurso de los años se modificó la norma y en el 2017 se aprobaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire mediante Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, como un referente para aquellos parámetros que caracterizan las emisiones de servicios, y actividades extractivas y productivas. De igual manera, se constituyó la Comisión Multisectorial para la Gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao, que tiene por finalidad emitir informes técnicos que propongan mecanismos de coordinación entre las diversas instituciones y las modificaciones normativas para mejorar la calidad del aire en su ámbito de intervención (Ministerio del Ambiente, 2017).

En el 2021 se aprobó el “Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad de Aire de Lima y Callao 2021-2025” mediante Resolución Ministerial N° 142-2021-MINAM, cuyo objetivo es continuar con el proceso de reducción de CA en Lima y Callao, por medio de medidas para el manejo de las fuentes emisoras que permitan el cumplimiento de los ECA aire vigentes y así salvaguardar la salud pública (Ministerio del Ambiente, 2021a).

## **2.3. TRANSPORTE URBANO**

### **2.3.1. Transporte en ciudades**

Con respecto a la relación entre las ciudades y el ambiente, Trujillo (2021) manifiesta que, entre los siglos XIX y XX, ya se tenía la idea de preservación de la naturaleza, y que la naturaleza y lo rural debían ser protegidos del crecimiento de las ciudades, por lo que el componente ambiental era externo a las ciudades. Sin embargo, la discusión cambió al considerar a la naturaleza como un foco central para el desarrollo sostenible para las zonas urbanas.

Ahora se pone mucho mayor énfasis en las ciudades como centros de actividad y están asociados a los problemas con la calidad de vida urbana. Por ello, la demanda de la movilidad urbana se ve afectada por las variables de crecimiento económico y cambios sociales, que generan patrones de consumo, en tanto la oferta se ve afectada por la provisión de la infraestructura y los avances tecnológicos (Jones, 2014).

Es así que, la “movilidad urbana puede ser entendida como un *performance* en el territorio, y al transporte como el medio o vector que realiza el desplazamiento” (Gutiérrez, 2012, p.65). Es decir, el objeto de la movilidad es el movimiento de las personas independiente del medio usado, en cambio el transporte se refiere al medio mecánico usado para el traslado de las personas y bienes (Mataix, 2010). Por ello, ambos conceptos son cercanos. Para la presente investigación el objeto de estudio es un medio de transporte, la Línea 1, cuyo impacto activa la formulación de estrategias para una movilidad urbana.

Debido a eso, cuando se piensa en el futuro de la movilidad urbana también hay preocupaciones políticas como el énfasis continuo en reducir los accidentes de tránsito, mejorar la calidad del aire y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Asimismo, hay un mayor énfasis en la habitabilidad y la calidad de vida en la ciudad, y en garantizar la resiliencia a los efectos del cambio climático (Jones, 2014).

Por otro lado, Aristizábal (2022) menciona que en la categoría de transporte público se identifican aquellos con base a buses, con o sin carril exclusivo, así como aquellos con riel, como el *Light Rail Transit* (LRT) y *Metro Rail Transit* (MRT), y su evaluación y comparación se basan en:

- Económico: dinero para la construcción de la infraestructura, su mantenimiento y operación del material rodante.
- Ambiental: cantidad de emisiones que genera el sistema de transporte, así como el ahorro de emisiones por la reducción de los vehículos particulares en circulación por el uso del sistema de transporte.

- Tiempo: en ciudades congestionadas, el transporte público ofrece una reducción de los tiempos de desplazamiento, sobre todo los que tienen vía exclusiva como los trenes y BRT, lo que permite calcular el tiempo ahorrado de los pasajeros del sistema en comparación con el uso de vehículos particulares.

Como sustenta Mataix (2010), el modelo de movilidad urbana actual “provoca una serie de efectos (ruido, contaminación, accidentes, etc.) que influyen negativamente en la calidad de vida de los ciudadanos, el ambiente y el desarrollo económico, que hacen inviable -insostenible- esta forma de movilidad, para las generaciones futuras y actuales” (p.18). Por lo que una movilidad urbana sostenible tiene que “asegurar la protección del ambiente, mantener la cohesión social y la calidad de vida de los ciudadanos y fortalecer el desarrollo económico” (p.18).

### **2.3.2. Transporte ferroviario**

Como sostiene Kohon (2011), “el ferrocarril es un transporte especialmente apto para el traslado de grandes flujos de pasajeros y carga en condiciones más seguras (...) que demanda consumos bajos en energía, baja generación de carbono y GEI, y optimiza el espacio público”.

El autor sostiene que el ferrocarril no es el transporte predominante de pasajeros y carga en las economías mundiales por algunas restricciones, como los trasbordos, que han hecho que el transportador por defecto sea el automóvil. Sin embargo, para la movilización de personas en grandes ciudades el transporte ferroviario es una solución. En ese sentido, la consolidación de sistemas ferroviarios será posible con políticas públicas con un rol activo de los Estados en su financiamiento, periodos largos de maduración y poseen capacidades estructurantes que impactan positivamente en el desarrollo de la ciudad (Kohon, 2011).

## **2.4. EXTERNALIDADES**

De acuerdo a Stiglitz (2000), “siempre que una persona o una empresa emprende una acción que produce un efecto en otra persona o en otra empresa por el que esta última no paga ni es pagada, decimos que hay una externalidad” (p. 248). Asimismo, “se denomina externalidades negativas en los casos en que los actos de las personas imponen costes o afectan negativamente a otras, y externalidades positivas, en los que los actos de una persona producen otros beneficios, no siendo compensados” (p.248).

En términos generales, “las externalidades surgen siempre que el bienestar de un individuo se ve afectado por las actividades de otros que ignoran este desbordamiento al tomar sus decisiones” (European Commission, 1995).

### **2.4.1. Externalidades del transporte**

La consecuencia del incremento del uso de los automóviles se da en términos prácticos de la creciente congestión vehicular, además a través de sus efectos en la contaminación del aire, los accidentes de tránsito y el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Jones, 2014).

Para Stiglitz (2000) existen varios ejemplos de externalidades. Uno de ellos es el generado por un automóvil adicional en una vía congestionada que aumenta la congestión al reducirse la velocidad a la que otros conductores pueden circular en condiciones de seguridad, así como por aumentar las probabilidades de que ocurra un accidente.

“La externalidad negativa más importante del transporte terrestre incluye los accidentes, daños viales, daños ambientales, congestión y la dependencia del petróleo” (Santos et al., 2010, p. 38).

El transporte terrestre genera externalidades ambientales que incluyen los impactos de emisiones, ruido y vibraciones; las dos primeras se han cuantificado y monetizado mejor. Adicionalmente, se generan cambios en el paisaje natural y el paisaje urbano, los impactos en la biodiversidad, el patrimonio de los recursos históricos y el agua que tienden a ser evaluados utilizando técnicas cualitativas (Santos et al., 2010).

Para la Comisión Europea, las externalidades del transporte “se refieren a una situación en la que un usuario del transporte no paga los costos totales (incluidos los costos ambientales, de congestión o de accidentes) de su actividad de transporte o no recibe todos los beneficios de esta” (p.4). El transporte crea beneficios (sino las personas no lo usarían) y también costos; sin embargo, no todos estos costos y beneficios corresponden solo a quienes pagan por esta actividad de transporte (usuario del transporte), algunos costos recaen sobre otras personas o la sociedad. Por ello, se puede distinguir entre los llamados costos internos o privados, que son asumidos por las personas que realizan la actividad (costos de tiempo, vehículos y combustible), y costos externos, aquellos que acumulan a los demás. En ese sentido, ambos tipos de costos se denominan "costos sociales", por lo que en la tabla 2 se presenta un desglose de los costos sociales totales del transporte en términos de costos externos e internos para una serie de partidas de costos (European Commission, 1995).

**Tabla 2:** *Clasificación de los costos del transporte*

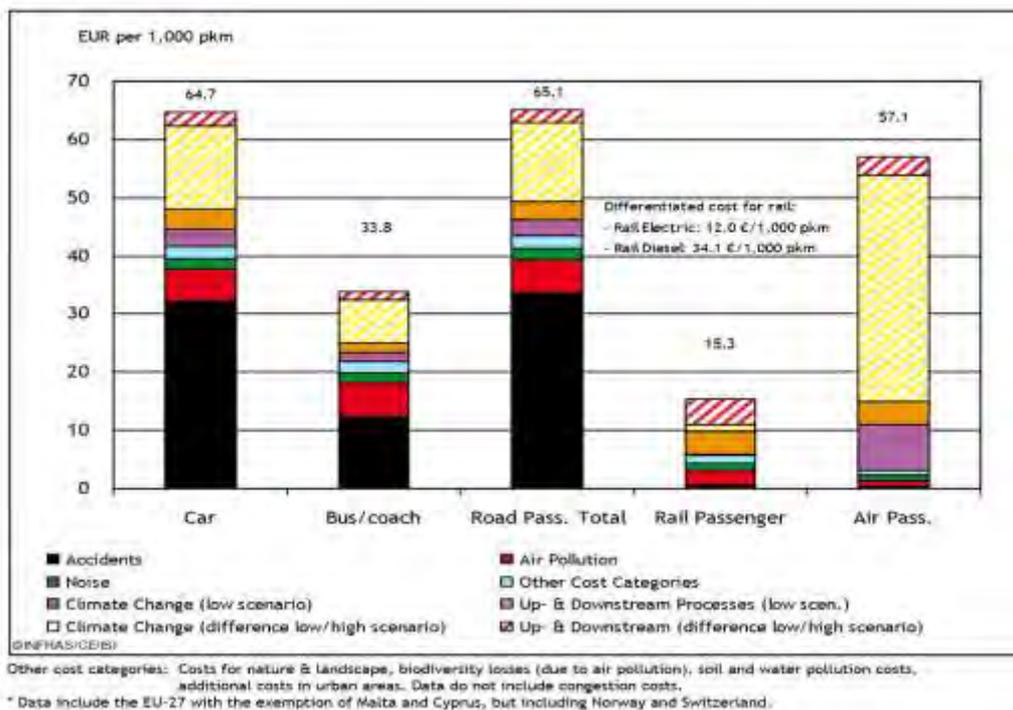
Categorías de Costos	Costos sociales	
	Costos internos o privados	Costos externos
Gastos de transporte	- Costos del vehículo y combustible; tickets/fares	- Costos pagados por otros (p. ej., provisión gratuita de espacios de estacionamiento)
Costos de infraestructura	- Tasas de usuario, impuestos sobre vehículos e impuestos especiales sobre el combustible	- Costos de infraestructura no cubiertos
Costos de accidentes	- Costos por el seguro, costos propios del accidente	- Costos de accidentes no cubiertos (p. ej., dolor y sufrimiento impuestos a otros)
Costos ambientales	- Desventajas propias	- Costos ambientales no cubiertos (p. ej., ruido molesto a otros)
Costos de congestión	- Costos de tiempo propio	- Demoras/costos de tiempo impuestos a otros

Fuente: European Commission (1995)

De acuerdo a la Organización Panamericana de la Salud (s/f) el material particulado fino ( $PM_{2,5}$ ) y grueso ( $PM_{10}$ ) son partículas “suspendidas en el aire y emitidas por vehículos diésel, (...) son un problema mundial de salud pública, incluso en niveles relativamente bajos”, generando infecciones respiratorias, enfermedades cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón.

De acuerdo con Essen et al. (2011), la contaminación del aire causada por las actividades de transporte genera diversos tipos de costos de externalidad; uno de los más importantes es el costo a la salud debido a enfermedades respiratorias y cardiovasculares causadas por contaminantes del aire. Otra externalidad de la contaminación del aire incluye el daño a la infraestructura, pérdida de cultivos e impactos en la biodiversidad y ecosistema.

El costo promedio de externalidad sin incluir los costos por la congestión vehicular para el transporte terrestre, en 27 países de la Unión Europea, es mucho mayor que el transporte por tren. El costo del uso de carro o avión por kilómetro-pasajero es cerca de cuatro veces el del transporte por ferrocarril (Essen et al., 2011), como se observa en la figura 2.



**Figura 2:** Costos promedio de externalidad de transporte de pasajeros, año 2008

Fuente: Essen et al. (2011) p. 8

#### 2.4.2. Externalidades del transporte ferroviario

De acuerdo con Kohon (2011), el transporte ferroviario genera externalidades positivas y negativas, que se detallan a continuación:

- **Externalidades positivas:** rol estructurador de las ciudades dado que contribuye a densificar y relocalizar las actividades económicas y de vivienda, generando nuevos destinos. Además, reduce los tiempos de viajes, la congestión en las zonas del trazado ferroviario, la contaminación, los gases de efecto invernadero y el número de accidentes; mejora el uso del espacio público y brinda un mayor acceso de transporte a personas de bajos recursos. Otro punto importante es la enorme aceptación social porque está asociado a una imagen de progreso y desarrollo económico (Kohon, 2011).
- **Externalidades negativas:** deterioro del medio urbano cercano a las líneas por el ruido y el inadecuado mantenimiento de la vía, así como

el efecto de barrera urbana por inserción de la vía férrea en la ciudad (Kohon, 2011).

Por otro lado, el costo del impacto del cambio climático, medido a través del costo social del carbono, castiga fuertemente a los proyectos de carretera, tanto en los servicios de carga como de pasajeros, pero contribuye positivamente a justificar socialmente la implementación de proyectos ferroviarios. De igual modo, el desarrollo de sistemas de transporte sostenible con bajo consumo de carbono genera nuevas oportunidades para los sistemas de transporte ferroviario en las grandes ciudades (Kohon, 2011).

## **2.5. ESTIMACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSPORTES URBANO**

### **2.5.1. Experiencias de estimación de emisiones en ciudades de Latinoamérica**

#### **Casos en Colombia**

El estudio “Influencia de la implementación de un sistema BRT en la calidad del aire: Caso de estudio Bogotá” buscó evidenciar la influencia que tiene la implementación del Transmilenio, un sistema BRT, en la reducción de emisiones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> desde el año 2000. Se concluyó que la implementación del sistema BRT Transmilenio ha reducido las concentraciones de PM y NO<sub>x</sub> que se reportan desde la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá, además de realizarse inversiones económicas para fortalecer la red de monitoreo y adicionar el control de CO<sub>2</sub> para tener información y, de esa forma, elaborar propuestas en el transporte (Tafur Flórez, 2020).

En el estudio “Evaluación de costo-efectividad de dos programas de movilidad sostenible en Bogotá” se precisa que los sistemas de transporte buscan soluciones de movilidad ambientalmente amigables y reducir los vehículos particulares generadores de la congestión vehicular en la ciudad. El objetivo de dicha investigación es estimar el costo-efectividad de dos

programas de movilidad sostenible en Bogotá, la bicicleta y el Transmilenio. La metodología aplicada consiste en analizar el costo efectividad de los dos modos de transporte, analizando los viajes de cada sistema y evaluando los costos económicos asociados en cada etapa del proyecto. Y, para ello, se utilizó información de las Encuestas de Movilidad y del Plan Maestro de Movilidad, número de viajes del Transmilenio y los buses (alimentadores, especial y tradicional), y para el transporte privado se consideraron los viajes en moto, bicicleta y auto privado. El estudio concluye que el Transmilenio presenta efectos positivos en los temas ambientales por la reducción de emisiones, así como por la siniestralidad, por lo que puede ser considerado como una política pública *no regrets* o políticas públicas que no generan arrepentimiento. Entre tanto, la bicicleta representa alrededor de 38% de los viajes del Transmilenio con solo 6,6% de la inversión de este último considerándose una política exitosa de bajo costo (Aristizábal, 2022).

### **Casos en Chile**

El objetivo de la investigación titulada “Evaluación social de proyectos ferroviarios considerando externalidades, aplicado al proyecto de transporte de pasajeros Batuco-Mallico” de López (2016) fue evaluar socialmente el proyecto ferroviario del servicio de pasajeros de Batuco-Santiago-Mallico, incorporando externalidades como accidentes, contaminación atmosférica y cambio climático. El trabajo consistió en realizar la evaluación social del proyecto considerando externalidades a través de la adaptación de metodologías de evaluación social para el caso chileno. Con respecto al cambio climático, los resultados de estimación de beneficios concluyen que las diferencias de emisión de CO<sub>2</sub> que genera el proyecto son insignificantes, además de la poca importancia para el país, porque el precio de CO<sub>2</sub> era bajo en ese momento en Chile. La contaminación atmosférica se calculó en base a valores promedio en la región metropolitana (López, 2016).

### **2.5.2. Experiencias de estimación de emisiones en Perú**

Carcelén (2014), en el “Estudio de las emisiones atmosféricas de buses urbanos con motores diésel en Lima y Callao en base a la metodología COPERT”, buscó determinar los niveles de emisiones vehiculares en Lima y

Callao para evaluar diferentes escenarios con el cambio de flota vehicular para la ciudad. Para ello se estudiaron las características de la flota vehicular del transporte público que usa diésel, para luego usar la metodología de COPERT para el cálculo de emisiones (Carcelén Nava, 2014).

En cuanto a la metodología para el cálculo de emisiones generadas por la flota vehicular de buses diésel en Lima y Callao, los contaminantes evaluados fueron PM<sub>10</sub>, CO, hidrocarburos totales (HCT), NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> y los tipos de emisiones consideradas fueron las derivadas del motor en operaciones estables (emisiones en caliente), debido a los tramos largos de ruta en Lima y los tiempos de viaje. Finalmente, se concluye que las emisiones vehiculares muestran un gran deterioro del parque automotor de la ciudad debido a las tecnologías obsoletas, 72.2% de los vehículos sin norma de emisiones y flota vehicular antigua; entre tanto los vehículos modernos con sistemas de control de emisiones más exigentes tienen un impacto positivo sobre las emisiones generadas (Carcelén, 2014).

En la investigación “Impacto económico por la reducción de emisiones gaseosas y material particulado en Lima Metropolitana por el uso del gas natural como combustible en el parque automotor” se calculó el parque automotor en Lima Metropolitana por tipo de combustible, para luego estimar la contaminación del aire que generan estas unidades y su impacto a la salud de la población (Perales, 2015).

Se realizó la proyección del parque automotor por tipo de combustible (gasolina, diésel y gas natural) a partir de información de diversas instituciones de transporte; luego, se realizó el cálculo de las emisiones del parque automotor, la estimación de la población impactada en salud por la contaminación del aire y se calcularon los costos de las enfermedades respiratorias en términos de atención y medicamentos, así como de pérdida de productividad por inasistencia al centro de labores. Como último punto, se evaluaron los impactos ambientales y económicos por el cambio del parque automotor y se analizó la viabilidad del uso del gas natural vehicular. Se concluyó que el parque automotor es el factor principal de la contaminación del aire para Lima, representando 70% de las emisiones

totales; además, la simulación del cambio de combustible a gas natural anual en 3%, reduciría 3% de las emisiones y 4% de las personas con enfermedades respiratorias atribuibles al transporte. De igual modo, se reducen 2% los costos por salud (tratamiento de salud) e inasistencia (descanso médico) (Perales, 2015).



## **CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO**

### **3.1. CONTEXTO DEL CASO DE ESTUDIO**

La presente sección ha sido trabajada en base al documento “Metro de Lima. El Caso de la Línea 1” elaborado por CAF (Banco de Desarrollo de América Latina), donde se presentan los principales hechos que, para efectos de esta tesis, permitieron la ejecución de la Línea 1.

#### **3.1.1. Inicios de la Línea 1**

En los años 70s surgen las primeras acciones para el tren eléctrico de Lima como el Estudio de Factibilidad Técnico-Económico y el Anteproyecto del Sistema de Transporte Rápido Masivo de Pasajeros en el Área Metropolitana de Lima y Callao, donde se propusieron cuatro líneas subterráneas. Las dificultades para la ejecución del proyecto eran la obtención del financiamiento y los desafíos del suelo limeño por estar en una zona altamente sísmica, que no permitieron ejecutar el proyecto (Banco de Desarrollo de América Latina, 2015).

En 1986 se declara de “necesidad pública e interés social el establecimiento de un sistema eléctrico de transporte masivo para Lima y Callao, con el fin de dotar a las zonas de alta densidad poblacional y periféricas (...) de una infraestructura de transporte rápida” (Corporación Andina de Fomento, 2015, p.27), y se crea la Autoridad Autónoma del Proyecto Especial Sistema Eléctrico de Transporte Rápido Masivo de Lima y Callao (AATE). En 1989 se suscribió el contrato para la implementación del tramo inicial de 9 km que se extendía de Villa El Salvador al puente Atocongo. No obstante, las dificultades económicas y sociales que atravesaba el país, como los precios elevados, la hiperinflación y las acciones terroristas, no permitieron avances significativos, por lo que en abril de 1990 solo se inauguró un tramo de 1,5 km. Luego, entre 1990 y 2000 se complementaron las obras civiles del viaducto hasta el puente Atocongo, y se intentó prestar el servicio, pero al ser un trayecto corto que no ingresaba a distritos céntricos resultó siendo una obra no utilizada (Banco de Desarrollo de América Latina, 2015).

Con múltiples debates sobre la estimación de la demanda, los costos de inversión y operación, entre 1997 y 1998 se realizó el Estudio Complementario de la Red del Metro de Lima a fin de elegir la mejor ruta entre Villa El Salvador y Comas. Entre los años 2003 al 2010 se realizaron estudios que influyeron para el cambio del destino final hacia San Juan de Lurigancho. Por otro lado, entre los años 2003 al 2009 se buscó dar el Tramo I en concesión al sector privado, pero luego de múltiples intentos y con la crisis internacional del 2008 no se llegó a buen puerto. Se replanteó la estructura y se definieron dos procesos licitatorios separados: la obra pública y los componentes electromecánicos los asumiría el Estado mediante una obra pública, en tanto la prestación del servicio se concesionaría al sector privado (operación de trenes), además de incorporar material rodante y expandir el taller de mantenimiento de Villa El Salvador (Banco de Desarrollo de América Latina, 2015).

### **3.1.2. Construcción**

El Estado peruano solicitó a la CAF un préstamo para la construcción y aprovisionamiento de equipos, pero las dudas sobre la estimación de la demanda generaron que el financiamiento se condicionase a que el proyecto se realizara en dos etapas o tramos: el Tramo 1 de Villa El Salvador hasta el Centro de Lima, y el Tramo 2 del Centro de Lima hasta San Juan de Lurigancho, una zona con alta densidad poblacional. Asimismo, bajo el criterio de que la Línea 1 era un proyecto que comenzó hace veinte años, se le exoneró de la normativa del Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP) vigente en ese momento (Banco de Desarrollo de América Latina, 2015).

A inicios de 2010 comenzó la ejecución del Tramo 1 por parte del consorcio Odebrecht y Graña & Montero y se culminó formalmente en setiembre de 2011, tiempo récord para una obra de esa magnitud que involucraba expropiaciones e interferencias. Adicionalmente, a mediados de 2011 se da la buena pro al mismo consorcio para ejecutar el Tramo 2, iniciando las obras en diciembre del mismo año. Se enfrentaban dos retos de ingeniería, la construcción de los puentes de la Vía de Evitamiento (270 m) y del río Rímac

(240m), culminando la obra en mayo de 2014, e iniciando la marcha blanca en julio de ese mismo año (Banco de Desarrollo de América Latina, 2015).

### **3.1.3. Contrato de concesión**

El 11 de abril de 2011 se suscribió el Contrato de Concesión del Proyecto Especial Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao – Línea 1, Tramo 1 y 2 (Villa El Salvador - Av. Grau - San Juan de Lurigancho) entre MTC y GyM Ferrovías bajo la modalidad de concesión APP (Asociación Público-Privada) cofinanciada por un plazo de treinta años y teniendo a la fecha cuatro adendas (OSITRAN, 2022a, p.1).

En el “(...) contrato de Concesión se transfirió a GyM Ferrovías (actualmente Tren Urbano de Lima S.A.) la concesión para el diseño, financiamiento y construcción del taller de mantenimiento mayor para los trenes nuevos y existentes (...) ubicado en Villa El Salvador”, además de la provisión del material rodante y la explotación del sistema de transporte (OSITRAN, 2022b, p.8).

## **3.2. CARACTERÍSTICAS DEL SERVICIO**

### **3.2.1. Área del servicio**

La Línea 1 recorre Lima de oeste a sur, a lo largo de 34 km y cuenta con 26 estaciones conectando a once distritos de Lima como se presenta en la figura 3. Se estima que el proyecto beneficiará a 3,75 millones de personas representando aproximadamente 41% de la población de la provincia de Lima (OSITRAN, 2022b, p.10).



**Figura 3:** Estaciones de la operación de la Línea 1

Fuente: Tren Urbano de Lima S.A. (2023)

### 3.2.2. Características técnicas

Respecto a la infraestructura y al equipamiento con que cuenta la Línea 1, en la tabla 3 se describen las principales características de este sistema.

**Tabla 3: Infraestructura y equipamiento de la Línea 1**

Infraestructura y/o equipamiento	Características
Vía	Viaducto principal elevado de doble vía de aproximadamente 34 km (22.1 km del primer tramo y 11.9 km del segundo tramo). “El tramo 2 cuenta con dos mega puentes de una longitud de 270 m (vía de Evitamiento) y de 240 m (río Rímac)” (p.11)
Estaciones	Las estaciones se desarrollan en dos niveles con 26 estaciones (16 del primer tramo y 10 del segundo tramo). “En el primer nivel se ubica la parte operativa que permite acceder a la estación (boleterías, torniquetes, servicios higiénicos, etc.) y área técnica (sala de bombas, cisternas, sala de señales, etc.)” (p.11). Mientras tanto “en el segundo nivel, a la altura del viaducto, se encuentran los andenes que permiten acceder al tren” (p.11).
Subestaciones eléctricas	“El tramo 1 cuenta con una subestación eléctrica de 60/20 KV (mercado mayorista) y el tramo 2 cuenta con una subestación eléctrica de 60/20 KV (patio de maniobras de Bayóvar)” (p.11).
Catenaria	“La catenaria es la línea área de alimentación que transmite energía eléctrica a los trenes. El sistema de suspensión de la catenaria utiliza postes metálicos instalados en la parte superior del viaducto” (p.12).
Taller de mantenimiento mayor	“Se ubica en el segundo piso del taller de material rodante en Villa El Salvador” (p.12).
Trenes	Se cuenta con 44 trenes, 39 trenes de marca ALSTOM modelo metrópolis serie 9000 (con 6 coches) y 5 trenes de la marca ANSALDO BREDA (con 6 coches) (p.12).
Equipos	“En las subestaciones y catenarias se dispone de aisladores de sección, descargadores, subestaciones rectificadoras, línea de transmisión, alumbrado, etc.” (p.12).
	“Equipos de señalización y telecomunicaciones como la máquina de cambio, circuito cerrado TV, sistema de telefonía de emergencia, sistema de telefonía IP, transmisión digital, sistema de difusión sonora, sistema de comunicación de audio y video, etc.” (p.12).
	“En las estaciones de pasajeros y patio taller se cuenta con sistemas de aire acondicionado, de agua industrial, contra incendio, de generación de energía, etc.” (p.12).

Fuente: OSITRAN (2022b), p.11-12.

### 3.2.3. Operación

La operación del Tramo 1 de la Línea 1 se inició el 9 de enero de 2012 en su fase de marcha blanca, mientras que el Tramo 2 se dio en julio de 2014 en la misma fase. La fase de operación comercial ocurrió en abril de 2012 para el Tramo 1 y en agosto de 2014 para el Tramo 2. Adicionalmente, entre los años 2018 y 2019 se incorporaron progresivamente 20 trenes y 39 vagones para acoplarse al sistema. Es con la Adenda 4 que se aumenta la flota a 44 trenes con seis coches cada uno (OSITRAN, 2022b).

En el 2012, cuando se inició la operación comercial del sistema de transporte, se movilizaron 32,5 millones de pasajeros, transportando aproximadamente 107 millones de pasajeros a partir de 2015 e incrementando a 170,3 millones en el año 2019, creciendo cinco veces su capacidad debido a la incorporación de trenes por la Adenda 4. El sistema se vio afectado por la crisis sanitaria del COVID-19 reduciendo el uso de este medio de transportes a nivel inferior. En la figura 4 se muestra el flujo de pasajeros que se movilizan con la Línea 1 desde el año 2012 al 2021.



**Figura 4:** Evolución del tráfico de pasajeros entre los años 2012 al 2021 (En miles de pasajeros)

Fuente: Tren Urbano de Lima S.A extraído de (OSITRAN, 2022b).

El horario de prestación del servicio va desde las 05:00 am hasta las 10:00 pm de lunes a viernes, mientras que los domingos y feriados es de 06:00 am a 10:00 pm. El servicio se ofrece con intervalos de tiempo de 3 min en hora punta o de 4, 5, 6 y 10 min en el resto del horario laborable, en cambio los domingos y feriados el intervalo de espera es de 7,5 a 15 min (OSITRAN, 2022b).

### **3.3. COMPONENTE AMBIENTAL**

#### **3.3.1. Instrumento de gestión ambiental**

Como se describió previamente, la Línea 1 cuenta con dos tramos y debido a que el proyecto fue exonerado al SNIP, cuenta con dos instrumentos de gestión ambiental (IGAs), que fueron modificados, precisados a continuación:

- El Tramo 1 cuenta con la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1, Tramo 1: Villa El Salvador - Av. Grau, aprobada mediante Resolución Directoral N° 157-2009-MTC/16 en 2009. La DIA se modificó mediante Resolución Directoral N° 209-2017-MTC/16 el 2017.
- El Tramo 2 cuenta con el Estudio de Impacto Ambiental semidetallado (EIA-sd) del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1, Tramo 2: Av. Grau - San Juan de Lurigancho, aprobado mediante Resolución Directoral N° 202-2010-MTC/16 en 2010. El EIA-sd se modificó mediante Resolución Directoral N° 208-2017-MTC/16 el 2017.

#### **3.3.2. Impactos ambientales identificados**

De acuerdo con los IGAs aprobados, se identificó como impacto ambiental positivo en la etapa de operación para los dos tramos, “la mejora de la calidad del aire local”, describiendo este impacto como:

- Tramo 1: La línea 1 emplea como principal suministro la energía eléctrica lo que no genera subproductos que alteran la calidad del aire.

Además de la reducción de unidades de transporte motorizado, ocasiona una reducción de gases de combustión (CO, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>), generando un impacto de carácter positivo de magnitud moderada (p.630) (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2009). Además, con la modificación del DIA se menciona que “la operación del sistema del metro mejorará sustantivamente la calidad de aire con la reducción de los gases de combustión y material particulado asociado con el parque automotor del transporte público ya que no circularán” (p.19) (Consortio GyM Ferrovias S.A., 2017a)

- Tramo 2: La operación de la Línea 1 podría propiciar una nueva alternativa de uso de transporte urbano, que indirectamente contribuirá a la mejora de la calidad del aire local, en las zonas de mayor congestión vehicular, al disminuir las fuentes de emisión, generando un impacto de carácter positivo de magnitud alto (p.647) (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2010). Asimismo, “la operación reducirá las emisiones de combustión y el material particulado asociado al transporte público del área de influencia del metro” (p.21) (Consortio GyM Ferrovias S.A., 2017b).

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

### 4.1. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 4.1.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación es de tipo descriptivo porque busca analizar los beneficios ambientales de la operación de la Línea 1 en cuanto a la reducción de emisiones de GEI y CA. El diseño es no experimental dado que se recolectarán datos de fuentes gubernamentales para el periodo de tiempo a partir del año 2015 al 2023, para luego realizar las estimaciones de reducción de emisiones por la operación del sistema de transporte.

#### 4.1.2. Escala espacial y temporal

- **Escala espacial:** La investigación se realizó sobre el área urbana de Lima Metropolitana y Callao porque la reducción de emisiones considera los viajes de origen y destino de los pasajeros que usan la Línea 1, los mismos que provienen de distintos puntos de toda la ciudad.
- **Escala temporal:** Se busca realizar el análisis de la implementación de la Línea 1 desde el 2015 hasta el 2023 y realizar una proyección hasta el año 2030, de importancia para el Acuerdo de París donde se contabilizarán los aportes de todos los estados miembros con la implementación de sus NDC. Cabe precisar que los años 2020 y 2021 son atípicos debido a la pandemia del COVID-19, por lo que el análisis de estos años se realizó de manera particular.

#### 4.1.3. Recolección de información

Se utilizó el análisis documental (información de entidades públicas, bibliografía, datos secundarios, entre otros) y entrevistas (consulta a expertos en transporte, cambio climático y calidad de aire), además, se hizo uso de herramientas digitales (hojas de cálculo en Excel).

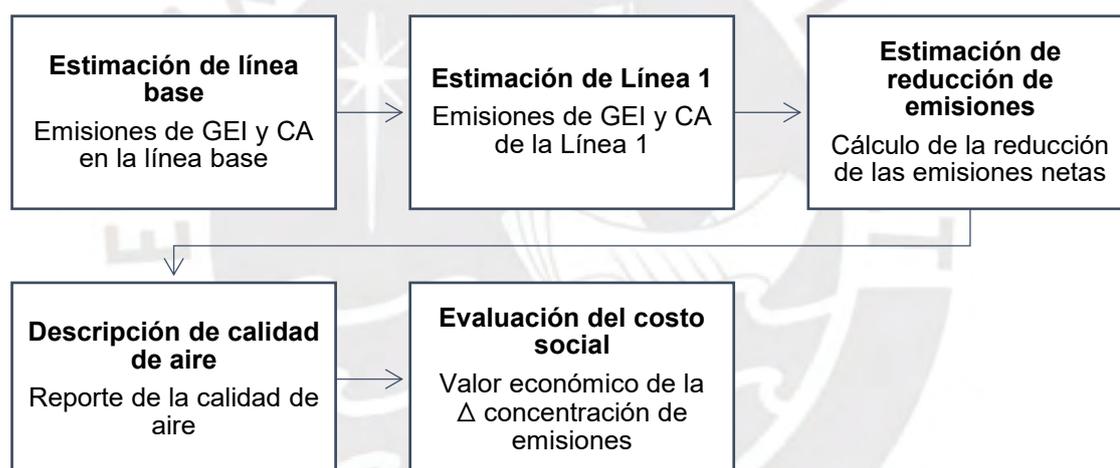
- **Documentario:** se solicitó información a diversas entidades del Estado, así como se buscaron las variables de operación de la Línea 1 e

información relacionada a la calidad de aire en Lima Metropolitana en repositorios y páginas web oficiales.

- **Entrevistas:** se realizaron entrevistas semiestructuradas a diversos expertos en temas de transporte, calidad de aire y cambio climático. Además, se solicitó a cada entrevistado su Consentimiento Informado Previo mediante el documento del Anexo 4.
- **Hojas de cálculo:** se elaboraron las estimaciones de las emisiones de GEI y CA mediante el uso de hojas de cálculo de Excel.

#### 4.1.4. Metodología de investigación

La metodología para conocer los beneficios de la reducción de emisiones de la operación de la Línea 1 se muestra en el siguiente esquema.



**Figura 5:** Esquema de la metodología de la estimación de los beneficios de la Línea 1

De acuerdo con el esquema anterior, la metodología se enmarca en las siguientes acciones:

##### Estimación de emisiones de línea base

- Se elaboró la línea base, donde se presentan las condiciones de GEI y CA en Lima en caso de que no operase el sistema de transporte urbano en evaluación, Línea 1. Asimismo, se realizaron las proyecciones de las emisiones al año 2030.

#### Estimación de emisiones de Línea 1

- Para la operación de la Línea 1, se estimó las emisiones de GEI y CA del 2015 al 2023 con información de la operación del sistema de transporte, y se realizó la proyección de las emisiones del 2024 al 2030.

#### Estimación de reducción de emisiones

- La diferencia entre los escenarios de línea base y Línea 1 en todo el periodo de evaluación, del 2015 al 2030, facilitó el análisis integral del impacto de la operación de la Línea 1 en términos de reducción de GE y CA.

#### Descripción de calidad de aire

- Se solicitó información a SENAMHI, DIGESA y ATU y a partir de los datos disponibles, se obtuvo el estado de la calidad de aire en Lima en los años 2014 al 2022.

#### Evaluación del costo social

- En base a la variación de las concentraciones de emisiones (GEI y CA) por la implementación de la Línea se estimó el costo social asociado a la reducción en todo el periodo de evaluación (2015 al 2030).

#### **4.1.5. Alcances y limitaciones de la investigación**

La investigación se enfoca en el análisis de los beneficios por la reducción de emisiones de GEI y CA generados por la implementación de la Línea 1 en un periodo de tiempo que va del año 2015 al 2030.

Se estimaron las emisiones GEI en base a los documentos *VCS Project Description: Metro Line 1, Perú* versión 3.0 y *VCS Monitoring Report: Metro Line 1, Peru* versión 3.0 elaborados por la empresa DEUMAN SAC para la AATE, considerando información real a la fecha y los efectos por el COVID-19.

De acuerdo con las consideraciones metodológicas para la estimación de GEI para un sistema masivo de tránsito rápido, no se analizaron las emisiones provenientes del transporte de carga, aéreo, ferroviario o de barco en la ciudad. Tampoco se evaluaron las emisiones causadas por el transporte remanente como los taxis, carros privados, motocicletas y transporte público convencional.

La disponibilidad de información sobre algunas variables como la del parque automotor, las proyecciones de operación de la Línea 1, estaciones de monitoreo cercanas al sistema de transporte en evaluación, datos históricos completos de las variables de calidad de aire analizadas, entre otros, no están disponibles.

## **4.2. METODOLOGÍAS APLICADAS**

### **4.2.1. Metodología para la estimación de emisiones**

Clean Development Mechanism (2011) propone para el cálculo de emisiones de GEI la metodología ACM0016 *Mass Rapid Transit Projects, version 03.0*.

En los documentos *VCS Project Description: Metro Line 1, Peru version 3* (2014) y *VCS Monitoring Report: Metro Line 1, Peru version 3* (2017) elaborados por la empresa DEUMAN SAC para la AATE, se consideró 2015 como año inicial de la operación de todo el sistema, debido a que a finales del año 2014 se estimó que se culminaría el proceso de integración del sistema de los tramos I y II.

Por eso, el año inicial de operación de la Línea 1 en toda su extensión, es decir para ambos tramos, es a partir del año 2015 para la presente investigación. Se utilizó la metodología antes descrita para la estimación de las emisiones de CA (PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>).

#### **4.2.1.1. Cálculo de las emisiones de línea base**

Para el caso de los GEI y CA se usa la metodología la ACM0016, que precisa que las emisiones que se consideran en el escenario de línea base y Línea

1 son solo de CO<sub>2</sub>. Las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O son una fuente menor de emisiones de las totales generadas por los vehículos de diésel y gasolina, por lo que no considerar estas emisiones en la línea base y la línea 1 es conservador de acuerdo con lo planteado por la metodología. Para estimar las emisiones se siguieron los siguientes pasos:

1. Identificar las categorías vehiculares relevantes (*i*).
2. Identificar el factor de emisión por km y categoría vehicular (FE<sub>km</sub>), con la siguiente ecuación:

$$FE_{km,i,y} = \sum_x [SFC_{x,i} \times VCN_x \times FE_{CO_2,x} \times N_{x,i}] \times \frac{IR_i^{t+y}}{N_i}$$

donde:

FE<sub>km,i,y</sub>: factor de emisión por km de categoría vehicular “*i*” en el año “*y*” (g CO<sub>2</sub>/km)

SFC<sub>x,y</sub>: consumo del tipo de combustible “*x*” por categoría vehicular “*i*” (g/km)

VCN<sub>x,y</sub>: valor calorífico neto del tipo de combustible “*x*” en el año “*y*” (J/volumen de combustible)

FE<sub>CO<sub>2</sub>,x,y</sub>: factor de emisión por tipo de combustible “*x*” en el año “*y*” (gCO<sub>2</sub>/J)

N<sub>i</sub>: número de vehículos por categoría vehicular “*i*” previo al proyecto (N° unidades)

N<sub>i,x</sub>: número de vehículos por categoría vehicular “*i*” y tipo de combustible “*x*” previo al proyecto (N° unidades)

IR<sub>i</sub><sup>t+y</sup>: factor de mejora tecnológica por categoría vehicular por año “*t+y*” (ratio *t*: tiempo de mejora anual, expresado en años (depende de los datos por categoría vehicular)

*y*: año de evaluación

3. Determinar el factor de emisión por km y pasajero (FE<sub>pkm</sub>), con la siguiente ecuación:

$$FE_{pkm,i,y} = \frac{FE_{km,i,y}}{OC_i}$$

donde:

FE<sub>pkm,i,y</sub>: factor de emisión por km pasajero y categoría vehicular “*i*” en un año “*y*” (gCO<sub>2</sub>/pkm)

FE<sub>km,i,y</sub>: factor de emisión por km categoría vehicular *i* en un año *y* (gCO<sub>2</sub>/km)

OC<sub>B</sub>: ocupación promedio de los buses, en la línea base (N° pasajeros)

4. Determinar la línea base del transporte convencional (BE) para un año determinado, con las siguientes ecuaciones:

Las emisiones de línea base por pasajero encuestado se calculan por el modo de transporte usado, las distancias de viajes por modo de transporte y los factores de emisión por modo de transporte.

$$BE_{p,y} = \sum_i BTD_{p,i,y} \times FE_{pkm,i,y} \times 10^{-6}$$

donde:

BE<sub>p,y</sub>: emisiones de línea base por pasajero encuestado “p” en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

FE<sub>pkm,i</sub>: factor de emisión por km pasajero en la categoría vehicular “i” y el año “y” (gCO<sub>2</sub>/pkm)

BTD<sub>p,i,y</sub>: distancia de viaje por pasajero encuestado “p”, por categoría vehicular “i” y año “y” (km)

Las emisiones de referencia de los pasajeros encuestados en el periodo encuestado se calculan:

$$t_{BE_{SPER,y}} = \sum_p (BE_{p,y} \times FEX_{p,y})$$

donde:

t<sub>BE<sub>SPER,y</sub></sub>: estimador del total de emisiones de la línea base en el periodo de la encuesta para el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

BE<sub>p,y</sub>: emisiones de línea base por pasajero encuestado “p” en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

FEX<sub>p,y</sub>: factor de expansión por pasajero encuestado “p”

SPER: periodo encuestado

Las emisiones de Línea Base con un límite inferior de confianza de 95%, se calcula:

$$BE_{y,95\%} = \frac{P_y}{P_{SPER}} \left( t_{BE_{SPER,y}} - Z_{0.975} \times \sqrt{V(t_{BE_{SPER,y}})} \right)$$

donde:

$BE_{y,195\%}$ : emisión de línea base en el año “y” tomando como límite inferior del intervalo de confianza del 95% ( $tCO_2$ )

$t_{BE\ sper,y}$ : estimador del total de emisiones de la línea base en el periodo de la encuesta para el año “y” ( $tCO_2$ )

$V(t_{BE\ sper,y})$ : estimador de la varianza para  $t_{BE\ sper,y}$  ( $tCO_2$ )<sup>2</sup>

$Z_{0,975}$ : valor para el intervalo de confianza de 95%

$P_y$ : número total de pasajeros en el año “y”

$P_{SPER}$ : número de pasajeros en el periodo de tiempo de la encuesta

p: pasajeros encuestados

#### 4.2.1.2. Cálculo de las emisiones del proyecto

Para el cálculo de las emisiones de la Línea 1 se realiza con la siguiente fórmula:

$$PE_y = IPE_y + DPE_y$$

donde:

$PE_y$ : emisiones del proyecto en el año “y” ( $tCO_2$ )

$DPE_y$ : emisiones directas del proyecto en el año “y” ( $tCO_2$ )

$IPE_y$ : emisiones indirectas del proyecto en el año “y” ( $tCO_2$ )

Las emisiones directas (DPE) de un sistema de transporte que utiliza energía eléctrica son calculadas con la siguiente fórmula:

$$DPE_y = EP_{E,y} = \sum EC_{PJ,j,y} \times EF_{EL,j,y} \times (1 + TDL_{j,y})$$

donde:

$DPE_y$ : emisiones directas del proyecto en el año “y” ( $tCO_2$ )

$EP_{EC}$ : emisiones del proyecto por el consumo de energía eléctrica en el año “y” ( $tCO_2$ )

$EC_{PJ,j,y}$ : cantidad de energía eléctrica consumida por el proyecto del recurso “j” en el año “y” (MWh/año)

$EF_{grid,y}$ : factor de emisión para la generación eléctrica en el año “y” ( $tCO_2/MWh$ )

$TDL_{j,y}$ : promedio de pérdidas técnicas en la transmisión y distribución de la provisión eléctrica para el recurso “j” en el año “y”

J: fuente del consumo eléctrico del proyecto

El factor de emisión para la generación eléctrica ( $EF_{grid,CM,y}$ ) se calcula con la siguiente fórmula:

$$EF_{grid,CM,y} = EF_{grid,OM,y} \times W_{OM} + EF_{grid,BM,y} \times W_{BM}$$

donde:

$EF_{grid,BM,y}$ : factor de emisión de construcción marginal en el año “y” (tCO<sub>2</sub>/MWh)

$EF_{grid,OM,y}$ : factor de emisión de operación marginal en el año “y” (tCO<sub>2</sub>/MWh)

$W_{OM}$ : ponderación del factor de emisión de operación marginal (%)

$W_{BM}$ : ponderación del factor de emisión de construcción marginal (%)

Para el cálculo de las emisiones indirectas (IPE) del sistema de transporte que utiliza energía eléctrica con un límite inferior de confianza de 95%, se calcula:

$$IPE_{y,95\%} = \frac{P_y}{P_{SPER}} \left( t_{BE_{SPER,y}} - Z_{0.975} \times \sqrt{V(t_{BE_{SPER,y}})} \right)$$

donde:

$IPE_{y,95\%}$ : emisiones indirectas del proyecto en el año “y” tomando como límite inferior del intervalo de confianza del 95% (tCO<sub>2</sub>)

$t_{BE_{SPER,y}}$ : estimador del total de emisiones de la línea base en el periodo de la encuesta para el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

$V(t_{BE_{SPER,y}})$ : estimador de la varianza para  $t_{BE_{SPER,y}}$  (tCO<sub>2</sub>)<sup>2</sup>

$Z_{0.975}$ : valor para el intervalo de confianza de 95%

$P_y$ : número total de pasajeros en el año “y”

$P_{SPER}$ : número de pasajeros en el periodo de tiempo de la encuesta

$p$ : pasajeros encuestados

#### 4.2.1.3. Cálculo de las emisiones fugitivas

Las emisiones fugitivas son calculadas como:

$$LE_y = LE_{LFB,y} + LE_{LFT,y} + LE_{Con,y} + LE_{UP,y}$$

donde:

$LE_y$ : emisiones fugitivas en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

$LE_{LFB,y}$ : emisiones fugitivas debido al cambio del factor de carga de los buses en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

LE<sub>LFT,y</sub>: emisiones fugitivas debido al cambio del factor de carga de los taxis en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

LE<sub>Con,y</sub>: emisiones fugitivas debido al cambio en la congestión en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

LE<sub>UP,y</sub>: emisiones fugitivas debido a las emisiones de aguas arriba de los combustibles gaseosos en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

#### 4.2.1.4. Cálculo de reducción de emisiones

La reducción de emisiones de GEI fue calculada con la siguiente fórmula:

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y$$

donde:

ER<sub>y</sub>: emisiones reducidas en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

BE<sub>y</sub>: emisiones de línea base en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

PE<sub>y</sub>: emisiones de proyecto en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

LE<sub>y</sub>: emisiones fugitivas en el año “y” (tCO<sub>2</sub>)

#### 4.2.2. Metodología para describir la calidad de aire

Dado que el Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao presenta un listado de estaciones usadas para conocer el estado de la calidad de aire para Lima y Callao, se solicitó información a SENAMHI, DIGESA y ATU de las estaciones de monitoreo de calidad de aire que se encuentren más cercanas al área en estudio.

#### 4.2.3. Metodología para estimar los costos sociales

La estimación de los costos sociales relacionados a la reducción de GEI y CA se realizó multiplicando las emisiones evitadas por la implementación de la Línea 1, con los factores de costo social establecidos por Parry et al. (2014) y el Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico (2016), a través de la siguiente fórmula:

$$CS = E(ton) \times FCS \left( \frac{US\$}{ton} \right)$$

donde:

CS: costo social

E: emisión estimada total para un determinado parámetro

FCS: factor de costo social asociado a tonelada evitada

#### 4.2.4. Fuente de información

Para el desarrollo de las metodologías detalladas previamente, se contó con diversas fuentes de información que se describen en la tabla 4:

**Tabla 4:** *Información requerida para la investigación y la fuente de información*

<b>Tipo de información</b>	<b>Información requerida</b>	<b>Fuente</b>
Información de operación de Línea 1	<i>VCS Project Description: Metro Line 1, Peru version 3</i> <i>VCS Monitoring Report: Metro Line 1, Peru version 3</i>	VERRA
	Diseño muestral, desarrollo de encuestas y determinación de los kilómetros recorridos por modo de transporte por pasajero encuestado considerando escenarios con y sin metro de Lima	AATE
	Número de pasajeros que transporta la Línea 1 del año 2015 al 2023	ATU
	Información del consumo de energía eléctrica de la Línea 1 del Balance Nacional de Energía (BNE)	MINEM
	Informes de sostenibilidad de la Línea 1	Tren Urbano de Lima S.A.
Información de la flota vehicular	<i>VCS Project Description: Metro Line 1, Peru version 3</i>	VERRA
Información de los factores de emisiones	Directrices del IPCC 2006 para el GEI y del Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao para los CA	IPCC MINAM
Información del estado de la calidad del aire	Información de las estaciones de monitoreo de calidad de aire en Lima y Callao	SENAMHI DIGESA ATU
Información de los factores de costo social	<i>Getting energy prices right: From principle to practice.</i>	Fondo Monetario Internacional
	Estimación del precio social del carbono para la evaluación social de proyectos en el Perú.	Ministerio de Economía y Finanzas

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de la investigación y la discusión de estos.

### 5.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 5.1.1 Emisiones de línea base

La línea base de la investigación consistió en estimar cuáles son las condiciones de la ciudad (Lima y Callao) en términos de GEI y CA generados en un escenario donde se continúan usando los modos de transporte convencionales (microbuses, buses, combis, Metropolitano, taxis y transporte privado, los mismos que consumen combustibles como el diésel, gasolina, GLP o GNV), considerando que la Línea 1 no se hubiera implementado.

Adicionalmente, se precisa que para la investigación sólo se consideran las emisiones de CO<sub>2</sub>, tanto para las emisiones de línea base y Línea 1, debido a que las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O no son significativas comparadas con el CO<sub>2</sub> y porque la metodología ACM00016 señala estas emisiones son una fuente menor en vehículos diésel y gasolina. Las emisiones de CA evaluadas son PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>.

#### Encuestas de transporte

1. Para la investigación se utilizó los resultados del documento Diseño muestral, desarrollo de encuestas y determinación de los kilómetros recorridos por modo de transporte por pasajero encuestado considerando escenarios con metro de Lima 1 y sin este, conducido por la empresa Taryet (2015). La encuesta se realizó entre el 10 al 17 abril y del 25 al 28 de abril de 2015 a los pasajeros que usan la Línea 1.

Como la metodología lo señala, las emisiones se obtienen de la diferencia de los modos de transporte que los pasajeros habrían utilizado en ausencia de la Línea 1, por lo que las emisiones de referencia se calculan por pasajero encuestado. Este resultado permite obtener las emisiones de

todos los pasajeros en la semana específica de la encuesta y estos a su vez se multiplican por el total de pasajeros que usaron la Línea 1 del período en evaluación.

### **Categorías vehiculares**

2. Se identificaron las categorías vehiculares relevantes en Lima Metropolitana en el año base (*i*)
  - Metropolitano (BRT-COSAC)
  - Buses (grandes, medianos y pequeños)
  - Taxis
  - Vehículos particulares

### **Factores de emisión (FE)**

3. Se determinó el factor de emisión por km y categoría vehicular ( $FE_{km}$ ), para GEI ( $CO_2$ ) y CA ( $PM_{2,5}$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$ ) referido a los kilómetros recorridos por una determinada categoría vehicular.

Para el cálculo  $FE_{km}$  de  $CO_2$  se utilizó información del FE ( $kgCO_2/TJ$ ) de las Directrices del IPCC de 2006, para la gasolina, diésel y GLP, mientras que para el GNV se utilizó el valor reportado en el Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero (RAGEI) del sector Energía - Combustión Estacionaria y Emisiones Fugitivas del año 2019 (ver Anexo 1-C).

Para el cálculo del  $FE_{km}$  de CA se utilizó el FE ( $g/km$ ) de contaminantes atmosféricos ( $PM_{2,5}$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$ ) por tipo de combustible ajustados por la cantidad de biocombustible y el contenido de azufre, obtenido del Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao (ver Anexo 1-C).

El número de vehículos (*N*) se obtuvo del documento *VCS Project Description: Metro Line 1, Peru* que consideró información de la Municipalidad Metropolitana de Lima, debido a que luego de las consultas a diversas entidades públicas sobre el número de vehículos por tipo de

combustible no se logró obtener información más actualizada (ver Anexo 1-B).

El factor de mejora tecnológica por categoría vehicular ( $IR_i$ ) usado fue la constante de la metodología ACM0016 versión 03.0.0 fue 0,99 para todos los tipos de categoría vehicular para el  $CO_2$ . En tanto, el  $FE_{km}$  para GEI y CA de “buses convencionales” se calculó a partir de los FE de los buses largos, medidos y pequeños de acuerdo con la metodología ACM0016.

Con la información antes descrita, se calculó el  $FE_{km}$  que se presenta en el Anexo 1-D para todos los parámetros evaluados.

4. Se determinó el factor de emisión por km y pasajero ( $FE_{pkm}$ ), referido a los kilómetros promedio de viaje de un pasajero, el cual se determina conociendo el factor de emisión por km de la categoría vehicular.

La tasa de ocupación por tipo de vehículos ( $OC_i$ ) antes del proyecto se obtuvo del *VCS Project Description: Metro Line 1, Peru* presente en el Anexo 1-B.

Se utilizó la fórmula descrita en la metodología y se obtuvieron los resultados para el factor de emisión por km pasajero ( $FE_{pkm}$ ) y categoría vehicular para todos los años en evaluación para los parámetros de GEI y CA, tal como se presentan en el Anexo 1-E.

### **Escenario línea base (BE)**

5. Se estimó la línea base para el transporte convencional considerando el resultado de las encuestas, la distancia de viaje por pasajero y los valores estimados previamente. Los resultados obtenidos de GEI ( $CO_2$ ) y CA ( $PM_{2,5}$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$ ) se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5: Emisiones de línea base de GEI y CA de los año 2015-2030**

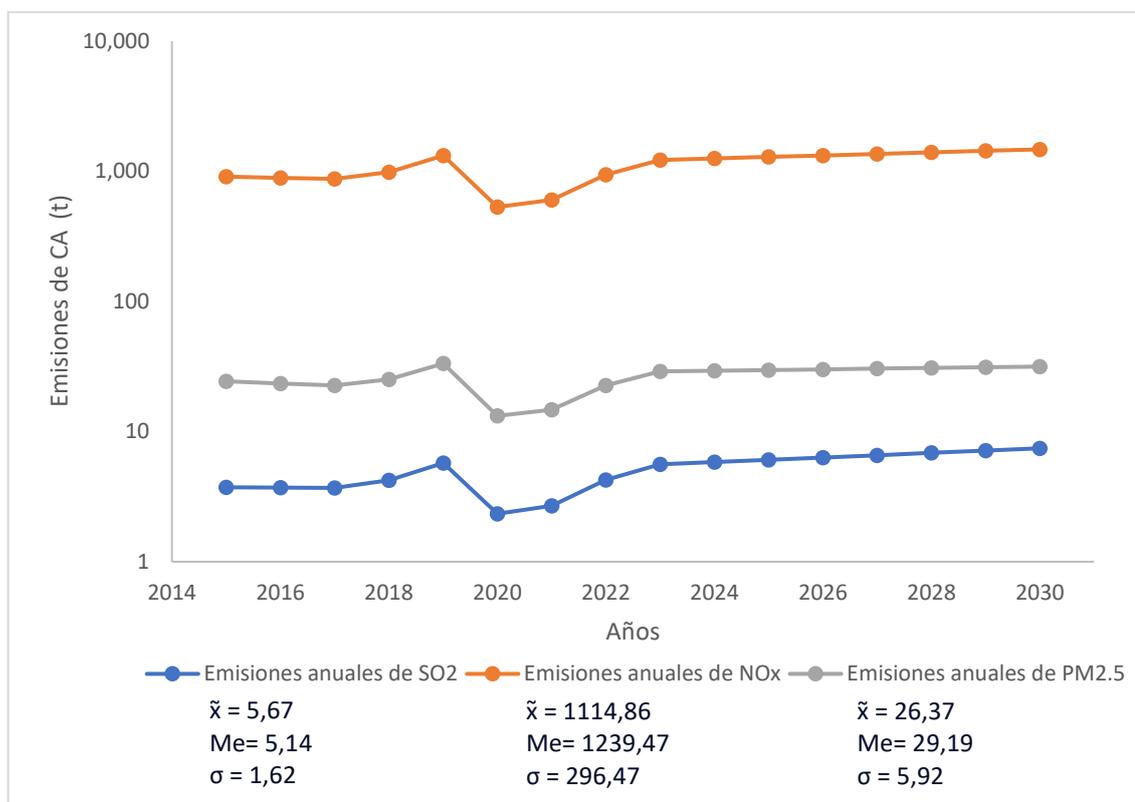
Año	Emisiones de BE (tCO <sub>2</sub> )	Emisiones de BE (tPM <sub>2,5</sub> )	Emisiones de BE (tNO <sub>x</sub> )	Emisiones de BE (tSO <sub>2</sub> )
2015	81 000,70	24,31	911,70	3,73
2016	80 310,52	23,46	892,74	3,71
2017	79 729,89	22,67	875,30	3,69
2018	91 125,50	25,22	988,01	4,22
2019	123 782,16	33,34	1 325,46	5,74
2020	50 361,91	13,20	532,60	2,34
2021	57 853,90	14,76	604,25	2,69
2022	91 386,15	22,69	942,65	4,25
2023	120 039,08	29,01	1 222,86	5,60
2024	124 845,55	29,36	1 256,07	5,83
2025	129 844,47	29,72	1 290,19	6,07
2026	135 043,54	30,09	1 325,22	6,32
2027	140 450,80	30,45	1 361,21	6,58
2028	146 074,56	30,83	1 398,18	6,86
2029	151 923,51	31,20	1 436,15	7,14
2030	158 006,65	31,58	1 475,15	7,44
Acumulado	1 761 778,89	421,90	17 837,75	82,21

De manera gráfica se presentan los resultados en las figuras 6 y 7:



**Figura 6: Emisiones de CO<sub>2</sub> de la línea base (BE)**

Las emisiones de CO<sub>2</sub> de la línea base son generadas por los pasajeros que usan modos de transporte convencional en caso de no existir la Línea 1, con una tendencia de crecimiento en el tiempo evaluado. Para los años 2017 al 2019 presenta un crecimiento exponencial y entre los años 2023 a 2030 un crecimiento lineal. Por otro lado, debido a la pandemia del COVID-19 entre los años 2020 y 2022 las emisiones se redujeron por las restricciones de desplazamiento en las personas en Lima y Callao durante este periodo.



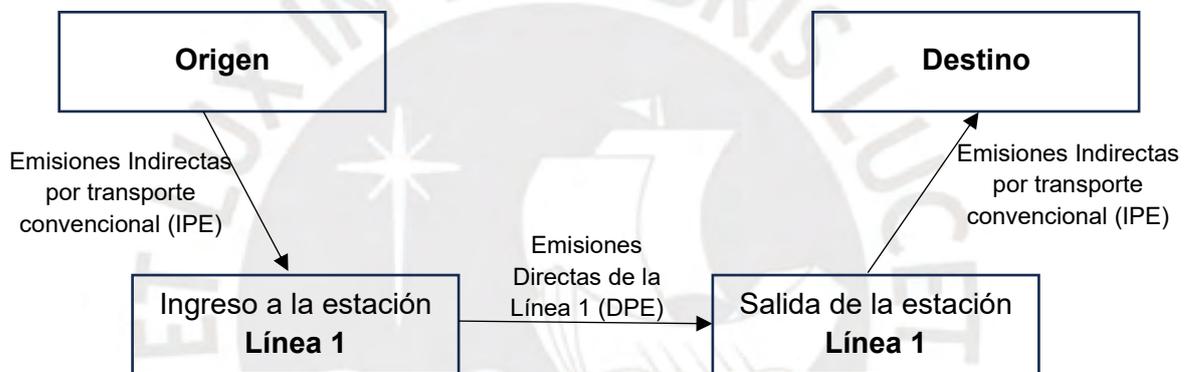
**Figura 7:** Emisiones de CA de la línea base (BE)

Para la presentación de los resultados de todas las emisiones de CA de la línea base se utilizó una escala logarítmica, sin embargo, con esta gráfica no se visualizan las tendencias de crecimiento de manera pronunciada. Para los tres parámetros (PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>) analizados, las tendencias de crecimiento pre-pandemia fueron exponenciales, en el COVID-19 hubo una reducción significativa y para las proyecciones futuras tienen una tendencia de crecimiento lineal, por lo que en los tres periodos las tendencias son similares a las de la gráfica para CO<sub>2</sub>.

### 5.1.2 Emisiones de la Línea 1

Las emisiones de la Línea 1 (PE) se conforman por las Emisiones Indirectas (IPE) y las Emisiones Directas (DPE).

Se entiende como IPE aquellas emisiones generadas desde el origen del viaje hasta llegar a la estación de abordaje de la Línea 1, así como desde la salida de la estación de la Línea 1 hasta llegar al destino final del viaje, en este trayecto se usan diversos modos de transporte convencional (buses, couster, combis y taxis). Entre tanto, DPE son aquellas generadas por la operación de la Línea 1 por el consumo de energía eléctrica. Estas emisiones se muestran de manera esquemática en la figura 8:



**Figura 8:** Esquema de las emisiones directas e indirectas de la Línea 1

Es así como la estimación de las emisiones del sistema en evaluación (Línea 1) se logra considerando las emisiones de GEI y CA que se dan entre el transporte convencional y el uso de la Línea 1.

#### **Emisiones directas (DPE) de la Línea 1**

La Línea 1 es un sistema de transporte masivo que usa la energía eléctrica como fuente de operación. Por ello, se calculó el factor de emisión de margen combinado ( $EF_{CM}$ ) de  $CO_2$  de la generación de eléctrica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), que se presenta en el Anexo 1-G.

El  $EF_{CM}$  se calculó con el promedio ponderado del factor de emisión de margen de operación ( $EF_{OM}$ ) y el factor de emisión de margen de construcción ( $EF_{BM}$ ). Para este último se consideró el valor constante (0,4822

tCO<sub>2</sub>/MWh) estimado en el *VCS Project Description: Metro Line 1, Peru*. Para el EF<sub>BM</sub> se utilizó la metodología presentada en el documento “Factores de emisión nacionales asociados con el consumo de electricidad del sistema eléctrico interconectado nacional” (Córdova Rau, s/f), utilizando información del volumen de combustible consumido para la generación eléctrica, los factores de emisiones de CO<sub>2</sub> por tipo de combustible y la energía eléctrica generada por el SEIN, presentada en el Anexo 1-F.

Para el cálculo de la DPE se utilizaron las pérdidas por transmisión y distribución para los años 2015 al 2018 obtenidos de Córdova Rau (s/f). Por otro lado, la cantidad de energía eléctrica consumida por la Línea 1 se extrajo de los Informes de Sostenibilidad de la Línea 1 de los años 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020 (Tren Urbano de Lima S.A., s/f), en tanto el consumo energético para el año 2021 se obtuvo del Balance Nacional de Energía 2021 (Ministerio de Energía y Minas, 2023a). La información mencionada se presenta en el Anexo 1-F.

El resultado de la estimación de DPE de CO<sub>2</sub> generadas por la Línea 1 se presenta en la tabla 6.

**Tabla 6:** Emisiones directas de CO<sub>2</sub> de los año 2015-2030

<b>Año</b>	<b>Emisiones de DPE (tCO<sub>2</sub>)</b>
2015	18 139,02
2016	17 891,73
2017	17 539,76
2018	20 466,22
2019	26 425,32
2020	26 221,63
2021	27 200,53
2022	31 491,53
2023	34 594,86
2024	36 955,91
2025	39 315,80
2026	41 674,52
2027	44 032,08
2028	46 388,47
2029	48 743,70
2030	51 097,78
Acumulado	528 178,83
Promedio anual	33 011,18
Mediana	33 043,19
Desviación estándar	11 489,08

Con respecto a las emisiones de CA generadas por la producción de energía eléctrica del SEIN, para el caso en estudio se consideraron como cero debido a que las tecnologías usadas para la generación eléctrica utilizan sistemas de control de emisiones y, por tanto, se estima que la generación es mínima.

### **Emisiones indirectas (IPE) de la Línea 1**

Las emisiones indirectas (IPE) de GEI y CA, como se mencionó previamente, son aquellas generadas por los desplazamientos en transporte convencional desde el origen del viaje hasta ingresar a la estación de la Línea 1, y luego aquellas generadas desde la salida de la estación hasta llegar al destino final del viaje. Con los resultados de la encuesta y el factor de expansión de pasajeros encuestados se estimaron las emisiones indirectas, actualizando

la cantidad de pasajeros que ha usado el servicio de la Línea 1. El resultado de las estimaciones anualizadas se presenta en la tabla 7.

**Tabla 7: Emisiones indirectas de GEI y CA de los años 2015-2030**

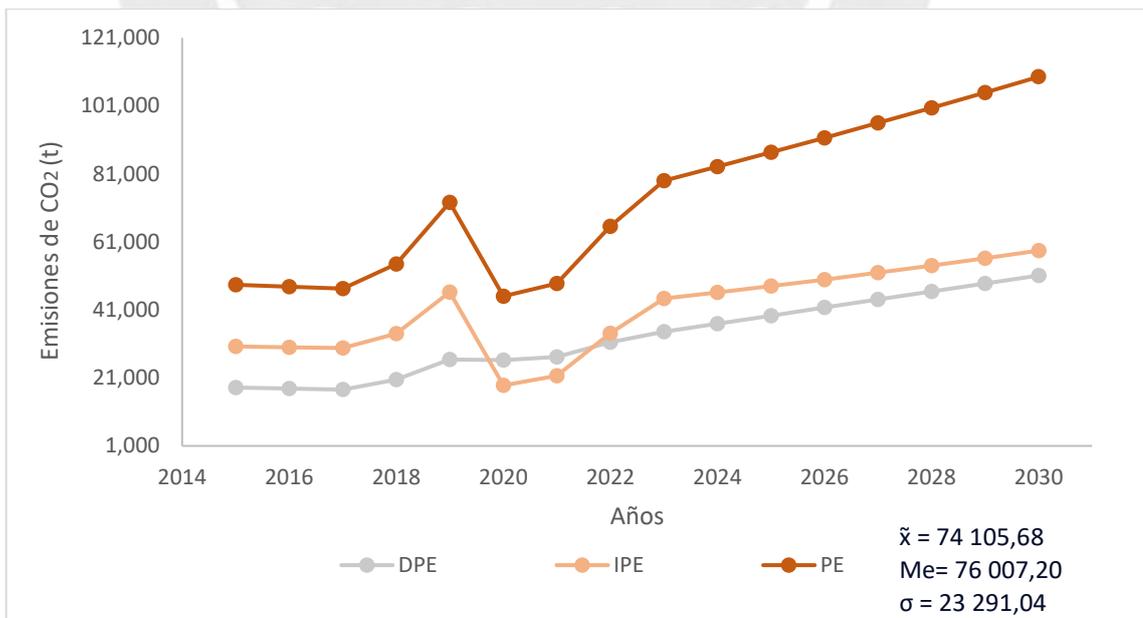
<b>Año</b>	<b>Emisiones de IPE (tCO<sub>2</sub>)</b>	<b>Emisiones de IPE (tPM<sub>2,5</sub>)</b>	<b>Emisiones de IPE (tNO<sub>x</sub>)</b>	<b>Emisiones de IPE (tSO<sub>2</sub>)</b>
2015	30 229,50	6,09	228,08	1,28
2016	29 971,93	5,87	223,09	1,27
2017	29 755,24	5,68	218,51	1,26
2018	34 008,08	6,32	246,38	1,43
2019	46 195,57	8,35	330,18	1,94
2020	18 795,09	3,31	132,53	0,79
2021	21 591,10	3,70	150,20	0,90
2022	34 105,36	5,69	234,07	1,42
2023	44 798,65	7,27	303,33	1,86
2024	46 592,42	7,36	311,23	1,93
2025	48 458,02	7,45	319,35	2,01
2026	50 398,32	7,54	327,67	2,08
2027	52 416,31	7,64	336,21	2,16
2028	54 515,10	7,73	344,97	2,24
2029	56 697,93	7,83	353,96	2,33
2030	58 983,47	7,93	363,19	2,41
Acumulado	657 512,11	105,75	4 422,95	27,32

### **Emisiones del proyecto (PE)**

Las emisiones del proyecto (PE) son las emisiones totales de la Línea 1, que se obtienen de la suma de las emisiones directas (uso de la Línea 1) y de las emisiones indirectas (uso de transporte convencional para llegar a la estación del metro y a la salida de estación hasta su destino); los resultados se muestran en la tabla 8 y en las figuras 8 y 9:

**Tabla 8:** Emisiones del proyecto de GEI y CA de los año 2015-2030

Año	Emisiones de PE (tCO <sub>2</sub> )	Emisiones de PE (tPM <sub>2,5</sub> )	Emisiones de PE (tNO <sub>x</sub> )	Emisiones de PE (tSO <sub>2</sub> )
2015	48 368,52	6,09	228,08	1,28
2016	47 863,66	5,87	223,09	1,27
2017	47 295,00	5,68	218,51	1,26
2018	54 474,30	6,32	246,38	1,43
2019	72 620,89	8,35	330,18	1,94
2020	45 016,72	3,31	132,53	0,79
2021	48 791,63	3,70	150,20	0,90
2022	65 596,88	5,69	234,07	1,42
2023	79 393,51	7,27	303,33	1,86
2024	83 548,33	7,36	311,23	1,93
2025	87 773,82	7,45	319,35	2,01
2026	92 072,84	7,54	327,67	2,08
2027	96 448,39	7,64	336,21	2,16
2028	100 903,57	7,73	344,97	2,24
2029	105 441,64	7,83	353,96	2,33
2030	110 081,25	7,93	363,19	2,41
Acumulado	1 185 690,94	105,75	4 422,95	27,32



**Figura 9:** Emisiones de CO<sub>2</sub> de la Línea 1 (PE)

Las emisiones directas del proyecto mantienen un crecimiento lineal en el tiempo a pesar de la pandemia de COVID-19 debido a que la operación del sistema no se detuvo. No obstante, las emisiones totales del proyecto sí mantienen la tendencia de crecimiento exponencial, seguido de la reducción por pandemia y el crecimiento lineal, debido a la influencia de las emisiones indirectas del proyecto. Es decir, de las emisiones generadas por los otros modos de transporte convencional que se caracterizan por tener flotas con más de 15 años de antigüedad y consumen principalmente diésel (Ministerio del Ambiente, 2021a, p.36).



**Figura 10:** Emisiones de CA ( $PM_{2,5}$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$ ) de la Línea 1 (PE)

Para el caso de las emisiones de CA, en la figura 10 solo se presentan las emisiones totales del proyecto, sin considerar el desagregado (emisiones directas e indirectas) a fin de mostrar los resultados de manera clara. Estas emisiones mantienen las tendencias de las emisiones de  $CO_2$ , precisando que las mayores emisiones son de  $NO_x$ , seguido de  $PM_{2,5}$  y con menor cantidad de emisiones las de  $SO_2$ .

## **Emisiones fugitivas (LE)**

El documento *VCS Project Description: Metro Line 1, Peru* considera de manera conservadora que las emisiones fugitivas son cero, debido a que la Línea 1 no usa combustibles fósiles, no impacta en el cambio del factor de ocupación de los buses y de taxis, así como no impacta en la congestión vehicular. Esto debido a que no existe una reducción del espacio del tránsito vehicular ya que la infraestructura en la mayor parte de su extensión es un viaducto elevado. En ese sentido, para la presente investigación se asumió lo mismo.

### **5.1.3 Reducción de emisiones**

#### **Cálculo de reducción de emisiones netas**

La operación de la Línea 1 como una medida del Estado peruano en los años de operación de 2015 al 2030 redujo los GEI (CO<sub>2</sub>) y CA (PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>) como se presenta en la tabla 9:

**Tabla 9:** *Reducción de emisiones de GEI y CA de los años 2015-2030*

<b>Año</b>	<b>Reducción de emisiones (ER) (tCO<sub>2</sub>)</b>	<b>Reducción de emisiones (ER) (tPM<sub>2,5</sub>)</b>	<b>Reducción de emisiones (ER) (tNO<sub>x</sub>)</b>	<b>Reducción de emisiones (ER) (tSO<sub>2</sub>)</b>
2015	32 632,18	18,23	683,62	2,45
2016	32 446,86	17,59	669,64	2,44
2017	32 434,89	16,99	656,80	2,43
2018	36 651,20	18,90	741,63	2,79
2019	51 161,28	24,99	995,28	3,80
2020	5 345,19	9,89	400,07	1,55
2021	9 062,27	11,06	454,05	1,79
2022	25 789,26	17,00	708,58	2,83
2023	40 645,58	21,74	919,54	3,73
2024	41 297,21	22,00	944,84	3,89
2025	42 070,65	22,27	970,84	4,06
2026	42 970,71	22,54	997,55	4,24
2027	44 002,41	22,81	1 025,00	4,42
2028	45 170,99	23,09	1 053,21	4,62
2029	46 481,87	23,37	1 082,18	4,81
2030	47 925,40	23,66	1 111,96	5,02
Acumulado	576 087,95	316,15	13 414,80	54,89

En el periodo evaluado, se estimó una reducción promedio anualizada de 36 005 tCO<sub>2</sub> resaltando que en los años 2020 y 2021 este valor fue 5345 y 9062 tCO<sub>2</sub> respectivamente. Además, se obtuvo un total de emisiones acumuladas de 576 087,95 tCO<sub>2</sub>.

Con respecto a las emisiones de PM<sub>2,5</sub>, se obtuvo una reducción promedio anualizada de 19,76 tPM<sub>2,5</sub>, así como un total de emisiones acumuladas de 316,15 tPM<sub>2,5</sub>. Sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> en el periodo evaluado, se obtuvo el estimado de reducción promedio anualizado de 838,42 tNO<sub>x</sub> y una acumulación de emisiones de 13 414,80 tNO<sub>x</sub>. Y respecto a las emisiones de SO<sub>2</sub>, se observó una reducción promedio anualizada de 3,43 tSO<sub>2</sub>, así como un total de emisiones acumuladas de 54,89 tSO<sub>2</sub>.

#### **5.1.4 Descripción de la calidad de aire**

Para conocer el estado de la calidad de aire en Lima Metropolitana, se recolectó información de diversas estaciones de monitoreo de calidad de aire de la ciudad más próximas a la Línea 1, y cuyas ubicaciones se presentan en los Anexos 3-A y 3-B. Las tendencias de las emisiones de PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> se presentan en las figuras 11, 12 y 13.

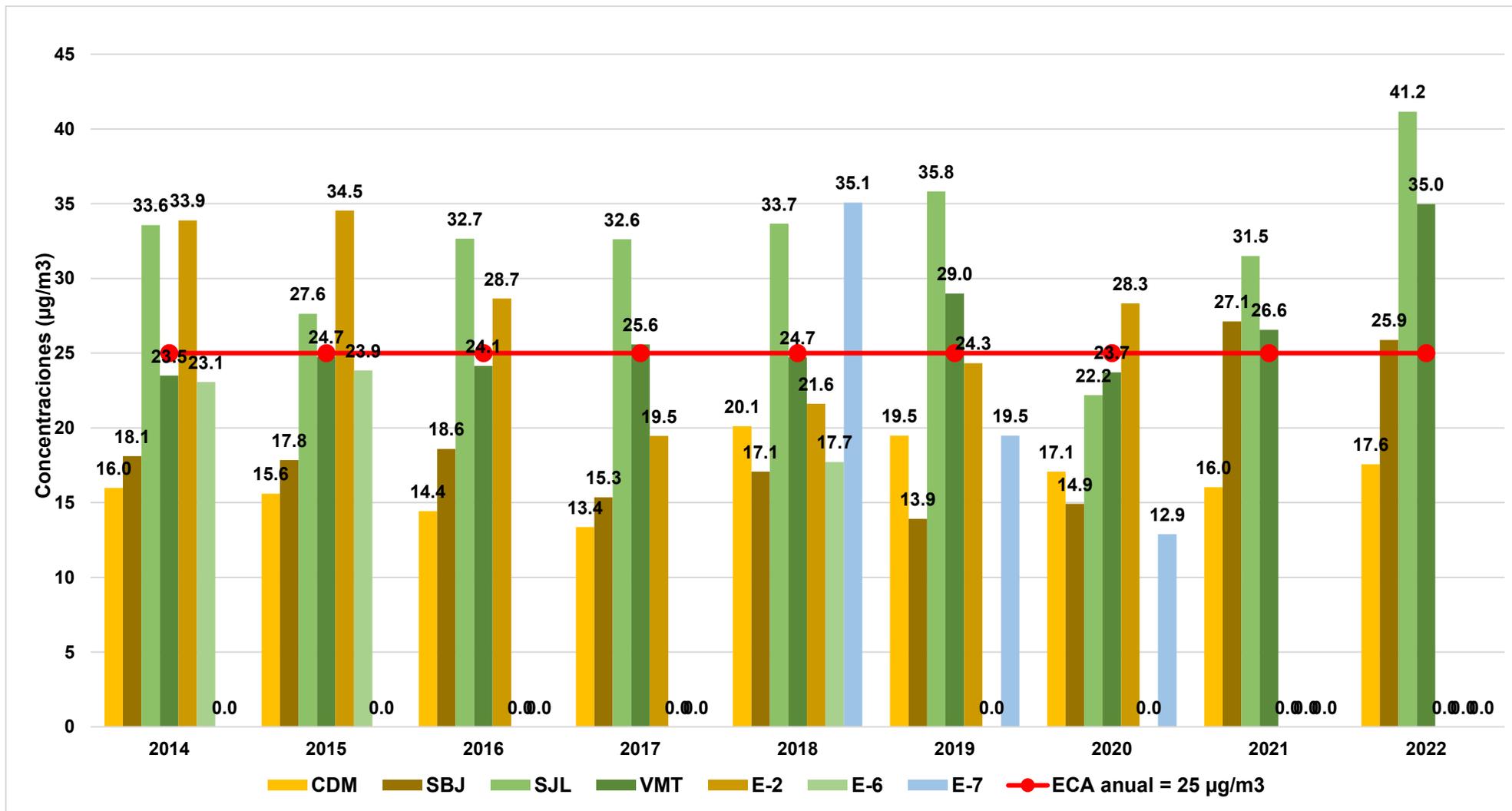


Figura 11: Concentraciones promedio anual de PM<sub>2.5</sub> del 2014-2022

Sobre las concentraciones promedios anuales de  $PM_{2,5}$  se observó que en casi todos los años evaluados se sobrepasa el ECA anual de  $PM_{2,5}$  en, por lo menos, dos estaciones de monitoreo, con excepción del año 2020 cuando solo se sobrepasa en la estación E-2 (Hospital María Auxiliadora).



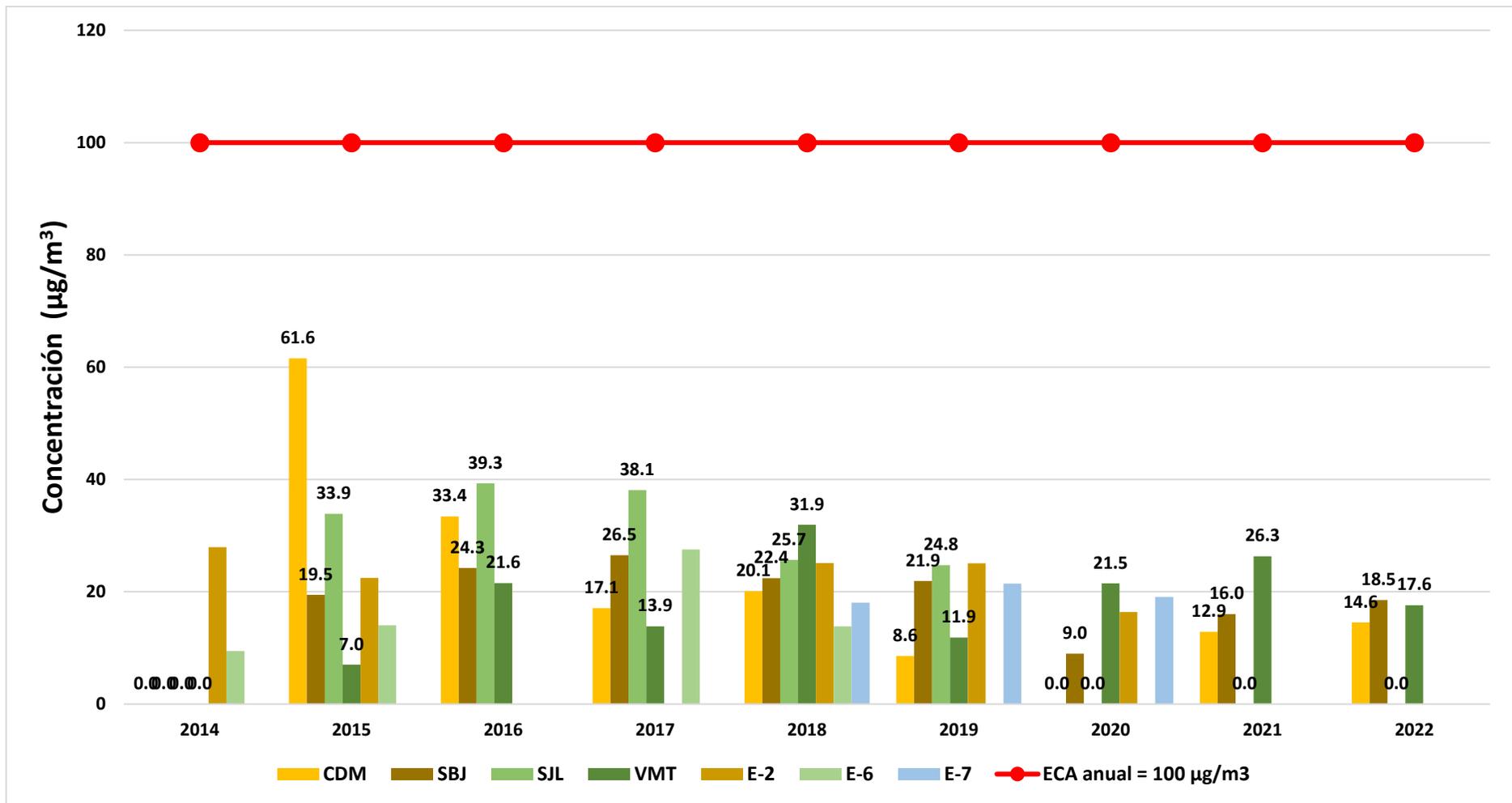


Figura 12: Concentraciones promedio anual de NO<sub>2</sub> del 2014-2022

Con respecto a las emisiones de NO<sub>2</sub>, se observó que en ninguno de los años evaluados se ha sobrepasado el ECA anual de NO<sub>2</sub>.

Por otro lado, la estación de Campo de Marte (CDM) en el año 2015 ha sido donde se ha registrado la mayor concentración de NO<sub>2</sub> en todo el periodo evaluado. La estación Almacén MINSA (E-7) solo presenta información para tres años (2018 - 2020). Y en el año 2022 solo se cuenta con información de tres estaciones de monitoreo (CDM, SBJ y VMT) que son de SENAMHI.



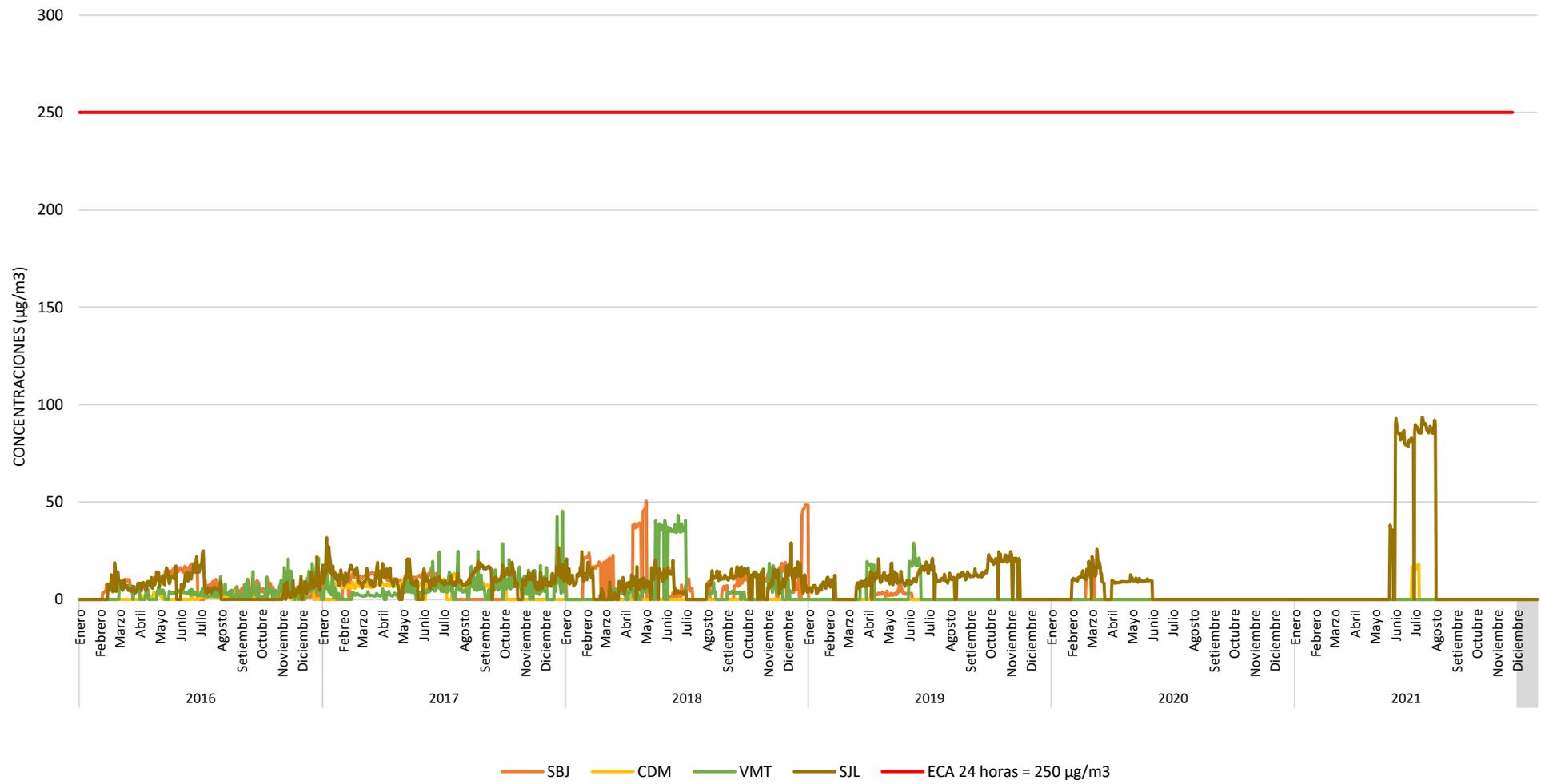


Figura 13: Concentraciones 24 horas de SO<sub>2</sub> del 2016-2021

La información analizada para el SO<sub>2</sub> fue del periodo 2014 al 2022, sin embargo, en los años 2014, 2015 y 2022 no se reportaron datos, es por lo que la figura solo presenta información de los años con información.

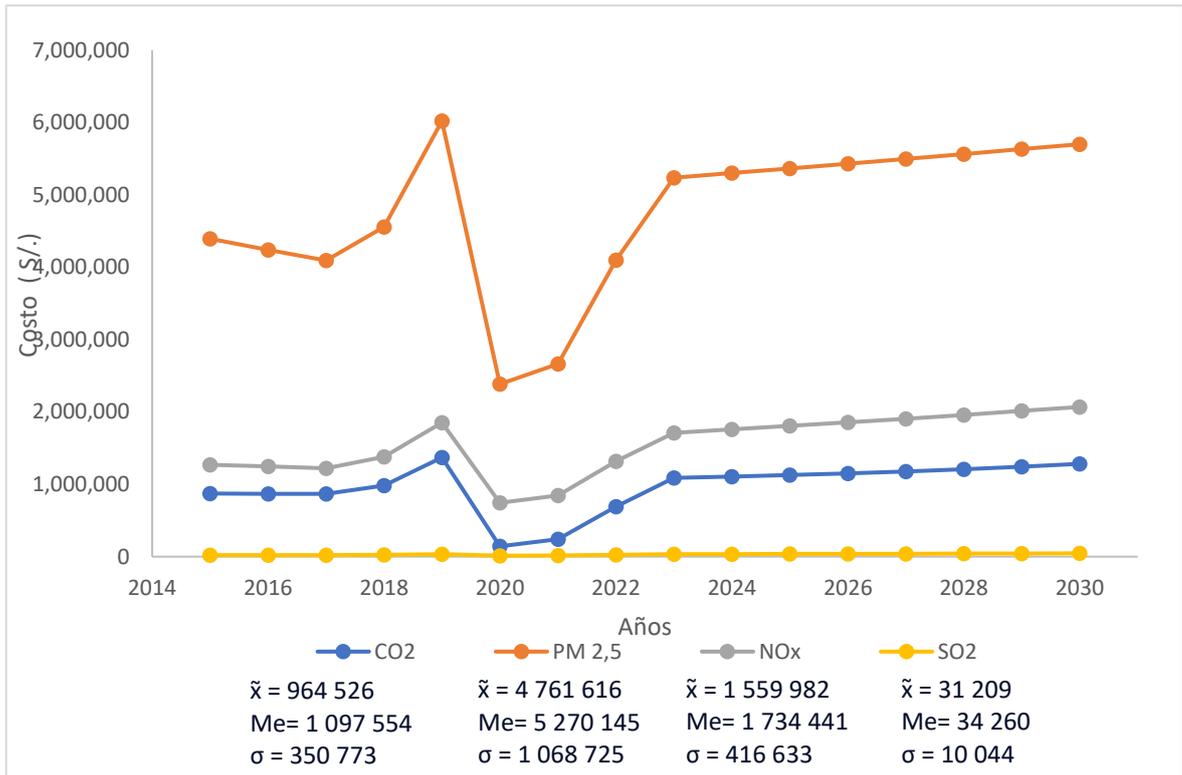
Sobre las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub>, se observó que la mayor concentración se dio en la estación SJL (San Juan de Lurigancho) en el año 2021, en cambio en la estación SBJ (San Borja) y VMT (Villa María del Triunfo) reportó concentraciones cercanas a 50 µg/m<sup>3</sup> en el año 2018. Asimismo, se observó que en ninguno de los años evaluados se ha sobrepasado el ECA (24 horas) de SO<sub>2</sub>.

### 5.1.5 Evaluación del costo social

El costo social identificado por la reducción de emisiones de GEI y CA de la operación de la Línea 1 se muestra en la tabla 10 y figura 14.

**Tabla 10:** Costo social de la operación de la Línea 1 de los años 2015-2030

Año	Costo social por CO <sub>2</sub> (S/.)	Costo social por PM <sub>2,5</sub> (S/.)	Costo social por NO <sub>x</sub> (S/.)	Costo social por SO <sub>2</sub> (S/.)
2015	874,161.07	4,392,731.78	1,271,958.13	22,313.54
2016	869,196.71	4,238,584.62	1,245,939.78	22,198.94
2017	868,876.13	4,095,171.08	1,222,041.91	22,113.14
2018	981,823.76	4,555,051.31	1,379,891.58	25,358.79
2019	1,370,524.47	6,021,627.61	1,851,838.10	34,561.76
2020	143,188.72	2,384,297.64	744,366.48	14,108.44
2021	242,762.82	2,665,589.99	844,805.43	16,260.68
2022	690,850.90	4,097,731.90	1,318,389.34	25,769.48
2023	1,088,826.56	5,238,274.99	1,710,901.55	33,959.22
2024	1,106,282.79	5,302,016.98	1,757,981.16	35,433.02
2025	1,127,001.74	5,366,534.52	1,806,355.37	36,969.98
2026	1,151,112.80	5,431,837.10	1,856,059.77	38,572.77
2027	1,178,750.47	5,497,934.21	1,907,130.92	40,244.20
2028	1,210,054.72	5,564,835.56	1,959,606.36	41,987.18
2029	1,245,171.07	5,632,550.92	2,013,524.70	43,804.74
2030	1,283,840.72	5,701,090.18	2,068,925.57	45,700.04
Acumulado	15,432,425.46	76,185,860.37	24,959,716.15	499,355.91



**Figura 14:** Costo social asociado a GEI y CA evitado por la Línea 1

En ese sentido, luego de estimar la reducción de las emisiones de GEI y CA producto de la operación de la Línea 1, y con los factores del costo social para el país, el valor monetario del daño evitado por dejar de emitir de manera acumulada en los quince años de evaluación para el CO<sub>2</sub> asciende a S/. 15,432,425 para el caso de PM<sub>2,5</sub> es de S/. 76,185,860, NO<sub>x</sub> de S/.24,959,716 y SO<sub>2</sub> S/.499,355.

### 5.1.6 Entrevistas

Las entrevistas se realizaron el 04, 05, 07, 09 y 13 de octubre del 2023, y estuvieron enfocadas en la operación de la Línea 1, la reducción de emisiones y el estado de la calidad de aire en Lima. Se contactó con seis profesionales: experto en cambio climático (Freddy Garro Flores), dos expertos en calidad de aire (Luis Ibañez Guerrero y un funcionario público), tres expertos en transporte (exfuncionario público del MTC, funcionario de ATU y asesor de cooperación internacional). Los profesionales llenaron la ficha de consentimiento informado y su experiencia y reflexión han aportado

para la discusión de los resultados que se presentan en los siguientes apartados.

## **5.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **5.2.1 Línea 1 como sistema de transporte sostenible**

Un transporte urbano sostenible debe garantizar la protección del ambiente, mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y fortalecer el desarrollo económico, por lo que se identifica que la Línea 1 es un transporte sostenible, que coincide con la opinión de los seis expertos entrevistados, porque considera el triple enfoque de la sostenibilidad que se describe a continuación.

#### **5.2.1.1. Enfoque ambiental**

Es un transporte masivo que usa una matriz energética limpia y, a la fecha, el único medio de transporte eléctrico a nivel nacional. La energía eléctrica utilizada proviene del SEIN, que es considerada como una de las más limpias a nivel mundial porque la generación histórica proviene en más de 50% de centrales hidroeléctricas y energías renovables. Por ejemplo, según el Ministerio de Energía y Minas (2023b) en el año 2019 la participación de las centrales hidráulicas fue de 56,6%, seguida de las centrales térmicas con 39% y energías renovables con 4,4%. Asimismo, los combustibles usados en las centrales térmicas para ese mismo año fue 89,1% de gas natural, 6,41% de bagazo y 4,49% de carbón mineral, petróleo, diésel, biodiésel y biogás.

Por el uso de este tipo de energía, la operación de la Línea 1 genera una reducción de emisiones directas de GEI y CA por el cambio de uso de vehículos convencionales (buses, combis, couster y taxis) que usan combustibles fósiles a un sistema masivo de transporte eléctrico. No obstante, está asociada a emisiones de GEI por la generación de energía proveniente del SEIN, pero que tiene un impacto menor en emisiones comparada con el parque automotor convencional. Debido a eso, existe una

gran oportunidad para reducir emisiones locales en la ciudad y emisiones globales que suma a la ambición climática que tiene Perú ante la comunidad internacional.

#### **5.2.1.2. Enfoque social**

Para la sociedad es útil y atractivo el sistema por:

- La optimización de los tiempos de viaje ha reducido el tiempo de recorrido entre ambos puntos extremos (Villa El Salvador y San Juan de Lurigancho).
- La rapidez en el traslado de las personas, por ser un sistema masivo y con frecuencias definidas.
- La asequibilidad por el bajo costo del pasaje que asciende a S/. 1.50.
- La accesibilidad, dado que la infraestructura permite el acceso a personas con habilidades diferentes al sistema.
- La conectividad, mayor conexión de uno de los distritos más poblados del país (San Juan de Lurigancho) con el centro (Centro de Lima y Gamarra) y sur de la ciudad (Villa El Salvador).
- La reducción de accidentes de tránsito por el retiro de circulación a varias líneas de transporte convencional en el trayecto de operación del sistema.
- La intermodalidad, dado que se permite ingresar al sistema con bicicletas o scooter.
- La fidelización del sistema, dado que la población cuida el sistema y no se observa vandalismo en la infraestructura.

A pesar de que el sistema no cubre una demanda significativa del traslado de personas a nivel de Lima Metropolitana y que falta la integridad con otros modos de transporte, los beneficios sociales antes listados han permitido que los usuarios tengan la oportunidad de desarrollar otras actividades que mejoren su calidad de vida (mayor acceso a empleos, educación, servicios de salud, recreación y otros) y se fidelicen con el sistema.

Complementariamente, conocer la cantidad de emisiones reducidas por la Línea 1, contribuye en la sensibilización ambiental de la población y sumado

al bajo costo del pasaje, la accesibilidad y conexión permitirá priorizar este tipo de transporte sobre otros.

### **5.2.1.3. Enfoque económico**

Desde el lado económico, el sistema funciona bajo un modelo de subsidio por el estado, esquema usado a nivel mundial para garantizar el servicio de transporte urbano.

En la primera disposición complementaria final de la Ley N° 30900 se declaró “al servicio de transporte terrestre de personas en todos sus ámbitos y modalidades como servicio público” (p.20). Así mismo, en la segunda disposición complementaria final se busca garantizar “sostenibilidad de los servicios de transporte terrestre de personas que se orienten hacia la movilidad dentro de un Sistema Integrado de Transporte urbano de Lima y Callao, (...) aprobarán las políticas y planes de subsidio a favor de estos servicios (...)” (p.20) (Congreso de la República del Perú, 2018b).

En ese sentido, dado que la Ley N° 30900 estableció al servicio de transporte urbano como un servicio público, esto conlleva una acción directa del estado para garantizar su operación en el tiempo. En consecuencia, la operación sostenida de la Línea 1 brinda el acceso a la ciudadanía que usa este medio de transporte para acceder a diversas actividades económicas como la de trabajo, salud, educación, comercio o cultura, lo que genera un impacto positivo en la economía de la ciudad y del país.

Por otro lado, de acuerdo con dos expertos en transporte, se ha visto una mejora en el entorno urbano de los lugares donde se encuentran las estaciones, a través del desarrollo de negocios complementarios y conexos que permiten un mayor dinamismo de la zona.

Finalmente, el costo económico del pasaje (S/.1.50) ayuda en la economía de las familias con menores recursos económicos, ya que parte del pasaje del sistema es subsidiado y por este medio de transporte se brinda un acceso para desarrollar otras actividades económicas para los ciudadanos.

### 5.2.2. Reducción de emisiones de la Línea 1

La presente investigación se centra en el análisis de la operación de la Línea 1 en el escenario de incremento anual de pasajeros de 5,05% y consumo energético de 10,26%, lo que generará una reducción de emisiones acumuladas en el periodo de quince años (2015-2030) de 576 087tCO<sub>2</sub>, 316,15 tPM<sub>2,5</sub>, 13 414,80 tNO<sub>x</sub> y 54,89 tSO<sub>2</sub>.

En las gráficas de evolución de emisiones de GEI y CA (Figura 11, 12, 13 y 14) se observa que, en el periodo de 2017 al 2019, hubo un incremento exponencial de las emisiones, tanto en la Línea Base como en las emisiones de la Línea 1, y esto es atribuible a la incorporación de material rodante (trenes y vagones) y mejora en la frecuencia de los viajes en los años 2018 y 2019 establecidos en el contrato de concesión.

De igual modo, todas las gráficas presentadas reflejan lo que ha sucedido en la historia de operación de la Línea 1 (tramo I y II), por el incremento del número de pasajeros transportados por la inclusión de nuevo material rodante en los años previos (2018 y 2019), así como la reducción de pasajeros debido a la pandemia en los años 2020 y 2021, y la recuperación del número de pasajeros pre-pandemia estimado para el año 2024.

Durante los años de pandemia por el Covid-19 hubo un menor uso del servicio de la Línea 1, y esto se observa en todas las gráficas: las emisiones de línea base y las emisiones del proyecto fueron menores a las de tendencias. Sin embargo, para el caso del CO<sub>2</sub> se observa que la operación de la Línea 1 generó una reducción poco significativa (5345,19 tCO<sub>2</sub> en el año 2020 y 9062,27 tCO<sub>2</sub> en el 2021) en comparación con los otros años, y esto es atribuible a que la operación se mantuvo constante por lo que las emisiones indirectas (consumo energético) permanecieron en el tiempo. Las gráficas de PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> (figura 12, 13 y 14, respectivamente) tienen un comportamiento diferente puesto que, para la presente investigación, se consideró como cero las emisiones indirectas, mientras que las emisiones directas (traslado del punto de origen a la estación del tren y de la salida de la estación al destino final) sí tienen un comportamiento tendencial a la generadas en la línea base.

En los años posteriores de la pandemia, a partir del 2022 se observa una normalización de las emisiones de línea base y las del proyecto, atribuible a la normalización del desplazamiento de las personas en la ciudad.

Si se considera un escenario alternativo, donde el número de pasajeros y el consumo energético de la Línea 1 se mantienen constantes en el tiempo a partir del año 2024; esto debido a que: no se incorpora nuevo material rodante, no existen mejoras en la frecuencia de viajes (por temas técnicos y de seguridad), o por temas contractuales. El resultado obtenido en el mismo periodo evaluado (2015-2030) es de 530 008 tCO<sub>2</sub>, 287,88 tPM<sub>2,5</sub>, 12 125,63 tNO<sub>x</sub> y 49,24 tSO<sub>2</sub> que, al compararlo con los resultados del escenario inicial analizado, se encuentra una diferencia de -8,00% CO<sub>2</sub>, -8,94% PM<sub>2,5</sub>, -9,61% NO<sub>x</sub> y -10,30%SO<sub>2</sub>.

Con respecto a las estimaciones de reducción de CO<sub>2</sub> en la PT de la NDC PT03 Línea 1 y 2 del metro de Lima y Callao, estas solo pueden ser comparadas en el periodo de 2015-2024 porque posteriormente se incorpora la reducción de emisiones por la operación de la Línea 2. En el periodo de evaluación (2015-2024) se precisa que el acumulado de reducción de emisiones para las NDC es 338 052 tCO<sub>2</sub>, en tanto para el presente análisis es 307 466 tCO<sub>2</sub>, representando una diferencia de 30 586 tCO<sub>2</sub> que corresponde a una reducción de emisiones de 9,05% respecto a las estimaciones de las NDC. Esto posiblemente se deba a que en la evaluación de las NDC no se consideró el efecto de la pandemia del Covid-19 y tampoco se conocía el número real de pasajeros en el periodo evaluado.

Para la cuantificación de emisiones de un transporte masivo, la metodología *ACM0016 Approved consolidated baseline and monitoring methodology - Mass Rapid Transit Projects* es una herramienta para el desarrollo del reporte, monitoreo y verificación de una mitigación de transporte urbano.

Se resalta que la reducción de emisiones de PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> en las ciudades, de acuerdo con la bibliografía consultada, tiene impacto en la salud pública por lo que su reducción aporta en mejorar la calidad de vida de la población en Lima y Callao.

En esa línea, los CA son perjudiciales porque afectan la salud pública a corto, mediano y largo plazo, por lo que las autoridades deberían tener en cuenta que la población va envejeciendo y, a medida que esto ocurre, los problemas de salud se incrementan. Es urgente reducir las fuentes de contaminación entre ellas las emisiones generadas por el parque automotor convencional, priorizando a nivel nacional sistemas integrales de transporte con bajas o cero emisiones, es decir, sistemas de transporte sostenibles.

Por otro lado, conocer el volumen de las emisiones generadas por la Línea 1 permitirá tener mayor exactitud en el reporte del indicador ambiental (kg CO<sub>2eq</sub>/per cápita y kg PM<sub>2,5</sub>/per cápita) para la ciudad de Lima y Callao establecido para el OP1 “Contar con sistemas de transporte urbano público eficaces para el desplazamiento de las personas” de la PNTU y con ello tener información más confiable para la toma de decisiones en las intervenciones públicas en las ciudades a nivel nacional.

### **5.2.3. Descripción de la calidad de aire**

El estado de la calidad de aire en Lima Metropolitana en los años evaluados, 2014 al 2022, respecto al PM<sub>2,5</sub> sobrepaso el ECA anual (25 µg/m<sup>3</sup>) en todas estaciones de monitoreo en al menos un año. En cambio, el NO<sub>2</sub> se mantuvo por debajo del ECA anual (100 µg/m<sup>3</sup>), y el SO<sub>2</sub> evaluado de manera diaria tampoco sobrepaso el ECA día (250 µg/m<sup>3</sup>).

La Línea 1 es un sistema cero emisiones de CA o de contaminantes criterio (que afectan a la salud humana) lo cual es altamente relevante porque muchas veces se sobrepasan los ECA de aire (como se observa en la figura 11 para PM<sub>2,5</sub>) y, por tanto, la elección de un sistema de transporte eléctrico favorece a mejorar la calidad de aire en la ciudad.

Con la estimación de reducción de emisiones de CA producto de la operación de la Línea 1 en el periodo de 15 años (2015 al 2030) se tiene 316,15 tPM<sub>2,5</sub>, 13 414,80 tNO<sub>x</sub> y 54,89 tSO<sub>2</sub> se reconoce el impacto sobre la calidad de aire. Sin embargo, con la información disponible no se logró identificar una relación entre la reducción de emisiones por la operación de la Línea 1 y el estado de la calidad de aire en las estaciones evaluadas en el periodo de

2014 al 2022. Esto debido a que se considera que, con la información de las estaciones de monitoreo no cercanas a la Línea 1 (las únicas disponibles) y sin información para todos los años, no se pueden caracterizar las fuentes emisoras cercanas a estas estaciones (fuentes móviles y fijas). Sumado a eso, el impacto de la Línea 1 es bastante acotado porque atiende una demanda del transporte cercana al 5% de los viajes de la ciudad y, por tanto, su efecto en la calidad de aire es poco significativo. En consecuencia, mientras más grande sea el sistema de transporte en una ciudad, el efecto del proyecto será más fácil de conocer e identificar con la estimación de emisiones.

No obstante, esto no significa que la operación de la Línea 1 con cero emisiones de CA no contribuya con mejorar la calidad del aire en la ciudad, puesto que sí lo hace, de acuerdo con los resultados de reducción de emisiones discutidos en el apartado anterior. Más bien, es importante precisar que es complejo identificar el impacto de la reducción de las emisiones sobre la calidad de aire, porque el análisis de este último es multivariable y no se dispone de información para este tipo de análisis.

A la fecha, según el Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de Lima y Callao 2021-2025, la antigüedad de la flota de transporte público en Lima y Callao para el año 2019 está constituida por 34,4 % con más de 15 años, 3,2% de 11 a 15 años, 31,3% con de 6 a 10 años y 31,1% menor de 5 años (Ministerio del Ambiente, 2021a, p.36).

En ese sentido, el estado de la calidad del aire va a evolucionar considerando las diversas intervenciones que se plantean a nivel de políticas públicas, no solo en el sistema de transporte, sino en otras fuentes emisoras. Los cambios significativos se visualizarán a nivel de toda la ciudad cuando se cambie el parque automotor priorizando tecnología y combustible más limpios y sacando de circulación a unidades obsoletas.

De lo mencionado anteriormente, sería equivocado pensar que la no observación de la mejora de la calidad de aire, luego de la implementación de medidas de mitigación (como la Línea 1), no está generando impactos

visibles. No sería real por todo lo que se viene desarrollando en los temas de mejora de la calidad de aire a nivel de Lima y Callao.

Ahora bien, mejorar la calidad del aire no es una tarea a corto plazo y, por tanto, sus efectos no son inmediatos, por lo que muchas veces para los tomadores de decisión no es fácil de entender por el periodo acotado de su mandato.

#### **5.2.4. Costo social**

El costo social “busca identificar el costo económico ocasionado por una tonelada adicional de emisiones, emitida a la atmósfera sobre las actividades económicas, el bienestar social y los ecosistemas” (Alatorre et al., 2019, p.5). En ese sentido, de la evaluación realizada en términos económicos la operación de la Línea 1 evita un total de S/. 117,077,358 de gastos por todas las emisiones que se dejan de emitir en el periodo de los 15 años de evaluación. Por otro lado, de ese valor monetario del daño evitado, se muestra que el parámetro con mayor aporte al balance económico corresponde al PM<sub>2,5</sub> que solo representa un 0,05% del total de emisiones evitadas, pero que términos de costo social representa el 65,07% del costo total.

Por otro lado, si se considera un valor potencial del carbono de \$ 25,83/tCO<sub>2</sub> propuesto por Alatorre et al. (2019), esto de manera conservadora, dado que en el futuro habrán más noticias negativas relacionadas con el cambio climático, el valor obtenido en el mismo periodo de tiempo evaluado solo para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> sería S/. 55,595,474 que corresponde a 360,3% mayor al valor actual de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Esta diferencia considerable genera que exista un potencial mayor para que los proyectos de sistemas de transporte sostenibles, y otros que busquen reducir emisiones de GEI, tengan un mayor beneficio social, porque también se consideraría la reducción de emisiones de PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>.

En la “Nota técnica para el uso del Precio Social de Carbono en la Evaluación Social de Proyectos de Inversión en tipologías: servicios de movilidad urbana, recuperación de ecosistemas forestales degradados y espacios públicos urbano que incluya áreas verdes” del Ministerio de Economía y Finanzas se plantea la incorporación de las emisiones de GEI en el precio social del carbono para la evaluación social de los proyectos de transporte. No obstante, aún existe la brecha de poder incorporar el impacto de los CA en su evaluación, que permitirá un análisis más amplio de las externalidades positivas de este tipo de proyectos.

Las posibles limitaciones para incorporar la evaluación de los CA en la evaluación de proyectos y de políticas públicas son la falta de información de los factores nacionales, tipo de tecnología y tipo de combustible del vehículo. Sin embargo, no se considera como un limitante puesto que se pueden considerar factores internacionales y trabajar datos del tipo de tecnología vehicular.

Por otro lado, el compromiso internacional de reducción de GEI en el marco del Acuerdo de París ha permitido el desarrollo de instrumentos técnicos y normativos para la incorporación de los GEI en las acciones del Estado, lo que no sucede con la reducción de CA, debido a que no se tiene un compromiso vinculante ante la comunidad internacional para reducción de emisiones.

## **5.2.5. Hallazgos del proceso de estimación de emisiones**

### **5.2.5.1. Importancia de la estimación de emisiones**

Se identifica que la importancia de cuantificar las emisiones de un sistema de transporte urbano radica en:

- Los compromisos climáticos en marco del Acuerdo de París han generado una responsabilidad del Estado para responder a lo asumido ante la comunidad internacional de luchar contra el cambio climático. En ese marco, se deben buscar los mecanismos más idóneos para contabilizar la reducción de emisiones de los sistemas de transporte y

reportar así, su avance para llegar a la meta de reducción del país a través de las NDC.

- Complementariamente, ha sido motivada por la preocupación y demanda de normas no vinculantes como los ODS por su impacto en la mitigación al cambio climático (ODS 13), reducción de muertes y enfermedades por la contaminación del aire (ODS 3), acceso de transporte urbano sostenible (ODS 11) y por los objetivos nacionales establecidos en la PNA y la PNTU.
- Transparentar la información ambiental de la sociedad sobre la reducción de emisiones de un sistema de transporte podría sumar con la fidelización de los usuarios porque se conocería de manera cuantitativa el impacto en la reducción de la contaminación del aire y del calentamiento global. De manera complementaria, conocer los efectos de los CA sobre la salud también ayudará en visibilizar la importancia del uso e implementación de medios de transporte cero emisiones en las ciudades con altos niveles de contaminación. El fin de generar conciencia ambiental en la población para optar por un sistema de transporte sostenible, facilitaría que conozca la huella de carbono por el uso de este tipo de sistema y poder elegirlo sobre el transporte convencional.
- Conocer las emisiones de un sistema de transporte permitirá a los tomadores de decisión sustentar las decisiones para desarrollar mejores políticas, programas y proyectos a corto, mediano y largo plazo basado en evidencias que sean costo efectivas, de alto impacto o que permitan usarse como instrumentos para impulsar otros sistemas masivos que prioricen tecnologías más limpias y/o combustibles cero emisiones.
- Sustentar la internalización del impacto de las emisiones de CA sobre la salud pública lo que permitirían conocer la presión que se ejercería sobre el sistema público de salud y el sistema pensionario y el gasto que se estaría evitando realizar por la reducción de emisiones.

- Generar evidencia de la reducción de emisiones para ser sujetos al financiamiento de la banca multilateral para el Estado peruano, dado que los proyectos de transporte urbano no se sustentan con recursos propios (erario nacional), sino que se procuran ejecutar con endeudamiento internacional (bancos de desarrollo), por lo que este tipo de banca prioriza proyectos que impulsan los compromisos internacionales como el Acuerdo de París y los ODS.
- Es atractivo para el sector privado por las oportunidades de financiamiento climático al que podrían acceder al optar por sistemas de transporte sostenibles, es decir en la inversión en flotas con baja o cero emisiones. Este actor relevante en el sistema de transportes también permitirá contribuir con alcanzar la meta climática que tiene el sector transporte y el país ante la comunidad internacional.
- A nivel nacional, sería útil contar con factores nacionales de emisión de los medios de transportes para conocer con exactitud el sector en cuánto a la contribución con GEI, y con la afinación de los cálculos obtener datos más reales que permitan tener información para el sustento técnico para los formuladores de políticas de mitigación de GEI a través de proyectos de transporte más sostenibles como la Línea 1.
- El estudio de los GEI y CA son idóneos para realizar estudios de cobeneficios en el ambiente como la reducción de la contaminación en el aire y mejorar en la salud de la población.
- También es una herramienta que permite evaluar escenarios de mitigación de GEI y CA a mediano y largo plazo, así como conocer el grado de avance de las acciones implementadas, siendo parte de un sistema de monitoreo y reporte de la reducción de emisiones generadas por un sistema de transportes.

### **5.2.5.2. Dificultades en la estimación de emisiones**

En el proceso de desarrollo de la presente investigación se identificaron las siguientes dificultades:

- La escasa disponibilidad de información del sector transporte ha sido el principal factor que dificultó la investigación dado que no se obtuvo información como la antigüedad, el tipo de combustible, la tecnología o la cantidad del parque automotor del transporte urbano de manera histórica, lo que hubiera permitido conocer con más exactitud las emisiones de la Línea 1.
- La falta de estudio sobre los kilómetros recorridos, la flota vehicular o el rendimiento de combustible, afectan el cálculo porque se considera información secundaria no siempre actualizada, afectando la precisión de la estimación.
- La ausencia de datos sobre el número de vehículos que circulan que operan durante la operación de un año. Se cuenta con un registro de vehículos que ingresan, pero no existe un registro de salida, por lo que falta este tipo de información para tener una mayor exactitud en los cálculos.
- Falta de desarrollo de bases de datos robustos y profesionales capacitados responsables de construir la información y crear un sistema que permita resguardar la información.
- El limitado conocimiento de las entidades estatales sobre la problemática del cambio climático y calidad de aire, que limita el accionar para desarrollar políticas que permitan atender el problema y, por ende, construir la información base para conocer el estado situacional de la ciudad y del país.
- La burocracia en todas las entidades del sector público consultados no contribuyeron en obtener la información para el estudio y se presume

que ello se debe al desconocimiento que tienen de la información que genera la entidad.

- Por otro lado, no se logró entrevistar formalmente a actores del sector privado, y tampoco a algunos funcionarios del sector público para conocer su opinión sobre la investigación.



## CONCLUSIONES

Se alcanzaron los objetivos de la investigación respecto a la estimación de reducción de emisiones de GEI (CO<sub>2</sub>) y CA (PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>) por la operación de la Línea 1 del Metro de Lima, el costo social de la reducción de estas emisiones, así como la relación de la reducción de CA con la calidad de aire de la ciudad.

Se estima la reducción de emisiones por la operación de la Línea 1 en el periodo del año 2015 al 2030 en 576 087 tCO<sub>2</sub>, 316,15 tPM<sub>2,5</sub>, 13 414,80 tNO<sub>x</sub> y 54,89 tSO<sub>2</sub>.

Los resultados de estimación de emisiones en términos de CO<sub>2</sub> cobran relevancia porque permiten mejorar la estimación del potencial de mitigación de la NDC PT 03 "Línea 1 y 2 del metro de Lima y Callao" respecto a la operación de la Línea 1 entre los años 2015 al 2024 y conocer las tendencias para los siguientes años. Además, respecto a los GEI y CA es posible desarrollar indicadores para ser utilizados de manera referencial en la evaluación de los impactos ambientales identificados en los IGAs (DIA y EIA-sd) aprobados del sistema de transporte. Adicionalmente, los resultados de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2,5</sub> podrían contribuir a tener mayor exactitud en el reporte del indicador ambiental (kg CO<sub>2eq</sub>/per cápita y kg PM<sub>2,5</sub>/per cápita) de la PNTU para Lima y Callao; e incluso los resultados de CO<sub>2</sub> contribuiría en el cálculo la huella de carbono de la Línea 1.

En cuanto al costo social evitado se estima que, en el periodo acumulado de los 15 años, el Estado peruano genera un ahorro por CO<sub>2</sub> de S/.15,432,425, PM<sub>2,5</sub> de S/. 76,185,860, NO<sub>x</sub> de S/.24,959,716 y SO<sub>2</sub> de S/.499,355 haciendo un total de S/. 117,077,358 por todas las emisiones que se dejaron de emitir debido a la operación de la Línea 1. Destacando que el parámetro de PM<sub>2,5</sub> solo representa un 0,05% del total de emisiones evitadas, sin embargo, en términos económicos representa el 65,07% del valor monetario evitado.

De la estimación de la reducción de CA producto de la operación de la Línea 1 se puede precisar que se ha reducido la concentración de PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y

SO<sub>2</sub> en las cantidades antes mencionadas en el área de operación del sistema de transporte masivo. Sin embargo, los resultados del estado de la calidad de aire en el periodo 2014 al 2022 no permiten tener un panorama de la magnitud de la influencia positiva de la operación de la Línea 1 en la ciudad. Por lo que, con la información disponible no es posible analizar el efecto de la Línea 1 sobre la evolución de la calidad del aire en Lima, sino este impacto se podrá observar cuando el sistema abarque una mayor demanda del transporte urbano en un largo plazo.

La estimación de emisiones evitadas por un sistema de transporte urbano es importante por: el compromiso climático en marco del Acuerdo de Paris, el cumplimiento de las ODS, transparentar la información ambiental a la población, sustentar mejores políticas, programas y proyectos para impulsar otros sistemas masivos de transporte, coadyuvar a canalizar financiamiento climático para el Estado y el sector privado, entre otros.

La Línea 1 es un sistema de transporte sostenible que contribuye con el mejoramiento de las condiciones del transporte público en Lima Metropolitana a través de la implementación del primer sistema de transporte masivo eléctrico. Genera beneficios ambientales en términos de reducción de emisiones de GEI y CA, beneficios sociales y económicos por la accesibilidad, asequibilidad, conectividad, seguridad, entre otros que ofrece este medio de transporte.

Desde el aspecto ambiental, la investigación cuantifica y valoriza la reducción de emisiones en términos de reducción de GEI y CA producto de la operación del sistema de transporte.

Desde el aspecto económico y social, la Línea 1 es un medio de transporte que permite la movilidad de personas en la ciudad, para contar con mayores oportunidades de desarrollo económico y social, favoreciendo también a la salud pública ambiental, de acuerdo con los valores del costo social evitado estimados, y con ello mejorar la calidad de vida de la población.

Por todo lo mencionado anteriormente, la presente investigación permite contar con información más confiable sobre la cuantificación, monetización

y exposición de los beneficios ambientales en términos de reducción de emisiones de la Línea 1, así como de los predicamentos asociados a la estimación de emisiones. Buscando que esta información sirva de referencia para la toma de mejores decisiones en las intervenciones públicas y privadas de transporte urbano en las ciudades a nivel nacional.



## RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones de estimación de reducción de emisiones de la Línea 1 u otros sistemas de transporte masivo, se recomienda obtener información actualizada del número de vehículos por categoría vehicular, tipo de tecnología, tipo de combustible y antigüedad. Además de realizar un estudio de la tasa de ocupación promedio por categoría vehicular y realizar la encuesta de pasajeros a los usuarios del sistema para conocer los cambios en la forma de desplazamiento en el transporte post pandemia. De igual modo, contar con factores de emisión de GEI y CA nacionales, y con factores de costo social nacionales asociados a los contaminantes atmosféricos o locales.

Se sugiere explorar la identificación de alguna metodología que permita estimar el FE de contaminantes del aire para la energía eléctrica generada por el SEIN, a fin de ser más precisos con la estimación de emisiones indirectas de los proyectos de transporte eléctrico.

Realizar el análisis de la relación del impacto del transporte sobre la calidad del aire considerando información de estaciones de monitoreo que se encuentren en el área de influencia directa del sistema de transporte, a fin de reducir el efecto de otras fuentes contaminantes.

La actualización del valor del costo social del carbono nacional es un instrumento que permitirá la construcción de mejores políticas públicas relacionadas con el desarrollo de las actividades económicas y su impacto sobre el cambio climático. En esa línea, se recomienda actualizar los cálculos cuando se incluyan los valores monetarios de emisiones de contaminantes del aire con el fin de incrementar la exactitud de los beneficios sociales de proyectos que reduzcan emisiones en el sector de transportes.

Se recomienda realizar este tipo de investigación sobre otros tipos de transporte urbano masivo a nivel nacional, dado que en la actualidad es importante identificar nuevas medidas de mitigación de GEI en el sector transportes para el cumplimiento del compromiso climático que tiene el país.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alatorre, J. E., Caballero, K., Ferrer, J., & Galindo, L. M. (2019). *El costo social del carbono: Una visión agregada desde América Latina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Aristizábal Salas, D. (2022). *Evaluación de costo-efectividad de dos programas de movilidad sostenible en Bogotá: Transmilenio y bicicleta*. Universidad de los Andes.
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Rev Esp Salud Pública*, 79, 159–175.
- Banco Central de Reserva del Perú. (s/f). *Dólar Americano (US\$)*. BCRPData. Recuperado el 22 de octubre de 2023, de <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/mensuales/resultados/PN01234PM/html>
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2015). *Metro de Lima. El Caso de la Línea 1*.
- Carcelén Nava, E. A. (2014). *Estudio de las emisiones atmosféricas de buses urbanos con motores diésel en Lima y Callao en base a la metodología COPERT* [Tesis para optar el título]. Universidad Pontificia Católica del Perú.
- Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico. (2016). *Estimación del precio social del carbono para la evaluación social de proyectos en el Perú*. Ministerio de Economía y Finanzas. [https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv\\_publica/docs/parametros\\_evaluacion\\_social/Precio\\_Social\\_Carbono.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/parametros_evaluacion_social/Precio_Social_Carbono.pdf)
- Clean Development Mechanism. (2011). *Approved consolidated baseline and monitoring methodology. ACM0016: Mass Rapid Transit Projects. Version 03.0*. United Nations Framework on Climate Change (UNFCCC).

- Comisión Multisectorial para la gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao. (2019). *Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao>
- Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional - COES. (s/f). *Estadísticas Anuales del COES*. Recuperado el 13 de octubre de 2023, de <https://www.coes.org.pe/Portal/publicaciones/estadisticas/estadistica?anio=2019>
- Committee of the Environmental and Occupational Health Assembly of the American Thoracic Society. (1996). Health effects of outdoor air pollution. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 153(1), 3–50. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.153.1.8542133>
- Congreso de la República del Perú. (1993). *Constitución Política del Perú*. [https://www.congreso.gob.pe/Docs/constitucion/constitucion/Constitucion-Politica-\(Abril-2023\).pdf](https://www.congreso.gob.pe/Docs/constitucion/constitucion/Constitucion-Politica-(Abril-2023).pdf)
- Congreso de la República del Perú. (2018a). *Ley N°30754. Ley Marco sobre Cambio Climático*. Diario Oficial el Peruano 14478. <http://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/ley-marco-sobre-cambio-climatico-ley-n-30754-1638161-1/>
- Congreso de la República del Perú, L. C. (2018b). *Ley N° 30900. Ley que crea la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU)*. Diario Oficial el Peruano 14773.
- Consorcio GyM Ferrovias S.A. (2017a). *Modificatoria de la Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima-Callao, Línea 1, Tramo 1: Villa El Salvador—Av. Grau*.

- Consorcio GyM Ferrovias S.A. (2017b). *Modificatoria del Estudio de Impacto Ambiental Semidetallado (EIA-sd) del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1, Tramo 2, Av. Grau- San Juan de Lurigancho.*
- Córdova Rau, A. (s/f). *Factores de emisión nacionales asociados con el consumo de electricidad del sistema eléctrico interconectado nacional.* Ministerio de Energía y Minas.
- DEUMAN SAC. (2014). *VCS Project Activity "Metro Line 1 Lima, Peru" version 3.*
- DEUMAN SAC. (2017). *VCS Monitoring Report "Metro Line 1 Lima, Peru" version 3.*
- Essen, H. van, Schroten, A., Otten, M., Sutter, D., Schreyer, C., Zandinella, R., Maibach, M., & Doll, C. (2011). *External costs of transport in Europe. Update Study for 2008.* CE Delft, INFRAS, Fraunhofer ISI. [https://uic.org/IMG/pdf/external\\_costs\\_of\\_transport\\_in\\_europe-update\\_study\\_for\\_2008-2.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/external_costs_of_transport_in_europe-update_study_for_2008-2.pdf)
- European Commission. (1995). *Towards fair and efficient pricing in transport.* (Green paper. COM(95) 691).
- Finn, C. (2013). AGU Updates Climate Change Position Statement. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(34), 301. <https://doi.org/10.1002/2013EO340006>
- Gutiérrez, A. (2012). ¿Qué es la movilidad? Elementos para (re) construir las definiciones básicas del campo del transporte. *Revista Bitácora Urbano Territorial*, 21(2), 61–74.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Base de Datos de los Censos Nacionales 2017 y el Perfil Sociodemográfico del Perú [dataset].*

- IPCC. (2013). *Glosario. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.*
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 157).
- IPCC. (2015). *Cambio Climático 2014: Mitigación del cambio climático. Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (Resumen para responsables de políticas).
- Jones, P. (2014). The evolution of urban mobility: The interplay of academic and policy perspectives. *IATSS Research*, 38(1), 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2014.06.001>
- Kohon, J. (2011). *Más y mejores trenes: Cambiando la matriz de transporte en América Latina y el Caribe | Publications*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/M%C3%A1s-y-mejores-trenes-Cambiando-la-matriz-de-transporte-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- López González, C. (2016). *Evaluación social de proyectos ferroviarios considerando externalidades, aplicado al proyecto de transporte de pasajeros Batuco-Mallico*. Universidad de Chile.
- Mataix González, Carmen. (2010). *Movilidad Urbana Sostenible: Un reto energético y ambiental*. Caja Madrid Obra Social.
- Ministerio de Energía y Minas. (2023a). *Balance Nacional de Energía 2021*.
- Ministerio de Energía y Minas. (2023b). *Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero del Sector Energía 2019. Categoría: Combustión estacionaria y emisiones fugitivas*.

- Ministerio de Salud. (s/f). *Red de Vigilancia Sanitaria de la Calidad del Aire de Lima y Callao (2007—2023)*. Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria—DIGESA. Recuperado el 22 de octubre de 2023, de [http://www.digesa.minsa.gob.pe/DCOVI/mapas/DIGESA\\_AIR\\_MR\\_CalidadAireAnual\\_LIMA.html#inicio](http://www.digesa.minsa.gob.pe/DCOVI/mapas/DIGESA_AIR_MR_CalidadAireAnual_LIMA.html#inicio)
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2009). *Declaración de Impacto Ambiental del Sistema Eléctrica de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1, tramo Villa El Salvador-Av. Grau*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2010). *Estudio de Impacto Ambiental semidetallado del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1, Tramo 2: Av. Grau—San Juan de Lurigancho*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2019). *Decreto Supremo N° 012-2019-MTC. Política Nacional de Transporte Urbano*. Diario Oficial el Peruano 14896. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que-aprueba-la-politica-nacional-de-transport-decreto-supremo-n-012-2019-mtc-1759117-2>
- Ministerio del Ambiente. (2009). *Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM. Política Nacional del Ambiente*. Diario Oficial el Peruano 396354. <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueba-la-politica-nacional-del-ambiente-decreto-supremo-n-012-2009-minam-351874-3/>
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Estudio de morbilidad por efectos de la contaminación del aire en la salud de las personas*. MINAM. <http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/76>
- Ministerio del Ambiente. (2016a). *Resolución Suprema N° 005-2016-MINAM. Conforman Grupo de Trabajo Multisectorial de naturaleza temporal encargado de generar información técnica para orientar la implementación de las*

- contribuciones previstas y determinadas a nivel nacional presentadas a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.*
- Ministerio del Ambiente. (2016b). *Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/tercera-comunicacion-nacional-peru-convencion-marco-las-naciones>
  - Ministerio del Ambiente. (2017). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.* Diario Oficial el Peruano 14101. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-la-ley-n-30754-decreto-supremo-n-013-2019-minam-1842032-2>
  - Ministerio del Ambiente. (2018). *Grupo de Trabajo Multisectorial de naturaleza temporal encargado de generar información técnica para orientar la implementación de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (GTM-NDC), Informe Final [Informe Final].* [https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wp-content/uploads/sites/127/2018/12/Informe-final-GTM-NDC\\_v17dic18.pdf](https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wp-content/uploads/sites/127/2018/12/Informe-final-GTM-NDC_v17dic18.pdf)
  - Ministerio del Ambiente. (2019). *Reglamento de la Ley N° 30754, Ley Marco sobre Cambio Climático.* Diario Oficial el Peruano 15216. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-la-ley-n-30754-decreto-supremo-n-013-2019-minam-1842032-2>
  - Ministerio del Ambiente. (2021a). *Aprobar el “Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad de Aire de Lima y Callao 2021-2025”.*
  - Ministerio del Ambiente. (2021b). *Decreto Supremo N° 023-2021-MINAM. Política Nacional del Ambiente.* Diario Oficial el Peruano 16137. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que-aprueba-la-politica-nacional-del-ambient-decreto-supremo-n-023-2021-minam-1976351-2>

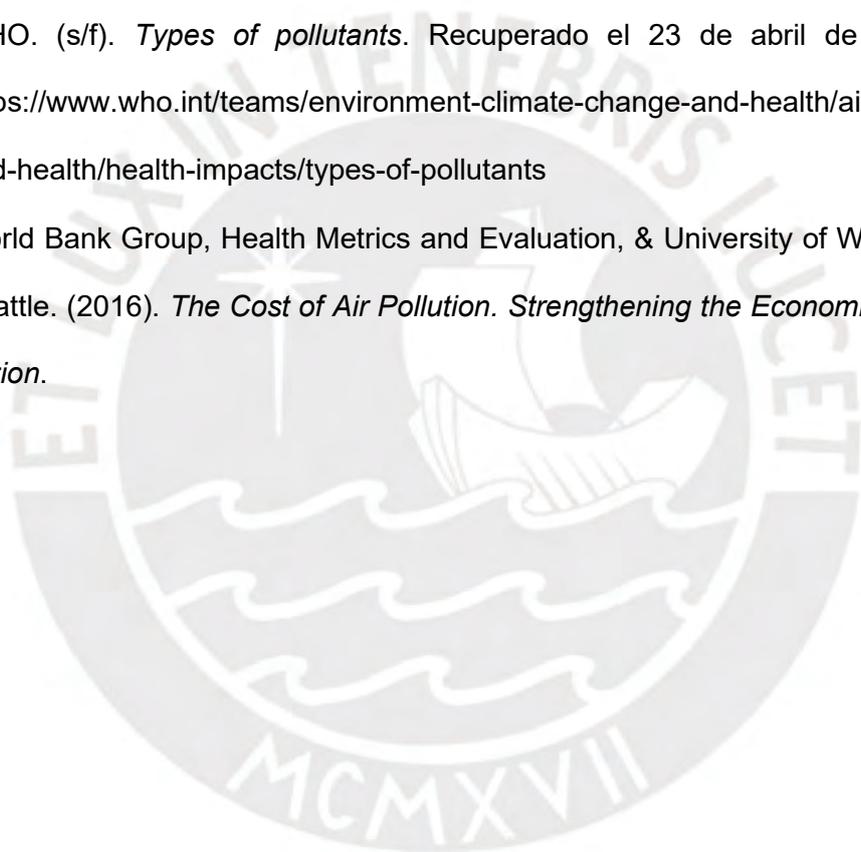
- Ministerio del Ambiente. (2021c). *Reporte de Actualización de las NDC del Perú al 2030*.  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1675213/Actualizaci%C3%B3n%20de%20las%20NDC%20del%20Per%C3%BA%20al%202030.pdf?v=1663622045>
- Muñoz D., A. M., Paz V., J. J., & Quiroz P., C. Ma. (2007). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de adultos que laboran en diferentes niveles de exposición. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 25(2), 85–94.
- Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Naciones Unidas. (s/f). *Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>
- Negev, M., Zea-Reyes, L., Caputo, L., Weinmayr, G., Potter, C., & de Nazelle, A. (2022). Barriers and Enablers for Integrating Public Health Cobenefits in Urban Climate Policy. *Annual Review of Public Health*, 43(1), 255–270. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-052020-010820>
- Organización Mundial de la Salud. (s/f). *Contaminación atmosférica*. Recuperado el 23 de abril de 2023, de [https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_2](https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_2)
- Organización Mundial de la Salud. (2022, diciembre 19). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

- Organización Panamericana de la Salud. (s/f). *Partículas PM10 y PM2.5: Polvo, hollín, humo y aerosol [Figura]*. Recuperado el 10 de mayo de 2023, de <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- OSITRAN. (2022a). *Ficha de contrato de concesión. Concesionario: TREN URBANO DE LIMA S.A. Sistema eléctrico de transporte masivo de Lima y Callao Línea 1*. <https://www.ositran.gob.pe/anterior/wp-content/uploads/2022/03/ficha-contrato-linea-1-2022.pdf>
- OSITRAN. (2022b). *Informe de Desempeño 2021 Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1*. <https://www.ositran.gob.pe/anterior/wp-content/uploads/2018/04/id-2021-l1.pdf>
- Parry, I. W. H., Heine, D., Lis, E., & Li, S. (2014). *Getting energy prices right: From principle to practice*. International Monetary Fund.
- Perales Llanos, M. M. (2015). *Impacto económico por la reducción de emisiones gaseosas y material particulado en Lima Metropolitana por el uso de gas natural como combustible en el parque automotor* [Tesis para optar el título]. Universidad Pontificia Católica del Perú.
- Santos, G., Behrendt, H., Maconi, L., Shirvani, T., & Teytelboym, A. (2010). Part I: Externalities and economic policies in road transport. *Research in Transportation Economics*, 28(1), 2–45. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2009.11.002>
- Santos, G., Behrendt, H., & Teytelboym, A. (2010). Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics*, 28(1), 46–91. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2010.03.002>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. (2023, agosto 22). *Solicitud de Acceso a la Información* [Comunicación personal].
- Stiglitz, J. E. (2000). *La economía del sector público* (3. ed). Bosch.

- Tafur Flórez, D. A. (2020). *Influencia de la implementación de un sistema BRT en la calidad del aire: Caso de estudio Bogotá* [Proyecto de Grado-Ingeniería Ambiental]. Universidad de los Andes.
- Taryet Ingeniería del Transporte. (2015). *Diseño muestral, desarrollo de encuestas y determinación de los kilómetros recorridos por modo de transporte por pasajero encuestado considerando escenarios con y sin metro de Lima*.
- Tren Urbano de Lima S.A. (s/f). *Informe de Sostenibilidad: Línea 1 del Metro de Lima*. <https://www.lineauno.pe/quienes-somos/>
- Tren Urbano de Lima S.A. (2023). *Presentación del Plan de Negocio del año 2023-Línea 1 del Metro de Lima [Presentación de diapositivas]*. <https://www.ositran.gob.pe/anterior/wp-content/uploads/2018/04/l1-pdn-2023.pdf>
- Trujillo Cabrera, A. I. (2021). *¿Qué le conviene a Lima? ¿Un sistema BRT o una Línea de metro subterráneo? Análisis costo beneficio del caso de dos modos de transporte alternativos: Línea 2 del Metro versus Corredor Segregado de Alta Capacidad II* [Tesis de Pregrado]. Universidad Pontificia Católica del Perú.
- United Nations. (2022, abril 26). *¿Qué es la triple crisis planetaria?* <https://unfccc.int/es/blog/que-es-la-triple-crisis-planetaria>
- United Nations Framework on Climate Change (UNFCCC). (s/f-a). *El Acuerdo de París*. Recuperado el 23 de abril de 2023, de <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- United Nations Framework on Climate Change (UNFCCC). (s/f-b). *Timeline UNFCCC: 25 Years of Effort and Achievement*. Recuperado el 23 de abril de 2023, de <https://unfccc.int/timeline/>
- Universidad Pontificia Católica del Perú. (2022, noviembre 22). *Modelo de protocolo de consentimiento informado para entrevistas | Portal de investigación*  
| PUCP. Portal de investigación.

<https://investigacion.pucp.edu.pe/documentos/modelo-de-protocolo-de-consentimiento-informado-para-entrevistas/attachment/modelo-de-protocolo-de-consentimiento-informado-para-entrevistas-2/>

- Vajjarapu, H., & Verma, A. (2022). Understanding the mitigation potential of sustainable urban transport measures across income and gender groups. *Journal of Transport Geography*, 102, 103383. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103383>
- Vallero, D. A. (2014). *Fundamentals of air pollution* (Fifth edition). Elsevier.
- WHO. (s/f). *Types of pollutants*. Recuperado el 23 de abril de 2023, de <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- World Bank Group, Health Metrics and Evaluation, & University of Washington, Seattle. (2016). *The Cost of Air Pollution. Strengthening the Economic Case for Action*.



## ANEXOS

### ANEXO 1: Parámetros utilizados para la estimación de emisiones

#### A. Número de pasajeros

**Tabla 11:** *Número de pasajeros transportados por la Línea 1*

<b>Años</b>	<b>Pasajeros</b>
2015	107 070 145
2016	107 230 143
2017	107 530 188
2018	124 140 635
2019	170 332 266
2020	70 001 258
2021	81 227 124
2022	129 602 574
2023	171 957 350
2024	180 649 155
2025	189 780 298
2026	199 372 987
2027	209 450 550
2028	220 037 497
2029	231 159 575
2030	242 843 832

Fuente: Informe N°D-00001-2023-ATU/DO-SSTF-JEPG de la Subdirección del sistema de transporte ferroviario de la ATU (2023) para los años 2015 al 2022 y Memorando N°D-00034-2024-ATU/DO-SSTF de la Dirección de Operaciones de la ATU (2024) para el año 2023.

## B. Parámetros de transporte

**Tabla 12:** Número de vehículos por categoría vehicular y tipo de combustible

Categoría vehicular "i"	N <sub>x,i</sub>				N <sub>i</sub>
	Tipo de combustible "x"				
	Gasolina	Diésel	LPG	GNV	
Metropolitano	-	-	-	364	364
Buses grandes	-	2899	-	-	2 899
Buses medianos	-	12 499	-	-	12 499
Buses pequeños	-	9339	-	-	9 339
Vehículo particular	353 786	15 947	55 351	62 671	487 755
Taxi	19 893	17 031	40 165	36 636	113 725

(-) no se cuenta con información

Fuente: DEUMAN SAC. (2014)

**Tabla 13:** Tasa de ocupación promedio por categoría vehicular

Categoría vehicular "i"	OC <sub>i</sub> (pasajeros)
Metropolitano	89,48
Buses convencionales	20,07
Vehículo particular	1,92
Taxis	1,31

Fuente: DEUMAN SAC. (2014)

**Tabla 14:** Consumo específico de combustible por categoría vehicular y tipo de combustible

Categoría vehicular "i"	SFC <sub>i,x</sub>			
	Tipo de combustible "x"			
	Gasolina (kg/km)	Diésel (kg/km)	LPG (kg/km)	GNV (m <sup>3</sup> /km)
Metropolitano	-	-	-	0,642
Buses grandes	-	0,429	-	-
Buses medianos	-	0,330	-	-
Buses pequeños	-	0,330	-	-
Vehículo particular	0,060	0,064	0,060	0,154
Taxi	0,060	0,064	0,060	0,154

(-) no se cuenta con información

Fuente: DEUMAN SAC. (2014)

**Tabla 15: Factor de mejora tecnología por categoría vehicular**

<b>Categoría vehicular "i"</b>	<b>IR<sub>i</sub></b>
Metropolitano	0,99
Buses grandes/medianos y pequeños	0,99
Vehículo privado	0,99
Taxis	0,99

Fuente: Clean Development Mechanism. (2011)

**Tabla 16: Años de mejora anual por categoría vehicular**

<b>Categoría vehicular "i"</b>	<b>t</b>
Metropolitano	4
Buses grandes/medianos y pequeños	4
Vehículo privado	19
Taxis	19

Fuente: DEUMAN SAC. (2014)

**Tabla 17: Distancia total manejada por sub-categoría de buses**

<b>Descripción</b>	<b>DD<sub>L/M/S</sub></b>
DDL: Total distance driven by buses sub-category L (large buses)	260 378 091
DD <sub>M</sub> : Total distance driven by buses sub-category M (medium buses)	1 214 082 479
DD <sub>S</sub> : Total distance driven by buses sub-category S (small buses)	1 399 949 501

Fuente: DEUMAN SAC. (2014)

### C. Factor de emisiones de CO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>

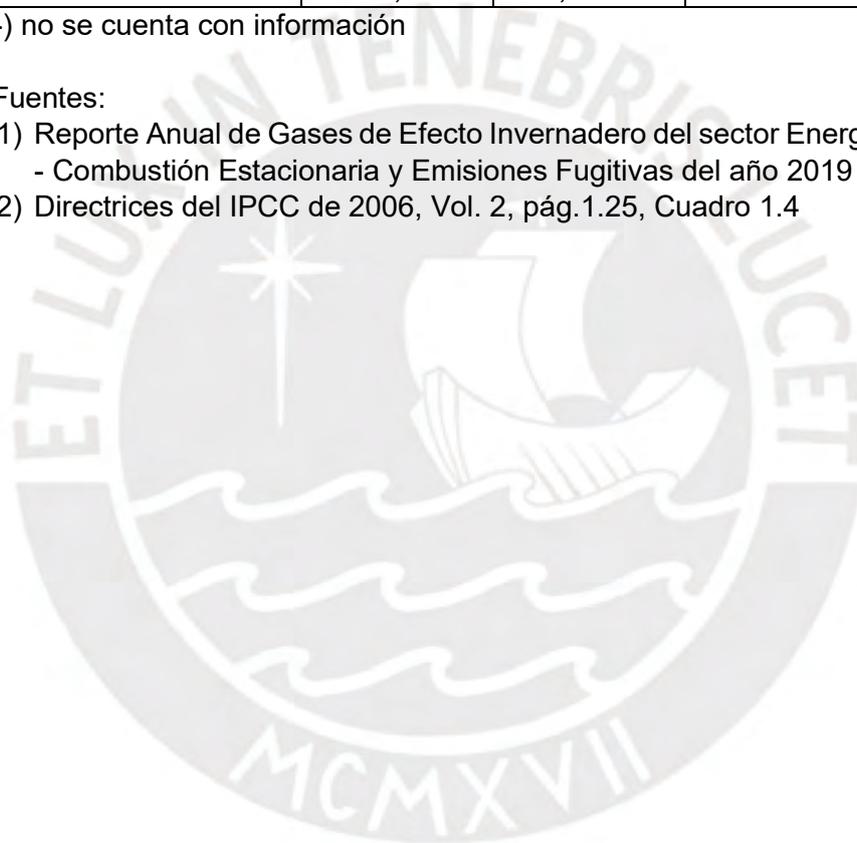
**Tabla 18:** Factor de emisión de CO<sub>2</sub> por tipo de combustible y valor calorífico neto

<b>Combustible</b>	<b>VCN <sup>(1)</sup> (TJ/10<sup>3</sup> ton)</b>	<b>VCN <sup>(1)</sup> (TJ/10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>FE <sup>(2)</sup> (kgCO<sub>2</sub>/TJ)</b>
Gasolina	44,80	-	69 300
Diésel	42,20	-	74 100
GLP	47,31	0,0264	63 100
GNV	45,76	0,0360	56 293

(-) no se cuenta con información

Fuentes:

- (1) Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero del sector Energía  
- Combustión Estacionaria y Emisiones Fugitivas del año 2019
- (2) Directrices del IPCC de 2006, Vol. 2, pág.1.25, Cuadro 1.4



**Tabla 19:** Factor de emisión de contaminantes atmosféricos ( $PM_{2,5}$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$ ) por tipo de combustible

Categoría vehicular	Combustible	Año de fabricación	EF $PM_{2,5}$ (g/km)	EF $NO_x$ (g/km)	EF $SO_2$ (g/km)
M1	Gasolina	< 2002	0,0022	1,9100	0,3080
M1	Gasolina	2003-2006	0,0022	0,2482	0,2640
M1	Gasolina	2007-2017	0,0011	0,1162	0,2640
M1	Gasolina	>2018	0,0011	0,0560	0,0070
M1	Diésel	< 2002	0,1170	0,4560	0,006
M1	Diésel	2003-2006	0,0450	0,6880	0,006
M1	Diésel	2007-2017	0,0290	0,7670	0,006
M1	Diésel	>2018	0,0300	0,5840	0,006
M1	GLP	< 2002	0,0020	2,3600	0,017
M1	GLP	2003-2006	0,0020	0,1800	0,016
M1	GLP	2007-2017	0,0010	0,0900	0,016
M1	GLP	>2018	0,0010	0,0600	0,016
M1	GNV	Indistinto	0,0010	0,0560	0,001
M2 y M3	Gasolina	< 2002	0,0023	3,0900	0,3400
M2 y M3	Gasolina	2003-2006	0,0023	0,2493	0,2800
M2 y M3	Gasolina	2007-2017	0,0011	0,1665	0,2800
M2 y M3	Gasolina	>2018	0,0011	0,1646	0,0070
M2 y M3	Diésel	< 2002	0,4810	13,7870	0,0370
M2 y M3	Diésel	2003-2006	0,1780	10,2870	0,0300
M2 y M3	Diésel	2007-2017	0,1550	9,3010	0,0300
M2 y M3	Diésel	>2018	0,0440	5,4560	0,0300
M2 y M3	GLP	< 2002	0,0090	9,4400	-
M2 y M3	GLP	2003-2006	0,0090	0,7200	-
M2 y M3	GLP	2007-2017	0,0040	0,3600	-
M2 y M3	GLP	>2018	0,0040	0,2200	-
M2 y M3	GNV	< 2002	0,0200	16,5000	0,0130
M2 y M3	GNV	2003-2006	0,0100	15,0000	0,0100
M2 y M3	GNV	2007-2017	0,0100	10,0000	0,0100
M2 y M3	GNV	>2018	0,0050	2,5000	0,0100

(-) no se cuenta con información

Fuente: Comisión multisectorial para la gestión de la iniciativa del aire limpio para Lima y Callao (2019) extraído del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2021).

**D. Factor de emisión por km y categoría vehicular ( $FE_{km,i,y}$ )**

**Tabla 20:**  $FE_{km,i,y}$  de  $CO_2$  de los años 2015 al 2030 (g  $CO_2/km$ )

Año	Categoría vehicular (g $CO_2/km$ )						
	Metropolitano	Buses convencionales	Buses largos	Buses mediados	Buses pequeños	Vehículos privados	Taxis
<b>2015</b>	1239	1008	1276	981	981	165	186
<b>2016</b>	1226	998	1263	972	972	164	184
<b>2017</b>	1214	988	1250	962	962	162	182
<b>2018</b>	1202	978	1238	952	952	160	180
<b>2019</b>	1190	968	1225	943	943	159	178
<b>2020</b>	1178	959	1213	933	933	157	177
<b>2021</b>	1166	949	1201	924	924	156	175
<b>2022</b>	1154	940	1189	915	915	154	173
<b>2023</b>	1143	930	1177	906	906	153	171
<b>2024</b>	1131	921	1165	896	896	151	170
<b>2025</b>	1120	912	1154	888	888	150	168
<b>2026</b>	1109	903	1142	879	879	148	166
<b>2027</b>	1098	893	1131	870	870	147	165
<b>2028</b>	1087	885	1119	861	861	145	163
<b>2029</b>	1076	876	1108	853	853	144	161
<b>2030</b>	1065	867	1097	844	844	142	160

**Tabla 21:**  $FE_{km,i,y}$  de  $PM_{2,5}$  de los años 2015 al 2030

Año	Categoría vehicular (gPM <sub>2,5</sub> /km)						
	Metropolitano	Buses convencionales	Buses largos	Buses mediodos	Buses pequeños	Vehículos privados	Taxis
<b>2015</b>	0,0100	0,3011	0,3011	0,3011	0,3011	0,0045	0,0159
<b>2016</b>	0,0100	0,3011	0,3011	0,3011	0,3011	0,0045	0,0159
<b>2017</b>	0,0100	0,3011	0,3011	0,3011	0,3011	0,0045	0,0159
<b>2018</b>	0,0100	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2019</b>	0,0100	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2020</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2021</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2022</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2023</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2024</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2025</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2026</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2027</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2028</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2029</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155
<b>2030</b>	0,0050	0,2883	0,2883	0,2883	0,2883	0,0044	0,0155

**Tabla 22:  $FE_{km,i,y}$  de  $NO_x$  de los años 2015 al 2030**

Año	Categoría vehicular (gNO <sub>x</sub> /km)						
	Metropolitano	Buses convencionales	Buses largos	Buses mediados	Buses pequeños	Vehículos privados	Taxis
<b>2015</b>	100,000	113,242	113,242	113,242	113,242	0,3602	0,4794
<b>2016</b>	100,000	113,242	113,242	113,242	113,242	0,3602	0,4794
<b>2017</b>	100,000	113,242	113,242	113,242	113,242	0,3602	0,4794
<b>2018</b>	100,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2019</b>	100,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2020</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2021</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2022</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2023</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2024</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2025</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2026</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2027</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2028</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2029</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678
<b>2030</b>	25,000	110,331	110,331	110,331	110,331	0,3516	0,4678

**Tabla 23:  $FE_{km,i,y}$  de  $SO_2$  de los años 2015 al 2030**

Año	Categoría vehicular (gSO <sub>2</sub> /km)						
	Metropolitano	Buses convencionales	Buses largos	Buses mediados	Buses pequeños	Vehículos privados	Taxis
<b>2015</b>	0,0100	0,0331	0,0331	0,0331	0,0331	0,1969	0,0540
<b>2016</b>	0,0100	0,0331	0,0331	0,0331	0,0331	0,1969	0,0540
<b>2017</b>	0,0100	0,0331	0,0331	0,0331	0,0331	0,1969	0,0540
<b>2018</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2019</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2020</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2021</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2022</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2023</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2024</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2025</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2026</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2027</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2028</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2029</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527
<b>2030</b>	0,0100	0,0330	0,0330	0,0330	0,0330	0,1916	0,0527

**E. Factor de emisión por km pasajero y categoría vehicular ( $FE_{pkm,i,y}$ )**

**Tabla 24:**  $FE_{pkm,i,y}$  de  $CO_2$  de los años 2015 al 2030

Año	Categoría vehicular (gCO <sub>2</sub> /pkm)			
	Metropolitano	Buses convencionales	Vehículos privados	Taxis
2015	14	50	86	142
2016	14	50	85	140
2017	14	49	84	139
2018	13	49	84	138
2019	13	48	83	136
2020	13	48	82	135
2021	13	47	81	133
2022	13	47	80	132
2023	13	46	79	131
2024	13	46	79	129
2025	13	45	78	128
2026	12	45	77	127
2027	12	45	76	126
2028	12	44	76	124
2029	12	44	75	123
2030	12	43	74	122

**Tabla 25:**  $FE_{pkm,i,y}$  de  $PM_{2,5}$  de los años 2015 al 2030

Año	Categoría vehicular (gPM <sub>2,5</sub> /pkm)			
	Metropolitano	Buses convencionales	Vehículos privados	Taxis
2015	0,0001	0,0150	0,0024	0,0121
2016	0,0001	0,0150	0,0024	0,0121
2017	0,0001	0,0150	0,0024	0,0121
2018	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2019	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2020	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2021	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2022	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2023	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2024	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2025	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2026	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2027	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2028	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2029	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118
2030	0,0001	0,0144	0,0023	0,0118

**Tabla 26:**  $FE_{pkm,i,y}$  de  $NO_x$  de los años 2015 al 2030

Año	Categoría vehicular (gNO <sub>x</sub> /pkm)			
	Metropolitano	Buses convencionales	Vehículos privados	Taxis
2015	0,1118	0,5642	0,1876	0,3659
2016	0,1118	0,5642	0,1876	0,3659
2017	0,1118	0,5642	0,1876	0,3659
2018	0,1118	0,5497	0,1831	0,3571
2019	0,1118	0,5497	0,1831	0,3571
2020	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2021	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2022	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2023	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2024	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2025	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2026	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2027	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2028	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2029	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571
2030	0,0279	0,5497	0,1831	0,3571

**Tabla 27:**  $FE_{pkm,i,y}$  de  $SO_2$  de los años 2015 al 2030

Año	Categoría vehicular (gSO <sub>2</sub> /pkm)			
	Metropolitano	Buses convencionales	Vehículos privados	Taxis
<b>2015</b>	0,0001	0,0017	0,1026	0,0412
<b>2016</b>	0,0001	0,0017	0,1026	0,0412
<b>2017</b>	0,0001	0,0017	0,1026	0,0412
<b>2018</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2019</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2020</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2021</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2022</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2023</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2024</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2025</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2026</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2027</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2028</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2029</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402
<b>2030</b>	0,0001	0,0016	0,0998	0,0402

**F. Parámetros para el cálculo del FE de CO<sub>2</sub> del SEIN**

**Tabla 28: Volúmenes de combustibles consumidos para la generación de electricidad del SEIN**

Año	Combustible							
	Diésel (gal)	Biodiesel (gal)	Residual 6 (gal)	R500 (gal)	Gas Natural (m <sup>3</sup> )	Biogás (m <sup>3</sup> )	Bagazo (t)	Carbón (t)
<b>2010</b>	17 236 011	351 755	3 931 524	40 827 238	3 005 883 797	-	191 049	393 153
<b>2011</b>	19 952 062	407 185	2 289 167	15 371 008	3 432 754 854	2 111 085	343 356	289 091
<b>2012</b>	21 467 376	1 129 862	575 691	7 424 805	3 694 174 280	21 698 891	511 250	221 461
<b>2013</b>	10 573 517	556 501	222 904	8 977 495	3 576 263 261	20 892 505	721 201	320 487
<b>2014</b>	4 833 653	254 403	111 572	1 929 721	4 140 952 207	20 343 862	536 278	60 321
<b>2015</b>	13 367 317	703 543	62 847	1 951 307	4 260 053 000	25 723 800	375 747	86 551
<b>2016<sup>(1)</sup></b>	31 987 249	1 683 539	161 911	12 392 549	4 689 827 600	33 019 700	340 493	295 006
<b>2017<sup>(1)</sup></b>	55 739 180	2 933 641	72 690	9 965 872	3 811 594 304	26 642 058	321 840	245 493
<b>2018<sup>(1)</sup></b>	7 706 093	405 584	57 276	2 411 929	3 711 402 797	32 955 093	321 856	15 811
<b>2019<sup>(2)</sup></b>	2 132 994	112 263	-	4 665 706	3 999 638 873	39 303 063	610 046	13 238
<b>2020<sup>(2)</sup></b>	3 151 282	165 857	-	855 693	3 328 913 181	34 800 347	851 085	4 698
<b>2021<sup>(2)</sup></b>	1 946 868	102 467	-	758 676	4 073 979 417	47 846 517	914 049	10 475
<b>2022<sup>(2)</sup></b>	20 536 154	1 080 850	-	943 483	4 733 552 824	45 473 557	932 895	29 076

(-) no se cuenta con información / (1)Factores de emisión nacionales asociados con el consumo de electricidad del sistema interconectado nacional / (2)Estadísticas Anuales del Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional - COES

**Tabla 29: Valor calorífico neto (VCN) de los combustibles producidos en Perú**

Combustibles usados en Perú			Unidad
Tipo de combustible		VCN	
R500	Petróleo Industrial 500	1,51E-04	TJ/gal
	Petróleo Industrial 6	1,50E-04	TJ/gal
D2	Diésel	1,35E-04	TJ/gal
GN	Gas Natural	3,60E-05	TJ/m <sup>3</sup>
BZ	Bagazo	1,16E-02	TJ/t
CA	Carbón mineral	2,67E-02	TJ/t
BD	Biocombustible	9,05E-05	TJ/gal
BG	Biogás (vertedero)	6,12E-05	TJ/m <sup>3</sup>

Fuente: RAGEI del sector Energía - Combustión Estacionaria y Emisiones Fugitivas del año 2019

**Tabla 30: Factores de emisión de CO<sub>2</sub>**

Combustible		CO <sub>2</sub>		
		FE por defecto (kgCO <sub>2</sub> /TJ)	Inferior	Superior
Diésel		74 100	72 600	74 800
Fuelóleo residual (Residual 6 y R500)		77 400	75 500	78 800
Carbón de coque (carbón)		94 600	87 300	101 000
Biocombustibles líquidos	Biodiésel	70 800	59 800	84 300
Biomasa sólida	Otra biomasa sólida primaria (bagazo)	100 000	84 700	117 000
Biomasa gaseosa (Biogás)	Gas de vertedero	54 600	46 200	66 000

Fuente: Directrices del IPCC de 2006, Volumen 2: Energía, pág. 2.16 – 2.17, extraído del RAGEI del sector Energía - Combustión Estacionaria y Emisiones Fugitivas del año 2019

**Tabla 31: Energía eléctrica generada por el SEIN**

Año	Generación	
	(GWh)	(MWh)
2010 <sup>(1)</sup>	32 427	32 427 000
2011 <sup>(1)</sup>	35 217	35 217 000
2012 <sup>(1)</sup>	37 321	37 321 129
2013 <sup>(1)</sup>	39 669	39 669 000
2014 <sup>(1)</sup>	41 796	41 796 000
2015 <sup>(1)</sup>	44 540	44 540 000
2016 <sup>(1)</sup>	48 326	48 326 000
2017 <sup>(1)</sup>	48 993	48 993 000
2018 <sup>(1)</sup>	50 817	50 816 800
2019 <sup>(2)</sup>	52 889	52 889 140
2020 <sup>(2)</sup>	49 187	49 186 640
2021 <sup>(2)</sup>	53 990	53 990 350
2022 <sup>(2)</sup>	56 116	56 116 300

- (1) Factores de emisión nacionales asociados con el consumo de electricidad del sistema interconectado nacional
- (2) Estadísticas Anuales del Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional - COES

**Tabla 32: Emisión de CO<sub>2</sub> según tipo de combustible del SEIN**

Año	Combustible (tCO <sub>2</sub> )						Total
	Diésel	Biodiesel	Residual 6	R500	Gas Natural	Carbón	
2010 <sup>(1)</sup>	171,79	-	45,66	478,19	6 079,76	993,03	7 768,43
2011 <sup>(1)</sup>	198,86	-	26,58	180,03	6 943,16	730,19	8 078,83
2012 <sup>(1)</sup>	213,96	-	6,69	86,96	7 471,91	559,37	8 338,89
2013 <sup>(1)</sup>	105,38	-	2,59	105,15	7 233,42	809,49	8 256,04
2014 <sup>(1)</sup>	48,18	-	1,30	22,60	8 375,57	152,36	8 600,01
2015 <sup>(1)</sup>	133,23	-	0,73	22,85	8 616,47	218,61	8 991,90
2016 <sup>(1)</sup>	318,81	-	1,88	145,15	9 485,74	745,13	10 696,71
2017 <sup>(1)</sup>	555,54	-	0,84	116,73	7 709,41	620,07	9 002,59
2018 <sup>(1)</sup>	76,80	-	0,67	28,25	7 506,76	39,94	7 652,41
2019 <sup>(2)</sup>	21,26	-	-	54,65	8 089,75	33,44	8 199,09
2020 <sup>(2)</sup>	31,41	-	-	10,02	6 733,13	11,87	6 786,42
2021 <sup>(2)</sup>	19,40	-	-	8,89	8 240,11	26,46	8 294,86
2022 <sup>(2)</sup>	204,68	-	-	11,05	9 574,18	73,44	9 863,35

(-) no se cuenta con información

## G. Factor de emisión del SEIN

**Tabla 33:** FE de CO<sub>2</sub> del SEIN de los años 2015 al 2030

Año	FE <sub>OM</sub>	*FE <sub>BM</sub>	FE <sub>CM</sub>
	(tCO <sub>2</sub> /MWh)	(tCO <sub>2</sub> /MWh)	(tCO <sub>2</sub> /MWh)
2010	0,240	0,482	0,361
2011	0,229	0,482	0,356
2012	0,223	0,482	0,353
2013	0,208	0,482	0,345
2014	0,206	0,482	0,344
2015	0,202	0,482	0,342
2016	0,221	0,482	0,352
2017	0,184	0,482	0,333
2018	0,151	0,482	0,316
2019	0,155	0,482	0,319
2020	0,138	0,482	0,310
2021	0,154	0,482	0,318
2022	0,176	0,482	0,329
<b>Promedio</b>	<b>0,191</b>	<b>0,482</b>	<b>0,337</b>

\* El valor del Factor de emisiones de la construcción marginal (FE<sub>BM</sub>) se considera constante en el tiempo y es obtenido de la Pág. 71 del *VCS Project Description: Metro Line 1, Peru*.

## ANEXO 2: Parámetros usados para costo social

### A. Información usada para el costo social

**Tabla 34:** Factores de costo social por tonelada de CA y GEI

Parámetro	Unidad	Valor económico estimado
PM <sub>2,5</sub>	US\$ / tonelada evitada	64 499
SO <sub>2</sub>	US\$ / tonelada evitada	2435
NO <sub>x</sub>	US\$ / tonelada evitada	498
*CO <sub>2eq</sub>	US\$ / tonelada evitada	7,17

Fuente: Parry et al. (2014) y \*Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico (2016)

**Tabla 35:** Tipo de cambio promedio del dólar americano (US\$)

Periodo	Tipo de cambio (S/.)
Feb-23	3.841
Mar-23	3.780
Abr-23	3.766
May-23	3.689
Jun-23	3.651
Jul-23	3.601
Ago-23	3.696
Sep23	3.730
Oct-23	3.844
Nov-23	3.762
Dic-23	3.734
Ene-24	3.740
<b>Promedio</b>	<b>3.736</b>

Fuente: (Banco Central de Reserva del Perú, s/f)

### ANEXO 3: Información sobre calidad de aire

#### A. Ubicación de las estaciones de calidad de aire

Tabla 36: Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad

Código	Nombre de la estación	Coordenadas UTM Zona 18L	
		Este X	Norte Y
<b>PROTRANSPORTES - ATU</b>			
SAT	Lima Centro	278 653	8 667 545
<b>DIGESA</b>			
E-2	Hospital María Auxiliadora	286 836	8 654 822
E-6	Centro de Salud Lince	278 840	8 663 564
E-7	Almacén MINSA - Surco	282 659	8 656 570
<b>SENAMHI</b>			
CDM	Campo de Marte	277 597	8 660 633
SBJ	San Borja	281 483	8 660 631
SJL	San Juan de Lurigancho	282 383	8 670 567
VMT	Villa María del Triunfo	291 084	8 654 309

## B. Mapa de ubicación de las estaciones de calidad de aire

Figura 15: Estaciones de monitoreo de calidad de aire de Lima y Callao



Fuente: Comisión Multisectorial para la gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao, (2019)

### C. Resultados de monitoreo de calidad de aire

**Tabla 37: Monitoreo de calidad de aire de  $PM_{2,5}$  ( $\mu g/m^3$ )**

AÑO	SBJ <sup>1</sup>	CDM <sup>1</sup>	VMT <sup>1</sup>	SJL <sup>1</sup>	E-2 <sup>2</sup>	E-6 <sup>2</sup>	E-7 <sup>2</sup>	ECA anual
2014	18,1	16,0	23,5	33,6	33,9	23,1	S/D	25
2015	17,8	15,6	24,7	27,6	34,5	23,9	S/D	25
2016	18,6	14,4	24,1	32,7	28,7	S/D	S/D	25
2017	15,3	13,4	25,6	32,6	19,5	S/D	S/D	25
2018	17,1	20,1	24,7	33,7	21,6	17,7	35,1	25
2019	13,9	19,5	29,0	35,8	24,3	S/D	19,5	25
2020	14,9	17,1	23,7	22,2	28,3	S/D	12,9	25
2021	27,1	16,0	26,6	31,5	S/D	S/D	S/D	25
2022	25,9	17,6	35,0	41,2	S/D	S/D	S/D	25

Fuentes: (1) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, comunicación personal (22 de agosto de 2023) y (2) (Ministerio de Salud, s/f)  
S/D: sin datos

**Tabla 38: Monitoreo de calidad de aire de  $NO_x$  ( $\mu g/m^3$ )**

AÑO	SBJ <sup>1</sup>	CDM <sup>1</sup>	VMT <sup>1</sup>	SJL <sup>1</sup>	SAT <sup>2</sup>	E-2 <sup>3</sup>	E-6 <sup>3</sup>	E-7 <sup>3</sup>	ECA anual
2014	S/D	S/D	S/D	S/D	42,0	28,0	9,4	S/D	100
2015	19,5	61,6	7,0	33,9	34,9	22,5	14,1	S/D	100
2016	24,3	33,4	21,6	39,3	30,5	S/D	S/D	S/D	100
2017	26,5	17,1	13,9	38,1	35,8	S/D	27,6	S/D	100
2018	22,4	20,1	31,9	25,7	36,2	25,1	13,9	18,1	100
2019	21,9	8,6	11,9	24,8	34,7	25,1	S/D	21,5	100
2020	9,0	S/D	21,5	S/D	34,5	16,4	S/D	19,1	100
2021	16,0	12,9	26,3	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	100
2022	18,5	14,6	17,6	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	100

Fuente: (1) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, comunicación personal (22 de agosto de 2023), (2) ATU y (3) (Ministerio de Salud, s/f)  
S/D: sin datos

**Tabla 39: Monitoreo de calidad de aire de SO<sub>2</sub> (μg/m<sup>3</sup>)**

FECHA	SBJ	CDM	VMT	SJL	ECA (24h)
1/05/2016	10,51	2.81	4.63	9.73	250
2/05/2016	11,47	1.60	5.00	10.83	250
3/05/2016	10,89	1.55	3.44	10.90	250
4/05/2016	11,61	1.89	3.42	9.22	250
5/05/2016	11,02	S/D	5.00	12.01	250
6/05/2016	12,45	S/D	4.81	9.28	250
7/05/2016	11,43	S/D	2.92	7.98	250
8/05/2016	10,80	S/D	2.83	7.61	250
9/05/2016	14,57	S/D	S/D	11.88	250
10/05/2016	13,86	S/D	S/D	12.40	250
11/05/2016	15,11	S/D	S/D	16.30	250
12/05/2016	13,33	S/D	S/D	14.70	250
13/05/2016	13,81	S/D	S/D	14.80	250
14/05/2016	13,53	S/D	S/D	10.68	250
15/05/2016	12,63	S/D	4.29	8.06	250

*Nota:* Esta tabla presenta la información diaria de quince días del mes de febrero del 2016, como muestra de la información usada.

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, comunicación personal (22 de agosto de 2023)

S/D: sin datos

#### ANEXO 4: Protocolo de consentimiento informado para entrevistas <sup>1</sup>

La investigación “Análisis de los beneficios de la implementación de un sistema de transporte urbano: Línea 1 del Metro de Lima” es conducida por Lisbeth Milagros Morales Lavado, estudiante de la Maestría de Desarrollo Ambiental de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Se le ha contactado a usted en calidad de \_\_\_\_\_. Si usted accede a participar en esta entrevista, se le solicitará responder diversas preguntas sobre el tema antes mencionado, lo que tomará aproximadamente entre 20 y 30 minutos. La información obtenida será únicamente utilizada para la elaboración de una tesis. A fin de poder registrar apropiadamente la información, se solicita su autorización para grabar la conversación. La grabación y las notas de las entrevistas serán almacenadas únicamente por la investigadora en su computadora personal protegida mediante contraseña, luego de haber publicado la investigación, y solamente ella y su asesora tendrán acceso a la misma. Al finalizar el estudio, la información será borrada.

Su participación en la investigación es completamente voluntaria. Usted puede interrumpir la misma en cualquier momento, sin que ello genere ningún perjuicio. Se considera que este estudio implica un riesgo mínimo para usted. Además, si tuviera alguna consulta sobre la investigación, puede formularla cuando lo estime conveniente, a fin de clarificarla oportunamente.

En caso de tener alguna duda sobre la investigación, puede comunicarse al siguiente correo electrónico: a20220475@pucp.edu.pe. Además, si tiene alguna consulta sobre aspectos de ética de la investigación, puede comunicarse con el Comité de Ética de la Investigación de la universidad, al correo electrónico [etica.investigacion@pucp.edu.pe](mailto:etica.investigacion@pucp.edu.pe).

Muchas gracias por su participación.

Yo, \_\_\_\_\_, doy mi consentimiento para participar en el estudio y autorizo que mi información se utilice en este.

Asimismo, estoy de acuerdo que mi identidad sea tratada de manera (*marcar una de las siguientes opciones*):

	<b><u>Declarada</u></b> , es decir, que en la tesis se hará referencia expresa de mi nombre.
	<b><u>Confidencial</u></b> , es decir, que en la tesis <b>no</b> se hará ninguna referencia expresa de mi nombre y la tesista utilizará un código de identificación o pseudónimo.

<sup>1</sup> Modelo realizado en base al Modelo de protocolo de consentimiento de la Universidad Pontificia Católica del Perú (2022)

Finalmente, entiendo que recibiré una copia de este protocolo de consentimiento informado.

---

Nombre completo del (de la) participante	Firma	Fecha
--	-------	-------

Correo electrónico del participante: \_\_\_\_\_

---

Nombre del Investigador responsable	Firma	Fecha
-------------------------------------	-------	-------

9

