

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PROYECTOS DE
REORDENAMIENTO VIAL IMPLEMENTADOS EN EL
DISTRITO DE SAN ISIDRO UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE
CICLO DE VIDA**

Tesis para obtener el título profesional de INGENIERO CIVIL

AUTOR

Jorge Luis Prado Acosta

ASESOR:

Ian Vázquez Rowe

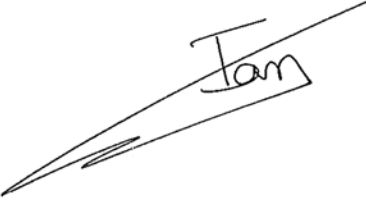
Lima, noviembre de 2023

Informe de Similitud

Yo, **Ian Vázquez Rowe**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada *Estudio comparativo de los proyectos de reordenamiento vial implementados en el distrito de San Isidro utilizando el Análisis de Ciclo de Vida* del autor **Jorge Luis Prado Acosta**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 16%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 26/11/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Sao Paulo (Brasil), 26 de noviembre de 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Vázquez Rowe, Ian</u>	
CE: 947214811	
ORCID: 0000-0002-7469-2033	

RESUMEN

Cada vez es mayor la presencia de impactos ambientales negativos asociados a las actividades afines a la infraestructura vial urbana. Esto ha generado un debate en relación a la forma en que se planifica el sistema de transporte. Las instituciones, tanto públicas como privadas, reconocen que para establecer una movilidad más sostenible es necesario formular soluciones más eficientes de gestión de tráfico. Si bien a la fecha las principales acciones llevadas a cabo se centran en el rediseño vial y la humanización de los espacios públicos, son pocos los estudios sobre estos temas que demuestran si en efecto los resultados generados son positivos en todas sus dimensiones. En tal sentido, se decidió realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) a fin de determinar los impactos ambientales relacionados con las calles urbanas de la ciudad de Lima. Para ello, fueron evaluadas las etapas de demolición, construcción, operación y mantenimiento de tres proyectos emplazados en el distrito de San Isidro. Así, para cada escenario, se obtuvo la información referente al consumo de materiales y se modelaron las emisiones al medio ambiente con base en una unidad funcional de 250 metros lineales de infraestructura vial intervenida en 1 año de operación. El método de evaluación del IPCC 2013 se utilizó para el cálculo del cambio climático y ReCiPe 2016 para otras categorías de impacto ambiental. En cuanto a la huella de carbono, se determinó un balance general en el rango de 16 y 37 toneladas de CO₂ eq al año por cada viario como resultado de los efectos directos de la construcción y el tráfico en la etapa de uso. En cambio, la formación de material particulado y la acidificación terrestre se manifestaron en una escala pequeña con magnitudes para los casos más críticos de 67 kg PM_{2.5} eq y 112 kg SO₂ eq, respectivamente. Hecho que representa riesgos mínimos para la salud humana o el entorno urbano local y que se le puede atribuir al buen comportamiento de la materia prima y al nivel tecnológico de los equipos y maquinaria. Hasta la fecha, este estudio es uno de los pocos de su tipo y los resultados obtenidos sirven como imagen de la carga ambiental que este tipo de proyectos puede inducir en los ecosistemas. Se recomienda extender la evaluación a otros proyectos viales ubicados en áreas de alta densidad urbana a fin de tener una visión más integral del panorama actual del transporte en la ciudad. Asimismo, se considera que los resultados e inventarios obtenidos pueden servir como una línea base para futuras investigaciones orientadas a la mejoría de la infraestructura vial en zonas urbanas.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida, evaluación ambiental, infraestructura vial, sostenibilidad, tráfico urbano.

SUMMARY

The presence of negative environmental impacts associated with activities related to urban road infrastructure is increasing. This has generated a debate in relation to the way in which the transport system is planned. Institutions, both public and private, recognize that in order to establish more sustainable mobility it is necessary to formulate more efficient traffic management solutions. Although to date the main actions carried out focus on road redesign and the humanization of public spaces, there are few studies on these issues that show whether the results generated are indeed positive in all dimensions. In this sense, it was decided to carry out a life cycle analysis (LCA) in order to determine the environmental impacts related to the urban streets of the city of Lima. For this, the stages of demolition, construction and operation and maintenance of three projects located in the district of San Isidro were evaluated. Thus, for each scenario, the information regarding the consumption of materials was obtained and the emissions to the environment were modeled based on a functional unit of 250 linear meters of road infrastructure intervened in 1 year of operation. The IPCC 2013 assessment method was used for the calculation of climate change and ReCiPe 2016 for other environmental impact categories. Regarding the carbon footprint, a general balance was determined in the range of 16 and 37 tons of CO₂ eq per year for each road as a result of the direct effects of construction and traffic in the use stage. On the other hand, the formation of particulate matter and terrestrial acidification manifested themselves on a small scale with magnitudes for the most critical cases of 67 kg PM_{2.5} eq and 112 kg SO₂ eq, respectively. A fact that represents minimal risks to human health or the local urban environment and can be attributed to the good performance of the raw material and the technological level of the equipment and machinery. To date, this study is one of the few of its kind and the results obtained serve as an image of the environmental load that this type of projects can induce on ecosystems. It is recommended to extend the evaluation to other road projects located in areas of high urban density in order to have a more comprehensive vision of the current panorama of transportation in the city. Likewise, it is considered that the results and inventories obtained can serve as a baseline for future research aimed at improving road infrastructure in urban areas.

Keywords: Environmental assessment, Life cycle analysis, road infrastructure, sustainability, urban traffic.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi gratitud a mi asesor, Ian Vázquez Rowe, por su paciencia, su constante orientación y sus consejos en cada una de las etapas de este proyecto. Su esfuerzo y dedicación han dejado una imborrable huella en mi formación académica.

Asimismo, deseo reconocer a todas las autoridades y personal que forman parte de la Municipalidad de San Isidro por su buena voluntad al abrirme las puertas y compartir conmigo la información necesaria para llevar a cabo esta investigación.

De manera muy especial, agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Perú, a toda la Facultad de Ciencias e Ingeniería, a mis profesores y compañeros, quienes con la enseñanza de valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional.

Finalmente, tengo reservado el mayor de mis agradecimientos a mis padres, Jorge y Eliana, y a mis hermanos, Diego y Alejandro, por brindarme su apoyo incondicional y motivarme a seguir cumpliendo cada uno de mis sueños. Son ellos a quienes debo mis logros y alegrías.

A todos ellos, les agradezco profundamente.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	i
Summary	ii
Agradecimientos	iii
Tabla de contenidos	iv
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	vii
Lista de acrónimos	viii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Formulación y descripción del problema.....	1
1.2. Objetivos de la investigación	1
1.2.1. Objetivo general.....	1
1.2.2. Objetivos específicos	1
1.3. Alcances y limitaciones	2
1.3.1. Hipótesis fundamental	2
1.3.2. Área de estudio: Distrito de San Isidro	2
1.4. Justificación	5
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Transporte y cambio climático.....	8
2.2. Infraestructura vial urbana y gestión de tránsito en el Perú	10
2.3. Gestión ambiental en el Perú	11
2.4. Análisis de ciclo de vida como herramienta de gestión ambiental	12
2.4.1. ISO 14040 y 14044	14
2.4.2. Herramienta de modelado: SimaPro	15
2.4.3. Base de datos: Ecoinvent	15
2.5. Pensamiento de ciclo de vida como eje de las ciudades sostenibles.....	16
2.6. Análisis de ciclo de vida en la infraestructura vial urbana	18
2.6.1. Antecedentes	19
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	21
3.1. Casos de estudio.....	21
3.1.1. Características de los escenarios de reordenamiento vial	21
3.1.2. Procesos constructivos	27
3.2. Análisis de ciclo de vida aplicado a los casos de estudio	28
3.2.1. Definición de objetivos y enfoque	28
3.2.2. Definición de la unidad mínima funcional.....	28

3.2.3.	Delimitación de los límites de cada sistema	29
3.2.4.	Recolección de datos.....	30
3.2.5.	Inventario de ciclo de vida.....	32
3.2.5.1.	Modelado del inventario de ciclo de vida	32
3.2.5.1.1.	Etapa de demolición.....	33
3.2.5.1.2.	Etapa de construcción	35
3.2.5.1.3.	Etapa de operación y mantenimiento	42
3.2.5.2.	Cálculo del consumo energético de las maquinarias	45
3.2.5.3.	Cálculo de emisiones de material particulado	47
3.2.5.4.	Cálculo del secuestro de carbono.....	52
3.2.6.	Evaluación del impacto de ciclo de vida.....	55
3.2.7.	Interpretación del análisis de ciclo de vida	57
3.2.8.	Análisis de sensibilidad.....	58
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		59
4.1.	Análisis de los impactos ambientales	59
4.1.1.	Etapa de demolición.....	59
4.1.2.	Etapa de construcción	60
4.1.3.	Etapa de operación y mantenimiento	62
4.1.4.	Sistema completo	64
4.2.	Discusión de resultados.....	68
4.3.	Prueba de hipótesis	72
4.4.	Utilidad de la aplicación del ACV en la infraestructura vial urbana	73
4.4.1.	Alternativas de control y mitigación de impactos.....	73
4.4.2.	Estrategias de mejora para la optimización de políticas públicas	74
4.4.3.	Viabilidad institucional de combinar el ACV y EIA	75
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		77
Referencias		79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	3
Figura 1.2. Distritos con mayor número de viajes motorizados en Lima Metropolitana	3
Figura 1.3. Densidad empresarial interdistrital en Lima Metropolitana.....	4
Figura 2.1. Fases de un análisis de ciclo de vida	14
Figura 3.1. Ubicación geográfica de la calle Los Libertadores	21
Figura 3.2. Propuesta de reordenamiento vial de la calle Los Libertadores.....	22
Figura 3.3. Resultado del proyecto de reordenamiento vial de la calle Los Libertadores.....	22
Figura 3.4. Ubicación geográfica de la avenida Rivera Navarrete	23
Figura 3.5. Propuesta de ordenamiento vial de la avenida Rivera Navarrete.....	24
Figura 3.6. Resultado del proyecto de reordenamiento vial de la avenida Rivera Navarrete	24
Figura 3.7. Ubicación geográfica de la calle Las Begonias.....	25
Figura 3.8. Propuesta de ordenamiento vial de la calle Las Begonias	25
Figura 3.9. Resultado del proyecto de reordenamiento vial de la calle Las Begonias	26
Figura 3.10. Mapa de procesos de los proyectos de reordenamiento vial urbano	27
Figura 3.11. Representación de los límites del sistema general	30
Figura 3.12. Esquema general del ICV.....	33
Figura 3.13. Detalles de las superficies de calzada	38
Figura 3.14. Detalles de las señalizaciones verticales.....	39
Figura 3.15. Parámetros utilizados para determinar el secuestro de carbono.....	54
Figura 3.16. Esquemmatización de las relación entre los métodos de caracterización	57
Figura 4.1. Impactos generados por las actividades de demolición	60
Figura 4.2. Impactos generados por las actividades de construcción	61
Figura 4.3. Impactos generados por los materiales de construcción	61
Figura 4.4. Impactos generados por las actividades de operación y mantenimiento.....	62
Figura 4.5. Impactos generados por los vehículos según su tipología	63
Figura 4.6. Comparación porcentual de los impactos generados en cada escenario	65
Figura 4.7. Impactos generados por fase en la calle Los Libertadores.....	65
Figura 4.8. Impactos generados por fase en la avenida Rivera Navarrete.....	66
Figura 4.9. Impactos generados por fase en la calle Las Begonias	66
Figura 4.10. Impactos generados por todas las actividades.....	67
Figura 4.11. Comparación de las emisiones calculadas con aquellas reportadas en la literatura.....	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Emisiones de GEI en el Perú por categorías de transporte.....	9
Tabla 3.1. Resumen de las características de los casos de estudio	26
Tabla 3.2. Distribución de los datos según su naturaleza.....	31
Tabla 3.3. Información primaria.....	31
Tabla 3.4. Duración de los proyectos 33	33
Tabla 3.5. Peso y volumen de escombros.....	34
Tabla 3.6. Cálculo de kilómetros recorridos por demolición	35
Tabla 3.7. Inventario primario para la etapa de construcción de la calle Los Libertadores	36
Tabla 3.8. Inventario primario para la etapa de construcción de la avenida Rivera Navarrete	37
Tabla 3.9. Inventario primario para la etapa de construcción de la calle Las Begonias.....	37
Tabla 3.10. Inventario final para la etapa de construcción de la calle Los Libertadores	40
Tabla 3.11. Inventario final para la etapa de construcción de la avenida Rivera Navarrete	41
Tabla 3.12. Inventario final para la etapa de construcción de la calle Las Begonias	41
Tabla 3.13. Cantidad anual de vehículos para cada caso de estudio	42
Tabla 3.14. Cantidad anual de vehículos por kilómetro recorrido para cada caso de estudio.....	43
Tabla 3.15. Consumo eléctrico anual	44
Tabla 3.16. Inventario del mantenimiento anual	45
Tabla 3.17. Tiempo de uso de las maquinarias.....	46
Tabla 3.18. Consumo energético de las maquinarias	46
Tabla 3.19. Emisiones de PM _{2.5} durante la demolición a	48
Tabla 3.20. Emisiones de PM ₁₀ durante la demolición	48
Tabla 3.21. Factor multiplicador k	49
Tabla 3.22. Pesaje promedio de vehículos para cada caso de estudio.....	50
Tabla 3.23. Emisiones por re-suspensión de material particulado	50
Tabla 3.24. Factores de emisión para el desgaste de frenos	51
Tabla 3.25. Emisiones producidas por el desgaste de los frenos.....	51
Tabla 3.26. Factores de emisión para el desgaste de neumáticos.....	52
Tabla 3.27. Emisiones anuales producidas por el desgaste de los neumáticos	52
Tabla 3.28. Secuestro de carbono en la calle Los Libertadores	55
Tabla 3.29. Secuestro de carbono en la calle Las Begonias	55
Tabla 4.1. Impactos ambientales en la etapa de demolición	59
Tabla 4.2. Impactos ambientales en la etapa de construcción.....	60
Tabla 4.3. Impactos ambientales en la etapa de operación y mantenimiento.....	63
Tabla 4.4. Impactos ambientales en el sistema completo.....	64
Tabla 4.5. Emisiones de GEI por actividad para cada escenario.....	67
Tabla 4.6. Emisiones de GEI para cada escenario en diferentes medidas.....	68
Tabla 4.7. Comparación de las emisiones calculadas con aquellas reportadas en la literatura	69
Tabla 4.8. Resultados obtenidos por el análisis de sensibilidad.....	71

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACV: Análisis de ciclo de vida

AICV: Análisis de inventario de ciclo de vida

ATU: Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao

CalEEMod: California Emission Estimator Model

CBCS: Consejo Brasileño de Construcción Sustentable

CIDATT: Centro de Investigación y de Asesoría del Transporte Terrestre

COP: Conferencia de las Partes

EIA: Estudio de impacto ambiental

EICV: Evaluación de impacto de ciclo de vida

EPA: Environmental Protection Agency

GEI: Gases de efecto invernadero

ICV: Inventario de ciclo de vida

IEA: Agencia Internacional de la Energía

IGEDD: Inspección General de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

INACAL: Instituto Nacional de Calidad

INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática

INGEI: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO: International Organization for Standardization

MINAM: Ministerio del Ambiente

MML: Municipalidad Metropolitana de Lima

MOVES: Motor Vehicle Emission Simulator

MSI: Municipalidad de San Isidro

MTC: Ministerio de Transporte y Comunicaciones

NTP: Norma Técnica Peruana

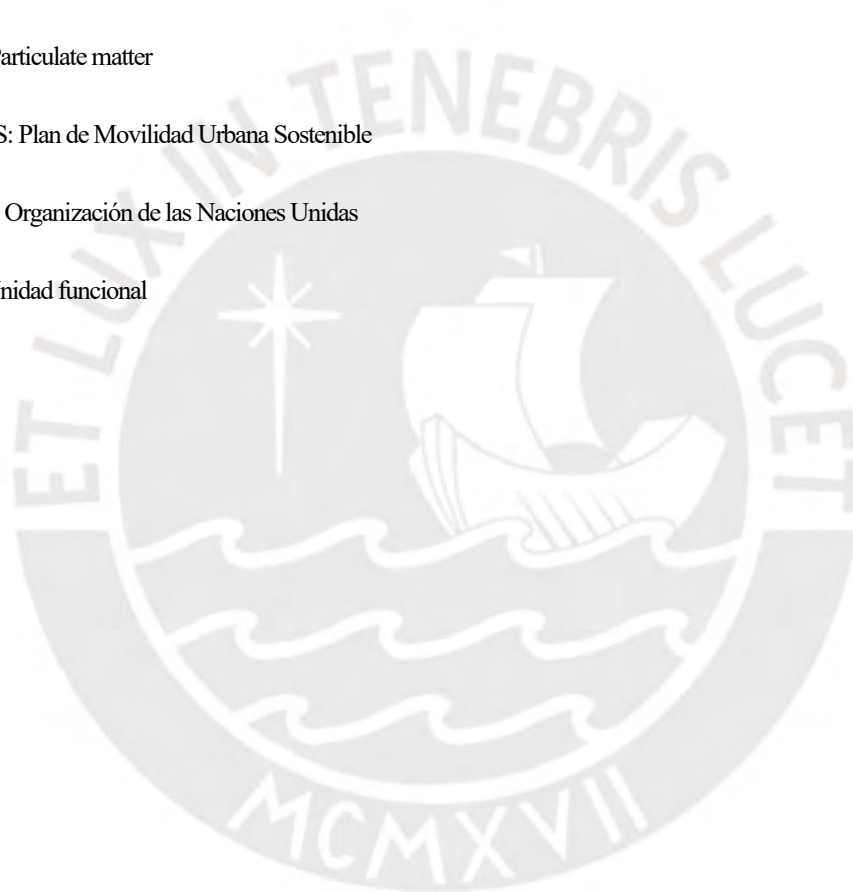
PELCAN: Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial

PM: Particulate matter

PMUS: Plan de Movilidad Urbana Sostenible

ONU: Organización de las Naciones Unidas

UF: Unidad funcional



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación y descripción del problema

Hoy en día son muchas las ciudades que tratando de buscar una solución a los problemas del tráfico han llevado a cabo un conjunto de reformas en gestión de tránsito, las cuales se centran en optimizar el uso de la infraestructura vial urbana a través de un reordenamiento que permita facilitar la fluidez de las unidades vehiculares. Dependiendo de las características propias de cada entorno, estas reformas pueden incluir dentro de su alcance la implementación, mejora o incluso eliminación de la estructura vial existente.

No obstante, a la par que tienen un impacto significativo en el sistema de transporte, los proyectos de intervención en la infraestructura vial también contribuyen a lo largo de todo su ciclo de vida al incremento de los niveles de contaminación atmosférica y, por ende, en la degradación de los ecosistemas. Estos impactos no se mantienen constantes en el tiempo, sino por el contrario son sensibles a sufrir cambios pues tienen una fuerte dependencia a múltiples externalidades.

A fin de fortalecer el diseño de políticas e ingeniería de transporte en el contexto urbano y así alcanzar un sistema de transporte más eficiente y con un mayor bienestar social, resulta importante conocer la respuesta a la siguiente interrogante: ¿cuáles son los impactos ambientales más relevantes generados por los distintos proyectos de reordenamiento vial a lo largo de su ciclo de vida?

Al abordar y resolver esa cuestión, por medio de un adecuado análisis, se espera que la gestión de tránsito en áreas urbanas pueda ser impulsada hacia una práctica más sostenible en todas sus dimensiones.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es integrar la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) a la evaluación de los impactos ambientales derivados de las intervenciones en la infraestructura vial urbana del distrito de San Isidro (Lima, Perú).

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar los principales contaminantes en cada uno de los sistemas, cuantificándolos y evaluándolos en contexto, determinando la importancia de su contribución al balance final de emisiones

- Comparar distintos escenarios de reordenamiento vial mediante una evaluación ambiental basada en el ciclo de vida a fin de lograr un dimensionamiento adecuado de los impactos ambientales más relevantes
- Analizar las incidencias de las intervenciones en la infraestructura vial y los cambios en el flujo del tráfico vehicular en el área de estudio y zonas urbanas adyacentes a partir de la información técnica disponible y bibliografía especializada
- Plantear alternativas de control y mitigación de emisiones para cada caso de estudio a fin de lograr un sistema de transporte sostenible y con bajos impactos ambientales
- Proponer estrategias de mejora para optimizar las políticas públicas orientadas a la ingeniería de transporte

1.3. Alcances y limitaciones

1.3.1. Hipótesis fundamental

El proyecto de reordenamiento vial urbano con la más baja incidencia de tráfico vehicular a lo largo de su ciclo de vida es el que menos contribuye al balance general de emisiones en el área de estudio y zonas adyacentes y, por consiguiente, constituye el escenario de trabajo más favorable en términos ambientales.

1.3.2. Área de estudio: Distrito de San Isidro

Lima Metropolitana es una gran urbe ubicada en el centro-oeste del Perú y conformada por 43 distritos. Cuenta con una extensión de 2617 km², lo que representa cerca de un 0.2% del territorio nacional, y alberga alrededor del 30% de la población total, 9 476 975 habitantes (INEI, 2020a). En relación a su densidad demográfica, presenta la más alta de todo el país (3621 habitantes/km²) producto de que en esta región se concentran los habitantes de todo el territorio nacional a consecuencia del fenómeno migratorio. Además de ser la ciudad más ocupada, se caracteriza también por ser sede de gobierno, lo cual hace que sea el núcleo económico, social y político del país.

Dentro del área metropolitana de Lima, al centro-oeste de su territorio, se encuentra el distrito de San Isidro (véase Figura 1.1), reconocido como tal mediante el *Decreto Ley N° 7113*. De acuerdo con las estimaciones realizadas por la Municipalidad de San Isidro (MSI), el distrito cuenta con una población aproximada de 67 mil habitantes y una extensión territorial de 9.82 km², zonificada por juntas vecinales en 5 sectores urbanos, los que a su vez se distribuyen en 24 subsectores.



Figura 1.1. Ubicación geográfica del área de estudio. Fuente: Visor de información catastral de la MSI (2018)

En relación con el resto de distritos que conforman Lima Metropolitana, San Isidro tiene una caracterización que difiere del perfil general. Además de ser el distrito que registra la mayor cantidad de viajes diarios en vehículos motorizados en toda la región, con aproximadamente 524 mil (JICA, 2012); San Isidro, al albergar cerca de 403.1 empresas por cada mil habitantes (INEI, 2018), se constituye como el distrito con el más elevado índice empresarial de toda la metrópoli. Podría decirse que San Isidro es distrito con mayor atracción de viajes metropolitanos, así como el principal centro financiero y empresarial de Lima y Perú; tal como se aprecia en las Figuras 1.2 y 1.3.

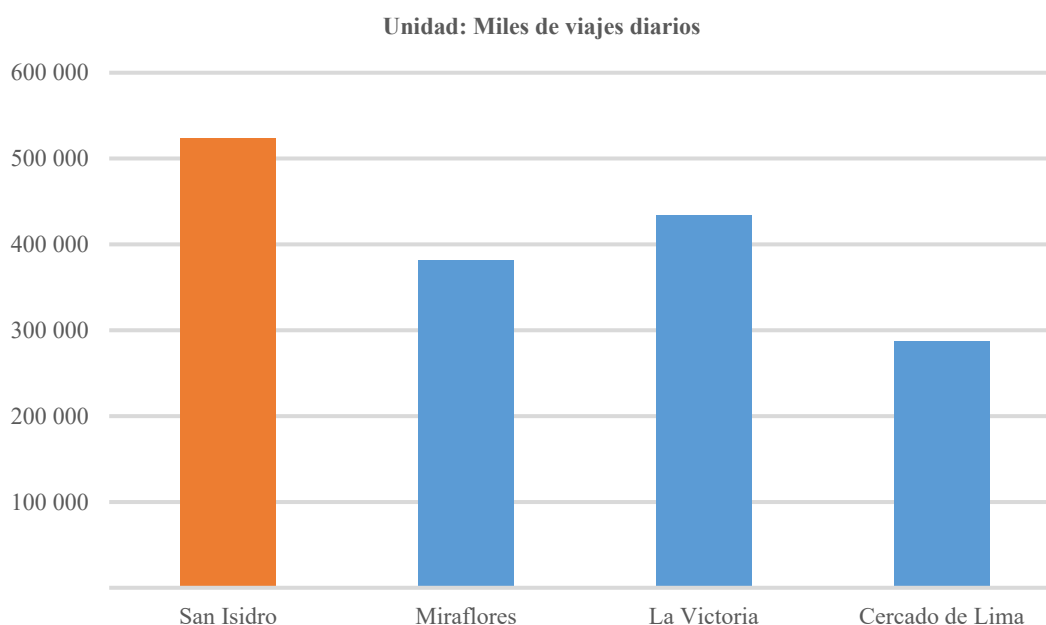


Figura 1.2. Distritos con mayor número de viajes motorizados en Lima Metropolitana. Fuente: Adaptado de JICA (2012)

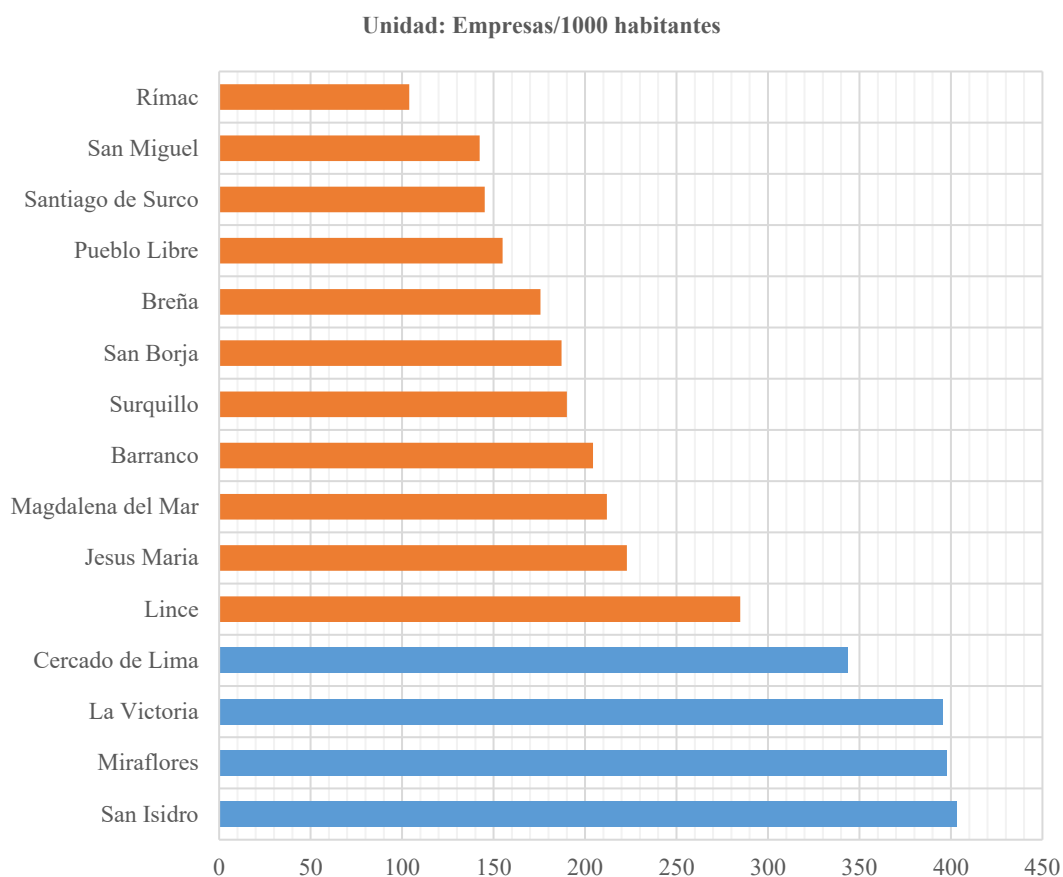


Figura 1.3. Densidad empresarial interdistrital en Lima Metropolitana. Fuente: Adaptado de INEI (2018)

A todo esto, se le puede sumar que San Isidro también se diferencia del resto de distritos ya que, a pesar de su moderada densidad poblacional con cerca de 6025 habitantes/km² (INEI, 2020a), capta en su interior a los grupos con el nivel socioeconómico más alto de la región. Según la *Encuesta Nacional de Hogares*, la zona moderna de Lima, de la que forma parte San Isidro, está integrada en un 76.8% por perfiles socioeconómicos AB, mientras que en el resto del territorio estos índices no superan el 30% (INEI, 2019). El conjunto de estos indicadores muestra el contraste que se vive hoy en día entre los diferentes distritos, pero a su vez el valor que tienen cada una de estas características cuando se busca implantar medidas que mejoren el bienestar general del público.

En este contexto, resulta imperativo para San Isidro reformular sus políticas y propuestas acorde a las nuevas exigencias urbanas y ambientales, teniendo como prioridad mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos. En los últimos años, este objetivo se ha visto reflejado en varias publicaciones, siendo el *Plan de Movilidad de Urbana Sostenible (PMUS)* el que quizás lo aborda de una manera más integral, haciendo énfasis sobre la visión de incrementar la competitividad del distrito y solucionar el creciente problema del tráfico y expansión urbana (MSI y Fundación Transitemos, 2016).

Otro aspecto que denota la importancia que se le da en San Isidro a la búsqueda de mejoras continuas es su lucha por direccionar el desarrollo sostenible local. En pro de esto, el distrito a desplegado grandes inversiones económica, temporal y tecnológica con la que busca generar innovaciones urbanas con mayor eficiencia (MSI, 2012)

A fin de alinearse con todas las estrategias sobre movilidad y tránsito, la MSI propuso implementar una serie de programas y proyectos orientados configurar la infraestructura vial urbana a lo largo de todo el distrito, estableciendo una jerarquía vial que garantice condiciones físicas adecuadas para la accesibilidad universal y que además sirva como apoyo para una operación más eficiente del transporte público a través de la intermodalidad (MSI y Fundación Transitemos, 2016). En palabras cortas, se planeó llevar a cabo una redistribución en la dotación de las infraestructuras y usos que se les da a los espacios públicos.

A pesar de que a primera instancia los proyectos de intervención en la infraestructura vial urbana puedan suponer ventajas sociales y ambientales significativas, es necesario corroborar, a partir de un análisis holístico, que para casos concretos los resultados son positivos. Así, tomando en cuenta los criterios mencionados antes, se realizó una revisión de la literatura sobre los principales proyectos de reordenamiento vial ejecutados en el distrito de San Isidro en los últimos años, planteándose la calle Los Libertadores, la avenida Rivera Navarrete y la calle Las Begonias como los escenarios de estudio más convenientes.

Esta tesis propone evaluar dichos viarios mediante un análisis basado en su ciclo de vida, a fin de obtener un dimensionamiento de todos los procesos y subprocesos involucrados, así como de los impactos ambientales que estos puedan inducir, específicamente, en el entorno inmediato a cada una de estas calles y, de manera más general, en toda la extensión territorial del distrito de San Isidro.

En ese sentido, dentro de los alcances de cada proyecto, se incluyeron las modificaciones realizadas en los mobiliarios urbanos, las veredas, los estacionamientos, los perfiles, las vías auxiliares y las calzadas principales. Si bien los límites del análisis se encuentran sujetos a las características particulares de cada emplazamiento, el presente estudio, al tener un carácter comparativo, permite que las fases en común de estos proyectos puedan ser evaluadas individualmente o de manera conjunta, a través de sistemas parciales y/o completos, reduciendo así el nivel de incertidumbre y mejorando la certeza de los datos y resultados.

1.4. Justificación

En los últimos años, la lucha contra el cambio climático se ha convertido en un desafío de primer grado para el Perú. En respuesta a cumplir con los objetivos de adaptación, mitigación y control de los impactos ambientales, establecidos en el *Protocolo de Kyoto* y el *Acuerdo de París* (ONU, 1998; 2015a), resulta necesario identificar los diversos sectores en los que reducir las emisiones de gases de efecto invernadero

(GEI) es crucial. Si bien el transporte no ha sido considerado dentro de las áreas temáticas priorizadas para el cumplimiento de las contribuciones nacionalmente determinadas (MINAM, 2016a), dicho sector resulta aún de vital importancia para cumplir con algunas metas proclamadas en la *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (ONU, 2015b), como es el caso de los ODS 9 y 11, los cuales señalan que intervenir e innovar en esta área permitiría alcanzar infraestructuras más resilientes y, por ende, ciudades y asentamientos humanos más inclusivos, seguros y sostenibles.

No obstante, la situación actual del país es otra, siendo la congestión en vías urbanas uno de los problemas más notables. Las calles y avenidas saturadas de vehículos se han convertido en una imagen habitual en las ciudades del Perú, generando una serie de consecuencias sociales y ambientales negativas (Ponce de León, 2012). Este problema se ha ido intensificando cada vez más producto de la inadecuada red vial existente, el crecimiento en los índices de motorización y la ineffectividad de las políticas públicas entorno a este sector. Por ello, a día de hoy, la realidad del país y la región refleja un desorden absoluto que pone en riesgo la calidad de vida de sus habitantes.

Al respecto, según indica el INEI (2021), para Lima Metropolitana, existen alrededor de 2 millones 90 mil unidades vehiculares, siendo esta la región que más contribuye al parque automotor nacional. Asimismo, también se determinó que los distritos limeños con mayor atracción de flujo vehicular en la región son Cercado de Lima, Miraflores, La Victoria y San Isidro (JICA, 2012; ATU, 2019). Si bien existe una diferencia relativamente marcada entre ellos, el distrito de San Isidro, al concentrar una población con un nivel de ingresos alto, refleja una tasa de motorización que supera por un margen amplio al promedio general de Lima con una proporción estimada en 360 vehículos por cada 1000 habitantes (MSI y Fundación Transitemos, 2016).

Por otro lado, de acuerdo con el *Séptimo Informe de Resultados sobre Calidad de Vida*, el sector transporte de Lima Metropolitana fue fuente de emisión de aproximadamente 6.5 millones toneladas de CO₂ eq (Lima Cómo Vamos, 2017). Al relacionar todos estos indicadores, se puede deducir que las áreas urbanas con una tasa de motorización alta son sensibles a generar mayores emisiones de GEI y, por ende, mayores impactos ambientales negativos.

Por el contexto mencionado, hay razones suficientes para creer que un análisis de la infraestructura vial urbana y del flujo vehicular incidente en el distrito de San Isidro representarán una oportunidad para una mejora ambiental y social significativa. Así, con ánimos de poder aliviar esta problemática, se propone realizar un estudio que permita monitorear, cuantificar y evaluar los impactos ambientales más relevantes de los proyectos de reordenamiento vial durante todas las etapas de su ciclo de vida.

Se eligió aplicar la herramienta de análisis de ciclo de vida (ACV) en tres escenarios distintos: la calle Los Libertadores, la avenida Rivera Navarrete y la calle Las Begonias. Debido a sus características, se espera que estos sean responsables de un significativo impacto ambiental en el área de estudio y entornos adyacentes. Se puede decir que el desarrollo de este estudio será crucial no solo para determinar el sistema más eficiente en términos ambientales, sino también para plantear oportunidades de mejora en diseño de políticas e ingeniería de transporte.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Transporte y cambio climático

El cambio climático representa indudablemente uno de los mayores problemas para la humanidad. Si bien, es conocido que la Tierra ha experimentado alteraciones en su entorno desde el principio de los tiempos; según el IPCC (2022), la actividad humana ha provocado inequívocamente que estos cambios sean más dinámicos y se presenten en un periodo más corto de tiempo. Prueba de ello son los eventos meteorológicos extremos que se viven frecuentemente en diversas partes del mundo, tales como el derretimiento de los cascos polares, las sequías, las inundaciones o los incendios forestales (Riedy, 2016). En ese sentido, queda claro que la realidad del cambio climático debido a acciones humanas es certera y que las amenazas ambientales irreversibles son cada vez más inminentes, lo cual plantea riesgos para los sistemas naturales que podrían llegar a ser catastróficos si no se controlan adecuadamente (Stocker et al, 2013).

Kirk-Davidoff (2018) afirma que la principal causa del cambio climático actual es el incremento en la acumulación de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera provocado por el consumo desenfrenado de combustible fósiles y los cambios en los usos del suelo. De acuerdo con su investigación, estas dos categorías se reparten entre sí la emisión de más del 50% de estos contaminantes, tendencia que se mantiene hasta el día de hoy.

Por otro lado, según estimaciones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2023), en los últimos años, el sector transporte representó alrededor del 23% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂), lo equivalente al 13% del total de emisiones de GEI. Si se compara esta cifra con la del resto de sectores, se ve un crecimiento con casi el doble de velocidad. De continuar esta tendencia, se espera que la contribución global del transporte a las emisiones de GEI aumente, llegando a alcanzar o, en el peor de los casos, superar el umbral del 30% para el 2050 (Pizzinato, 2009; Creutzig et al., 2015).

En un contexto más específico, se puede afirmar que la modalidad de transporte que más emisiones genera, debido a sus componentes, dimensiones y escalas, es el realizado en carretera. La infraestructura vial juega un papel importante en todo esto, pues de ellos se desprenden grandes cantidades de CO₂, principalmente durante sus etapas de construcción y operación (Castillo, 2012). El transporte terrestre termina por resultar incluso más desfavorable si se toma en cuenta que las emisiones de GEI derivadas de estas actividades, amplifican sus efectos negativos en ambientes con gran concentración urbana. Según señalan Xie y colegas (2017), el tamaño de la población genera un efecto más pronunciado sobre las

emisiones de carbono en ciudades de mediana y gran escala, lo que provoca que los impactos en las personas y ecosistemas lleguen a ser más perjudiciales.

A pesar de que las regiones industrializadas son las principales causantes de los contaminantes emitidos a la atmósfera producto del transporte, los países en desarrollo se encuentran en camino de alcanzar los mismos volúmenes de emisiones dado el acelerado crecimiento de sus tasas de motorización y la falta de una adecuada conurbación planificada en sus territorios (ONU, 2021). Ello provocando también que algunas externalidades asociadas, como la congestión, siniestros viales y degradación ambiental sufran un aumento significativo de la misma proporción. Si a esto se le añade el hecho que los procesos y servicios vinculados al transporte en estas regiones son más precarios, desarticulados y, en muchos casos, ineficientes, el escenario para ellos se vuelve mucho más desfavorable (Cortés-Villafradez, 2018).

La situación actual que se vive en el Perú es un retrato fiel del problema que se evidencia en muchos países en vías de desarrollo. De acuerdo con la Tabla 2.1, al año 2019, el sector transporte peruano contribuyó al balance general de emisiones en un 12% con aproximadamente 25 millones de toneladas de GEI, de los cuales el 93% del total correspondía a la categoría de transporte terrestre (MINAM, 2019).

Tabla 2.1. Emisiones de GEI en el Perú por categorías de transporte. Fuente: Adaptado de MINAM (2019)

Categoría de transporte	Emisiones de GEI (Gg CO ₂ eq)	Porcentaje (%)
Aviación civil	1171.29	4.57%
Transporte terrestre	23 958.96	93.42%
Ferrovionario	96.13	0.37%
Navegación marítima y fluvial	390.85	1.52%
Otros tipos	29.05	0.11%
Total	25 646.28	100%

Nota 1 Gg = 1000 toneladas

Si bien podría decirse que el Perú cuenta con una tasa relativamente baja de emisiones en comparación con otros países, sus condiciones demográficas, políticas y sociales lo hacen un país vulnerable ante los efectos del cambio climático localizado. En ese sentido, si se quiere minimizar los efectos ambientales que perturban al país, es necesario abordar de forma urgente las deficiencias en su sistema de transporte. De hecho, un estudio reciente de Shindell y colegas (2018) sugiere que alrededor de 41 000 vidas humanas se podrían salvar en Lima en el período 2020–2100 si se diera más énfasis a las emisiones de GEI a corto plazo. Para lograr esto, se debe instaurar estrategias que eviten un sesgo a favor del automóvil, adoptando un enfoque de planificación integrada que incluya medios de transporte eficientes, saltos tecnológicos y, sobre todo, diseños inteligentes de infraestructura vial (Bakker et al., 2014).

2.2. Infraestructura vial urbana y gestión de tránsito en el Perú

Hoy en día, la infraestructura vial urbana es considerada como un componente clave en el desarrollo económico de cualquier sociedad, por lo que implica importantes inversiones en su construcción. Según afirman Araújo y Oliveira (2014), si en el pasado el principal criterio utilizado en el diseño de dichas infraestructuras era buscar los costos más bajos de implementación, actualmente existen otros enfoques sobre este tema, los cuales valoran otras dimensiones y procuran darle un alcance más integral.

Dado que las redes viales influyen directamente en el crecimiento financiero de una región mediante el transporte de personas y mercancías, generan impactos importantes en el nivel de vida de la población, así como en la calidad de los ecosistemas urbanos. No obstante, estos efectos se vuelven negativos cuando la infraestructura existente pierde la capacidad de satisfacer la demanda de circulación adyacente a ella, es decir cuando se generan los problemas de tráfico excesivo (Vásquez y Bendezú, 2008).

De acuerdo con Zhang y colegas (2011), desde el punto de vista de la ingeniería de tránsito, son varias las acciones orientadas a controlar y mitigar los problemas de tráfico en las ciudades como, por ejemplo, la extensión o mejoría de la red vial, el establecimiento de zonas rígidas, la implementación de carriles exclusivos para determinados vehículos o la eliminación de estacionamientos y obstrucciones en las autopistas. No obstante, cuando estas operaciones son planteadas, muchas veces no se toman en cuenta los efectos indirectos, tanto ambientales como sociales, que se podrían generar.

En ese sentido, resulta crucial para las políticas públicas formular propuestas más creativas en materia de transporte que integren estudios sobre las principales incidencias de estas potenciales acciones en las áreas de estudio y zonas aledañas. Ello representaría una solución sostenible para el problema de la congestión vehicular en el contexto urbano.

Al igual que en otros países en vías de desarrollo, las ciudades del Perú también tienen problemas relacionados con su sistema de transporte urbano, siendo los más notorios la informalidad en la prestación de servicios, la saturación de la red vehicular, la cantidad siniestros viales y la polución focalizada (Moscoso et al., 2019). A fin de mitigar esa problemática, se están implementado diversas soluciones en materia de gestión de tránsito que tienen como objetivo alcanzar una movilidad más sostenible.

San Isidro es un ejemplo de los nuevos modelos de ciudad que se intentan alcanzar en el país, ya que está impulsando un proceso de innovación que apunta hacia una mejora en los modos de desplazamiento y uso del espacio público (MSI y Fundación Transitemos, 2016). Específicamente, una de los trabajos más importantes llevados a cabo en este distrito es el rediseño de las secciones viales para dar alcance al uso de espacios por parte de peatones, ciclistas y transporte público (Harte, 2017). Con ello, aspiran a que la infraestructura de transporte se adapte a los efectos del cambio climático a fin de reducir las pérdidas

sociales y ambientales. Sin embargo, pese a que estas modificaciones parecen traer consigo impactos positivos, no existe un respaldo científico que lo demuestre. La única evidencia encontrada corresponde a los reportes de seguimiento operativo, en los cuales se detalla el avance y la eficacia de llevar a cabo estas acciones en los últimos años a fin de promover el desarrollo urbano territorial ordenado y sostenible en el distrito (MSI, 2023). Entonces, queda claro que, para validar estos trabajos, será necesario la ejecución de evaluaciones que permitan determinar si es que sus consecuentes impactos son, en el balance general, beneficiosos o no para la población.

2.3. Gestión ambiental en el Perú

El concepto de desarrollo sostenible ha sido objeto de muchas interpretaciones a lo largo del tiempo, pero no es hasta 1987, con la creación del documento *Our Common Future*, que se obtiene una primera definición formal (Brundtland, 1987). Según dicha publicación, este puede representarse como el equilibrio entre las actividades humanas y el mundo natural, es decir, entre la interacción del desarrollo económico y social, y la protección del medio ambiente. Por lo tanto, implica un manejo adecuado de los recursos naturales y la búsqueda de soluciones a fin de reducir su dependencia y satisfacer necesidades intergeneracionales sujetas a limitaciones tecnológicas.

Según señalan la *Ley General del Ambiente* (MINAM, 2005) y, en un contexto internacional, el *Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible* (ONU, 2002), la gestión ambiental cumple un rol fundamental con miras al desarrollo sostenible ya que se presenta como la forma más eficiente de mejorar la calidad de vida de la población, la integración de actividades económicas y la protección del patrimonio natural. Además, constituye también un necesario y sustantivo avance hacia la armonización de decisiones y acciones en lo que respecta a políticas públicas (MINAM, 2016b).

Entre los principales instrumentos de gestión institucionalizados en el Perú, se puede encontrar el estudio de impacto ambiental (EIA). Tal como indica el reglamento correspondiente a la *Ley N° 27446*, todos aquellos proyectos que impliquen actividades, construcciones u obras con el potencial de causar impactos negativos en la sociedad están obligados a aplicar los EIA para poder ser autorizadas y/o habilitadas ante las autoridades competentes (MINAM, 2011).

Si bien el EIA es una herramienta útil para prevenir, supervisar y controlar los impactos de determinados proyectos y/o actividades, el problema de su uso reside en que, por su misma naturaleza burocrática, los esfuerzos suelen concentrarse más en conseguir la aprobación técnica y rara vez en la discusión de los resultados obtenidos (Sánchez y Hacking, 2012). En ese sentido, el EIA suele ser considerado por los titulares de los proyectos más como un trámite legalmente requerido que como un método de planificación orientado a mejorar la ejecución de procesos y generar bienestar social.

Aparte, una importante debilidad de este instrumento es el enfoque pragmático y simple en el cual se sustenta. Tal como indican Glasson y colegas (2005), gran parte, si no la mayoría, de las evaluaciones actuales se basa en la experiencia y la opinión de expertos en lugar de análisis complejos y científicamente comprobables, lo cual deja mucho lugar para errores potenciales debido a un juicio deficiente y a la falta de información creíble.

Por otro lado, según reconocen Cornejo y colegas (2005), otra limitación de este tipo de procedimiento es que únicamente evalúa los impactos ambientales inmediatos sobre un área de estudio específica, dejando de lado los efectos globales que estos también puedan ocasionar, tales como el cambio climático o la destrucción de la capa de ozono. Asimismo, debido a su carácter predictivo, esta evaluación deja de lado algunos efectos que pueden surgir en los diferentes niveles de la cadena de suministro y omite ciertos indicadores importantes que si deberían tomarse en cuenta pues podrían llegar a ser críticos para la toma de decisiones.

En ese entender, a pesar de que el EIA es uno de los pocos sistemas de control ambiental integrado a las políticas peruanas, queda claro que no es totalmente eficiente. Por tal motivo, es necesario encontrar e implementar herramientas y mecanismos más completos para determinar la viabilidad de los proyectos de inversión a lo largo de todo su ciclo de vida. Solo así se podrá establecer una mejora en la gestión ambiental, a medida que se alcanzan los objetivos del desarrollo sostenible.

2.4. Análisis de ciclo de vida como herramienta de gestión ambiental

En los últimos años, la conciencia ambiental se ha convertido en una obligación empresarial e institucional en todo el mundo. Por ello, son muchos los países que han adoptado políticas en este ámbito, las cuales mediante regulaciones motivan una serie de acciones con el fin mitigar los impactos negativos en los entornos naturales y garantizar el desarrollo sostenible (Phan y Baird, 2015; Vatn, 2015).

Particularmente, en el Perú bajo ninguna circunstancia se puede ejecutar un proyecto sin antes contar con las certificaciones que garanticen el cumplimiento de los indicadores de calidad ambiental pertinentes (MINAM, 2005). En tal sentido, para cumplir con estos lineamientos, resulta necesario incluir dentro de todo proyecto una metodología que aborde de manera sistemática los impactos ambientales y los consecuentes efectos circundantes que estos puedan generar. Si bien se opta generalmente por el uso del EIA, aún existen muchos debates en cuanto a si es el instrumento más adecuado para medir la sostenibilidad ambiental de manera integral debido a la falta de consistencia y uniformidad en su evaluación.

No obstante, existe una herramienta alternativa basada en los principios de gestión ambiental y cuya aplicación cumple con los criterios expuestos, el análisis de ciclo de vida (ACV). Según indican

Rybczewska-Blażejowska y colegas (2018), la principal fortaleza de esta herramienta es que toma en consideración todas las etapas de producción de un determinado producto o servicio e involucra todos los efectos externos relevantes para un análisis más honesto y fiel a la realidad. Además, otra importante ventaja del ACV es su enfoque determinístico, el cual se enmarca en procedimientos estandarizados y validados por normativas internacionales. Así pues, a diferencia de otros instrumentos, esta permite la inclusión de datos cuantitativos sobre los impactos potenciales de un proyecto, tanto en magnitud como escala probable, con la finalidad de que los procesos de análisis y, por consiguiente, los resultados reproducidos cuenten con un consenso dentro de la comunidad científica (Madhu, 2019).

Asimismo, en el transcurso de la última década, ha quedado demostrado por medio de algunos estudios que el ACV puede ser incorporado exitosamente en diversas organizaciones a fin de identificar procesos ineficientes, evaluar el desempeño ambiental, reducir pérdidas económicas y aumentar la sostenibilidad de los productos finales (Lewandowska, 2011a; 2011b; 2013). Según dichos estudios, el ACV ofrece múltiples posibilidades que justifican la idoneidad como herramienta institucionalizada, mientras que sus limitaciones no representan mayores inconvenientes cuando se lleva a cabo de manera regular y sistemática.

Por otra parte, Mazzi y colegas (2017) sostienen que la integración del ACV con otros sistemas de gestión ambiental, como el EIA, resulta también una alternativa prometedora pues la combinación de estas metodologías puede conducir a una visión más completa de los impactos ambientales al posibilitar la realización de inventarios de ciclo de vida más explícitos (con información tanto cuantitativa como cualitativa) y la identificación de las fases más críticas de los procesos. De igual manera, esta unión también tiene el potencial de facilitar los procesos de toma de decisión ya que permite determinar de una mejor manera los principales problemas que deben abordarse como prioridades y, por ende, servir como un fuerte respaldo para los juicios críticos sobre los perfiles ambientales de productos o servicios (Manuilova et al., 2009; Dong et al., 2018).

En definitiva, la inclusión del enfoque de ciclo de vida al EIA tiene el potencial de profundizar y aumentar el rendimiento de las evaluaciones ambientales al ayudar a resaltar más los impactos, especialmente aquellos globales, y brindar información más detallada sobre los procesos responsables de ellos (Larrey-Lassalle et al., 2017).

Si bien hace un tiempo en el Perú se tenía cierta resistencia a adoptar esta herramienta entre los mecanismos de gestión ambiental, la última evidencia encontrada respecto a su funcionalidad como instrumento de ayuda para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible terminó por reducir aquel rechazo (Vázquez-Rowe, 2019). Por el contrario, hoy en día es probable encontrar una mayor apertura, tanto de instituciones gubernamentales como empresas privadas, por implementar el ACV como un

mecanismo de gestión integrado para la mejora de procesos. Incluso, es cada vez más frecuente encontrar publicaciones de divulgación científica desarrolladas en territorio peruano y basadas en este tipo de pensamiento.

Así, por ejemplo, gracias al trabajo en conjunto del MINAM y el Instituto de la Calidad (INACAL), hoy existen algunos documentos reglamentarios basados en esta corriente de estudio. Así, por un lado, se cuenta con la *NTP-ISO 14044* (2013) y la *NTP-RT/ISO TR 14049* (2014), las cuales describen los requisitos y directrices a seguir, a medida que brindan ejemplos ilustrativos de aplicación. Y, por otro lado, se tiene la *NTP-ISO 14045* (2013), la cual define cómo evaluar la ecoeficiencia de los sistemas de un producto o servicio en base a todos los procesos que rigen su ciclo de vida.

2.4.1. ISO 14040 y 14044

El ACV está regulado internacionalmente por las normas *ISO 14040* y *14044*, las cuales describen una metodología capaz de descomponer en distintas fases la existencia de un producto o servicio y ahondar con mayor detalle en sus diferentes procesos a fin de poder determinar los impactos potenciales que estos puedan tener en el ambiente a lo largo de toda su vida útil (ISO, 2006a; 2006b).

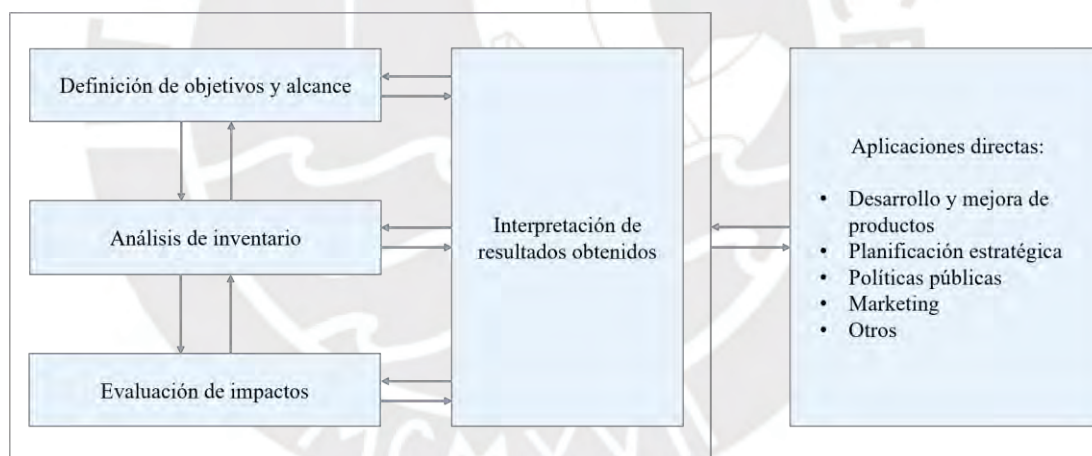


Figura 2.1. Fases de un análisis de ciclo de vida. Fuente: Adaptado de ISO 14040 (2006a)

Adicionalmente, estos lineamientos establecen una serie de procedimientos y consideraciones para realizar una evaluación ambiental de manera apropiada. Por un lado, la norma *ISO 14040* describe la estructura que debe tener un estudio basado en el enfoque de ciclo de vida, estableciendo los criterios básicos y las fases que lo componen. Dichas etapas son la definición del objetivo y alcance del estudio, en donde se define el objeto de análisis, los límites del sistema y las metas a cumplir; el desarrollo del inventario de ciclo de vida (ICV), fase en la que se estudian las entradas y salidas del sistema en estudio y se modelan los inventarios a analizar; el análisis de inventario de ciclo de vida (AICV), donde se evalúan los ICVs mediante diferentes métodos y herramientas de cálculo para determinar sus impactos

ambientales; y la interpretación de los resultados obtenidos por el análisis (ISO, 2006a). Como se observa en la Figura 2.1, las fases que conforman un ACV son dinámicas ya que se retroalimentan entre sí a fin de conseguir resultados realistas y con un mínimo grado de incertidumbre.

Por otro lado, la norma *ISO 14044* establece los requisitos y directrices mínimos que debe cumplir un estudio de esta naturaleza (ISO, 2006b). Particularmente, el documento resalta el hecho de que la información a analizar debe ser adquirida de fuentes directas y confiables., y debe encontrarse dentro de las limitaciones del ciclo de vida planteado.

2.4.2. Herramienta de modelado: SimaPro

Herrmann y Moltesen (2015) refieren que SimaPro es una herramienta para el cálculo de los impactos ambientales asociados a un producto, actividad o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, con aplicación en la elaboración de informes, el diseño de productos, la determinación de indicadores clave de sostenibilidad e incluso el desarrollo de planes de acción. En general, se destaca por permitir el modelamiento y análisis de ciclos de vida complejos, medir el impacto ambiental de un sistema e identificar los puntos críticos en una cadena de procesos.

Las principales ventajas de este software son su funcionalidad, la cual se basa en las fases metodológicas de un ACV según las normativas *ISO 14040* y *14044*, su adaptabilidad a las necesidades de los usuarios y su capacidad para integrar y gestionar aspectos sociales en la modelación. Mientras tanto, algunas de las desventajas son su alto costo de inversión y su limitado número de formatos para visualizar los conjuntos de datos (Silva et al., 2017).

Por otra parte, SimaPro es una de las herramientas más efectivas en la industria de ACV ya que posee un conjunto de información muy completo. Según PRÉ Sustainability (2020), este programa incluye bases de datos científicas como Agri-footprint, European Life Cycle Database (ELCD), Industry Data y Ecoinvent, en los cuales los datos sobre materiales y procesos están organizados en múltiples sectores y subsectores productivos, así como bajo criterios geográficos o temporales. Asimismo, esta institución también indica que dicho software contiene múltiples metodologías de evaluación de impactos (CML-IA, Ecoindicator 99, TRACI 2.1, Recipe, Impact 2002+, IPCC 2007 GWP 100a), lo cual facilita la representación gráfica, interpretación y comunicación de los resultados de una manera ordenada y transparente.

2.4.3. Base de datos: Ecoinvent

Con ánimos de cumplir con la metodología estandarizada, es necesario construir un inventario que sea una fiel imagen de los flujos de entrada y salida de un determinado sistema a lo largo de su ciclo de vida. En ese sentido, para elaborar el inventario de ciclo de vida (ICV), se debe escoger con cuidado la fuente de

datos a analizarse, las cuales, dependiendo de su naturaleza, pueden tener origen en mediciones directas, publicaciones técnicas, comunicaciones personales o fuentes electrónicas. Dentro de este último grupo, se encuentran los recursos de información más empleados en estudios de ACV a nivel global, las bases de datos.

De acuerdo con Moreno-Ruiz y colegas (2019), Ecoinvent es la base de datos más completa actualmente ya que cuenta con cerca de 18 000 conjuntos de datos de ICVs distribuidos en muchas áreas, como suministro de energía, agricultura, transporte, combustibles, materiales de construcción, tratamiento de residuos, entre otros. Debido a la diversidad de información que maneja, Ecoinvent se establece como un sistema de gestión de datos robusto y adaptativo. El uso de esta biblioteca ofrece muchas posibilidades a nivel técnico debido a que cuenta con características claves como el soporte para datos de ICVs regionalizados, la aplicación de múltiples modelos de sistemas y la flexibilidad para introducir información compleja en forma de propiedades (Wernet et al., 2016). En términos generales, el empleo de esta base de datos puede enriquecer satisfactoriamente la elaboración de los inventarios a través de la construcción una cadena de procesos interconectados, a medida que permite la consecuente evaluación de los datos y brinda soporte a la variedad de los enfoques metodológicos existentes.

2.5. Pensamiento de ciclo de vida como eje de las ciudades sostenibles

Garantizar un nivel de vida óptimo en áreas urbanas sin comprometer el medio ambiente, la economía y la sociedad exige una comprensión crítica del desempeño de la sostenibilidad. No obstante, debido a que las ciudades son el resultado de la combinación de múltiples sistemas técnicos, culturales e institucionales, su gestión integral es compleja (Petit-Boix et al., 2017).

Actualmente, las practicas dominantes se enfocan solo en una dimensión de la sostenibilidad o solo en un aspecto del comportamiento de las ciudades, dejando de lado componentes esenciales para un análisis completo. No obstante, las decisiones, sobre todo aquellas vinculadas a políticas públicas, no deben basarse en información parcial o fragmentada, sino deben contemplar un conocimiento más completo en el que se adopte un enfoque de ciclo de vida a fin de impulsar la creación de ciudades más eficientes (Assefa, 2019).

Si bien a la fecha no existe una definición exacta de ciudad sostenible, hay cierto consenso en cuanto al modelo que estas deben tener. El Instituto para Comunidades Sostenibles (2017) la describe como aquella que mantiene un equilibrio sano y resiliente entre el capital humano, natural y financiero para satisfacer las necesidades actuales y, al mismo tiempo, garantizar que los recursos adecuados estén disponibles para las generaciones futuras. Este concepto puede acercarse a lo que ahora se promueve como economía circular, pero a una escala urbana (Korhonen, 2018), es decir, ciudades capaces de reconocer los límites de sus recursos y el potencial de asimilación de los mismos.

Queda claro que el desarrollo de políticas eficientes resulta clave para asegurar un rendimiento urbano sostenible a largo plazo. Tal como señalan Jenks y Jones (2010), las estrategias a plantearse no deben funcionar unas contra otras, sino deben complementarse a fin de conseguir el máximo provecho entre ellas y es en ese entender que el pensamiento de ciclo de vida cobra valor ya que puede ser beneficioso para la toma de decisiones al permitir ir más allá del enfoque tradicional de evaluación, incluyendo los impactos ambientales, sociales y económicos. Además, esta perspectiva tiene la ventaja de que se puede aplicar a diferentes escalas, que van desde productos individuales hasta sistemas de mayor complejidad, como es el caso de vecindarios, urbanizaciones o ciudades (Madhu, 2019).

De acuerdo con Assefa (2019), existen áreas de necesidad en cualquier sistema urbano que tienen que ser atendidas a fin de alcanzar el mayor grado de sostenibilidad posible. Primeramente, resulta necesario demostrar el desarrollo de mejores prácticas y su eficiencia a través de metas mensurables respaldadas por indicadores multidimensionales. Se busca que las ciudades tengan la capacidad de llevar a cabo proyectos de todo tipo y que sus resultados puedan traducirse en el cumplimiento de objetivos cuantitativos específicos.

Por otro lado, dado que ninguna ciudad puede ser realmente sostenible por sí misma, es necesario la adopción de un marco de referencia, que además de regular su comportamiento, permita poder integrarla con sus semejantes. De momento, la *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (ONU, 2015b) es el marco global que se maneja para la planificación de todas las ciudades del mundo pues en ella se encuentran los objetivos de desarrollo sostenible que deben alcanzar todos los países para el 2030. En particular, el onceavo artículo de dicho documento indica las metas específicas que una ciudad debe alcanzar para denominarse sostenible.

Por último, se requiere un manejo en las ciudades sobre sostenibilidad dentro del esquema de ciclo de vida a un nivel técnico y administrativo con el objetivo de conseguir una visión más completa de su realidad (Jenks y Jones, 2010). Por ello, se requiere que las autoridades, tanto públicas como privadas, tengan un grado suficiente de conocimiento sobre este tipo de pensamiento para ser capaces de fomentar y comunicar la importancia de la sostenibilidad como hilo conductor de la planificación y el desarrollo.

Referente a la situación de Lima y sus distritos, se puede apreciar que los problemas se han estado empujando hacia el futuro con soluciones que tienden a ser social y/o ambientalmente rentables solo a corto plazo a consecuencia de una planificación limitada que no llega a cubrir todas las dimensiones. Así pues, en el sector transporte se puede apreciar la creación de mayor infraestructura vial como principal respuesta a los problemas del tráfico vehicular urbano, muchas veces sin contemplar que a largo plazo este tipo de reformas, más allá de no llegar a satisfacer la demanda, puede generar mayores impactos para las generaciones futuras. Los pasos a desnivel de la avenida 28 de Julio o del óvalo Monitor son ejemplos

recientes (2015 y 2022, respectivamente) de como proyectos desarrollados sin el sustento técnico adecuado no solo no logran cumplir con el fin con el cual fueron creados, sino que terminan por inducir nuevos problemas. Particularmente, estos viaductos en lugar de haber aliviado la congestión vehicular, provocaron una desarticulación de la ciudad en desventaja de la población.

Con el pensamiento de ciclo de vida, a diferencia de otras perspectivas más conservadoras, se puede ayudar a las ciudades y otros sistemas urbanos a tener un crecimiento sostenible en el tiempo, disminuyendo y/o evitando la aparición de nuevos problemas. Para ello, este tipo de enfoque debe inscribirse como requisito en los programas de gestión urbana y ser de conocimiento de todas aquellas personas vinculadas a proyectos civiles.

2.6. Análisis de ciclo de vida en la infraestructura vial urbana

Al igual que cualquier actividad de construcción, los proyectos de intervención en la infraestructura de transporte representan un gran reto ambiental y social. De acuerdo con el *Reglamento de Protección Ambiental para el Sector Transporte*, se requiere para esta clase de proyectos el cumplimiento de ciertas evaluaciones ambientales que ayuden a mejorar su desempeño ambiental e índice de sostenibilidad (MTC, 2017).

No obstante, tal como señala Stripple (2001), existen ciertas circunstancias de estos sistemas que hacen que su estudio sea distinto al de cualquier otro. Las condiciones a las que están sujetas no permiten que la evaluación ambiental pueda ser realizada de manera estática pues están en constante cambio a lo largo del tiempo. En ese sentido, las herramientas genéricas de gestión ambiental no son lo suficientemente minuciosas para realizar un análisis que abarque e integre todos los aspectos relevantes de este tipo de proyectos y menos para devolver resultados que indiquen los puntos críticos, dónde resulta necesario prestar mayor atención (Madhu, 2019).

Para enfrentar este problema, es necesario implementar medidas que permitan monitorear, calcular y evaluar los impactos ambientales de una forma más dinámica, especialmente porque el dimensionamiento de estos indicadores es un factor clave cuando se evalúa la calidad de los proyectos de construcción (Barandica et al., 2013). En ese entender, tal como expone Fernández-Sánchez (2010), el análisis de ciclo de vida (ACV) se presenta como una herramienta efectiva para ayudar a los involucrados en este tipo de proyectos, ya sean instituciones públicas o empresas privadas, en su búsqueda por alcanzar objetivos cada vez más sostenibles y/o aportar un valor agregado a los resultados finales. Así pues, analizar los impactos ambientales de la infraestructura vial a través de un enfoque con estas características, permitiría proporcionar soluciones más beneficiosas a la par que reduciría la probabilidad de generar consecuencias negativas no deseadas (Harvey, 2019).

Sin duda, el uso del ACV en este sector puede servir como un respaldo a los tomadores de decisiones para evaluar con mayor precisión los aspectos que deben priorizarse a la hora de formular políticas más sostenibles (Severis et al., 2019), mientras representa también un cambio positivo en los estilos de vida de aquellas personas o comunidades a quienes está orientada este tipo de proyectos.

2.6.1. Antecedentes

A lo largo del mundo, se han desarrollado numerosos estudios de ACV basados en la infraestructura vial. Algunos de ellos enfocados en el aumento de la funcionalidad de las vías, el reconocimiento de los impactos ambientales y la mejora de la cadena de procesos desde una perspectiva urbana (Keijzer et al., 2015; Mao et al., 2017; Hasan, 2019; Alzard et al., 2019;). Otros incluso centrados en evaluar etapas precisas como construcción, uso, mantenimiento o rehabilitación (Huang, Bird y Heidrich, 2009; Milachowski, Stengel y Gehlen, 2011), los cuales tratan de reducir la incertidumbre de los análisis al abordar cada fase como un objeto de estudio individual.

Dentro de este grupo, existen investigaciones aún más específicas como aquellas orientadas a explorar las emisiones de sistemas viales con modelos de microsimulación de tráfico (Huang, Bird y Bell, 2009; Galatioto, 2015), a estudiar el efecto de la aplicación de políticas relacionadas a la movilidad desde un punto de vista consecuencial (Querini y Benetto, 2015), a analizar técnicas de rehabilitación de pavimentos (Turk et al., 2016) o a evaluar el efecto de la resistencia a la rodadura en el desempeño de los asfaltos (Wang, 2012). Si bien cada uno de estos estudios trabaja de manera singular los datos de entrada o salida, guardan en común el hecho de que todas permiten reconocer que nivel de afectación puede llegar a tener esta información dentro del sistema en general.

También se ha encontrado literatura en lo que respecta a la utilización de algunos materiales en la construcción de este tipo de infraestructuras, en especial en lo referido a pavimento y concreto. Algunos artículos encontrados detallan las implicancias de las cargas ambientales asociadas a estos elementos (Chowdhury, 2010; Umer, 2017), los beneficios y oportunidades que puede traer consigo el uso de materiales más sostenibles (Giani, 2015; AzariJafari, 2016) y la importancia que conlleva su análisis para los diseñadores y tomadores de decisiones (Santero, 2011a; 2011b).

Por otro lado, los estudios de ACV realizados en el Perú han demostrado tener resultados positivos igualmente al ser aplicados en los sectores energéticos e industriales (Bazán et al., 2018; Vázquez-Rowe, 2019). Gran parte de estos estudios se llevaron a cabo por autoría o asesoría del grupo de investigación Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN, por sus siglas en inglés), quienes se presentan como uno de los mayores interesados en el uso de esta herramienta. Desde el año 2005 hasta la fecha, ellos vienen contribuyendo a que diversos sectores productivos sean cada vez más

sostenibles, a la par que ayudan a la generación de conocimiento científico en diversas ramas de la ingeniería.

De la misma manera, se ha encontrado evidencia de estudios de ACV que evaluaron el sector transporte en el país. La literatura hallada corresponde a investigaciones que examinaron los impactos ambientales generados en las diversas etapas del ciclo de vida de proyectos desarrollados en una carretera no pavimentada cercana al Parque Nacional del Manu (Larrea-Gallegos et al., 2017), en un sector de la Panamericana Sur ubicado en Lima (Verán-Leigh et al., 2019) y en el primer tramo de la autopista que une Tacna con Collpa (Elorrieta-Mendoza, 2023). Incluso se logró encontrar un estudio con mayor alcance, el cual comprende un análisis comparativo entre un sistema de telecabinas y una carretera sin asfaltar con el fin de determinar el método más eficiente para visitar el Complejo Arqueológico de Kuelap (Biberos-Bendezú et al., 2020)

No obstante, a día de hoy se desconocen estudios de ACV que abarquen el análisis y evaluación ambiental de los proyectos de reordenamiento de la infraestructura vial en zonas urbanas. En ese sentido, el presente estudio representa una línea base a seguir para el desarrollo de futuras investigaciones orientadas a la gestión sostenible del tránsito urbano.

Dado el continuo uso que se le ha dado al ACV, es una realidad que se ha ido mejorando la metodología de análisis, así como la base de datos con la que se trabaja; la información disponible se ha vuelto más extensa, llegando a abarcar datos muy detallados de diferentes regiones y países. En base a esto, se puede decir que existe amplia literatura sobre estudios de ACV en materia de transporte, la cual sirve como soporte para este estudio a fin de poder obtener soluciones más eficientes respecto a los problemas ambientales inducidos por los proyectos de intervención en la infraestructura vial.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Casos de estudio

3.1.1. Características de los escenarios de reordenamiento vial

Con el objetivo de determinar los impactos ambientales negativos provocados por los proyectos de reordenamiento vial en una zona urbana de alta concentración poblacional y elevado índice de motorización, se decidió llevar a cabo un ACV en tres emplazamientos del distrito de San Isidro. La elección de estos escenarios se basó en el tipo de vías, la naturaleza de las actividades involucradas y la disponibilidad de datos.

El primer caso de estudio es la calle Los Libertadores, la cual se encuentra ubicada en el subsector 3-2 del distrito y cuenta con una extensión vial de aproximadamente 850 metros, tal como se observa en la Figura 3.1. Durante mucho tiempo, esta calle se ha visto terriblemente afectada por los problemas del tráfico y es que, al encontrarse adyacente al centro empresarial de la ciudad, muchas veces fue utilizada como ruta alterna de circulación, lo que indujo en ella una gran congestión vehicular. El problema se acrecentó cuando las condiciones físicas del lugar ya no fueron suficientes para dar cabida a tantas unidades motorizadas.



Figura 3.1. Ubicación geográfica de la calle Los Libertadores. Fuente: Visor de información catastral de la MSI (2016)



Figura 3.2. Propuesta de reordenamiento vial de la calle Los Libertadores. Fuente: Portal web de la MSI (2016)



Figura 3.3. Resultado del proyecto de reordenamiento vial de la calle Los Libertadores. Fuente: Elaboración propia

En respuesta a esta problemática, la Municipalidad de San Isidro (MSI) optó por reconfigurar la vía en toda su extensión a fin de instaurar un tránsito más armonioso en el lugar. El proyecto consistió en la implementación de medidas de tráfico calmo, cuyas características permiten la reducción de la velocidad vehicular a un máximo de 30 kilómetros por hora, evitando así que se genere tanto tráfico en el sector.

Las, popularmente, denominadas zonas 30 crean las condiciones para la coexistencia del tránsito peatonal con el vehicular, priorizando al primero. Por otra parte, el proyecto también contempló la colocación de mobiliario urbano, entre bolardos de concreto esféricos y macetones; la creación de una ciclovía

bidireccional segregada; el establecimiento de zonas rígidas, donde está prohibido por ley estacionarse; y finalmente la reducción de la sección vial a un solo carril. En las Figuras 3.2 y 3.3, se puede observar con mayor detalle tanto la propuesta como el resultado final del reordenamiento vial.

El segundo caso de estudio es la avenida Rivera Navarrete, la cual se encuentra ubicada en el subsector 4-2 del distrito y cuenta con una extensión vial de casi 540 metros (véase Figura 3.4). A diferencia del resto, este proyecto se caracterizó por ser de inversión público-privada y por tener un alcance mayor en términos económicos y productivos. Ello a consecuencia de ser una propuesta dirigida a solucionar el déficit de estacionamientos y la concentración masiva de vehículos en las calles, los cuales provocaban una serie de efectos negativos en el sistema de transporte local y en la calidad de vida urbana. Entonces, a fin de aliviar esta problemática, la MSI, en apoyo con el consorcio de estacionamientos Rivera Navarrete (ERN), decidió transformar una de las principales vías de articulación del centro financiero de la ciudad.



Figura 3.4. Ubicación geográfica de la avenida Rivera Navarrete. Fuente: Visor de información catastral de la MSI (2016)

Tal como se observa en las Figuras 3.5 y 3.6, el proyecto abarcó la creación de parqueos subterráneos distribuidos en tres niveles bajo el eje de la avenida Rivera Navarrete, la implementación de una ciclovía bidireccional segregada y la colocación de múltiple mobiliario urbano y obras de arte (cicloparqueaderos, bancas, topellantas) en sus alrededores.



Figura 3.5. Propuesta de ordenamiento vial de la avenida Rivera Navarrete. Fuente: Portal web de la MSI (2016)

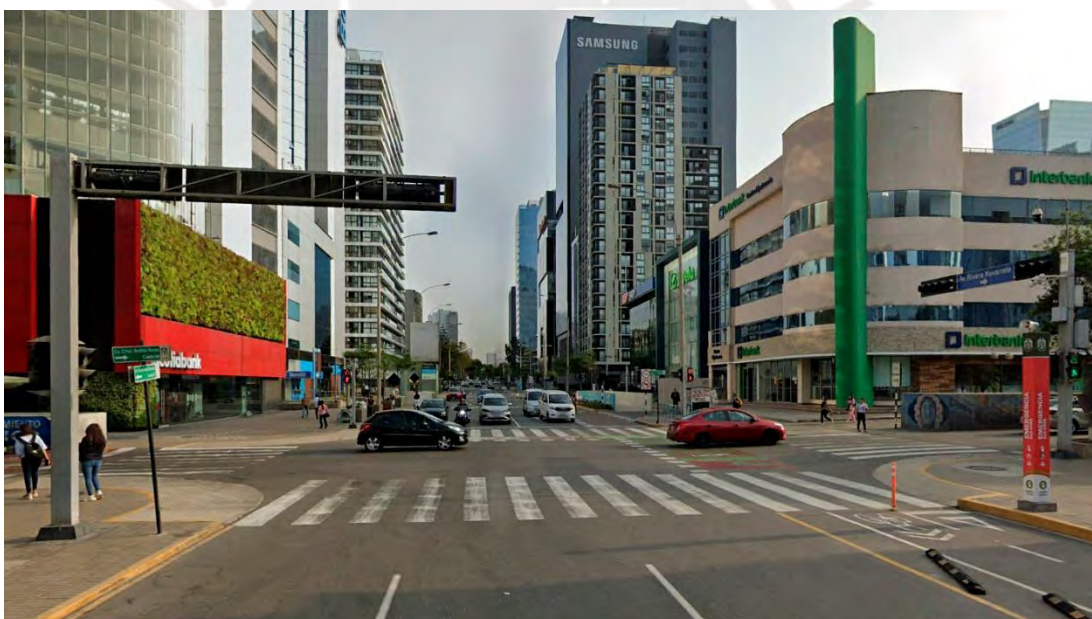


Figura 3.6. Resultado del proyecto de reordenamiento vial de la avenida Rivera Navarrete. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el último caso de estudio fue la calle Las Begonias, la cual se encuentra ubicada en el subsector 4-2 del distrito y cuenta con una extensión estimada de 615 metros (véase Figura 3.7). La propuesta de intervención en esta vía representa un claro ejemplo de como San Isidro está reestructurando la ciudad con ansias de alcanzar un estado sostenible en toda su extensión y complejidad.



Figura 3.9. Resultado del proyecto de reordenamiento vial de la calle Las Begonias. Fuente: Elaboración propia

Según datos de la misma MSI (2018), la propuesta de intervención logró recuperar cerca de 1000 metros cuadrados de espacio público, los cuales fueron reemplazados por nuevas áreas verdes. Las Figuras 3.8 y 3.9 muestran la proyección y el resultado de la calle Las Begonias tras la reestructuración vial planteada.

Si bien la información de tres proyectos distintos puede resultar difícil de analizar, al identificar características y patrones similares, es posible hacer más eficiente la evaluación. La Tabla 3.1 muestra los resultados de sintetizar toda la información mencionada anteriormente, describiendo de manera más dinámica las principales características de cada caso de estudio.

Tabla 3.1. Resumen de las características de los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia

Características	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Ubicación	Subsector 3-2	Subsector 4-2	Subsector 4-2
Carácter	Público	Público-privado	Público
Sentido	Unidireccional	Unidireccional	Unidireccional
Tráfico	Calmo (30 km/h)	Alto (60 km/h)	Calmo (30 km/h)
Estacionamientos	Zona rígida	Subterráneos	Segregados
Ciclovía	Segregada bidireccional	Segregada bidireccional	Cicloacera unidireccional
Mobiliario urbano	Bolardos de concreto y macetones	Bancas de madera, bolardos y topellantas	Cicloparqueaderos y bancas de madera
Extensión (km)	0.850	0.540	0.615
Carriles vehiculares	1	4	3
Ancho de sección (m)	13.50	30.10	19.80
Ancho de carriles (m)	6.50	14.10	9.20

3.1.2. Procesos constructivos

Como parte de sus obligaciones con el ciudadano, la MSI tiene el deber de ser transparente con la información de carácter público y de facilitar el acceso a cualquier usuario que la solicite dentro de los límites normativos. En ese sentido, para fines de este estudio, se adquirieron documentos técnicos relativos a los proyectos de reordenamiento vial implementados en la calle Los Libertadores, la avenida Rivera Navarrete y la calle Las Begonias, entre los cuales destacan los planos arquitectónicos, los términos de referencia y las memorias descriptivas.

Al analizar todo este conjunto de documentos, se pudo deducir que los tres proyectos se tratan de casos típicos de proyectos de intervención vial salvo ligeras variaciones en algunas de sus actividades. Entonces, a fin de entender de mejor manera la relación entre las partidas de los proyectos y los flujos de masa y energía, se contrastó la información obtenida con otro estudio de ACV en una carretera peruana (Verán-Leigh et al., 2019). A partir de la comparación entre estos estudios, se pudo estructurar un mapa de actividades y determinar su correspondencia con las distintas fases del ciclo de vida de los sistemas de estudio. Como se observa en la Figura 3.10, los procesos y subprocesos de construcción se conectan entre sí a través de relaciones de precedencia y consecuencia.

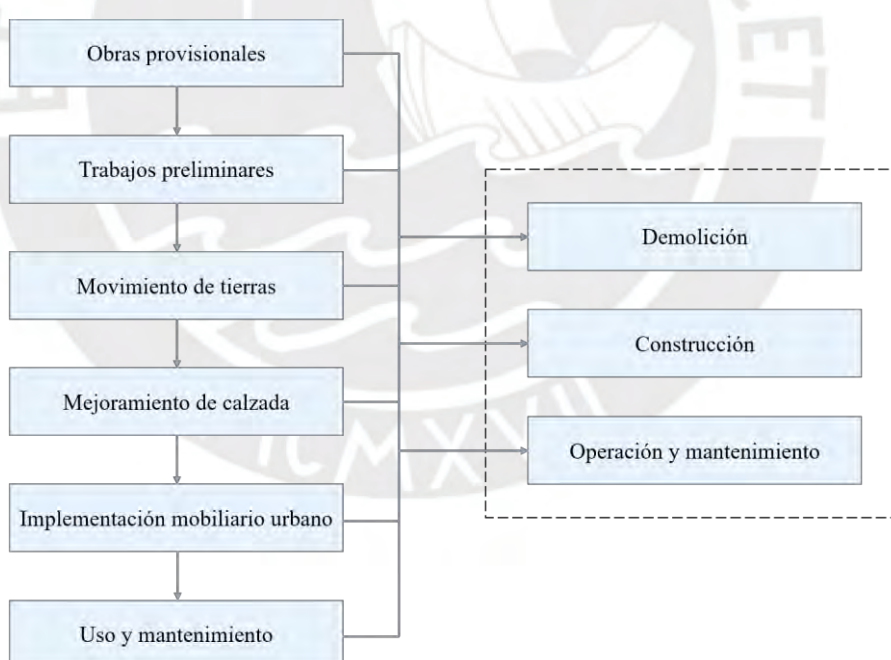


Figura 3.10. Mapa de procesos de los proyectos de reordenamiento vial urbano. Fuente: Elaboración propia

Si bien podría decirse que dicho enfoque sobre los procesos es muy generalizado, su uso es aún muy relevante para desarrollar la evaluación a la cual apunta este estudio. Así pues, al tratarse de un análisis en emplazamientos relativamente pequeños, cuyas extensiones no llegan al kilómetro, los resultados de los modelos se pueden considerar precisos pues las variaciones que normalmente presentan cada una de las

actividades en determinados tramos de los módulos viales dejan de ser representativos. De esta manera, queda claro que una simplificación de los procedimientos en tres actividades principales, como son demolición, construcción y operación y mantenimiento, es práctica y coherente.

3.2. Análisis de ciclo de vida aplicado a los casos de estudio

3.2.1. Definición de objetivos y enfoque

Existen dos enfoques fundamentales de ACV aplicados al campo de la investigación. Según señala Tillman (1994), mientras el primero tiene una perspectiva atribucional, que consiste en evaluar los impactos inmediatos en un sistema restringido durante un periodo de tiempo; el segundo posee un enfoque consecuencial, el cual incluye el modelamiento de los efectos colaterales producidos en los sistemas adyacentes por los cambios que se originaron a partir de los procesos del sistema primario.

En lo que respecta a este estudio, ya que el objetivo primordial es evaluar las consecuencias directas en los ecosistemas locales producto de las etapas de demolición, construcción y operación y mantenimiento para tres escenarios distintos de reordenamiento vial urbano, se optó por emplear una visión atribucional. Si bien el uso de este enfoque resulta adecuado para el alcance planteado, la aplicación de un análisis basado en una perspectiva consecuencial, ayudaría a determinar con una mayor amplitud los efectos derivados de estas intervenciones en todo el entorno urbano vecino. Por tal motivo, la adaptación de este segundo enfoque queda pendiente para el desarrollo de futuros proyectos relacionados a este tema.

3.2.2. Definición de la unidad mínima funcional

La unidad funcional (UF) es la base de cualquier estudio de ACV y, por lo tanto, es el cimiento para cualquier análisis comparativo de esta naturaleza. Según comenta Hoxha (2020), esta se caracteriza por ser una referencia a partir de la cual se normalizan matemáticamente todos los datos de entrada y salida del sistema de producción.

Dado que los escenarios estudiados corresponden a espacios físicos de uso público donde se desarrolla el tránsito tanto de personas como de vehículos, se optó usar una referencia que caracterizará de manera apropiada a dichos sistemas. Por ello, la UF seleccionada fueron 250 metros lineales de infraestructura vial intervenida en un año de operación. Dicha elección se encuentra en consonancia con aquellas encontradas en la literatura y es resultado de combinar los parámetros de diseño de las secciones viales.

A diferencia de otras investigaciones, donde los objetos analizados eran carreteras de mayor envergadura y la UF se basaba en el kilómetro de extensión, para este estudio se tuvo que escalar dicho parámetro ya que los escenarios escogidos demandaban el uso de una escala más pequeña. Asimismo, si bien usar una referencia basada en área o volumen hubiera tenido sus propias ventajas, se optó por esta caracterización

ya que, aparte de reflejar directamente el propósito de los proyectos de reordenamiento vial, también permite garantizar la consistencia en la comparación de diferentes alternativas de diseño y enfoques de construcción. Esto es particularmente relevante ya que el análisis de estos escenarios involucra aspectos como la fragmentación espacios públicos y la optimización de la eficiencia en el uso de recursos.

Por otra parte, acorde a lo establecido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018), se decidió emplear como escala de tiempo el año de operación debido a que este periodo corresponde al ciclo de uso de la infraestructura vial en el Perú antes de procurar mantenimiento. La selección de este valor fue validado por el equipo técnico de la MSI que estuvo a cargo de los proyectos. Por otra parte, la muestra seleccionada se puede considerar como representativa para toda la red vial existente en el distrito de San Isidro ya que los viarios en estudio cuentan con condiciones similares en su tipología.

Aunque los proyectos de intervención vial urbana que abordan un enfoque de sostenibilidad y de accesibilidad universal son pocos en la ciudad, los procesos iniciados por algunas instituciones gubernamentales, como la Municipalidad de San Isidro o la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y el Callao, reflejan que en los próximos años los números irán en aumento. Bajo ese contexto, se espera que los resultados obtenidos por este estudio puedan ser utilizados a futuro como una línea base para la discusión y el desarrollo de mejores políticas de gestión de tránsito.

3.2.3. Delimitación de los límites de cada sistema

Tal como indica Guinée (2002), la delimitación del sistema consiste en precisar las unidades de los procesos que el ACV evaluará. En virtud de ello, se toman en cuenta aspectos geográficos y temporales, así como las características tecnológicas propias de cada proceso. Esta etapa es de vital importancia debido a que en ella se definen los límites últimos o sistemas de fondo, los cuales enmarcan todos los procesos de los escenarios estudiados desde el inicio de su vida útil hasta su deposición final. En ese entender, ya que evaluar un sistema durante todas las etapas de su ciclo de vida no es sencillo, se optó por reducir sus límites a un nivel capaz de proporcionar información de calidad y que a su vez no requiera ahondar mucho más en fases o etapas poco relevantes para el estudio.

Así, tomando en cuenta las características en común que comparten los tres escenarios en estudio, fue posible delimitar un sistema general que los integre a todos. Este sistema de fondo fue establecido en torno a las actividades de mayor relevancia de los proyectos de reordenamiento vial urbano y a las restricciones que se puedan presentar en cuestión de tiempo y dinero. Como se observa en la Figura 3.11, los límites de este sistema general abarcan las fases de demolición, construcción y operación y mantenimiento, siendo las principales actividades de estas la extracción y movimiento de escombros, la mejora de las calzadas, la instalación de mobiliario urbano, la inclusión de área verde, el flujo vehicular y el consumo eléctrico. Únicamente, se han excluido del sistema los procesos vinculados a los cambios de usos de suelo,

habituales en otros estudios de ACV ya que en los trabajos de reordenamiento vial no existe un cambio propio en la naturaleza de los emplazamientos, sino un simple reacondicionamiento de sus componentes físicos.

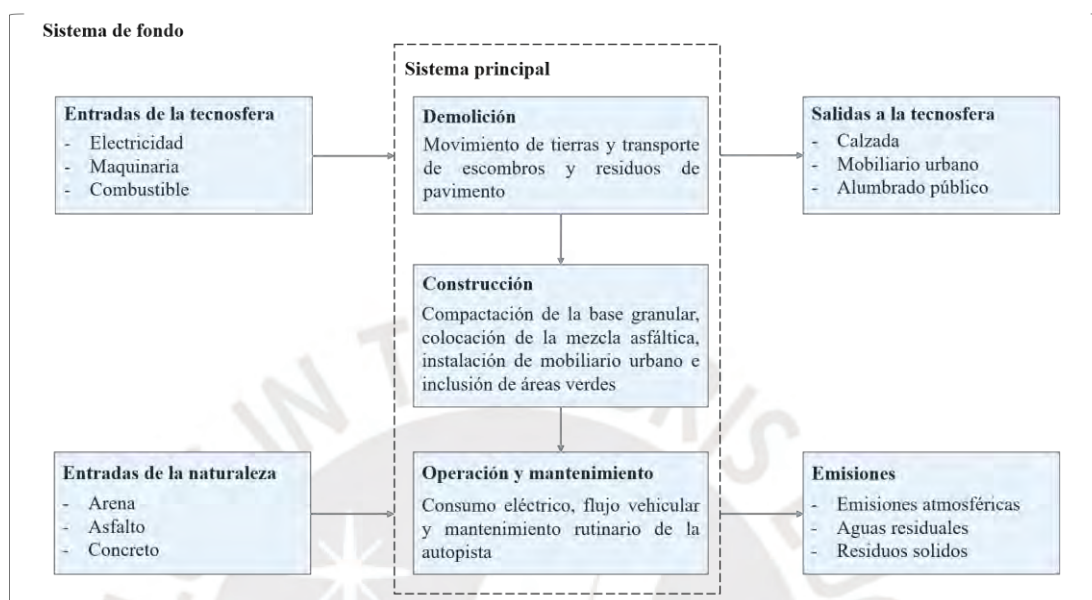


Figura 3.11. Representación de los límites del sistema general. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la etapa de fin de vida tuvo un tratamiento particular debido al hecho de que sus partidas competen en su totalidad a las fases iniciales de los proyectos viales que en un futuro reemplazarán a los existentes. Así pues, agregar dichos procesos dentro de los límites del sistema planteado provocaría entradas redundantes en el proceso de análisis y, por ende, una gran incertidumbre en los resultados esperados. Por tal motivo, se optó por omitir dicha fase y, en su lugar, manejar sus actividades como si formarían parte de la etapa de demolición.

3.2.4. Recolección de datos

Esta etapa comprende la obtención de la información correspondiente a los tres proyectos de intervención en la infraestructura vial urbana en el distrito de San Isidro y al resto de sus actividades vinculantes. Al igual que cualquier estudio de ACV, el nivel de incertidumbre depende de la calidad y precisión de los datos, por ello es necesario desglosar los sistemas de estudio en procesos que permitan un análisis más profundo y estructurado.

En base a los alcances y limitaciones mencionados previamente, la recolección de datos se pudo dividir en tres etapas: demolición, construcción y operación y mantenimiento de las vías. Convenientemente, el inicio de esta investigación coincidió temporalmente con la intervención a uno de los emplazamientos, la calle las Begonias; de esta manera, fue posible obtener los datos de manera directa a través de mediciones de campo, metrados de materiales y testimonios de especialistas. Respecto a los otros emplazamientos, al

tratarse de proyectos culminados en años recientes, los datos se consiguieron a partir de documentos técnicos, como planos arquitectónicos, términos de referencia y memorias descriptivas, los cuales fueron provistos por los funcionarios de la MSI.

En general, se realizaron metrados en planos y en obra para poder dimensionar los materiales empleados. Se accedió al diseño de las carpetas asfálticas, a la cantidad de mobiliario urbano y obras de arte instaladas y al registro de consumo de combustible por parte de los equipos, así como a los programas de mantenimiento periódico y rutinario. También, se adquirieron los datos correspondientes al tránsito vehicular en cada uno de los emplazamientos y en sus zonas aledañas para algunos meses del año de estudio. Esta última información fue validada a través de la revisión de conteos vehiculares elaborados por la MSI en apoyo con el Centro de Investigación y de Asesoría de Transporte Terrestre (CIDATT). Dichos conteos se caracterizan por describir detalladamente las tendencias de desplazamiento en todo el distrito y representarlas a través de flujogramas clasificados en relación a las características del tipo de transporte empleado. En ese sentido, se pudo concluir que tanto la información obtenida en campo, como la brindada por estas instituciones fue de alta calidad.

Tabla 3.2. Distribución de los datos según su naturaleza. Fuente: Adaptado de Verán-Leigh y colegas (2019)

Datos cuantitativos	Datos cualitativos
Entradas de energía y materia prima	Descripciones de tecnologías de los procesos
Emisiones al aire, agua y suelo	Escala temporal de los datos
Información para la asignación de cargas ambientales	Información sobre modos de transporte
Información sobre distancias y rutas	Ubicaciones geográficas de los procesos

Tabla 3.3. Información primaria. Fuente: Adaptado de MSI (2016)

Tránsito vehicular	Información sobre el tipo de vehículos
	Flujo vehicular durante una determinada escala temporal
	Velocidades promedio estandarizadas
Información primaria de construcción	Materia prima utilizada
	Maquinarias requeridas
	Rendimiento de los equipos
	Características del mantenimiento implementado
Consumo eléctrico	Iluminación de cada emplazamiento
	Consumo eléctrico de las maquinarias y equipos

A fin de darle un mejor tratamiento a la información recolectada, se optó por realizar diferentes tipos de categorizaciones, basándose en lo descrito en la investigación de Verán-Leigh y colegas (2019). Por un lado, se distribuyó la información en dos grupos en base a si su naturaleza era cuantitativa o cualitativa (véase Tabla 3.2). Y por otro, se segregaron los datos respecto a su grado de disponibilidad en relación a

cada proyecto; es decir, si las fuentes con la que se obtuvieron fueron primarias o secundarias. En esa dirección, los datos primarios fueron brindados por la MSI (véase Tabla 3.3), a través de su Gerencia de Desarrollo Urbano; mientras que los datos secundarios fueron aquellos obtenidos a partir de la bibliografía empleada para el estudio, los cuales incluyen libros, revistas, sitios web institucionales, artículos científicos, entre otros.

Finalmente, para poder obtener resultados específicos en la categoría de emisión de partículas al medio ambiente, fue necesario realizar un modelamiento en base a los lineamientos metodológico propuestos por la Environmental Protection Agency (EPA), siendo los datos recopilados necesarios y útiles.

3.2.5. Inventario de ciclo de vida

El inventario de ciclo de vida (ICV) comprende la estructuración de todos los datos cuantitativos relacionados al ciclo de vida de los proyectos que contribuyan con los objetivos del estudio. Según establece la normativa *ISO 14040*, esta información abarca los componentes de la biosfera y tecnosfera que forman parte de las entradas y salidas de los sistemas estudiados (ISO, 2006a).

3.2.5.1. Modelado del inventario de ciclo de vida

Como se mencionó anteriormente, se pudieron identificar tres fases principales vinculadas a los sistemas en estudio (demolición, construcción y operación y mantenimiento), tal como se observa en la Figura 3.12. Si bien existen algunos procesos y subprocesos diferenciados entre un escenario y otro, en general los trabajos realizados son los mismos ya que los proyectos poseen características similares. Esta admisión facilitó la elaboración de los inventarios, los cuales se han realizado en base a la unidad funcional planteada para esta investigación (250 metros lineales de infraestructura vial intervenida en un año de operación).

En general, se recolectó información sobre la materia prima utilizada, las características de las maquinarias, el flujo vehicular, el consumo eléctrico y de combustible, y la periodicidad y características de los trabajos de mantenimiento. Los detalles de los procesos constructivos y de las características de las partidas de trabajo fueron adquiridos del equipo técnico de la MSI a través de entrevistas presenciales y documentación técnica de valor (expedientes, informes y memorias descriptivas), así como de bibliografía especializada. A esta información se la contempló como parte de un sistema de primer orden, dado que forman parte del conjunto de inventarios más directos.

Asimismo, se creó un sistema secundario, también conocido como sistema de fondo, a partir de los datos que no pudieron obtenerse en campo ni estaban disponibles en los documentos consultados; para ello se utilizó la base de datos Ecoinvent en su versión 3.7.1 debido a que cuenta con una extensa cantidad de procesos unitarios que son útiles para este estudio.

Al complementar ambas series de datos, se obtuvo una investigación más completa e integral con una gran cantidad de información significativa, lo que consecuentemente posibilitó una mayor precisión en los resultados finales. Cabe destacar que la calidad de los inventarios se mejoró a medida que se desarrollaba este estudio pues, con el tiempo, se encontraron fuentes de información más eficaces.

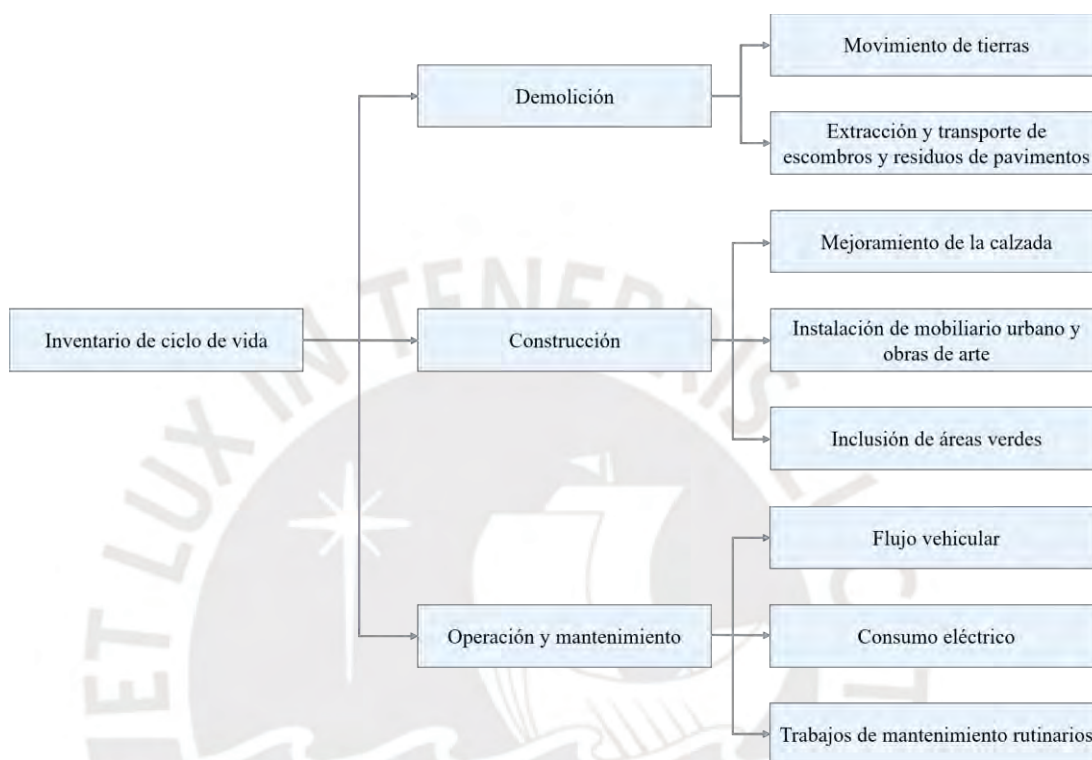


Figura 3.12. Esquema general del ICV. Fuente: Elaboración propia

3.2.5.1.1. Etapa de demolición

De acuerdo con los datos recopilados, los trabajos efectuados se llevaron a cabo durante un plazo aproximado de 7 meses para las calles Los Libertadores y Las Begonias, y 13 meses para el caso de la avenida Rivera Navarrete. La Tabla 3.4 muestra la duración en días de cada uno de estos proyectos.

Tabla 3.4. Duración de los proyectos. Fuente: Elaboración propia

Proyecto	Duración (días)	
	Demolición	Construcción
Calle Los Libertadores	31	183
Avenida Rivera Navarrete	41	374
Calle Las Begonias	36	195

Respecto a la etapa de demolición, se contaba con datos sumamente limitados y dispersos pues no se mantenía un registro exacto del peso de los escombros generados. Por ello, se tuvo que estimar dicha

información a través del cálculo de valores teóricos compatibles con la realidad. Para obtener dichas aproximaciones, se siguió el procedimiento descrito en la investigación de Loo y Aguilar (2017) debido a describe de manera exitosa el análisis de ecoeficiencia para los procesos de demolición de vías en el contexto peruano.

En ese entender, se calculó el volumen de escombros considerando las siguientes partidas de obra: corte de la capa asfáltica, retiro de adoquines de concreto, desbroce de áreas verdes, y demolición de obras de arte (rampas, muretes, sardineles, entre otros). A partir de ello, se pudo determinar el valor total del peso de los escombros generados haciendo uso de un factor de equivalencia igual a 1.4 ton/m³, que es el valor de la densidad que manejaban en obra los operarios encargados de efectuar el movimiento de tierras. Finalmente, se obtuvo como resultado los valores descritos en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Peso y volumen de escombros. Fuente: Elaboración propia

Proyecto	Volumen (m ³)	Peso (ton)
Calle Los Libertadores	1533.84	2147.38
Avenida Rivera Navarrete	2334.51	3268.29
Calle Las Begonias	2713.87	3798.40

Resulta pertinente mencionar que el proyecto de la avenida Rivera Navarrete, a diferencia del resto, representó un caso de estudio muy particular debido a que dentro de su alcance se incluyó la construcción de estacionamientos subterráneos. Esto trajo como consecuencia que algunos valores de su metraje final se vieran afectados enormemente, en específico los correspondientes a la formación de escombros.

Dado que este no se trata de un proyecto de reordenamiento vial convencional, se optó por darle un tratamiento especial, restringiendo las partidas de demolición a aquellas correspondientes a los trabajos sobre las capas superficiales de la calzada. De esta manera, fue posible evitar errores en la lectura de los resultados y, por consiguiente, realizar una comparación más coherente entre los casos de estudio.

Una vez obtenidos los valores volumétricos de los escombros, se realizó el modelado de su transporte. Para ello, se tomaron las ubicaciones de cada escenario como referencias de origen, mientras que como punto de destino se asignó el relleno sanitario Portillo Grande al ser el centro de disposición final donde trasladaban los residuos sólidos de estos proyectos. De acuerdo con las mediciones hechas, en todos los casos la distancia de traslado se aproximó a los 49 kilómetros. Para hallar la cantidad total de kilómetros recorridos por los vehículos de carga, primero se tuvo que dividir el volumen de la demolición entre la capacidad de los volquetes, estandarizada en 17 m³, a fin de estimar la cantidad de viajes teóricos necesarios para movilizar la totalidad de este material.

Luego, ya que en la realidad no es posible realizar una fracción de viaje, se tuvo que realizar un ajuste a los valores obtenidos. Por tal motivo, se dividió la cantidad de viajes teóricos entre el número de días de demolición, cuyo resultado se aproximó al número entero superior más cercano antes de ser multiplicado por el total de días de duración de esta etapa del proyecto. El resultado conseguido corresponde a la cantidad de viajes reales realizados.

Finalmente, al multiplicar este valor por la distancia recorrida entre cada destino, se obtuvo la cantidad final de kilómetros totales recorridos. La Tabla 3.6 muestra todas las estimaciones descritas anteriormente.

Tabla 3.6. Cálculo de kilómetros recorridos por demolición. Fuente: Elaboración propia

Descripción	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Volumen de demolición (m ³)	1533.84	2334.51	2713.87
Capacidad de volquete (m ³ /unidad)	17	17	17
Viajes teóricos	90.23	137.32	159.64
Duración de la demolición (días)	31	41	36
Viajes cargados por día	2.91	3.35	4.43
Viajes cargados totales	93	164	180
Distancia a relleno sanitario (km)	48.41	48.97	49.12
Distancia recorrida total (km)	4502.13	8031.08	8841.60

3.2.5.1.2. Etapa de construcción

Los inventarios correspondientes a esta fase comprenden las actividades de mejoramiento de calzada e implementación de mobiliario urbano y obras de arte, las cuales se elaboraron en conjunto al tratarse de procesos fuertemente relacionados. Así pues, en base a lo indicado por la MSI, se decidió considerar una vida útil diferenciada para cada uno de los elementos identificados. A la carpeta asfáltica y a las obras de arte se les asignó un tiempo de vida de 10 años, periodo en el cual empiezan a salir a la luz las fallas más evidentes. En cambio, para las superficies hechas a base de adoquines de concreto, dada su mayor resistencia y durabilidad, se estableció un periodo de vida de 15 años. Para la pintura utilizada en la señalética horizontal, se decidió que un tiempo de funcionamiento de 2 años sería óptimo dado que el flujo vehicular con el cual interactúan provoca un deterioro rápido de la capa superficial, haciendo imperante su reemplazo.

En cuanto al resto de los materiales, se seleccionaron sus vidas útiles basándose en material bibliográfico, el cual indicaba en muchos casos el periodo de uso recomendable que deben tener cada uno de estos elementos en el mercado. Por ejemplo, los proveedores de los delimitadores viales señalaron en sus especificaciones técnicas que las tachas reflectivas y topellantas tienen un tiempo de vida estimado de 12

años dada su dependencia a variables como el volumen de tráfico, la tipología de los vehículos circulantes y la cantidad de material abrasivo presente.

Los cicloparqueaderos y la señalética vertical son un caso aparte; el MTC (2016) refiere que para los materiales que constituyen estos elementos (tubos de acero galvanizado y láminas de sustrato de aluminio) se opte por asignarles un tiempo de vida de 15 años, ya que sus propiedades físicas y su relativo bajo nivel de exposición a riesgos hacen que no perciban daños tan fácilmente. Por último, para el caso de los mobiliarios urbanos (macetas, bancas, bolardos, entre otros), que resultan ser elementos sujetos continuamente a la manipulación y, por ende, a las fuerzas de contacto, se optó por proporcionales un tiempo de vida útil de 5 años. Otro criterio para esta selección fue el hecho de que el reemplazo de estos materiales es mucho más fácil de concretarse a diferencia del resto dado que no requieren trabajos demandantes ni tiempos de ejecución excesivos.

A fin de poder determinar las cantidades exactas de materia prima utilizada en cada proyecto, se realizó una inspección a los planos arquitectónicos y expedientes técnicos. Los resultados de este reconocimiento se registraron en inventarios primarios (véanse Tablas 3.7-3.9), donde también se detallan las vidas útiles de los elementos.

Tabla 3.7. Inventario primario para la etapa de construcción de la calle Los Libertadores. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)
Ciclovía (pintura verde)	1293 m ²	2
Señalización horizontal (pintura blanca)	660.6 m ²	2
Adoquines de concreto prefabricado	4191 m ²	15
Carpeta asfáltica	3322 m ²	10
Rampas de concreto (f _c =175 kg/cm ²)	38.62 m ³	10
Sardineles de concreto (f _c =175 kg/cm ²)	182.2 m ³	10
Jardín sembrado (e=0.1 m)	268.4 m ³	10
Arboles (álamos)	85 und	10
Macetones	30 und	5
Macetas	20 und	5
Cicloparqueaderos	11 und	15
Tachas reflectivas	673 und	12
Señalización vertical	31 und	15
Bolardos esféricos de concreto (f _c =100 kg/cm ²)	138 und	5
Bancas rectangulares de concreto (f _c =100 kg/cm ²)	18 und	5
Bancas semicirculares de concreto (f _c =100 kg/cm ²)	12 und	5

Tabla 3.8. Inventario primario para la etapa de construcción de la avenida Rivera Navarrete. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)
Ciclovia (pintura verde)	327.2 m ²	2
Señalización horizontal (pintura blanca)	522.3 m ²	2
Señalización horizontal (pintura amarilla)	30.81 m ²	2
Adoquines de concreto prefabricado	4853 m ²	15
Carpeta asfáltica	7453 m ²	10
Rampas de concreto ($f_c=175$ kg/cm ²)	23.62 m ³	10
Sardineles de concreto ($f_c=175$ kg/cm ²)	125.3 m ³	10
Jardín sembrado ($e=0.1$ m)	36.31 m ³	10
Macetones	68 und	5
Macetas	18 und	5
Cicloparqueaderos	33 und	15
Tachas reflectivas	212 und	12
Señalización vertical	24 und	15
Bolardos flexibles de polietileno	28 und	5
Topellantas de caucho SBR	131 und	12
Bancas de madera	36 und	5

Tabla 3.9. Inventario primario para la etapa de construcción de la calle Las Begonias. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)
Señalización horizontal (pintura blanca)	785.3 m ²	2
Señalización horizontal (pintura amarilla)	342.4 m ²	2
Adoquines de concreto prefabricado	2224 m ²	15
Carpeta asfáltica	4550 m ²	10
Rampas de concreto ($f_c=175$ kg/cm ²)	32.81 m ³	10
Sardineles de concreto ($f_c=175$ kg/cm ²)	158.4 m ³	10
Jardín sembrado ($e=0.1$ m)	224.9 m ³	10
Arboles (álamos)	108 und	10
Macetas	12 und	5
Cicloparqueaderos	16 und	15
Tachas reflectivas	151 und	12
Señalización vertical	38 und	15
Bolardos de caucho SBR	76 und	5
Bancas de madera	34 und	5

A pesar de que los datos reunidos son de buena calidad, no tienen mucha utilidad si es que estos no se encuentran expresados por las unidades adecuadas. Para facilitar la posterior evaluación de la información,

se optó por traducir las cantidades de los elementos identificados a unidades de peso, con excepción de aquellos hechos a base de concreto y madera, los cuales se manejaron con unidades de volumen.

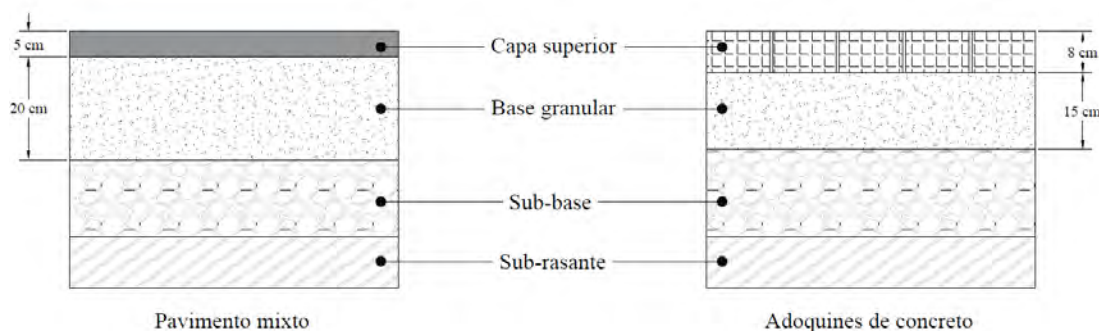


Figura 3.13. Detalles de las superficies de calzada. Fuente: Elaboración propia

Al examinar las etapas de las obras orientadas a reestructurar la superficie de las calzadas, se identificó el uso de dos materiales predominantes, los adoquines de concreto prefabricado y el pavimento mixto (carpeta asfáltica), los cuales, según los planos de arquitectura consultados, tuvieron espesores de 8 y 5 centímetros, respectivamente (véase Figura 3.13). La información técnica consultada también detallaba que para la instalación de ambos elementos se requirió previamente la colocación de una base granular; utilizándose para los primeros una capa de arena fina de 15 centímetros y para los segundos una de 20 centímetros.

Haciendo uso de estos valores y considerando las áreas superficiales correspondientes a cada material, así como un peso específico de 1.4 ton/m^3 para la arena y 1.5 ton/m^3 para el pavimento mixto, se determinaron las cantidades a ser introducidas en los inventarios finales. A continuación, se muestra como ejemplo demostrativo los cálculos realizados utilizando los datos de la calle Los Libertadores.

$$\text{Adoquines de concreto: } 4191.36 \times 0.08 = 335.31 \text{ m}^3$$

$$\text{Capa de arena para los adoquines de concreto: } 4191.36 \times 0.15 \times 1.4 = 880.19 \text{ ton}$$

$$\text{Carpeta asfáltica: } 3322.13 \times 0.05 \times 1.5 = 249.16 \text{ ton}$$

$$\text{Base granular para la carpeta asfáltica: } 3322.13 \times 0.20 \times 1.4 = 930.20 \text{ ton}$$

Como parte de la señalización horizontal, los términos de referencia señalaron la selección y uso de pinturas acrílicas a base de agua, tachas reflectivas de policarbonato y topellantas de caucho SBR. El peso de los primeros productos se determinó al relacionar su eficiencia ($12 \text{ m}^2/\text{l}$) y densidad (1.59 kg/l) con los valores correspondientes a las áreas superficiales pintadas en cada escenario de estudio. Mientras que las características de las pinturas se obtuvieron de la información primaria recolectada de los técnicos de la MSI, para el resto de materiales se tuvo que recurrir a las especificaciones técnicas brindadas por los

proveedores. En ellas, se indicaba que los pesos por unidad para las tachas y topellantas fueron de 0.08 y 16 kg, respectivamente. Para ilustrar la sistemática empleada durante el cálculo del peso de las pinturas, se utiliza de nuevo los valores del inventario primario de la calle Los Libertadores.

$$Pintura\ verde = \frac{1.59 \times 1292.62}{12} = 171.27\ kg$$

$$Pintura\ blanca = \frac{1.59 \times 660.55}{12} = 87.52\ kg$$

Asimismo, otros dispositivos empleados para delimitar y segregar las vías fueron los bolardos. Se pudieron identificar tres presentaciones distintas de dichos elementos en relación al tipo de material que los constituyen. Los primeros se caracterizaron por estar hechos de concreto ($f'c = 100\ kg/cm^2$) y tener una forma esférica de diámetro igual a 0.45 metros o, en equivalencia, un volumen por pieza de $0.047\ m^3$. Los otros dos tipos de bolardos correspondían a elementos lineales con longitudes iguales (0.75 m), pero pesos distintos; siendo aquellos basados en polietileno (2 kg) más ligeros que los compuestos por caucho SBR (11.1 kg). Esta información se adquirió a partir de la ficha técnica de cada producto.

Por otro lado, también se encontró señales verticales de carácter informativo, preventivo y regulador, las cuales estaban conformadas, en general, por postes de acero galvanizado de 3.50 metros de longitud, paneles hechos de sustrato de aluminio con espesores iguales a 3 milímetros y dados de concreto ($f'c = 140\ kg/cm^2$) para las cimentaciones con secciones cuadradas de 40 centímetros por lado (véase Figura 3.14).

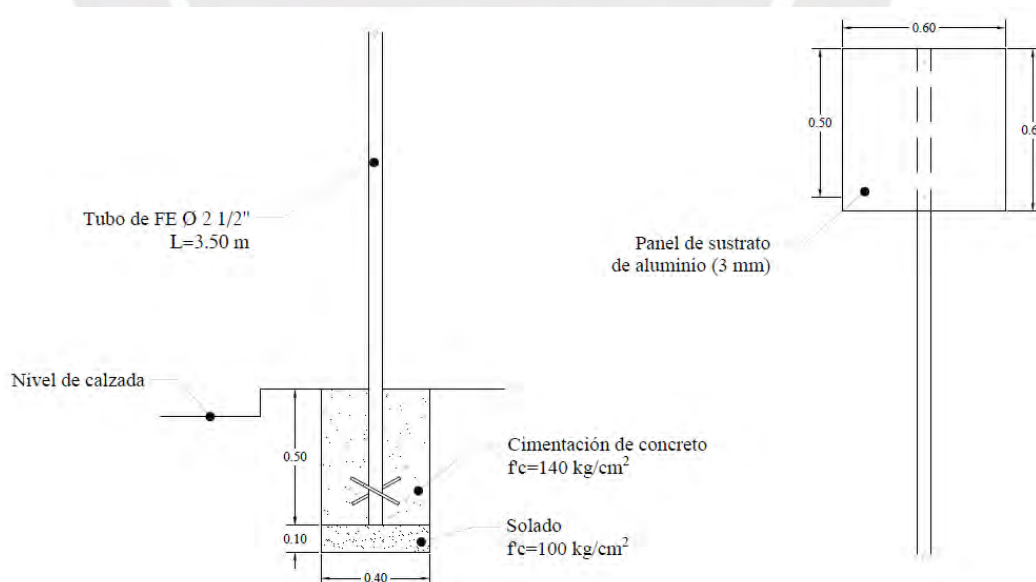


Figura 3.14. Detalles de las señalizaciones verticales. Fuente: Adaptado de MSI (2016)

Estos últimos elementos además se caracterizan por tener una altura aproximada de 50 centímetros y contar con un revestimiento en su cara inferior, comúnmente conocido como solado, con una resistencia

de 100 kg/cm² y un espesor de 10 centímetros. Al consultar los requerimientos técnicos de los proyectos en estudio y el *Manual de dispositivos de control de tránsito automotor para calles y carreteras* (MTC, 2016), se halló que los valores de los pesos promedios por unidad para los postes y paneles fueron 71.55 y 2.80 kg, respectivamente. Tomando como ejemplo la calle Los Libertadores, se muestra la manera como se hicieron las estimaciones de los metrajes finales para todos los componentes de las señalizaciones verticales.

$$\text{Panel informativo (sustrato de aluminio): } 31 \times 2.80 = 86.80 \text{ kg}$$

$$\text{Poste (acero galvanizado): } 31 \times 71.55 = 2218.05 \text{ kg}$$

$$\text{Cimentación de concreto: } 31 \times 0.4 \times 0.4 \times 0.5 = 2.48 \text{ m}^3$$

$$\text{Solado de concreto: } 31 \times 0.4 \times 0.4 \times 0.1 = 0.50 \text{ m}^3$$

Para el cálculo de los materiales restantes, se tuvo que recurrir al *Manual de Mobiliario Urbano* (MSI, 2016), ya que allí se indican tanto los pesos como los volúmenes de cada elemento. Al examinar ese documento, se encontró que las macetas y macetones ornamentales de cemento, así como los cicloparqueaderos de acero galvanizado, poseían un peso por pieza de 16, 35 y 32.5 kg, respectivamente. Además, este también señalaba que el volumen considerado para las bancas fue de 0.8 m³, salvo para aquellas con forma semicircular, donde se utilizó un valor de 0.316 m³ en su lugar. Finalmente, tras realizar los cálculos antes mencionados y recolectar los consecuentes resultados, se pudieron construir los inventarios finales para cada escenario de estudio, los cuales se encuentran representados en las Tablas 3.10-3.12.

Tabla 3.10. Inventario final para la etapa de construcción de la calle Los Libertadores. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)
Ciclovía (pintura verde)	0.17 ton	2
Señalización horizontal (pintura blanca)	8.75E-02 ton	2
Adoquines de concreto prefabricado	335.3 m ³	15
Capa de arena para adoquines de concreto prefabricado (e=0.15 m)	880.2 ton	15
Carpeta asfáltica (e=0.05 m)	249.2 ton	10
Base granular para la carpeta asfáltica (e=0.20 m)	930.2 ton	10
Rampas de concreto (f'c=175 kg/cm ²)	38.62 m ³	10
Sardineles de concreto (f'c=175 kg/cm ²)	182.19 m ³	10
Jardín sembrado (e=0.1 m)	268.4 m ³	10
Arboles (álamos)	85 und	10
Macetones (cemento)	1.05 kg	5
Macetas (cemento)	0.32 ton	5
Cicloparqueaderos (acero galvanizado)	0.36 kg	15

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)
Tachas reflectivas (policarbonato)	5.38E-02 ton	12
Panel informativo para la señalética vertical (sustrato de aluminio)	8.68E-02 ton	15
Poste para la señalética vertical (acero galvanizado)	2.22 ton	15
Cimentación de concreto para la señalética vertical ($f_c=140$ kg/cm ²)	2.48 m ³	15
Solado de concreto para la señalética vertical ($f_c=100$ kg/cm ²)	0.50 m ³	15
Bolardos esféricos de concreto ($f_c=100$ kg/cm ²)	6.49 m ³	5
Bancas rectangulares de concreto ($f_c=100$ kg/cm ²)	14.40 m ³	5
Bancas semicirculares de concreto ($f_c=100$ kg/cm ²)	3.79 m ³	5

Tabla 3.11. Inventario final para la etapa de construcción de la avenida Rivera Navarrete. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)
Ciclovía (pintura verde)	4.34E-02 ton	2
Señalización horizontal (pintura blanca)	6.92E-02 ton	2
Señalización horizontal (pintura amarilla)	4.08E-03 ton	2
Adoquines de concreto prefabricado	388.2 m ³	15
Capa de arena para adoquines de concreto prefabricado ($e=0.15$ m)	1019 ton	15
Carpeta asfáltica ($e=0.05$ m)	559 ton	10
Base granular para la carpeta asfáltica ($e=0.20$ m)	2087 ton	10
Rampas de concreto ($f_c=175$ kg/cm ²)	23.62 m ³	10
Sardineles de concreto ($f_c=175$ kg/cm ²)	125.34 m ³	10
Jardín sembrado ($e=0.1$ m)	36.31 m ³	10
Macetones (cemento)	2.38 ton	5
Macetas (cemento)	0.29 ton	5
Cicloparqueaderos (acero galvanizado)	1.07 ton	15
Tachas reflectivas (policarbonato)	1.70E-02 ton	12
Panel informativo para la señalética vertical (sustrato de aluminio)	6.72E-02 ton	15
Poste para la señalética vertical (acero galvanizado)	1.72 ton	15
Cimentación de concreto para la señalética vertical ($f_c=140$ kg/cm ²)	1.92 m ³	15
Solado de concreto para la señalética vertical ($f_c=100$ kg/cm ²)	0.38 m ³	15
Bolardos flexibles de polietileno	5.60E-02 ton	5
Topellantas de caucho SBR	2.10 ton	5
Bancas de madera	28.8 m ³	5

Tabla 3.12. Inventario final para la etapa de construcción de la calle Las Begonias. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)
Señalización horizontal (pintura blanca)	0.10 ton	2
Señalización horizontal (pintura amarilla)	45.4E-02 ton	2
Adoquines de concreto prefabricado	178 m ³	15
Capa de arena para adoquines de concreto prefabricado ($e=0.15$ m)	467.1 ton	15

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)
Carpeta asfáltica ($e=0.05$ m)	341.2 ton	10
Base granular para la carpeta asfáltica ($e=0.20$ m)	1274 ton	10
Rampas de concreto ($f_c=175$ kg/cm ²)	32.81 m ³	10
Sardineles de concreto ($f_c=175$ kg/cm ²)	158.4 m ³	10
Jardín sembrado ($e=0.1$ m)	224.9 m ³	10
Arboles (álamos)	108 und	10
Macetas (cemento)	0.19 ton	5
Cicloparqueaderos (acero galvanizado)	0.52 ton	15
Tachas reflectivas (policarbonato)	1.21E-02 ton	12
Panel informativo para la señalética vertical (sustrato de aluminio)	0.11 ton	15
Poste para la señalética vertical (acero galvanizado)	2.72 ton	15
Cimentación de concreto para la señalética vertical ($f_c=140$ kg/cm ²)	3.04 m ³	15
Solado de concreto para la señalética vertical ($f_c=100$ kg/cm ²)	0.61 m ³	15
Bolardos de caucho SBR	0.84 ton	5
Bancas de madera	27.20 m ³	5

3.2.5.1.3. *Etapas de operación y mantenimiento*

La etapa de uso de las infraestructuras viales se modeló en base a la información provista por la MSI. Para ello, se tomaron en cuenta los conteos y flujogramas vehiculares realizados en cada uno de los emplazamientos. Tanto para las calles Los Libertadores (2016) y Las Begonias (2018), como para la avenida Rivera Navarrete (2016), se cuantificaron las cantidades de las unidades circulantes durante un periodo continuo de 24 horas. Esta información se considera de alta calidad ya que fue elaborada utilizando metodologías que permitieron una categorización de los vehículos según su tipología, distinguiéndose entre unidades livianas, de carga pesada y de transporte público.

Dado el tiempo prolongado que implica realizar estas mediciones, el equipo técnico de la MSI optó por determinar la tasa de vehículos para algunos días en particular y modelar el periodo restante a partir de aproximaciones para cada temporada del año, haciendo uso para ello de los factores de expansión provistos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 3.13. Cantidad anual de vehículos para cada caso de estudio. Fuente: Elaboración propia

Tipo de vehículo	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Público	0	105 485	56 725
Liviano	1 873 545	4 917 280	3 562 945
Carga pesada	8 835	99 645	32 020
Total	1 882 380	512 2410	3 651 690

Asimismo, considerando que los escenarios evaluados reciben viajes que dependen fuertemente de las actividades productivas y comerciales que se llevan a cabo en sus alrededores y que dichos trabajos, por las características de la zona, se ejecutan de manera constante, se deduce un comportamiento similar para su flujo vehicular a lo largo del tiempo. En tal sentido, se puede asumir a las variaciones en el tráfico como intrascendentes ya que implican un margen de error despreciable. La Tabla 3.13 detalla la cantidad de vehículos que transitan anualmente por cada uno de los emplazamientos según su tipología.

No obstante, ya que en este rubro se consideran las emisiones por cada kilómetro recorrido, se dispuso a realizar los cálculos de consumo de combustible para un año tomando en cuenta los límites máximos de velocidad permitidos en el distrito. Así, para los casos de las calles Los Libertadores y Las Begonias, se utilizó el factor de velocidad de 30 km/h, mientras que para la avenida Rivera Navarrete tuvo que emplearse uno de 60 km/h. De manera que, al fraccionar las cantidades anuales de vehículos en proporción a los parámetros de velocidad mencionados, se logró determinar la cantidad de vehículos recorridos por kilómetro de vía (véase Tabla 3.14).

Tabla 3.14. Cantidad anual de vehículos por kilómetro recorrido para cada caso de estudio. Fuente: Elaboración propia

Tipo de vehículo	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Público	0	1758	1891
Liviano	62 452	81 955	118 765
Pesado	295	1661	1067

En vista de que la información adquirida no especificaba la categoría tecnológica de los vehículos en circulación, se tuvo que asumir el manejo generalizado del estándar EURO III. Dicha decisión se cimentó en el hecho de que los vehículos con esta normativa ocupan un gran porcentaje del parque automotor nacional. Si bien es posible encontrar hoy en día algunos vehículos con estándares más sofisticados como el EURO IV, V o VI, estos no representan una muestra significativa pues la flota promedio de vehículos en las calles se considera bastante antigua, teniendo un promedio de edad de 12.5 años según los estudios hechos por la Fundación Transitemos (2018).

Asimismo, la etapa de operación también incluye el consumo eléctrico del alumbrado público, el cual fue instalado como parte de las modificaciones hechas a las infraestructuras viales. Si bien no se pudo obtener los registros que detallaban el gasto energético total de los proyectos, fue posible modelarlo a partir del metrado de las unidades luminarias dispuestas a lo largo de las autopistas y sus alrededores.

Se identificaron los faroles ornamentales (60 watts) y empotrados LED (7 watts) como los principales responsables del consumo eléctrico en todos los sistemas. En base a esto y tomando en consideración que

el tiempo de actividad habitual de alumbrado público es de 12 horas diarias, se pudo determinar el consumo eléctrico anual.

A pesar de que se trata de una metodología de modelamiento conservadora, la calidad de los resultados es todavía notable, pues la estructura eléctrica de las vías en análisis no suele sufrir variaciones significativas entre un mes y otro, ni mucho menos entre un día y otro. Así pues, los resultados finales obtenidos muestran de manera realista el consumo eléctrico experimentado en cada uno de los emplazamientos durante su funcionamiento (véase Tabla 3.15).

Tabla 3.15. Consumo eléctrico anual. Fuente: Elaboración propia

Casos de estudio	Faroles ornamentales (60W)	Empotrados LED (7W)	Consumo de energía (kWh/año)
Calle Los Libertadores	113	12	30 064
Avenida Rivera Navarrete	71	24	19 395
Calle Las Begonias	125	112	36 284

Por otra parte, el comportamiento de las infraestructuras viales sigue un camino con una pendiente decreciente y es que, una vez son diseñadas y construidas, estas empiezan a disminuir la calidad del servicio brindado a los usuarios producto de los efectos negativos que surgen de las fuerzas de contacto con los vehículos. En ese sentido, resulta necesario realizar sobre ellas trabajos de mantenimiento que permitan preservar en óptimas condiciones sus componentes físicos y evitar el deterioro del servicio que se brinda al público a medida que avanza el tiempo.

En los casos de la calle Los Libertadores y la avenida Rivera Navarrete, se llevaron a cabo un conjunto de acciones que apuntaban a preservar el buen estado de los elementos que las constituyen. Dichas actividades se caracterizaron por ser ejecutadas frecuentemente y tratar de conservar las condiciones físicas con la mínima cantidad de variaciones posibles. En general, el mantenimiento se basó en la corrección de algunas imperfecciones en las vías, colocación de nueva pintura para las señalizaciones horizontales, implementación de nuevos mobiliarios urbanos en reemplazo de los defectuosos y reparación de algunas estructuras de concreto (rampas, sardineles, entre otros). Se recurrió a la información técnica disponible en 2016 para cuantificar el consumo final de materiales utilizados durante los trabajos de mantenimiento ya que en esta se resumían los metrados anuales de cada uno de los emplazamientos considerando sus extensiones totales.

El caso de la calle Las Begonias se manejó de una manera distinta. Dado que esta obra se inauguró a finales del 2018, mientras se iniciaba esta investigación, no existía aun información que respaldase cuantitativamente los trabajos de mantenimiento que debían realizarse. Por ello, fue necesario modelar los

datos de consumo de materiales utilizando como línea base la información disponible de los otros emplazamientos. El metraje final obtenido se ajustó con ayuda de los especialistas técnicos de la MSI a fin de conseguir valores más coherentes y con un nivel menor de incertidumbre.

La Tabla 3.16 muestra las cantidades finales de materiales empleados para realizar las labores de mantenimiento rutinario en cada viario durante un año de funcionamiento convencional. Se emplearon las mismas vidas útiles que en el inventario de la fase de construcción, ya que se tratan de los mismos materiales con la diferencia de que se presentan en una escala menor.

Tabla 3.16. Inventario del mantenimiento anual. Fuente: Elaboración propia

Materiales	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Pintura (ton)	1.85E-02	2.77E-02	8.96E-03
Concreto (m ³)	5.26	3.28	4.12
Acero galvanizado (ton)	0.17	0.27	0.25
Asfalto mixto (ton)	0.67	0.83	0.74
Polycarbonato (ton)	5.64E-03	2.86E-03	2.52E-03

Es preciso mencionar que se excluyeron del inventario las actividades vinculadas al recapeo asfáltico total de las calzadas debido a que dichas acciones, por su naturaleza, constituyen nuevos proyectos de intervención vial, cuyas características, al ser diferentes a las de los escenarios de estudio originales, no pueden ser modeladas ni integradas dentro del alcance de esta investigación.

3.2.5.2. Cálculo del consumo energético de las maquinarias

Un aspecto importante durante las etapas de demolición y construcción de los proyectos de reordenamiento vial fue la correspondiente al uso de maquinarias pesadas. Dado que el funcionamiento de estos equipos se basa en el uso de diésel B5, el cual es normalmente distribuido en el mercado peruano por galones, se tuvo que relacionar una serie de parámetros para obtener las cantidades finales de combustibles utilizadas.

En general, se estimó el consumo energético multiplicando el rendimiento efectivo de las máquinas por la cantidad de horas en la que estas se encontraron en funcionamiento. No obstante, ya que los valores obtenidos se encontraban en unidades volumétricas, fue necesario realizar una conversión con el fin de facilitar la inclusión de los datos calculados a los inventarios. Para ello, se tomó en consideración un factor de equivalencia de 0.0038 m³/gal y una densidad de 870 kg/m³ para el combustible. En cuanto al tiempo de vida a utilizarse, se seleccionó un periodo de 20 años debido a que los trabajos que derivan en el consumo de diésel B5 se tratan de actividades puntuales que se presentan solo una vez en los proyectos de reordenamiento vial.

A pesar de que la información técnica utilizada se podía considerar de calidad, esta no era del todo detallada pues no contaba con datos específicos que revelaran la eficiencia en campo de los equipos empleados. Por tal motivo, dichos indicadores tuvieron que ser aproximados utilizando otras fuentes de información, tales como bibliografía especializada (CAT, 2013) o reportes de proyectos viales con similares características (Loo y Aguilar, 2017). Así pues, en vista de que los valores asumidos no fueron completamente fieles a la realidad, se puede asumir un cierto nivel de incertidumbre para los resultados obtenidos. Las Tablas 3.17 y 3.18 muestran las cantidades totales de horas y diésel B5 utilizadas por la maquinaria para cada uno de los escenarios de estudio.

Tabla 3.17. Tiempo de uso de las maquinarias. Fuente: Elaboración propia

Maquinaria	Fase	Tiempo de uso (horas)		
		Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Cargador frontal CAT950	Demolición y construcción	741	1187	960
Volquete	Construcción	640	1074	860
Motoniveladora CAT140	Construcción	662	856	719
Rodillo compactador	Construcción	662	856	719
Regadora asfáltica	Construcción	142	230	196
Camión cisterna	Construcción	72	104	80
Retroexcavadora sobre orugas CAT330	Demolición	246	332	291
Martillo hidráulico	Demolición	246	332	291

Tabla 3.18. Consumo energético de las maquinarias. Fuente: Elaboración propia

Maquinaria	Rendimiento (gal/h)	Consumo diésel B5 (ton)		
		Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Cargador frontal CAT950	8.76	21.46	34.38	27.80
Volquete	8.76	18.53	31.10	24.91
Motoniveladora CAT140	3.60	7.88	10.19	8.56
Rodillo compactador	3.46	7.57	9.79	8.22
Regadora asfáltica	2.83	1.33	2.15	1.83
Camión cisterna	3.31	0.79	1.14	0.88
Retroexcavadora sobre orugas CAT330	3.94	3.20	4.32	3.79
Martillo hidráulico	3.60	2.93	3.95	3.46

Por último, cabe señalar que las magnitudes de consumo energético descritas anteriormente corresponden en gran medida al tipo de trabajo realizado. Existen algunas actividades, como las realizadas sobre la matriz asfáltica y la base granular, que demandaron un mayor uso de las maquinarias y, por ende, un gasto de combustible más alto. Adicionalmente, las variaciones que se aprecian entre un escenario y otro para

los datos calculados pueden atribuirse a las diferencias que existen entre las configuraciones físicas de cada emplazamiento (longitud y ancho efectivo). Queda claro entonces que los trabajos en un escenario con mayores dimensiones y alcances suponen gastos energéticos más altos.

3.2.5.3. Cálculo de emisiones de material particulado

Según señala Mészáros (1999), el material particulado (PM, por sus siglas en inglés) puede definirse como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas suspendidas en el aire que se originan a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas. La exposición a este tipo de material ocasiona una variedad de impactos en la salud de las personas, entre ellos, el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares (Pope, 2004). En tal sentido, resulta necesario realizar mediciones de la concentración de este contaminante y evaluar su comportamiento en una escala espacial y temporal, permitiendo orientar estrategias de control y seguimiento por parte de las autoridades interesadas y/o tomadores de decisiones.

En el caso de las partículas de polvo emitidas en grandes cantidades, algunos autores coinciden que su origen principal es la erosión del viento y las actividades agrícolas (Goossens y Buck, 2009a; 2009b). No obstante, los procesos de demolición, construcción o incluso las acciones mecánicas de los vehículos en vías pavimentadas también pueden contribuir significativamente a su generación y, por ende, al deterioro de la calidad de la atmosfera. Entonces, en vista a que la infraestructura vial se ve influenciada por diversas actividades que generan estos contaminantes, se decidió incluir el cálculo de sus emisiones como parte del presente estudio.

Para el modelado de partículas emitidas por la demolición, se siguieron los lineamientos del *CalEEMod* (*California Emission Estimator Model*), desarrollado por ENVIRON (2013), en conjunto con el informe *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*, considerando como el principal compendio de factores de emisión de la EPA. Además, se siguió la estructura de cálculos planteada en investigaciones científicas similares (Larrea-Gallegos et al., 2017; Verán-Leigh et al., 2019). De acuerdo a todos ellos, es posible calcular la cantidad de material particulado en suspensión usando las siguientes ecuaciones:

$$EF_D = k(0.0032) \frac{\left(\frac{U}{5}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}}$$

$$E_D = EF_D \times W$$

Donde:

k : Factor multiplicador según tamaño de partículas

U : Velocidad media del viento (millas por hora)

M : Contenido de humedad promedio del material (%)

EF_D : Factor de emisión (libras de PM/tonelada de escombros)

W : Peso de los escombros (toneladas)

E_D : Cantidad de emisiones (libras de PM)

Siguiendo las sugerencias de la EPA (1995), para realizar los cálculos, se tomó en cuenta un valor predeterminado 2% para M . Además, se empleó un factor k de 0.35 para el PM10 y de 0.053 para el PM2.5. Para la estimación de U , se tuvo que recurrir al *Anuario de Estadísticas Ambientales*, elaborado por el INEI (2020b). En dicho documento se detalla que entre 2015 y 2019 las estaciones al interior de Lima detectaron una velocidad promedio de 1.7 m/s, o en equivalencia 3.80 mph. Mientras tanto, el peso de los escombros se obtuvo a partir de los datos de la Tabla 3.5.

Aparte, a fin de conservar la homogeneidad en las unidades empleadas en este estudio, se multiplicó por 0.45 la cantidad de emisiones estimada a fin de convertir los factores obtenidos de libras a kilogramos. En las Tablas 3.19 y 3.20, se observan los resultados de la generación de material particulado producto de las actividades de demolición.

Tabla 3.19. Emisiones de PM2.5 durante la demolición. Fuente: Elaboración propia

Proyecto	W (ton)	k	EF _D (libras/ ton)	E _D (libras)	E _D (kg)	E _D (ton)
Calle Los Libertadores	2147.38	0.053	1.187E-04	0.255	0.116	1.16E-04
Avenida Rivera Navarrete	3268.29			0.388	0.176	1.76E-04
Calle Las Begonias	3798.40			0.451	0.205	2.05E-04

Tabla 3.20. Emisiones de PM10 durante la demolición. Fuente: Elaboración propia

Proyecto	W (ton)	k	EF _D (libras/ ton)	E _D (libras)	E _D (kg)	E _D (ton)
Calle Los Libertadores	2147.38	0.350	7.839E-04	1.683	0.764	7.64E-04
Avenida Rivera Navarrete	3268.29			2.562	1.162	1.16E-03
Calle Las Begonias	3798.40			2.978	1.351	1.35E-03

Este tipo de contaminantes también se originan durante la etapa de operación a consecuencia de la pulverización del material superficial por las fuerzas ejercidas entre los neumáticos y la autopista al entrar en contacto. En general, son tres los aspectos primordiales para el dimensionamiento de las emisiones de partículas para una vía pavimentada: la velocidad media de las unidades vehiculares, el tráfico diario promedio y el número de carriles que posee una vía a lo largo de su recorrido (Loo y Aguilar, 2017).

Para los cálculos en esta categoría se volvió a utilizar el reporte AP-42, *Compilation of Air Emissions Factors* debido a que propone un procedimiento estandarizado de modelación que permite cuantificar la cantidad de emisiones por re-suspensión de PM10 y PM2.5 en un camino pavimentado en condiciones de estado seco. Dicha metodología se basa en el uso y aplicación de la siguiente fórmula:

$$E = k(sL)^{0.91}(W)^{1.02}$$

Donde:

k: Factor multiplicador según tamaño de partículas

sL: Carga de limos presente en el terreno (gramos por metro cuadrado)

W: Peso promedio de los vehículos que pasan por la autopista (toneladas)

E: Factor de emisión de material particulado

Según señala la EPA (1995), el factor multiplicador k varía en relación al tamaño de las partículas suspendidas y las unidades a trabajar. Como el alcance de los proyectos en estudio incluyen el transporte de vehículos motorizados de varios tamaños, se optó por trabajar con el PM10 y 2.5, que son los contaminantes mayormente generados a partir de estos procesos. Otra razón para la elección de estas partículas es que son los materiales respirables más pequeños suspendidos en la atmósfera, por lo que representan un riesgo alto para la salud de las personas. Asimismo, por comodidad se decidió emplear la unidad g/VKT (gramos/kilómetro recorrido por vehículo), puesto que esta investigación se desarrolló en base al sistema internacional de unidades (SI) y sus derivados.

Tabla 3.21. Factor multiplicador k. Fuente: Adaptado de EPA (1995)

Rango de tamaño	Factor multiplicador k		
	g/VKT	g/VMT	lb/VMT
PM2.5	0.15	0.25	0.00054
PM10	0.62	1	0.0022
PM15	0.77	1.23	0.0027
PM30	3.32	5.24	0.011

En cuanto al valor de sL, la EPA (2002) sugiere valores típicos que dependen de la cantidad de vehículos que transitan por la vía a analizar. De acuerdo con los conteos realizados por la MSI, la avenida Rivera Navarrete y la calle Las Begonias poseen una cantidad circulante de vehículos diarios superior a 10 000 unidades, por lo que se usó una tasa de 0.03 gramos por metro cuadrado, valor recomendado para el tipo de vías con flujo alto. Mientras tanto, la calle Los Libertadores tuvo un tratamiento diferente al tratarse de una vía de tráfico calmo con una capacidad menor al resto. Dado que son aproximadamente 5157

vehículos los que transitan en esta vía al día, encontrándose en el rango de flujo medio (5000–10 000), se optó por emplear un valor de sL igual a 0.06.

Para el peso medio de los vehículos (W) que transitan por estas vías, se usó como apoyo el *Reglamento Nacional de Vehículos* (MTC, 2003), en donde se afirma que los pesos promedios de los vehículos públicos, livianos y de carga pesada son 12, 1.5 y 18 toneladas, respectivamente.

Al relacionar estos datos de peso con las cantidades anuales de los vehículos (véase Tabla 3.15), se pudo obtener los valores de W para cada caso de estudio, los cuales se encontraban expresados en toneladas americanas. Debido a ello, se tuvo que realizar una conversión de estas unidades al sistema internacional (SI), empleando como factor de equivalencia de 0.907 respecto a las toneladas métricas. A partir de estos cálculos, se obtuvo que los valores finales de peso promedio anual para la calle Los Libertadores, la avenida Rivera Navarrete y la Calle Las Begonias fueron 1.43, 1.85 y 1.64 toneladas métricas, respectivamente (véase Tabla 3.22).

Tabla 3.22. Pesaje promedio de vehículos para cada caso de estudio. Fuente: Elaboración propia

Tipo de vehículo	Características	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Público	Cantidad	0	105 485	56 725
	Peso (ton)	0	1 148 098.74	617 394.90
Liviano	Cantidad	1 873 545	4 917 280	3 562 945
	Peso (ton)	2 548 957.97	6 689 959.44	4 8470 386.67
Carga pesada	Cantidad	8 835	99 645	32 020
	Peso (ton)	144 240.21	1 626 804.27	522 758.52
Peso promedio (ton)		1.43	1.85	1.64

Una vez obtenido los pesajes promedios, se pudo utilizar la fórmula para estimar el factor de emisión producido por la re-suspensión de partículas. No obstante, ya que los valores obtenidos corresponden a emisiones generadas solamente por un vehículo, hubo que escalar estos resultados parciales tomando en cuenta la longitud total de recorrido de las vías y la cantidad total de vehículos circulantes. Los resultados de dichos cálculos se pueden observar en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23. Emisiones por re-suspensión de material particulado. Fuente: Elaboración propia

Casos de estudio	Longitud (km)	PM2.5 (ton)	PM10 (ton)
Calle Los Libertadores	0.850	0.027	0.110
Avenida Rivera Navarrete	0.540	0.032	0.132
Calle Las Begonias	0.615	0.025	0.095

Adicionalmente, también se produce PM por desgaste de frenos y neumáticos. Según señalan Harrison y colegas (2012), este tipo de emisiones se generan por el propio deterioro de los materiales producto de la abrasión, corrosión y turbulencia, los cuales provocan que las partículas queden sueltas en el aire.

Por un lado, el deterioro de los frenos en los vehículos convencionales se debe a la pérdida de la masa en las pastillas, independientemente si estos sean del tipo disco o tambor, ya que ambos utilizan procesos de rozamiento para resistir el movimiento inercial del vehículo produciendo desgaste y, por consiguiente, emisión de contaminantes del tipo PM2.5 y PM10. La cantidad de masa perdida depende de la tipología de los vehículos, siendo los camiones de carga pesada y las unidades de transporte público los que producen mayor cantidad de partículas. Ello a consecuencia de su peso que hace que requieran frenos más grandes.

En la literatura se han encontrado modelos y pruebas para poder calcular la cantidad de material particulado emitido por el desgaste de frenos durante el tránsito de vehículos en una autopista. En esta investigación, se utilizó el modelo de datos propuesto por Garg (2000) debido a que permite la diferenciación de los resultados entre vehículos livianos y pesados; además, que ha demostrado tener éxito al servir como bases para otro estudio basado en el enfoque de ciclo de vida, donde fue necesario el modelamiento de estas emisiones (Verán-Leigh et al., 2019). La información de referencia a emplear se encuentra especificada en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24. Factores de emisión para el desgaste de frenos. Fuente: Adaptado de Garg (2000)

Tipo de vehículo	PM2.5 (mg/km)	PM10 (mg/km)
Vehículo liviano	3.4	8.9
Vehículo pesado	4.6	12.1

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta la longitud total de las vías analizadas y las cantidades de vehículos registradas, se pudieron calcular las emisiones finales producidas por el desgaste de los frenos (véase Tabla 3.25).

Tabla 3.25. Emisiones producidas por el desgaste de los frenos. Fuente: Elaboración propia

Tipo de partícula	Emisiones anuales (ton)		
	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
PM2.5	5.449E-03	9.538E-03	7.701E-03
PM10	1.426E-02	2.497E-02	2.016E-02

Por otra parte, el menoscabo de los neumáticos se debe a la fuerza de fricción generada entre estos y la superficie de la calzada, provocando que parte de su material se desprenda y liberando partículas que

quedan finalmente alojadas en la atmósfera. Si bien un factor determinante en el desgaste de estos elementos es la tipología de los vehículos; la rugosidad de la superficie, el estilo de manejo de los conductores e incluso las condiciones climáticas también afectan la tasa de deterioro (Park, 2018).

Además, según indican Le Maitre y colegas (1998), acciones como un fuerte frenado o un incremento en la velocidad generan un mayor daño a los neumáticos dado que el nivel de aceleración influye en la cantidad de fuerzas aplicadas a estos elementos. Al respecto de los efectos de las estaciones climáticas, algunos factores como la humedad, la temperatura o el aire resultan también determinantes al momento de calcular el tiempo de desgaste de un neumático (Thorpe y Harrison, 2008). Por ejemplo, el deterioro será menor cuando los vehículos estén circulando por superficies húmedas dado que la abrasión a la que se encuentran sujetos se reduce considerablemente.

Para esta investigación se ha tomado en consideración cada uno de estos aspectos, cuantificando el desgaste de estos elementos en base a la distancia en kilómetros recorrida, el peso inicial y estado de la superficie, tanto del neumático como de la autopista adyacente. Además, para el modelado de las emisiones relacionados a esta categoría, se usaron valores estimados por la EPA (2014), los cuales se basan en la experiencia y metodologías de la comunidad científica. La Tabla 3.26 presenta los factores de emisión para el desgaste de neumáticos.

Tabla 3.26. Factores de emisión para el desgaste de neumáticos. Fuente: Adaptado de EPA (2014)

Tipo de vehículo	PM2.5 (mg/km)	PM10 (mg/km)
Vehículo de pasajeros	0.93	6.09
Vehículo de carga pesada	1.93	12.80
Vehículo público interurbano	2.73	18.21

Así pues, al igual que en el caso anterior, se procedió a realizar los cálculos para el dimensionamiento de las emisiones del tipo PM2.5 y PM10, evidenciándose los resultados obtenidos en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27. Emisiones anuales producidas por el desgaste de los neumáticos. Fuente: Elaboración propia

Tipo de partícula	Emisiones anuales (kg)		
	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
PM2.5	1.496E-03	2.729E-03	2.171E-03
PM10	9.795E-03	1.790E-02	1.423E-02

3.2.5.4. Cálculo del secuestro de carbono

Un aspecto importante de los proyectos de reordenamiento vial implementados fue la inclusión de áreas verdes a fin de embellecer la ciudad y constituir espacios de recreación y esparcimiento. Estos lugares se

acondicionaron para ser ocupados por árboles, arbustos y plantas dada su capacidad de combatir los problemas ambientales derivados de la quema de combustibles fósiles.

Como señala Ranjan (2016), estas especies poseen una propiedad única de secuestro de carbono que consiste en almacenar este elemento en su biomasa por encima y por debajo del suelo como producto de la fotosíntesis. El autor también refiere que tras este proceso de asimilación los compuestos ricos en carbono sufren una configuración estructural para, finalmente, ser devueltos a la atmósfera a través de la descomposición biológica.

Para el presente estudio, se modeló el total de carbono retenido por los árboles como parte del funcionamiento cotidiano de cada emplazamiento. Para ello, se siguió la metodología descrita en varias fuentes bibliográficas (Oyamakin, 2014; Vázquez-Rowe et al., 2017), ya que permite obtener resultados coherentes con la realidad sin la necesidad de realizar cálculos demasiado complejos. En primer lugar, se estimó el peso total de las especies arbóreas mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Para árboles con diámetro menor a 11: } W = 0.25D^2H$$

$$\text{Para árboles con diámetro mayor o igual a 11: } W = 0.15D^2H$$

Donde:

W: Peso del árbol por encima del suelo (libras)

D: Diámetro del tronco (pulgadas)

H: Altura del árbol (pies)

Los autores señalan que para el sistema radicular (conjunto de raíces por debajo del suelo) se debe asumir un peso aproximado del 20% del peso del árbol sobre el suelo. Por lo tanto, el peso total de cada especie se puede calcular multiplicando por 1.2 el valor W . La Figura 3.15 muestra la manera como se obtuvieron los parámetros requeridos para los cálculos; es pertinente mencionar que, para determinar el diámetro del tronco, se tomó como referencia una línea horizontal proyectada desde la altura del pecho debido a que, según la literatura consultada, en ese punto yacen los valores más representativos.

Posteriormente, fue necesario calcular el peso seco total. Para ello se empleó la caracterización descrita en la literatura consultada, la cual indica que, en promedio, un árbol posee 72.5% de material seco y 27.5% de humedad. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las especies con las que se obtuvieron dicha estimación varían respecto a las del presente estudio, lo que podría inducir un cierto grado de incertidumbre a los cálculos. Tras esto, se realizó la estimación del peso del carbono en cada árbol.

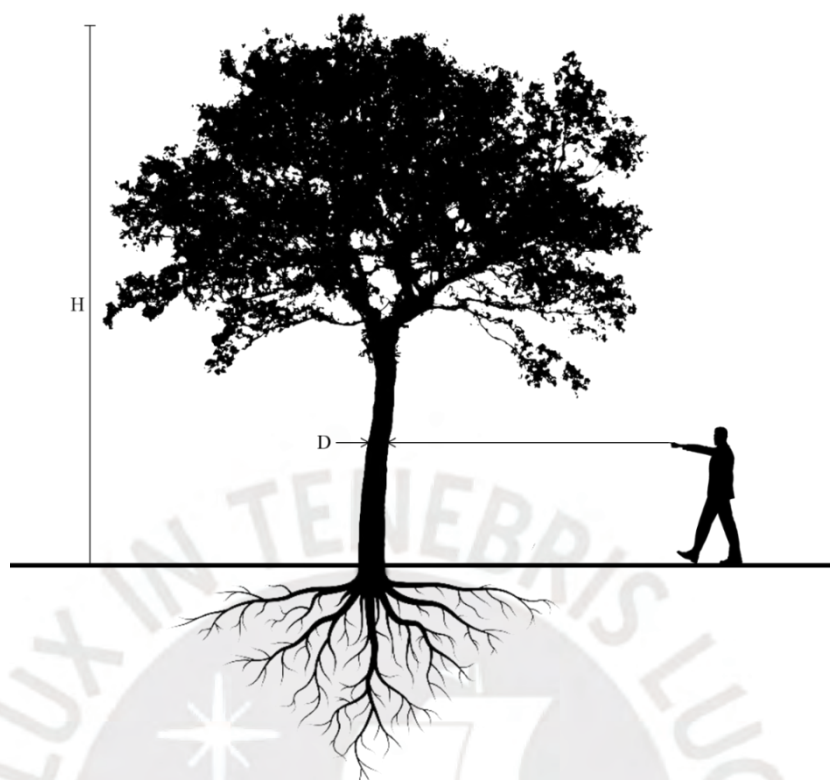


Figura 3.15. Parámetros utilizados para determinar el secuestro de carbono. Fuente: Elaboración propia

Según los datos proporcionados por Birdsey (1992), el contenido medio de carbono representa aproximadamente 50% del volumen total de cualquier árbol. En ese sentido, se tuvo que dividir el peso seco de cada especie por la mitad. Por último, se determinó la cantidad de dióxido de carbono almacenado basándose en las propiedades físicas de cada una de sus moléculas, tal como se muestra a continuación:

Peso atómico del carbono: 12.0107

Peso atómico de oxígeno: 15.9994

Peso molecular del CO₂: $12.0107 + 2 \times 15.9994 = 43.9987$

Relación de CO₂ y C: $\frac{43.9987}{12.0107} = 3.663$

En resumen, al multiplicar 3.663 por el peso del contenido de carbono en los árboles es posible determinar la cantidad de CO₂ retenido por los mismos. Si este valor se divide entre la edad del árbol, se obtiene la tasa de secuestro anual para este compuesto.

De los tres emplazamientos, solo las calles Los Libertadores y Las Begonias cuentan con árboles sembrados en su recorrido, siendo estos en su mayoría álamos. Estas especies se caracterizan por tener una copa densa, medir aproximadamente 4 metros de altura (13.12 pies) y tener un diámetro de tronco que

varía entre 20 y 25 centímetros (8 a 10 pulgadas). La edad de los árboles para el primer escenario es de aproximadamente 2.5 años, mientras para el segundo es de 1 año, que a su vez corresponden a los periodos operativos que llevan ambas autopistas tras abrirse al público. En las Tablas 3.28 y 3.29 se puede observar los resultados finales del secuestro de carbono anualizado.

Tabla 3.28. Secuestro de carbono en la calle Los Libertadores. Fuente: Elaboración propia

	Calle Los Libertadores	
	8	10
D (pulgadas)	8	10
H (pies)	13.12	13.12
Cantidad de arboles	52	13
W (libras)	10 915.84	4264
W incluido sistema radicular (libras)	13 099.01	5116.80
W seco (libras)	9496.78	3709.68
C almacenado (libras)	4748.39	1854.84
CO ₂ almacenado (libras)	17 393.35	6794.28
CO ₂ almacenado (ton)	7.89	3.08
Edad (años)	2.5	2.5
CO ₂ secuestrado (ton/año)	3.16	1.23

Tabla 3.29. Secuestro de carbono en la calle Las Begonias. Fuente: Elaboración propia

	Calle Las Begonias		
	8	9	10
D (pulgadas)	8	9	10
H (pies)	13.12	13.12	13.12
Cantidad de arboles	63	29	16
W (libras)	13 224.96	7704.72	5248
W incluido sistema radicular (libras)	15 869.95	9245.66	6297.30
W seco (libras)	11 505.72	6703.11	4565.76
C almacenado (libras)	5752.86	3351.55	2282.88
CO ₂ almacenado (libras)	21 072.72	12276.74	8362.19
CO ₂ almacenado (ton)	9.56	5.57	3.79
Edad (años)	1	1	1
CO ₂ secuestrado (ton/año)	9.56	5.57	3.79

3.2.6. Evaluación del impacto de ciclo de vida

Según se describe en la normativa *ISO 14040*, el objetivo principal de esta fase es evaluar el potencial de incidencia ambiental que se produce en cada escenario utilizando los resultados del análisis del ICV (ISO, 2006a). Para ello, se selecciona un conjunto de variables (categorías de impacto ambiental), las cuales interactúan con los datos de los inventarios a fin de reflejar las emisiones agregadas o los recursos utilizados.

En ese entender, se decidió utilizar el software SimaPro en su versión 9.2.0.2 en conjunto con la metodología de evaluación ReCiPe Midpoint (H) dado su potencial de transformar los datos de los inventarios en indicadores numéricos ambientales de alta calidad. En cuanto a las categorías de impacto, se seleccionaron aquellas con el potencial de reflejar los aspectos ambientales más importantes para los casos de estudio, siendo las elegidas cambio climático, formación de material particulado, agotamiento de recursos y potencial de acidificación terrestre. A continuación, se describe la justificación de esta selección:

- Cambio climático: Según la EPA (2016), se refiere al aumento gradual de las temperaturas de la atmósfera y océanos a consecuencia del incremento de la concentración de GEI en el ambiente. En ese entender, ya que el sector transporte es una gran fuente de estos contaminantes, evaluar el impacto ambiental en estos términos permitiría cuantificar y comparar el grado de contribución de los proyectos de reordenamiento vial a este problema.
- Formación de material particulado: Su cómputo está justificado debido a que los casos de estudio se tratan de infraestructuras viales localizadas en áreas altamente urbanizadas, donde la presencia de estos contaminantes resulta perjudicial para la salud humana y los ecosistemas adyacentes.
- Agotamiento de recursos: En este grupo se encuentran la disminución de combustibles fósiles y la depleción de minerales, las cuales se producen en las diversas fases de los proyectos (demolición, construcción, operación y mantenimiento). La evaluación de esta categoría resulta importante pues permitiría medir el grado de sostenibilidad de los sistemas viales urbanos y entender la influencia de este tipo de proyectos en términos de la demanda de materias primas y su disponibilidad a largo plazo.
- Potencial de acidificación terrestre: De acuerdo con la EPA (2016), el proceso de acidificación ocurre cuando un donante aporta protones a los ecosistemas, lo que reduce su concentración de iones de hidrógeno (pH). En los sistemas terrestres el principal efecto que se puede manifestar es la reducción y/o desaparición de áreas verdes producto de la introducción de sustancias ácidas, como óxidos de azufre y nitrógeno, al medio ambiente. Entonces, dado que estos elementos se generan en altas cantidades durante la fase de operación de las vías producto de la quema de combustibles fósiles en los vehículos, cabe la necesidad de analizar esta categoría a fin de garantizar la calidad de los nuevos entornos urbanos que se están implementando en favor de las personas.

Cabe mencionar que la categoría de cambio climático tuvo un tratamiento especial debido a que, para este caso en particular, se optó por emplear la metodología IPCC 2013 por su capacidad de proporcionar un enfoque más especializado y detallado al evaluar esta clase de impactos. Con ello, se espera además que los resultados a obtenerse tengan una mayor consistencia con estándares internacionales y, por ende, mejorar la confiabilidad de los hallazgos.

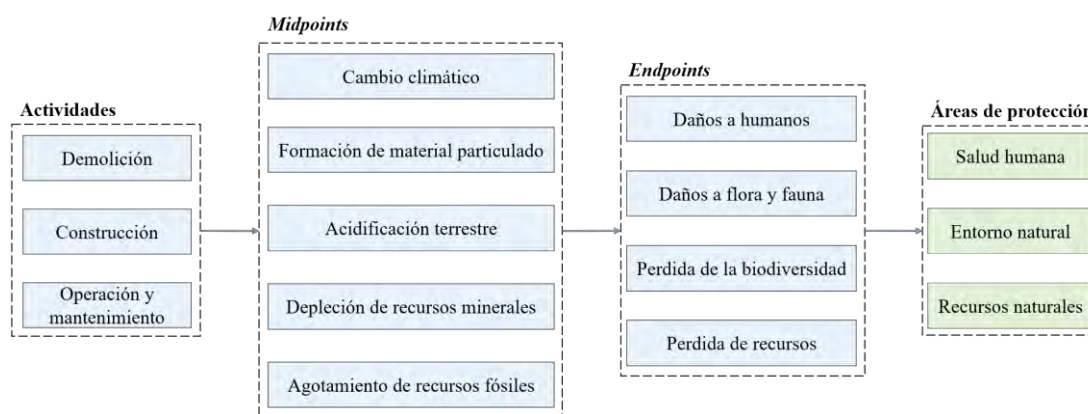


Figura 3.16. Esquematización de las relación entre los métodos de caracterización. Fuente: Elaboración propia

Una vez culminada la clasificación de los impactos, la siguiente etapa de evaluación comprende la caracterización de los datos. Se distinguen dos tipos de metodologías para ello, las cuales están basadas en el enfoque asignado a la cadena de emisiones y a los daños de cada categoría de impacto. Por un lado, se tiene al método *Midpoint*, el cual se enfoca en los efectos primarios y secundarios producidos por las emisiones a partir de términos de cuantificación química de cada uno de los contaminantes (Joint Research Centre, 2013). Por otro lado, el método *Endpoint*, caracterizado por tratar la información directa acerca de las áreas dañadas o afectadas por las emisiones con el fin de identificar un tema ambiental preocupante (ISO, 2006a). La Figura 3.16 esquematiza las dinámicas de las relaciones entre los distintos métodos de caracterización.

Para el desarrollo de esta investigación se empleó la metodología *Midpoint*, debido a que esta presenta los resultados en función de las emisiones producidas por las actividades de cada proyecto de intervención vial. La metodología *Endpoint* no se utilizó por el momento ya que, al concentrarse directamente en los efectos de fondo, hace que la incertidumbre de los datos sea muy elevada, lo cual haría disminuir la calidad de los resultados. No obstante, ya que uno de los objetivos de esa tesis es mejorar el diseño de políticas e ingeniería de transporte, también resulta pertinente determinar resultados que sean más fáciles de comunicar al público no familiarizado con el ACV. Entonces, el uso de esta metodología de caracterización queda aplazado para el desarrollo de futuras investigaciones.

3.2.7. Interpretación del análisis de ciclo de vida

El ACV concluye con la interpretación de los resultados obtenidos de combinar el análisis del ICV con la evaluación de impacto. Con ello, se busca desarrollar conclusiones y sugerencias alineadas a los objetivos y alcances inicialmente planteados.

Según señala la *ISO 14040*, los resultados de esta interpretación también permiten determinar en qué parte del ciclo de vida de un producto o servicio se generan las principales cargas ambientales negativas y, por

lo tanto, que puntos y/o aspectos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse (ISO, 2006a). En otras palabras, durante esta fase es posible identificar los procesos más críticos de un proyecto y determinar los obstáculos a superar para alcanzar la sostenibilidad ambiental.

3.2.8. Análisis de sensibilidad

Para este estudio se decidió realizar un análisis de sensibilidad con el fin de evaluar la influencia que tienen algunos parámetros dentro del sistema. De acuerdo con PRé Sustainability (2016), este tipo de evaluaciones permite dimensionar el nivel de incertidumbre que determinadas suposiciones metodológicas puedan generar en los resultados generales del estudio y en su posterior interpretación.

Los escenarios alternos al modelo inicial (A1) que fueron incluidos en este análisis son:

- A2: Modificación del mercado automotriz peruano a los últimos estándares europeos (EURO V y EURO VI). Esta modificación se realizó con el fin de comparar el impacto producido por el flujo vehicular asumido (EURO III) respecto al estándar europeo actual.
- A3: Modificación de la cantidad de vehículos livianos circulantes al incorporar el tránsito de vehículos eléctricos en un 10%. Este cambio se desarrolló esperando que, con el ingreso de los vehículos eléctricos, se consiga una reducción en el consumo de combustible fósiles y, por consiguiente, en los impactos relacionados al cambio climático. Para ello, se toma en cuenta todas las etapas del ciclo de vida de los vehículos eléctricos pues los procesos y subprocesos que conforman su etapa de producción son muy diferentes al de un vehículo liviano convencional.
- A4: Modificación de las capas asfálticas por superficies hechas a base de adoquines de granito. Este escenario se planteó con el fin de comparar el impacto que generan en el sistema el uso de diferentes tecnologías de pavimento. Se espera que las losas de granito, por su durabilidad y su capacidad de mejorar los ámbitos públicos, generen un menor grado de impactos ambientales.
- A5: Modificación de la escala de espacios urbanos al incrementar las áreas verdes en un 10%. Esta reforma se planteó con el objetivo de determinar que tantos son los beneficios ambientales de llevar al límite la recuperación de áreas asignadas a los vehículos en favor de las personas.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de los impactos ambientales

Haciendo uso del programa SimaPro y siguiendo la metodología IPCC 2013 y ReCiPe Midpoint (H), se procedió a calcular los impactos ambientales de los escenarios de estudios para cada una de las etapas de sus ciclos de vida. El análisis y discusión de dichos resultados se realizó tomando en consideración una perspectiva individual para cada proceso involucrado, así como una general para los sistemas completos.

4.1.1. Etapa de demolición

Al comparar los resultados obtenidos para cada emplazamiento (véase Tabla 4.1), se puede identificar a la avenida Rivera Navarrete y a la calle Las Begonias como las vías con los mayores impactos ambientales. Asimismo, se puede verificar que existe un patrón en los resultados, el cual indica que las emisiones de la calle Los Libertadores representa apenas una fracción del valor de los otros dos escenarios (cerca de la 40%). Ello puede atribuirse a su diseño, la cual exige menores esfuerzos en todos sus procesos por el hecho de representar un área de intervención más pequeña.

Tabla 4.1. Impactos ambientales en la etapa de demolición. Fuente: Elaboración propia

Categoría de impacto	Unidad	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Cambio climático	kg CO ₂ eq	159.83	384.62	332.54
Formación de material particulado	kg PM _{2.5} eq	0.39	0.89	0.75
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	1.07	2.44	2.01
Depleción de recursos minerales	kg Cu eq	0.27	0.66	0.58
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	249.28	545.03	432.08

Por otra parte, las categorías de impacto con los índices más críticos son las correspondientes al cambio climático y agotamiento de recursos fósiles. Esto puede atribuirse en igual proporción al movimiento de tierras y al transporte de escombros ya que durante ambas actividades se generan cantidades similares de GEI. Todo ello producto de la quema de combustibles fósiles, tanto de las maquinarias como de los vehículos de transporte. En la Figura 4.1, se puede observar la distribución porcentual de los impactos generados en cada escenario por los procesos evaluados para la categoría de cambio climático.

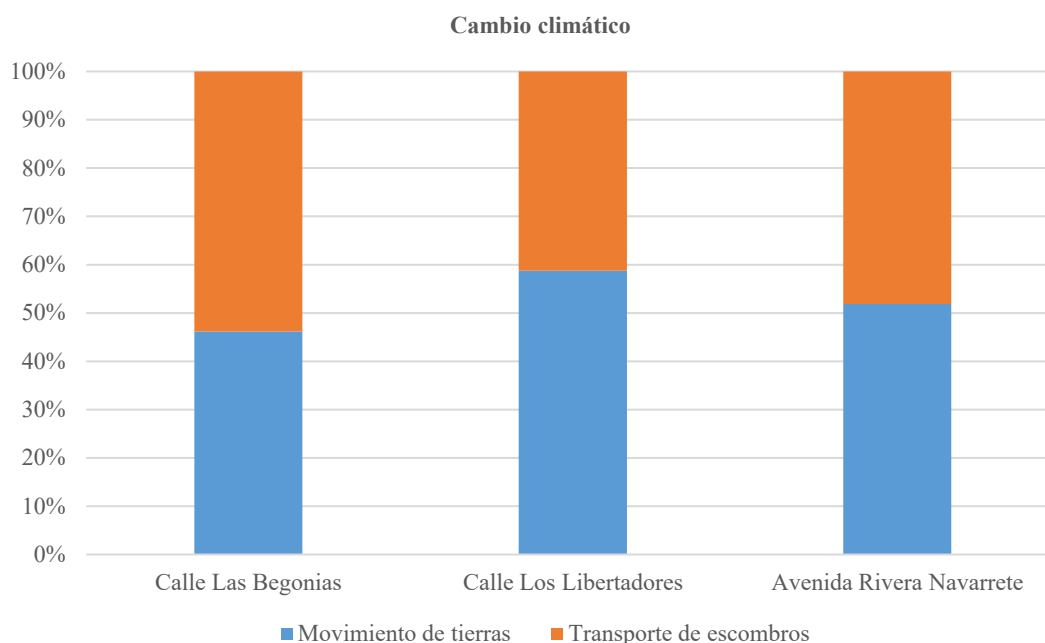


Figura 4.1. Impactos generados por las actividades de demolición. Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Etapa de construcción

Al analizar los resultados obtenidos para esta etapa, se puede observar al cambio climático y agotamiento de recursos fósiles como las categorías de impacto con las tasas de contaminación más elevadas. En cuanto a la evaluación de escenarios, se puede identificar a la avenida Rivera Navarrete como la vía con los mayores impactos en todos los rubros evaluados. En comparación con esta, las calles Los Libertadores y Las Begonias generan emisiones que representan apenas un 50 y 60% en promedio, respectivamente.

Tabla 4.2. Impactos ambientales en la etapa de construcción. Fuente: Elaboración propia

Categoría de impacto	Unidad	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Cambio climático	kg CO ₂ eq	7607	15 869	9525
Formación de material particulado	kg PM _{2.5} eq	9.49	25.39	14.95
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	23.12	61.75	36.29
Depleción de recursos minerales	kg Cu eq	38.81	54.79	44.02
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	2717	7188	4344

Para todos los casos, los mayores impactos se pueden atribuir a las actividades vinculadas a la pavimentación de superficies, como son la instalación de adoquines de concretos prefabricados, colocación de la mezcla asfáltica y la construcción de sardineles, veredas y rampas de concreto (véase Figura 4.2). En general, la contribución de emisiones de este conjunto de partidas se aproximó al 80%, mientras que el resto de actividades tuvieron un aporte individual del 5%. Dicha tendencia se replicó en

todas las categorías con excepción de los casos de formación de material particulado y acidificación terrestre, donde la pavimentación de superficies redujo su valoración a un 74%, mientras las actividades de transporte de materiales y compactación y nivelación del terreno la aumentaron a un 8% cada una.

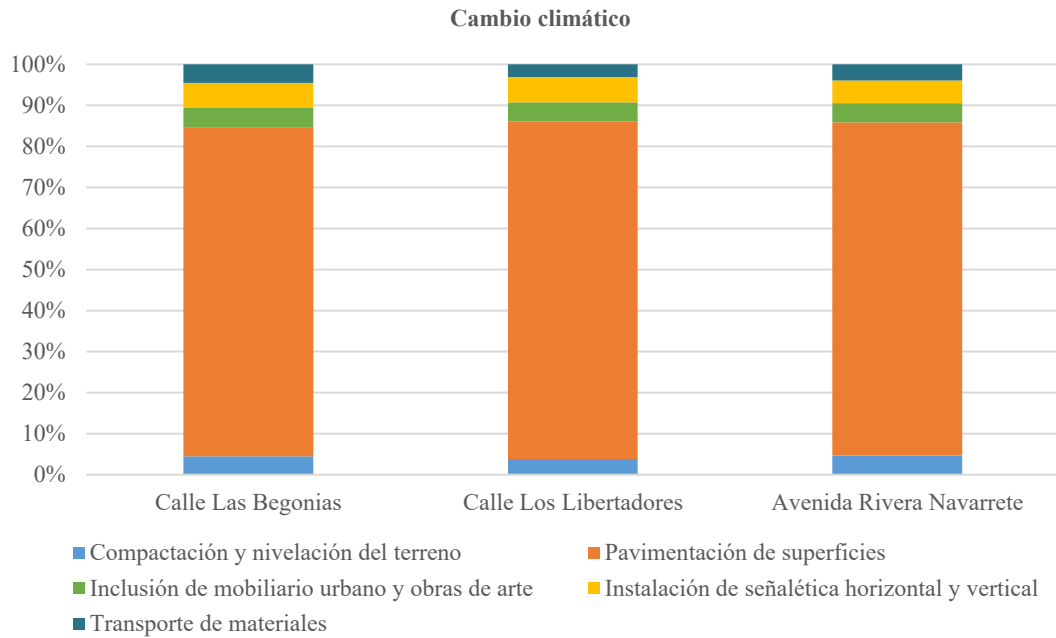


Figura 4.2. Impactos generados por las actividades de construcción. Fuente: Elaboración propia

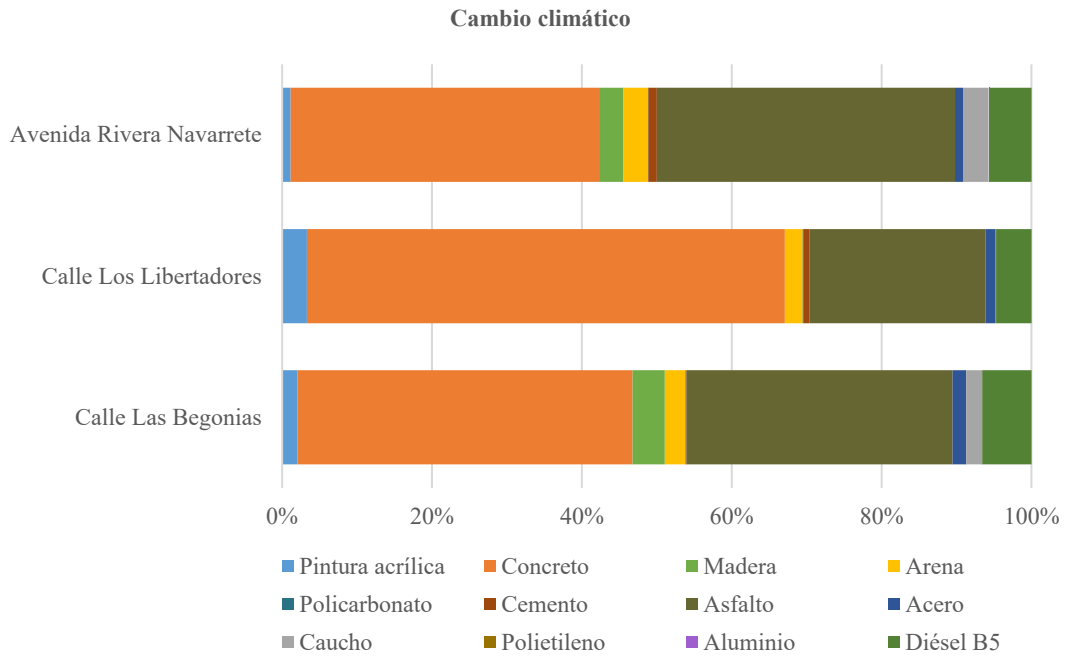


Figura 4.3. Impactos generados por los materiales de construcción. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, si inspeccionamos los resultados con mayor profundidad, podemos identificar al asfalto y concreto como los materiales que generaron las mayores emisiones de contaminantes con una contribución aproximada del 35 y 45%, respectivamente (véase Figura 4.3). Esta valoración guarda sentido con la realidad ya que son estos elementos los que constituyen en su mayoría la partida de pavimentación de superficies. También, se observa que el diésel B5 tiene un aporte considerable al balance de emisiones, ello a consecuencia de ser utilizado como insumo principal para el funcionamiento de las maquinarias, las cuales a su vez se utilizaron a lo largo de toda la fase de construcción.

4.1.3. Etapa de operación y mantenimiento

Los impactos ambientales derivados de la fase de operación están fuertemente vinculados al tráfico vehicular en la zona. Se observó que la magnitud de los resultados varía de manera proporcional a la cantidad de vehículos que circulan en promedio por cada emplazamiento, alcanzando valores alrededor del 80-90%. Así pues, al existir una gran flota de vehículos, los valores de emisiones se disparan debido a que se presenta un gran consumo de combustibles fósiles y, por ende, una mayor generación de GEI.

Con respecto al consumo eléctrico, se puede decir que es responsable en una menor medida de la emisión de contaminantes, donde la contribución más crítica a la categoría de cambio climático es de un 20% en el caso de la calle Los Libertadores. Esto se debe a que la matriz energética peruana usada en el estudio esta poco influenciada de procesos que derivan en la quema de combustibles fósiles.

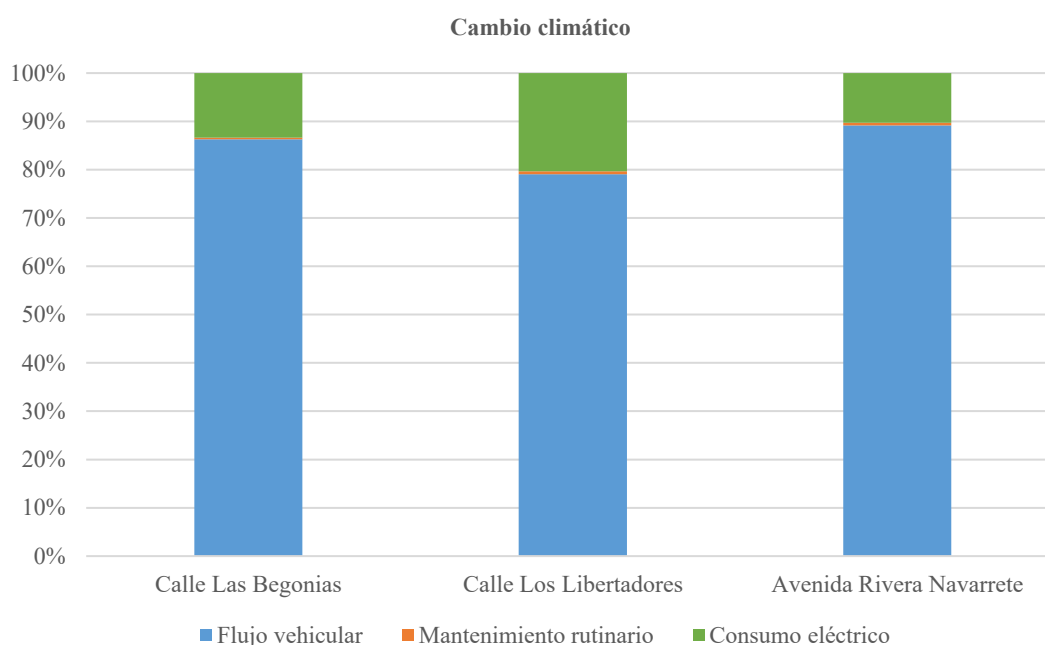


Figura 4.4. Impactos generados por las actividades de operación y mantenimiento. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, al relacionar la cantidad de vehículos según su tipología con los resultados obtenidos para esta etapa, se puede encontrar a las unidades livianas como las más contaminantes, seguido por los vehículos de servicio público y los de carga pesada. Así pues, mientras que los primeros alcanzan un aporte superior al 90%, el de los otros apenas consigue llegar a 5 y 2%, respectivamente. En efecto se puede verificar que la brecha de emisiones entre los diferentes tipos de vehículos es considerable.

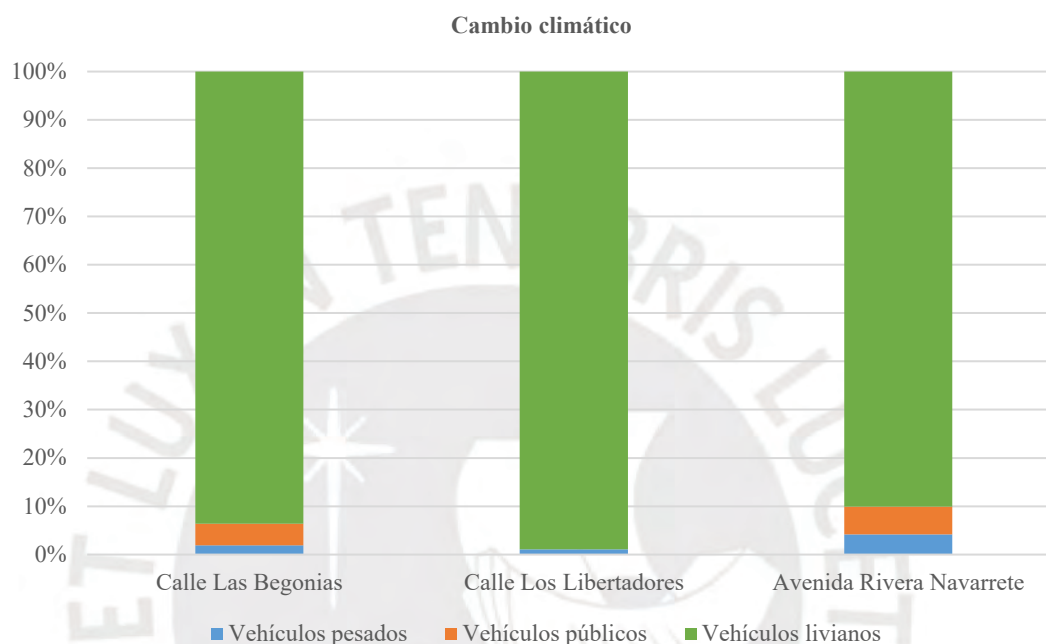


Figura 4.5. Impactos generados por los vehículos según su tipología. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la etapa de mantenimiento, los impactos no logran ser tan notables debido a la magnitud y escala de los procesos involucrados (en ningún caso superan el 1%). De los resultados obtenidos, se puede apreciar que los impactos ambientales afines a estas actividades coinciden con las tendencias vistas en la etapa de construcción, siendo nuevamente el caso de reparación de elementos de concreto el trabajo que más contaminantes emite a la atmósfera con una contribución de hasta el 61%. La razón de este hecho es la menor vida útil que tienen las obras de arte hechas de este material en comparación con los otros elementos puestos en mantenimiento rutinario.

Tabla 4.3. Impactos ambientales en la etapa de operación y mantenimiento. Fuente: Elaboración propia

Categoría de impacto	Unidad	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Cambio climático	kg CO ₂ eq	8537	20 655	18 421
Formación de material particulado	kg PM _{2.5} eq	18.88	40.93	38.03
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	21.01	47.98	58.04
Depleción de recursos minerales	kg Cu eq	41.14	86.76	105.56
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	3309	6520	8288

Por último, se puede identificar a la avenida Rivera Navarrete y a la calle Las Begonias como los escenarios con mayores impactos ambientales en el balance general (véase Tabla 4.3.). Esto hecho puede atribuirse a las características físicas y funcionales de estas autopistas, las cuales, permitieron una mayor circulación de vehículos por área superficial. No obstante, hay que mencionar que el segundo emplazamiento incluyó en el cálculo de sus impactos al secuestro de carbono realizado por las áreas verdes, mientras que el primer escenario no lo hizo al no contar con estos espacios. Si se conoce que, en total se secuestró un aproximado de 7.5 toneladas de CO₂ eq para la calle Las Begonias, lo que supone un ahorro de casi el 30% de GEI, no cabe duda entonces de que este escenario generó las emisiones más altas en términos de cambio climático.

4.1.4. Sistema completo

De acuerdo a los resultados obtenidos, la avenida Rivera Navarrete se constituye como el viario con los impactos más altos en todas las categorías, exceptuando el caso de depleción de recursos minerales. Esta tendencia es consecuencia de las características del proyecto realizado ahí, las cuales demandaron la realización de actividades constructivas con una mayor escala, tanto de tiempo como de espacio. Por este mismo motivo, mientras que en este emplazamiento se alcanzaron los índices más altos, en las calles Los Libertadores y Las Begonias apenas se presentaron impactos en una proporción cercana al 45 y 80% respecto a los valores máximos (véase Figura 4.6).

Tabla 4.4. Impactos ambientales en el sistema completo. Fuente: Elaboración propia

Categoría de impacto	Unidad	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Cambio climático	kg CO ₂ eq	16 304	36 909	28 279
Formación de material particulado	kg PM _{2.5} eq	28.75	67.21	53.73
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	45.19	112.16	96.35
Depleción de recursos minerales	kg Cu eq	80.22	142.22	150.15
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	6276	14 253	13 064

En términos de magnitud, la categoría de cambio climático es la que tiene los valores más altos en todos los casos, alcanzando en el escenario más crítico hasta 37 toneladas de CO₂ eq debido a la combustión producida por el flujo vehicular. Por otro lado, los trabajos constructivos y el uso de equipos mecánicos originaron consecuencias en términos de acidificación terrestre, aunque en proporciones mucho menores, con un valor promedio de 85 kg de SO₂ eq. Asimismo, en lo que se refiere a la formación de material particulado, se encontraron las emisiones con las escalas más pequeñas de entre todas las categorías (entre 28 y 67 kg de PM_{2.5} al año). Estos últimos resultados aliviaron de cierto modo los demás efectos negativos que estos proyectos provocan ya que, al tratarse de medidas relativamente bajas, no representaron un riesgo adicional para la salud humana o el entorno natural.

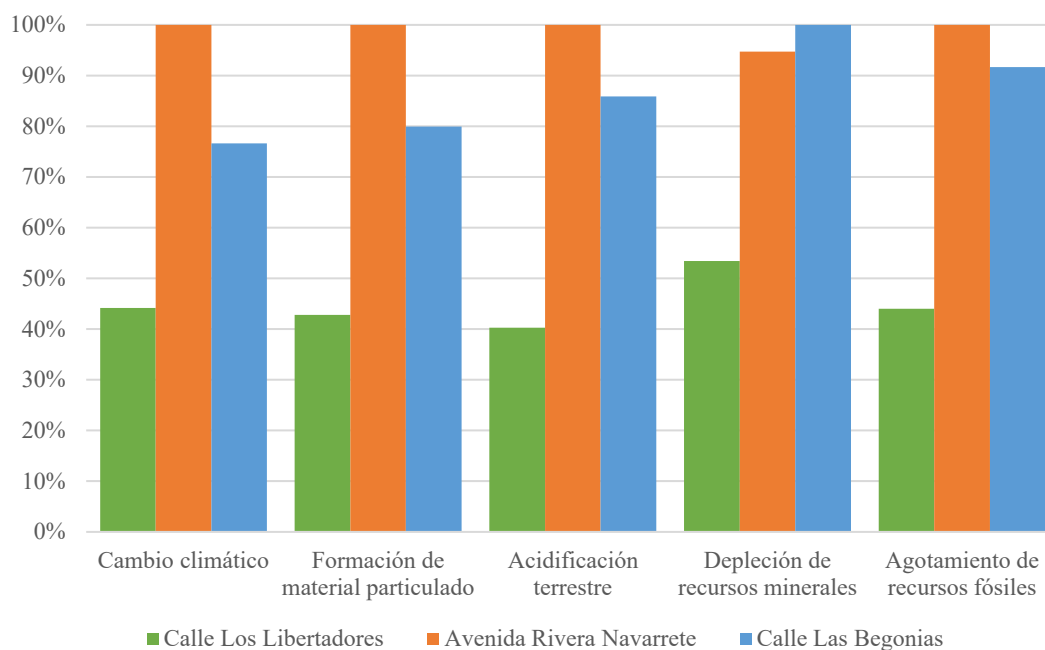


Figura 4.6. Comparación porcentual de los impactos generados en cada escenario. Fuente: Elaboración propia

En general, la participación de los impactos por fase es casi la misma en todos los escenarios salvo ligeras variaciones para el caso de la calle Las Begonias, donde la etapa de operación y mantenimiento tomó un mayor protagonismo (véanse Figuras 4.7-4.9). Esto indica que la generación de impactos para esta clase de proyectos se ve más influenciada por la densidad o concentración de tráfico en la vía que por los procesos de construcción o demolición llevados a cabo.

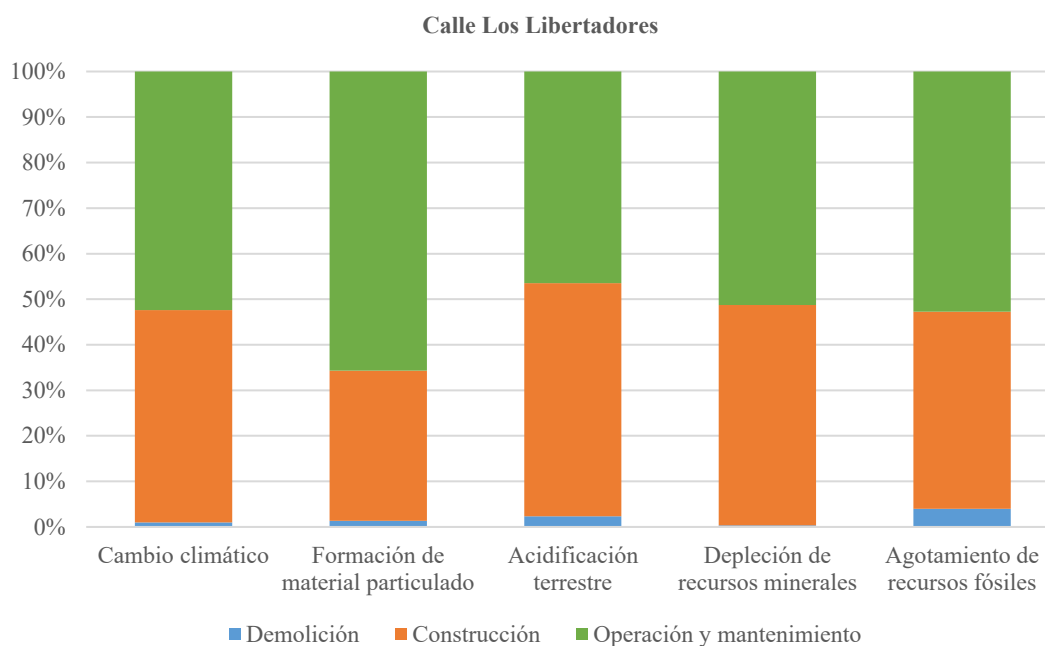


Figura 4.7. Impactos generados por fase en la calle Los Libertadores. Fuente: Elaboración propia

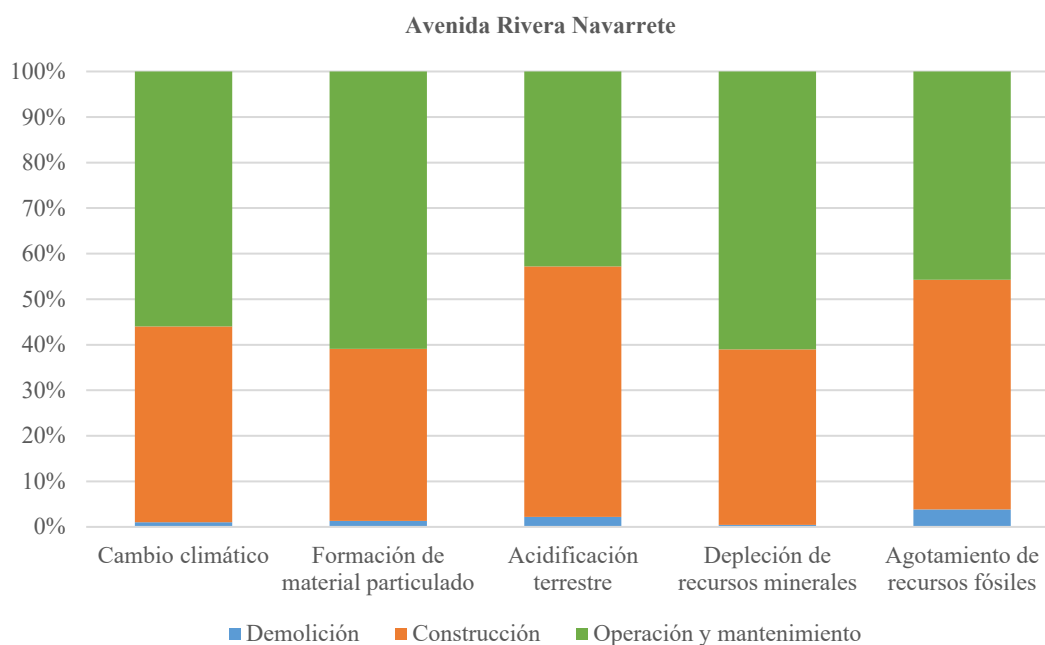


Figura 4.8. Impactos generados por fase en la avenida Rivera Navarrete. Fuente: Elaboración propia

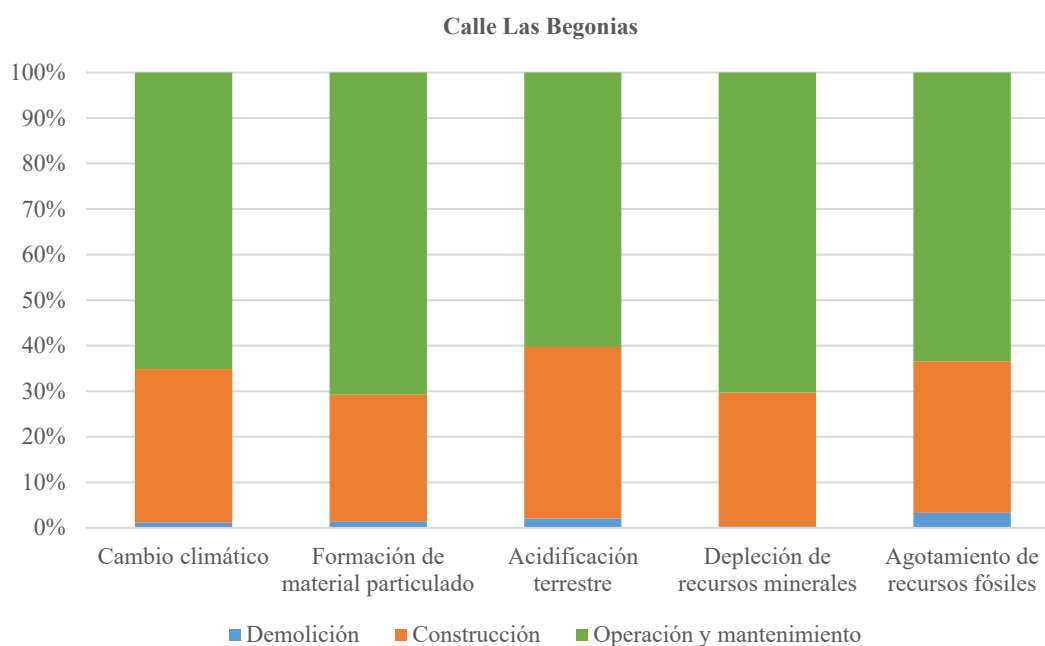


Figura 4.9. Impactos generados por fase en la calle Las Begonias. Fuente: Elaboración propia

Del análisis realizado a la categoría de cambio climático (véase Figura 4.10), se logró determinar que la actividad que más influyó en la generación de emisiones de GEI fue la correspondiente al flujo vehicular con un aporte equivalente al 53%. A esta le siguieron las partidas de pavimentación de calzadas (obras en la carpeta asfáltica y elementos de concreto) y consumo eléctrico con una contribución de 30 y 9%, respectivamente. El movimiento de tierras, transporte de escombros y materiales, y mantenimiento

rutinario terminaron siendo los procesos con la menor cuota de impactos en el sistema con una valoración individual que no superó el 1%. Mientras tanto, el secuestro de carbono significó un ahorro ambiental de 10% para la calle Los Libertadores y 20% para la calle Las Begonias, tal como se observa en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Emisiones de GEI por actividad para cada escenario. Fuente: Elaboración propia

Actividad	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Movimiento de tierras	93.91	199.51	153.61
Transporte de escombros	65.92	185.11	178.92
Compactación y nivelación del terreno	236.86	742.55	425.84
Pavimentación de superficies	6256	12 886	7641
Inclusión de mobiliario urbano y obras de arte	355.05	740.35	447.86
Instalación de señalización horizontal y vertical	472.10	876.35	576.64
Transporte de materiales	232.98	623.30	0.05
Flujo vehicular	8133	18 414	22 538
Mantenimiento rutinario	61.99	117.80	87.01
Consumo eléctrico	2091	2123	3488
Secuestro de carbono	-1694	0	-7257
Total	16 304	36 909	28 279

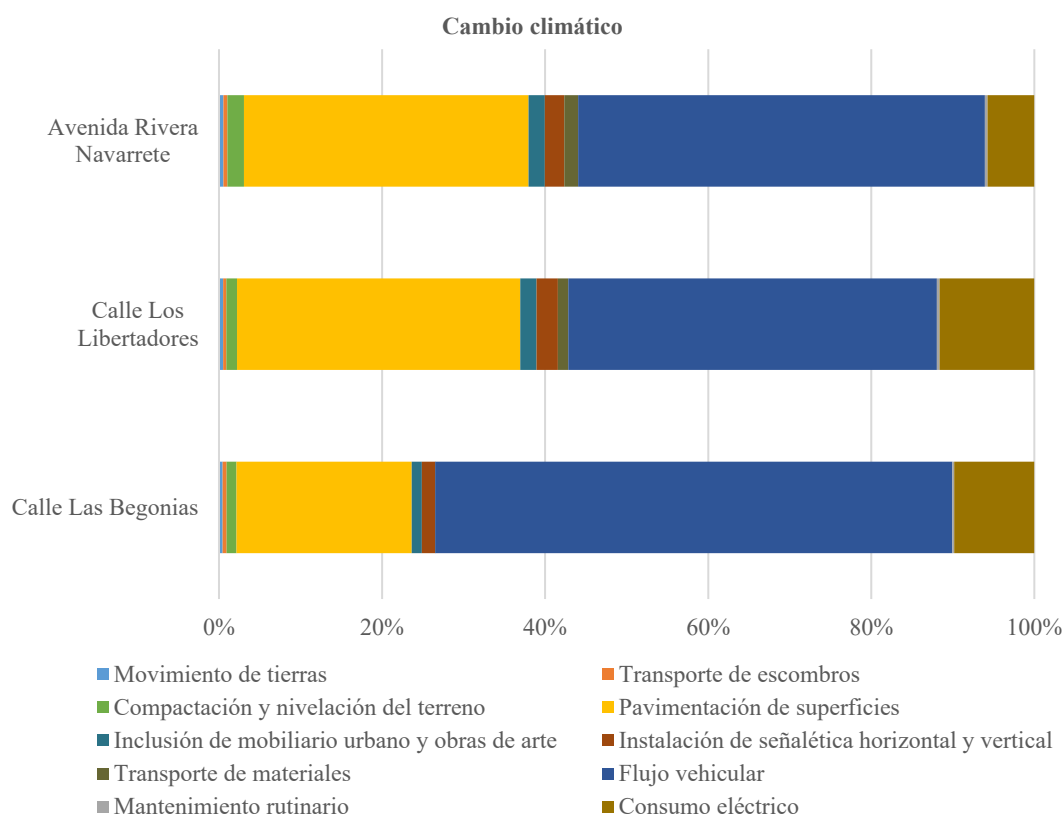


Figura 4.10. Impactos generados por todas las actividades. Fuente: Elaboración propia

4.2. Discusión de resultados

Como se mencionó anteriormente, en la literatura se ha encontrado múltiples antecedentes de estudios de ACV en infraestructuras viales urbanas. No obstante, a pesar de que se identificaron características similares entre ellos, las diferencias en las condiciones físicas de cada caso terminaban por complicar la comparación de los resultados. Las principales discrepancias identificadas se presentaron, por un lado, entre los parámetros considerados para caracterizar cada unidad funcional (UF) y, por otro, en los enfoques y alcances adoptados por los investigadores para cada proyecto. Así, por ejemplo, algunas estimaciones encontradas excluyeron el efecto del movimiento de vehículos, mientras otras no abordaron los procesos de iluminación y secuestro de carbono dentro de sus sistemas.

A pesar de estas limitaciones, fue posible realizar un análisis comparativo en lo que respecta al cambio climático. Para ello, primero se tuvo que normalizar los valores de las emisiones a otras unidades de modo que existiese una uniformidad entre los resultados obtenidos en esta investigación con aquellos encontrados en la literatura. Como se evidencia en la Tabla 4.6, los valores que aportan en principio la avenida Rivera Navarrete y las calles Los Libertadores y Las Begonias son 36.91, 16.50 y 28.28 toneladas de CO₂ eq al año, respectivamente. Si a dichos resultados se le excluye el efecto asociado al flujo vehicular y se los adecua en función de un segmento de 1 m en lugar de uno de 250, las nuevas medidas pasan a ser 73.98, 39.75 y 53.73 kg de CO₂ eq por metro al año.

Tabla 4.6. Emisiones de GEI para cada escenario en diferentes medidas. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Unidad	Calle Los Libertadores	Avenida Rivera Navarrete	Calle Las Begonias
Demolición	kg CO ₂ eq/año	159.83	384.62	332.54
Construcción	kg CO ₂ eq/año	7607	15 869	9525
Operación y mantenimiento	kg CO ₂ eq/año	8537	20 655	18 421
Total	kg CO ₂ eq/año	16 304	36 909	28 279
Operación y mantenimiento (excluyendo flujo vehicular)	kg CO ₂ eq/año	2171	2241	3575
Total (excluyendo flujo vehicular)	kg CO ₂ eq/año	9 937	18 495	13 432
Total (excluyendo flujo vehicular)	kg CO ₂ eq/m/año	39.75	73.98	53.73

Para contrastar los impactos, se tomaron en cuenta modelos de autopistas construidas en Holanda (Keijzer et al., 2015), Emiratos Árabes Unidos (Alzard et al., 2019), China (Mao et al., 2017) y Luxemburgo (Hill et al., 2012), ya que cuentan con resultados escalados a la unidad considerada en líneas anteriores. Según informan estos autores, las emisiones de GEI para vías urbanas asfaltadas dentro de una red secundaria

(considerando las obras viales y excluyendo los impactos de los vehículos en la fase de operación) deberían estar en el rango de 55 y 85 kg de CO₂ eq por metro al año (véase Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Comparación de las emisiones calculadas con aquellas reportadas en la literatura. Fuente: Elaboración propia

Escenario	Etapas	Emisiones de CO ₂ eq (kg/m/y)	Porcentaje
Alzard y colegas (2019)	Construcción	13.52	15.78%
	Operación	72.18	84.22%
Mao y colegas (2017)	Construcción	57.63	75.72%
	Mantenimiento	18.48	24.28%
Keijzer y colegas (2015)	Construcción	60.67	94.62%
	Mantenimiento	3.45	5.38%
Hill y colegas (2012)	Construcción	53.17	96.82%
	Mantenimiento	1.75	3.18%
Calle Los Libertadores	Demolición	0.64	1.61%
	Construcción	30.43	76.55%
	Operación y mantenimiento (excluyendo flujo vehicular y secuestro de carbono)	8.68	21.85%
Avenida Rivera Navarrete	Demolición	1.54	2.08%
	Construcción	63.48	85.80%
	Operación y mantenimiento (excluyendo flujo vehicular y secuestro de carbono)	8.96	12.12%
Calle Las Begonias	Demolición	1.33	2.48%
	Construcción	38.10	70.91%
	Operación y mantenimiento (excluyendo flujo vehicular y secuestro de carbono)	14.30	26.61%

En general, los valores obtenidos en este estudio están en orden con los registrados en la literatura, salvo el caso correspondiente a la calle Los Libertadores, cuyos resultados son un poco menores que los del resto de escenarios (véase Figura 4.11). La razón de esta disparidad es que esta vía, dadas sus características físicas y geográficas, puede ajustarse más al perfil de una autopista perteneciente a una red terciaria o vecinal. A diferencia de los otros casos, estas circunstancias generan para este emplazamiento un alivio de las cargas ambientales producidas por las actividades que forman parte del proyecto de reordenamiento vial planteado.

En cuanto a los escenarios descritos en la literatura, es oportuno mencionar que hay un sesgo respecto a la información adquirida y es que la mitad de todos los estudios examinados no especificaron la base de datos utilizada para la evaluación de impactos. A ello hay que sumarle, los efectos que tuvieron la ubicación de

los proyectos y la tipología de las estructuras modificadas en los resultados calculados. Por un lado, las condiciones de cada escenario se vieron afectadas por su localización ya sea por las regulaciones políticas a las que estuvieron sujetas o por las necesidades de construcción y mantenimiento que dependían de las características climáticas de cada zona. Por otra parte, el tipo de intervenciones ejecutadas por un caso y otro también influenciaron en la variación de las emisiones generadas, así para las obras de mayor envergadura se registraron mayores impactos a consecuencia de que requerían un inventario más complejo. Por ejemplo, en el proyecto llevado a cabo en Abu Dhabi (Emiratos Árabes Unidos) se evidenció una situación particular y es que, a diferencia de los otros escenarios, la fase crítica registrada fue la de operación, aun cuando se excluyeron los efectos del flujo vehicular. El motivo de este hecho fue que para el funcionamiento de esta vía era necesario la iluminación continua de un túnel que formaba parte de uno de sus tramos, lo que conllevó a un consumo energético drástico que se tradujo en mayores emisiones de GEI.

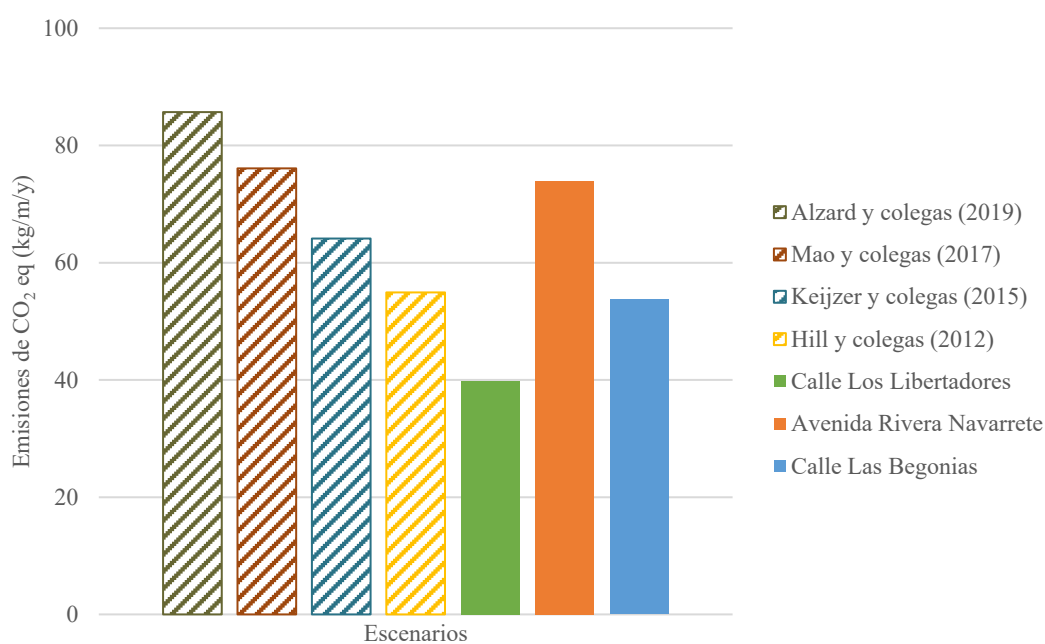


Figura 4.11. Comparación de las emisiones calculadas con aquellas reportadas en la literatura. Fuente: Elaboración propia

En general, lo que más llamó la atención de la evaluación comparativa fue que las emisiones de GEI calculadas para las etapas de construcción en los escenarios de San Isidro son, en promedio, más bajas que aquellos encontrados para contextos extranjeros. La explicación de esta diferencia es que los proyectos de intervención evaluados, al pretender recuperar espacios públicos y humanizar las calles, realizaron trabajos que implicaron menores consumos de materia prima (asfalto y concreto) y energía (maquinaria pesada) a diferencia de los otros casos que trataban de proyectos de rehabilitación de pistas con procesos más conservadores. Con ello se podría decir que las obras de construcción que comprendan una reconfiguración integral de la calzada e implementación de nuevos componentes en beneficio de las

personas representan un menor costo ambiental en comparación con que aquellas realizadas a modo de mejoramiento parcial o con un sesgo a favor de los vehículos. Aparte, con el análisis de todo el conjunto de escenarios, también queda claro que los impactos ambientales tienden a amplificarse en vías con dimensiones más grandes. No es coincidencia que las mayores emisiones se hayan registrado para los emplazamientos con superficies más extensas, aun cuando en la mayoría de veces las escalas de los trabajos eran prácticamente similares.

Tabla 4.8. Resultados obtenidos por el análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia

Categorías de impacto	Unidad	A1	A2	A3	A4	A5
Cambio climático	kg CO ₂ eq	81 192	78 397	79 242	94 870	79 406
Formación de material particulado	kg PM _{2.5} eq	149.69	146.81	150.43	170.35	146.94
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	253.71	245.12	251.95	304.32	246.54
Depleción de recursos minerales	kg Cu eq	372.59	371.74	376.30	975.82	246.54
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	33 593	32 657	32 827	32 074	32 972

A1: Modelo inicial, A2: Modificación del mercado automotriz peruano a los últimos estándares europeos, A3: Modificación de la cantidad de vehículos livianos circulantes al incorporar el tránsito de vehículos eléctricos en un 10%, A4: Modificación de las capas asfálticas por superficies hechas a base de adoquines de granito y A5: Modificación de la escala de espacios urbanos al incrementar las áreas verdes en un 10%

Adicionalmente, a partir de algunas suposiciones metodológicas, se pudo determinar cuáles eran los parámetros más sensibles y su influencia dentro del balance general de impactos (véase Tabla 4.8). De entre todos los escenarios hipotéticos, el que mayor ahorro ambiental supuso en términos de cambio climático es el A2 con un 3.44% a través de la modificación del mercado automotriz peruano a los últimos estándares europeos (EURO V y EURO VI). A este le sigue el modelo A3 con un 2.40% de reducción de emisiones al sustituir un porcentaje de los vehículos livianos por eléctricos. Por último, el escenario A5, que abordó una alteración de la escala urbana para otorgar mayores áreas verdes a las vías, significó una economización ambiental de 2.19%.

Este último hecho resulta llamativo pues se esperaba que la inclusión de mayores especies arbóreas potenciaría el secuestro de carbono a fin de reducir las emisiones de GEI de manera considerable. Todo ello puede traducirse en que, para obtener un mejor rendimiento ambiental del tránsito urbano, los proyectos a realizarse deben abordar en su enfoque tanto el diseño de espacios públicos como la gestión del transporte urbano y la tecnología de la flota vehicular. Solo con la convergencia de estos parámetros se podría alcanzar la mayor mitigación de impactos y, por ende, los resultados más eficientes.

En cuanto a la acidificación terrestre y la formación de material particulado, los resultados demostraron seguir una tendencia a favor de los modelos A2, A5 y A3, en ese orden. Así pues, al mejorar la tecnología de los vehículos circulantes, se produjo un descenso en las emisiones y es que la interacción que antes

existía entre las calzadas y los automóviles menos eficientes, y que terminaba por generar contaminantes fisicoquímicos (polvo, hollín de diésel, entre otros), se vio mitigada en cierto grado.

Finalmente, el único modelo que ocasionó mayores impactos en todas las categorías respecto al original fue el A4, mismo que comprendía el reemplazo de las capas asfálticas superficiales por adoquines de concreto. La adopción de este nuevo material representó un aumento promedio del 15% de emisiones, salvo en el rubro de agotamiento de recursos minerales, donde el incremento se disparó con una escala incluso superior al doble (372.59 frente a 9765.82 kg de Cu eq, respectivamente). Esto guarda sentido con la realidad dada la naturaleza de la materia prima con la que se construyen este tipo de adoquines (granito en la mayoría de casos). Lo que si se resalta es que, incluso con un tiempo de vida y resistencia mayores al del asfalto, estos bloques de granito inducen tasas superiores de emisiones en el sistema vial producto de la complejidad de trabajos requeridos para su instalación. En vista de estos resultados, lo que se debe buscar para alcanzar el equilibrio ambiental de este tipo de proyectos es la combinación de los materiales que permitan una mitigación de impactos, así como un embellecimiento y durabilidad de los espacios públicos.

4.3. Prueba de hipótesis

Todas las estimaciones realizadas permitieron identificar al proyecto de la calle Los Libertadores como el escenario de estudio con la menor aportación de impactos al balance general. Si bien la baja escala de emisiones se puede atribuir en parte a la poca circulación de vehículos livianos y a la ausencia de unidades de transporte público, la realidad es que la calidad ambiental de este viario también se ha visto afectada por las características de los procesos constructivos ejecutados. Así pues, de acuerdo con la información obtenida, mientras que la etapa de operación influyó a la formación de impactos en un 52%, la fase de construcción lo hizo hasta en un 47%.

Este hecho resulta coherente al conocer que fue en esta vía donde se implementaron de manera más rigurosa los conceptos de diseño para una movilidad más sostenible con la consigna de tener la menor escala de intervención en términos de estructura modificada. Al requerir una menor recuperación de área para la creación de nuevos espacios públicos y, por ende, tener una mínima necesidad de uso de maquinarias pesadas, los niveles de emisiones generadas, en particular las de GEI, bajaron considerablemente en comparación con la de los otros escenarios.

A todo lo antes mencionado, hay que agregar la particularidad del caso de la calle Las Begonias, escenario donde el margen de diferencia entre las fases de construcción y operación y mantenimiento es más marcado. Ello debido a las condiciones físicas de la vía, las cuales permiten una densidad vehicular mayor que la del resto de escenarios; es decir, una cantidad mayor de unidades por superficie recorrida. Al

contrario del proyecto en la calle Los Libertadores, en este viario no hubo un cambio tan radical en el uso del suelo en perjuicio de los automóviles.

Si en un principio se dijo que aquel proyecto con la menor incidencia de tráfico vehicular en todo su ciclo de vida representaría el escenario de trabajo más óptimo y amigable con el medio ambiente, ahora, en base a lo analizado y discutido en las líneas anteriores, queda claro que este manifiesto termina por ser cierto pues los resultados demuestran que el transporte tiene un papel principal en la generación de impactos para este tipo de proyectos. No obstante, hay que destacar que la fase de construcción contiene procesos que pueden contribuir a alcanzar o, incluso, superar a las actividades de la fase de operación y mantenimiento en la formación de emisiones si es que se llegan a dar las condiciones necesarias para que estas alcancen un estado límite.

4.4. Utilidad de la aplicación del ACV en la infraestructura vial urbana

4.4.1. Alternativas de control y mitigación de impactos

En el Perú, urge la implementación de alternativas de acción en materia de movilidad urbana que permitan reducir los impactos ambientales negativos en los próximos años. Ello con el objetivo de avanzar rumbo al desarrollo sostenible y cumplir con los acuerdos internacionales suscritos. No obstante, antes de poder establecer estos mecanismos, es necesario identificar las fases críticas en la cadena de procesos de los proyectos vinculados al reordenamiento vial. En otras palabras, distinguir cómo y en qué medida cada una de estas etapas aporta al balance general de emisiones para todas las categorías de impacto. Tras analizar los resultados obtenidos en este estudio, se logró identificar a las fases de construcción y operación y mantenimiento como las principales fuentes de contaminantes, especialmente en los aspectos relacionados al cambio climático.

En tal sentido, las alternativas de control y mitigación deben orientarse a reducir las emisiones de GEI en estas etapas y buscar la eficiencia ambiental y social. Por consiguiente, algunas medidas a instaurar para hacerle frente a los impactos adversos del cambio climático en el sector transporte, serían la renovación del parque automotor, el reciclaje de materiales, la sustitución tecnológica de maquinarias y equipos con altas tasas de consumo de combustible fósiles, y la promoción de desplazamientos intermodales.

Dado que en Lima algunas de estas estrategias ya se encuentran planificadas y/o implementadas (MML, 2014), los esfuerzos ahora deben centrarse en impulsar estas iniciativas para que sean más efectivas. Así, por ejemplo, se puede fortalecer las iniciativas orientadas a la reutilización o transformación de pavimentos asfálticos para nuevas obras públicas. Además, se puede mejorar el programa de chatarreo, que busca remover el excedente de unidades vehiculares con más de 20 años de antigüedad, a través de alianzas público-privadas. Con ello se podría dotar al sistema público de condiciones adecuadas para facilitar la

incorporación de sistemas masivos de transporte con tecnología más eficiente. Además, acorde a lo expuesto por Cárdenas y colegas (2017), la incorporación de un alto índice de vehículos eléctricos en Lima sería beneficioso para un transporte público en el que se haya reducido el uso de automóviles de pasajeros. Queda claro entonces que un aumento en el uso del transporte público con estas características tendría un mayor impacto en la mitigación de emisiones de GEI.

Por medio de estas coaliciones, también se podría fomentar el transporte no motorizado al dotar a la ciudad con espacios adecuados (corredores segregados o rutas exclusivas) para el uso de medios de movilidad alternativos, como la bicicleta. De este modo, los usuarios se sentirían invitados y motivados cada vez más a realizar sus viajes con esta clase de vehículos, cuya principal ventaja es que no generan combustión y, por ende, impactos ambientales durante su operación.

Asimismo, otra medida de optimización que permitiría reducir la congestión del tráfico es la mejora en la gestión de los dispositivos de control de movilidad. En ese contexto, la implementación de iniciativas como la ola verde, la cual busca garantizar un flujo continuo de vehículos al establecer una sucesión progresiva de luces verdes en la matriz semafórica de una vía, aparece como una medida necesaria para resolver el deficiente estado de circulación ya que a través de ella resulta factible reducir las demoras y las longitudes de colas generadas en las intersecciones (Pérez-Prada et al., 2017). Con esta práctica se buscaría impulsar la eficiencia del sistema de transporte urbano al facilitar una mejor ocupación de las vías y reducir el consumo de combustibles fósiles.

Finalmente, es necesario mejorar los mecanismos de inspección a fin de verificar que los servicios de transporte se mantengan eficientes a lo largo del tiempo. Para ello, se debería incluir herramientas dedicadas a monitorear la idoneidad ambiental de adoptar tecnologías bajas en carbono dentro del campo de la movilidad urbana. En virtud de lo expuesto, es evidente que el ACV sería una elección adecuada para realizar este tipo de registros en entornos locales.

4.4.2. Estrategias de mejora para la optimización de políticas públicas

Es importante resaltar la posibilidad de incluir el análisis de ciclo de vida dentro del planeamiento y diseño de políticas en ingeniería de transporte, dado su potencial para dimensionar y caracterizar diversos impactos ambientales. Así, en el contexto peruano, se recomendaría institucionalizar esta metodología a fin de tener una perspectiva más certera de las fases del ciclo de vida de los proyectos viales y las dinámicas funcionales que se ven involucradas. Con ello, además de generar una base de datos y procesos más exacta, se podría brindar también un valor certificable a los servicios de transporte finales.

Otra opción de acción puede ser la integración del enfoque de ciclo de vida dentro de un sistema de gestión ambiental ya normalizado, como el EIA. La evidencia recolectada en esta investigación, al igual que la de

otros estudios previos (Larrey-Lassalle et al., 2017; Madhu, 2019), ha demostrado el potencial que tiene la combinación de metodologías para producir beneficios a los titulares de los proyectos. Particularmente, tal como indica Laurance (2014), la aplicación de esta mezcla de enfoques a las propuestas de reordenamiento vial permitiría mejorar los procesos de análisis, reducir las incertidumbres de las evaluaciones, aumentar la resiliencia de los sistemas de transporte en la ciudad e incrementar los niveles de sostenibilidad urbana.

Por otro lado, ya que no podemos evitar del todo que ocurran los impactos ambientales, se deben llevar cabo esfuerzos tanto de mitigación como de adaptación en todos los procesos en los que esto sea posible. En lo correspondiente al transporte urbano, se debe establecer políticas que permitan una adecuación climática a través de procesos sociales e intervenciones para reducir sus deficiencias y/o aprovechar las oportunidades potenciales (Preston et al., 2011).

Este tipo de estrategias no pueden plantearse a corto plazo, sino deben revisarse para tener una duración que este acorde al ciclo de vida de las infraestructuras viales. Además, según indican Colin y colegas (2016), estas políticas deben poder cubrir las vulnerabilidades físicas y funcionales de estos sistemas; es decir ser capaces de evitar la degradación de la conectividad del transporte y la calidad del servicio.

Por último, cabe recordar que a medida que se implementen este tipo de estrategias, podría reducirse e incluso evitarse los impactos negativos en una determinada zona. Por ello, Metz y colegas (2007) refieren que los esfuerzos en los próximos años determinarían en gran medida las oportunidades de alcanzar niveles de estabilización ambiental deseados, por lo que retardar la aplicación de este tipo de políticas solo incrementaría el riesgo de agravamiento del cambio climático.

4.4.3. Viabilidad institucional de combinar el ACV y EIA

Si bien el análisis de ciclo de vida (ACV) como el estudio de impacto ambiental (EIA) son dos herramientas que por sí mismas traen beneficios al momento de plantear respuestas frente a los impactos negativos derivados de proyectos o actividades, resulta oportuno verificar si la integración de sus enfoques como una única metodología estandarizada es, en efecto, factible para los gobiernos. Ello debido a que este marco se encuentra limitado por el hecho de que ambos instrumentos requieren mucho tiempo e inversión para su ejecución, lo que puede llegar a obstaculizar su aplicabilidad práctica (Larrey-Lassalle et al., 2017).

Así, por ejemplo, es raro encontrar profesionales con experiencia en EIA y habilidades de modelación de ACV, justamente porque estos últimos estudios demandan la elaboración y procesamiento de inventarios más minuciosos. Producto de ello, muchas veces se opta por la contratación de proveedores especializados

en esta materia con el perjuicio de que ello podría no encajar en el presupuesto ni en la programación global.

En cuanto a los análisis ambientales de proyectos que involucran infraestructuras viales, esta limitación también es una constante. En el mercado peruano el costo de los ACV oscila entre unos pocos miles de soles para estudios simples en entornos urbanos hasta varios millones para evaluaciones de infraestructuras de mayor magnitud. En consecuencia, la realización de los ACV representa un costo adicional significativo que debería tomarse en cuenta antes de decidir incluirlo dentro de un EIA.

No obstante, este problema podría abordarse de una manera más eficiente con la creación y uso de una calculadora ambiental ya que con ese tipo de ACV simplificados, los tiempos y costos de estos estudios podrían reducirse significativamente al no requerir de programas informáticos costosos o asesorías especializadas. Para ello, podría utilizarse el marco desarrollado en esta investigación con el cual se lograron determinar, para las vías analizadas, cuales entradas contribuyen más al desempeño ambiental y cuáles pueden ser discriminadas. Pese a ello, quedaría pendiente replicar este tipo de estudios en otros proyectos con límites geográficos y temporales similares a fin de poder estandarizar los procesos más críticos y consolidarlos dentro de un sistema de fácil acceso y operatividad.

En Latinoamérica, ya se tiene casos de éxito en el desarrollo de herramientas simplificadas de este tipo, siendo la referencia principal el SIDAC. Dicho instrumento fue desarrollado por el Consejo Brasileño de Construcción Sustentable (CBCS) y consiste en un sistema informático capaz de calcular los indicadores de desempeño ambiental de productos de construcción. Con esta calculadora, han logrado democratizar las evaluaciones ambientales con enfoque de ACV en todas las organizaciones dedicadas a este rubro, conllevando a un incremento indudable en la sostenibilidad de sus proyectos.

En virtud de lo mencionado, queda en evidencia que, para casos como los evaluados en esta tesis y en el contexto peruano, el ACV también puede ser integrado al EIA. Siendo así, la formulación de una calculadora con las características necesarias para simplificar la evaluación de los proyectos de reordenamiento vial urbano queda pendiente para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación ha demostrado que la aplicación del enfoque y/o metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) es de gran utilidad para medir y comparar los impactos ambientales que los proyectos de reordenamiento vial son capaces de inducir en los entornos urbanos durante las distintas fases de su vida útil. Con ello, se es posible ampliar los conocimientos sobre la situación actual del sistema de transporte en el Perú y su relación con la gestión ambiental.

Los resultados que fueron presentados y analizados en los capítulos anteriores, demuestran que la etapa de operación y mantenimiento es la que mayor influencia ejerce sobre el medio ambiente a consecuencia del tráfico vehicular. A esta le sigue la fase de construcción, la cual se encuentra bastante influenciada por el uso de materiales y maquinaria pesada durante las actividades de pavimentación de las superficies. Por el contrario, se encontró que los procesos de demolición, iluminación y mantenimiento tienen un bajo impacto ambiental en comparación con el producido por las otras actividades. Respecto al secuestro de carbono derivado de las acciones de implementación de áreas verdes, se encontró que tiene un papel importante en el sistema pues logra recobrar una fracción considerable de las emisiones generadas, entre 10 y 20%. De acuerdo con el ensayo de sensibilidad realizado, para una reasignación del 10% de espacio en provecho de la inclusión de jardines y árboles, los valores de ahorro ambiental incrementaron entre 11 y 23%, respectivamente. Este hecho debe motivar la construcción de más espacios con estas características pues quedó demostrado su función como amortiguador de impactos, a la par que también permite mejorar la imagen urbana y democratizar las vías a favor de las personas.

Si bien las emisiones producidas en términos de cambio climático por todos los viarios son relativamente bajas en comparación con otros proyectos (entre 16 y 37 toneladas de CO₂ eq por año), aun representan un impacto ambiental importante si se toma en cuenta el contexto en el que se producen pues en presencia de gran cantidad de personas los efectos nocivos de los contaminantes emitidos se amplifican. En virtud de ello, resulta necesario aplicar las metodologías aprendidas para mejorar la calidad de próximas construcciones de autopistas a través de la implementación de mejoras en la ingeniería de tránsito y tomando en cuenta criterios de sostenibilidad.

Para mejorar la certeza de los resultados, esta investigación se respaldó de la información de cuatro casos de autopistas urbanas encontradas en la literatura. Al compararlas, se identificó que los resultados obtenidos para la categoría de cambio climático en términos de valoración estadística eran similares, con excepción del proyecto correspondiente a la calle Los Libertadores, donde si existen ciertas diferencias

marcadas entre los valores calculados para la etapa de construcción. La proximidad entre la mayoría de resultados y el hecho de que las discrepancias encontradas tengan un sustento técnico son buenos indicadores que certifican la calidad, tanto de los datos recolectados como de la evaluación realizada.

En definitiva, la movilidad es un aspecto en el que la sociedad debe comprometerse tanto cultural como políticamente, ya sea a través de cambios estructurales o de comportamiento, para lograr dar solución a los problemas inducen en los espacios urbanos. En ese contexto, es necesario volver a destacar las acciones de la Municipalidad de San Isidro que, en búsqueda de alinearse con las nuevas tendencias de sostenibilidad y ecoeficiencia, se encuentra implementando cambios en sus modos de transporte, esperando traer con ello efectos positivos en el nivel de vida de las personas y en la calidad de los entornos naturales.

Lo visto en este estudio lleva a inferir que la convergencia entre la sostenibilidad y la infraestructura de transporte es imprescindible para alcanzar un estado capaz de cubrir las necesidades de desplazamiento de los usuarios con el mínimo impacto ambiental. Entonces, dado que se espera que las obras o intervenciones viales se acrecienten en los años venideros, resultaría interesante la inclusión de la herramienta de ACV como parte integral de las políticas de Estado orientadas a mejorar la calidad de este tipo de sistemas.

Finalmente, se puede concluir que el uso de nuevos métodos que contribuyan a la mitigación de los impactos ambientales debe tomarse más en cuenta para todos los sectores económicos y productivos. Particularmente, en lo competente a la construcción dentro del ámbito de movilidad urbana, los resultados cuantitativos y comparativos presentados en este documento pueden servir de mucha utilidad ya que, si se interpretan adecuadamente, pueden constituir los primeros pasos para tomar decisiones informadas hacia prácticas más sostenibles. No obstante, esto debe hacerse de manera progresiva debido a que durante mucho tiempo este sector se ha mantenido estático en lo referente a sus mecanismos de acción haciendo que la modificación y/o implementación de nuevas tecnologías no se pueda realizarse tan fácilmente.

REFERENCIAS

- Alzard, M., Maraqa, M., Chowdhury, R., Khan, Q., Albuquerque, F., Mauga, T. y Aljunadi, K. (2019). Estimation of greenhouse gas emissions produced by road projects in Abu Dhabi, United Arab Emirates. *Sustainability*, 11 (8), 2367.
- Araújo, J., Oliveira, J. y Silva, H. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 97–110.
- Assefa, G. (2019). Life cycle insights for creating sustainable cities. *Sustainable Cities - Authenticity, Ambition and Dream*, 133.
- ATU (2019). *Análisis de patrones de movilidad urbana en Lima y Callao basados en tecnología BIG DATA*.
- AzariJafari, H., Yahia, A. y Ben Amor, M. (2016). Life cycle assessment of pavements: Reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2187-2197.
- Bakker, S., Zuidgeest, M., De Coninck, H. y Huizenga, C. (2014). Transport, development and climate change mitigation: Towards an integrated approach. *Transport Reviews*, 34 (3), 335-355.
- Barandica, J., Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Delgado, J. y Acosta, F. (2013). Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects. *Journal of Cleaner Production*, 57, 79–91.
- Bazán, J., Rieradevall, J., Gabarrell, X. y Vázquez-Rowe, I. (2018). Low-carbon electricity production through the implementation of photovoltaic panels in rooftops in urban environments: A case study for three cities in Peru. *Science of the Total Environment*, 622, 1448-1462.
- Biberos-Bendezú, K. y Vázquez-Rowe, I. (2020). Environmental impacts of introducing cable cars in the Andean landscape: A case study for Kuelap, Peru. *Science of The Total Environment*, 718.
- Birdsey, R. (1992). Carbon storage and accumulation in United States forest ecosystems. *General Technical Report W0-59*. United States Department of Agriculture Forest Service.
- Brundtland, G. (1987). Our common future - Call for action. *Environmental Conservation*, 14 (4), 291–294.
- Cárdenas, U., Kahhat, R., Vázquez-Rowe, I. y García-Torres, S. (2017). GHG emissions reductions linked to introducing electric vehicles in the city of Lima, Peru. Poster presentation. ISIE-ISSSN Conference, Chicago.
- Castillo, C. (2012). *Comercio, transporte y cambio climático*. Fundación Friedrich Ebert.

Chowdhury, R., Apul, D. y Fry, T. (2010). A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (4), 250-255.

Colin, M., Palhol, F. y Leuxe, A. (2016). Adaptation of transport infrastructures and networks to climate change. *Transportation Research Procedia*, 14, 86-95.

Congreso de la República del Perú (2018). *Ley Marco Sobre Cambio Climático*. Lima, Perú.

Cornejo, F., Janssen, M., Gaudreault, C., Samson, R. y Stuart, P. (2005). Using life cycle assessment (LCA) as a tool to enhance environmental impact assessments (EIA). *8th Conference on Process Integration Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction-PRES*, 5, 521-528

Cortés-Villafradez, R. A. (2018). ¿Qué tan competitivos son los países miembros de la Alianza del Pacífico en infraestructura de transporte?. *Revista EAN*, 85, 143-162.

Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O., Mattauch, L., McCollum, D. y Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation?. *Science*, 350 (6263), 911-912.

Dong, Y., Miraglia, S., Manzo, S., Georgiadis, S., Sørup, H. J. D. y Boriani, E. (2018). Environmental sustainable decision making – The need and obstacles for integration of LCA into decision analysis. *Environmental, Science and Policy*, 87, 33-44.

Elorrieta-Mendoza, A. (2023). *Análisis de ciclo de vida de un tramo de la carretera Tacna – Collpa en la región de Tacna (tesis de pregrado)*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

ENVIRON (2013). Appendix A: Calculation detail for CalEEMod. *California Emissions Estimator Model*. Disponible en:

<http://www.aqmd.gov/docs/default-source/calceemod/calceemod-appendixa.pdf>

EPA (1995). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*.

EPA (2002). *User's Guide to MOBILE6*. Office of Transportation and Air Quality.

EPA (2014). *Brake and tire wear emissions from on-road vehicles in MOVES2014*.

EPA (2016). *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016*.

Fernández-Sánchez, G. y Rodríguez-López, F. (2010). A methodology to identify sustainability indicators in construction project management - Application to infrastructure projects in Spain. *Ecological Indicators*, 10(6), 1193-1201.

Fundación Transitemos (2018). *Situación del transporte urbano en Lima y Callao*.

- Galatioto, F., Pary, T., Bird, R. y Bell, M. (2015). Traffic modelling in system boundary expansion of road pavement life cycle assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, 65-75.
- Garg, B., Cadle, P., Mulawa, P., Groblicki, C. y Laroo, G. (2000). Brake wear particulate matter emissions. *Environmental Science and Technology*, 34 (21), 4463-4469.
- Gasparatos, A., El-Haram, M. y Homer, M. (2008). A critical review of reductionist approaches for assessing the progress towards sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 28, 286-311.
- Giani, M., Dotelli, G., Brandini, N. y Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 224-238.
- Glasson, J., Therivel, R., Chadwick, A. (2005), *Introduction to environmental impact assessment*. London and New York: Routledge.
- Goossens, D. y Buck, B. (2009a). Dust dynamics in off-road vehicle trails: Measurements on 16 arid soil types. *Journal of Environmental Management*, 90, 3458-3469.
- Goossens, D. y Buck, B. (2009b), Dust emission by off-road driving: Experiments on 17 arid soil types. *Geomorphology*, 107, 118-138.
- Guinée, J. B. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational guide to the ISO standards*. Kluwer Academic Publishers.
- Guo, Z., Hu, D., Zhang, Z., Zhang, P. y Zhang, X. (2017). Material metabolism and lifecycle GHG emissions of urban road system (URS). *Journal of Cleaner Production*, 165, 243-253.
- Harrison, R., Jones, J., Gietl, J. y Yin, D. (2012). Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements. *Environmental Science and Technology*, 46 (12), 6523-6529.
- Harte, J. (2017). *Transporte urbano sostenible. Caso: Plan de movilidad sostenible en Lima*. Programa Internacional de Cooperación Urbana.
- Harvey, J., Butt, A., Lozano, M., Kendall, A., Saboori, A., Lea, J. y Basheer, I. (2019). Life cycle assessment for transportation infrastructure policy evaluation and procurement for state and local governments. *Sustainability*, 11 (22), 6377.
- Hasan, U., Whyte, A. y Al Jassmi, H. (2019). Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road network. *Journal of Cleaner Production*, 206, 541-558.

Herrera, J., MacAskill, K. y Haigh, S. (2020). Identifying interactions between policy, accountability and outcomes for adaptation of urban roads. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88, 102595.

Herrmann, I. y Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? A comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163-169.

Hill, N., Brannigan, C., Wynn, D., Milnes, R. y Van Essen, H. (2012). The role of GHG emissions from infrastructure construction, vehicle manufacturing, and ELVs in overall transport sector emissions. European Commission: Luxembourg.

Hoxha, E., Vignisdottir, R., Passer, A., Kreiner, H., Wu, S., Li, J. y Bohne, R. (2020). Life cycle assessment (LCA) to evaluate the environmental impacts of urban roads: a literature review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.

Huang, Y., Bird, R. y Bell, M. (2009). A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14 (3), 197–204.

Huang, Y., Bird, R. y Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17, 283-296.

IEA (2023). *Global CO₂ emissions by sector, 2019-2022*. Disponible en:

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2019-2022>

INEI (2018). *Perú: Estructura empresarial 2017*.

INEI (2019). *Encuesta nacional de hogares 2019*.

INEI (2020a). *Provincia de Lima: Compendio estadístico*.

INEI (2020b). *Anuario de estadísticas ambientales 2020*. Disponible en:

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1760/libro.pdf

INEI (2021). *Parque automotor en circulación a nivel nacional según departamento*.

IPCC (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Sixth Assessment Report.

ISO (2006a). *ISO 14040. Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework*.

ISO (2006b). *ISO 14044 Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines*.

- Jenks, M. y Jones, C. (2010). Dimensions of the sustainable city. *Future City*. Springer, Dordrecht.
- JICA (2012). *Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao*.
- Joint Research Centre (2013). *The European Commission's in-house science service: Annual report 2012*.
- Karl, T. y Trenberth, K. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302 (5651), 1719-1723.
- Keijzer, E., Leegwater, G., de Vos-Effting, S. Y De Wit, M. (2015). Carbon footprint comparison of innovative techniques in the construction and maintenance of road infrastructure in The Netherlands. *Environmental Science & Policy*, 54, 218-225.
- Kirk-Davidoff, D. (2018). The greenhouse effect, aerosols, and climate change. *Green Chemistry*, 211-234.
- Korhonen J., Honkasalo A. y Seppälä J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46.
- Larrea-Gallegos, G., Vázquez-Rowe, I., Wiener, H. y Kahhat, R. (2018). Applying the technology choice model in consequential life cycle assessment: A case study in the peruvian agricultural sector. *Journal of Industrial Ecology*, 1-14.
- Larrea-Gallegos, G., Vázquez-Rowe, I. y Gallice, G. (2017). Life cycle assessment of the construction of an unpaved road in an undisturbed tropical rainforest area in the vicinity of Manu National Park, Peru. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 (7), 1109–1124.
- Larrey-Lassalle, P., Catel, L., Roux, P., Rosenbaum, R., Lopez-Ferber, M., Junqua, G. y Loiseau, E. (2017). An innovative implementation of LCA within the EIA procedure: Lessons learned from two Wastewater Treatment Plant case studies. *Environmental Impact Assessment Review*, 63, 95-106.
- Laurance, W., Clements, G., Mueller, N., Goosem, M. y Van Der Ree, R. (2014). A global strategy for road building. *Nature*, 513 (7517), 229-232.
- Le Maitre, O., Süßner, M. y Zarak, C. (1998). Evaluation of tire wear performance. *SAE Technical Paper*.
- Lewandowska, A. (2011a). Environmental life cycle assessment (LCA) as a tool for identification and assessment of environmental aspects in environmental management systems (EMS) Part 1: Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Lewandowska, A. (2011b). Environmental life cycle assessment (LCA) as a tool for identification and assessment of environmental aspects in environmental management systems (EMS) Part 2: Case studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16 (3), 247-257.

Lewandowska, A., Kurczewski, P., Kulczycka, J., Joachimiak, K., Matuszak-Flejszman, A., Baumann, H. y Ciroth, A. (2013). LCA as an element in environmental management systems - Comparison of conditions in selected organisations in Poland, Sweden and Germany. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (2), 472-480.

Loo, F. y Aguilar, D. (2017). *Análisis de eco-eficiencia de la demolición de una edificación en Lima (tesis de pregrado)*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Lozano, A., Granados, F. y Guzmán, A. (2014). Impacts of modifications on urban road infrastructure and traffic management: A case study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 162, 368-377.

Madhu, K. y Pauliuk, S. (2019). Integrating life cycle assessment into the framework of environmental impact assessment for urban systems: Framework and case study of Masdar City, Abu Dhabi. *Environments*, 6 (9), 105.

Manuilova, A., Suebsiri, J. y Wilson, M. (2009). Should life cycle assessment be part of the environmental impact assessment? Case study: EIA of CO₂ capture and storage in Canada. *Energy Procedia*, 1 (1), 4511-4518.

Mao, R., Duan, H., Dong, D., Zuo, J., Song, Q., Liu, G. y Dong, B. (2017). Quantification of carbon footprint of urban roads via life cycle assessment: Case study of a megacity-Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production*, 166, 40-48.

Mazzi, A., Toniolo, S., Catto, S., De Lorenzi, V. y Scipioni, A. (2017). The combination of an environmental management system and life cycle assessment at the territorial level. *Environmental Impact Assessment Review*, 63, 59-71.

Mészáros, E. (1999). *Fundamentals of atmospheric aerosol chemistry*.

Metz, B., Davidson, O., Bosch, P. y Dave, R. (2007). *Mitigation on climate change*. Cambridge University

Milachowski, C., Stengel, T. y Gehlen, C. (2011). *Life cycle assessment for road construction and use*. European Concrete Paving Association. Disponible en:

https://www.eupave.eu/wp-content/uploads/eupave_life_cycle_assessment.pdf

MINAM (2005). *Ley General del Ambiente*. Lima, Perú.

MINAM (2011). *Plan de Acción de Adaptación y Mitigación frente al Cambio Climático*. Lima, Perú.

MINAM (2016a). *Objetivos de Desarrollo Sostenible e Indicadores*. Lima, Perú.

MINAM (2016b). *El Perú y el Cambio Climático*. Tercera comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 329. Disponible en:

<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/05/Tercera-Comunicaci%C3%B3n.pdf>

MINAM (2019). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2000-2019*. Disponible en:

https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2023/01/Tabla-consolidada-INGEI-2019_VF.xlsx

MML (2014). *Estrategia de Adaptación y Acciones de Mitigación de la Provincia de Lima al Cambio Climático*. Gerencia del Ambiente. Disponible en:

<https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/32c47abb5068d8c5.pdf>

Moreno-Ruiz, E., Valsanina, L., FitzGerald, D., Brunner, F., Symeonidis, A. y Wernet, G. (2019). Documentation of changes implementes in the ecoinvent database v3.6. *Ecoinvent Association*. Disponible en:

https://www.ecoinvent.org/files/change_report_v3_6_20190912.pdf

Moscoso, M., Van Laake, T., Quiñones, L., Pardo, C. y Hidalgo D. (2019). Transporte urbano sostenible en América Latina: Evaluaciones y recomendaciones para políticas de movilidad. *Despacio*. Bogota, Colombia.

MSI (2012). *Plan urbano distrital de San Isidro 2012-2022*. Lima, Perú.

MSI (2016). *Manual de Mobiliario Urbano*. Lima, Perú. Disponible en:

http://msi.gob.pe/portal/wp-content/uploads/2016/03/Manual-de-Mobiliario-Urbano_MMU.pdf

MSI y Fundación Transitemos (2016). *Plan de Movilidad Urbana Sostenible*. Lima, Perú.

MTC (2003). *Reglamento Nacional de Vehículos*. Lima, Perú.

MTC (2016). *Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras*. Lima, Perú.

MTC (2017). *Reglamento de Protección Ambiental para el Sector Transportes*. Lima, Perú.

Lima Cómo Vamos (2017). *Séptimo Informe de Resultados sobre Calidad de Vida*. Disponible en:

<http://www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2017/10/InformeGestion2016.pdf>

ONU (1998). *Protocolo de Kyoto*. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

ONU (2002). *Report of the World Summit on Sustainable Development*. Johannesburg, South Africa.

ONU (2015a). *Acuerdo de París*. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

ONU (2015b). *The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Disponible en:

<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>

ONU (2021). *Fact sheet: Climate change*. Sustainable Transport Conference. Disponible en:

https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/media_gstc/FACT_SHEET_Climate_Change.pdf

Oyamakin, S. (2014). On ranking of carbon stocks of selected tree species using statistical distributions. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics*, 2 (1), 154-160.

Park, I., Kim, H. y Lee, S. (2018). Characteristics of tire wear particles generated in a laboratory simulation of tire/road contact conditions. *Journal of Aerosol Science*, 124, 30-40.

Park, K., Hwang, Y., Seo, S. y Seo, H. (2003) Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129 (1), 25-31.

Pérez-Prada, F., Monzon, A. y Valdes, C. (2017). Managing traffic flows for cleaner cities: The role of green navigation systems. *Energies*, 10 (6), 791.

Petit-Boix, A., Llorach-Massana, P. y Sanjuan-Delmás, D. (2017). Application of life cycle thinking towards sustainable cities: A review. *Journal of Cleaner Production*, 166, 939-951.

Phan, T. y Baird, K. (2015). The comprehensiveness of environmental management systems: The influence of institutional pressures and the impact on environmental performance. *Journal of Environmental Management*, 160, 45-56.

Pizzinato, S. (2009). Transporte : El motor del cambio climático. *Revista Greenpeace*. Disponible en:

<http://ibdigital.uib.es/greenstone/collect/cd2/archives/gp0018.dir/gp0018.pdf>

Ponce de León, O. (2012). *Los retos del desarrollo de infraestructura de transporte urbano en Lima Metropolitana a través de asociaciones público-privadas*. Consorcio de Investigación Económica y Social.

Pope, C. A. (2004). Air pollution and health - Good news and bad. *New England Journal of Medicine*, 351 (11), 1132-1134.

PRé Sustainability (2016). *Introduction to LCA with SimaPro 7*.

PRé Sustainability (2020). *What's New in SimaPro 9.1*.

- Preston, B., Westaway, R. y Yuen, E. (2011). Climate adaptation planning in practice: an evaluation of adaptation plans from three developed nations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16, 407-438.
- Querini, F. y Benetto, E. (2015). Combining agent-based modeling and life cycle assessment for the evaluation of mobility policies. *Environmental, Science and Technology*, 49 (3).
- Ranjan, A. (2016). Carbon sequestration efficacy of trees of Vinoba Bhave University Campus, Hazaribag. *Carbon*, 3 (5), 4688-4692.
- Riedy, C. (2016). *Climate change*. Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney.
- Rybczewska-Blażejowska, M. y Palekhov, D. (2018). Life cycle assessment (LCA) in environmental impact assessment (EIA): principles and practical implications for industrial projects. *Management*, 22 (1) 138-153.
- Sánchez, L. y Hacking, T. (2012). An approach to linking environmental impact assessment and environmental management systems. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 25-38.
- Santero, N., Masanet, E. y Horvath, A. (2011a). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (9-10), 801-809.
- Santero, N., Masanet, E. y Horvath, A. (2011b). Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (9-10), 810-818.
- Severis, R., Simioni, F., Moreira, J. M. y Alvarenga, R. (2019). Sustainable consumption in mobility from a life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 234, 579-587.
- Silva, D., Nunes, A., Moris, A., Piekarski, C. y Rodrigues, T. (2017). How important is the LCA software tool you choose. Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. *VII Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica*.
- Shindell, D., Faluvegi, G., Seltzer, K. y Shindell, C. (2018). Quantified, localized health benefits of accelerated carbon dioxide emissions reductions. *Nature Climate Change*, 8 (4), 291-295
- Stocker, T., Qin, D. y Plattner, G. (2013). Technical summary. *Climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University.
- Stripple, H. (2001). *Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis*. IVL Swedish Environmental Research Institute. Gothemburg, Sweden.
- Thorpe, A. y Harrison, R. (2008). Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Science of the Total Environment*, 400 (1-3), 270-282.

Tillman, A., Ekvall, T., Baumann, H. y Rydberg, T. (1994). Choice of system boundaries in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2, 21-29.

Tukker, A. (2000). Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 20 (4), 435-456.

Turk, J. Mauko, A., Mladenovic, A. y Cotic, Z. (2015). Environmental evaluation of two scenarios for the selection of materials for asphalt wearing courses. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 683-691.

Turk, J. Mauko, A., Mladenovic, A y Cotic, Z. (2016). Environmental comparison of two alternative road pavement rehabilitation techniques: Cold in-placerecycling versus traditional reconstruction. *Journal of Cleaner Production*, 121, 45-55.

Umer, A., Hewage, K., Haider, H. y Sadiq, R. (2017). Sustainability evaluation framework for pavement technologies: An integrated life cycle economic and environmental trade-off analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 88-101.

Vásquez, A. y Bendezú, L. (2008). *Ensayos sobre el rol de la infraestructura vial en el crecimiento económico del Perú*. Consorcio de Investigación Económica y Social.

Vatn, A. (2015). Markets in environmental governance - From theory to practice. *Ecological Economics*, 117, 225-233.

Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Santillán-Saldívar, J., Quispe, I. y Bentín, M. (2017). Carbon footprint of pomegranate (*Punica granatum*) cultivation in a hyper-arid region in coastal Peru. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 (4), 601-617.

Vázquez-Rowe, I., Ziegler-Rodriguez, K., Quispe, I., Aldaco, R. y Kahhat, R. (2019). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 142 (12), 283-292.

Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Larrea-Gallegos, G. y Ziegler-Rodriguez, K. (2019). Peru's road to climate action: Are we on the right path? The role of life cycle methods to improve Peruvian national contributions. *Science of the Total Environment*, 659, 249-266.

Verán-Leigh, D., Larrea-Gallegos, G. y Vázquez-Rowe, I. (2019). Environmental impacts of a highly congested section of the Pan-American highway in Peru using life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*.

Wang, T., Kendall, A., Harvey, J., Lee, E. y Kim, C. (2012). Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. *Journal of Cleaner Production*, 33, 86-96.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. y Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (Part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (9), 1218-1230.

Xie, R., Fang, J. y Liu, C. (2017). The effects of transportation infrastructure on urban carbon emissions. *Applied Energy*, 196, 199-207.

Zhang, L., Miller, M. y Misener J. (2011). Traveler information tool with integrated real-time transit information and multimodal trip planning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation research Board*, 2215.

