

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



TESIS:

**“Procedimiento para el análisis de emisiones de CO₂
en carreteras de México basado en el análisis del ciclo
de vida de los pavimentos flexibles”.**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRIA EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
JUAN DIEGO FLORES RUIZ**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. MARCO ANTONIO MONTOYA ALCARAZ**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. LEONEL GABRIEL GARCIA GOMEZ**

Mexicali, Baja California, junio del 2024.

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Director(a) de Tesis: _____

Dr. Marco Antonio Montoya Alcaraz

Co-director de Tesis: _____

Dr. Leonel Gabriel García Gómez

Aprobada por el Jurado Examinador:

1. _____

2. _____

3. _____

*Esta investigación está dedicada a mis padres.
No hay palabras suficientes para expresar mi gratitud por
su amor y apoyo incondicional que me han brindado
y además la fuerza necesaria para alcanzar
mis metas y objetivos.
Muchas gracias.*

AGRADECIMIENTOS.

Agradecido con Dios por haberme brindado fortaleza, sabiduría y la perseverancia necesarias para completar esta tesis. Agradezco cada momento de claridad y cada impulso de energía que me permitió seguir adelante, especialmente en los momentos más desafiantes y difíciles en cuestiones de salud. Además, estoy profundamente agradecido por las oportunidades que se han presentado en mi camino, así como por las personas maravillosas que he conocido durante este proceso.

Asimismo, agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo económico brindado y su contribución en mis estudios en la maestría.

A mi alma máter la Universidad Autónoma de Baja California especialmente a la Facultad de Ingeniería Mexicali y al Programa Educativo de Ingeniería Civil por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, en un programa reconocido por su calidad internacional.

A mi director de tesis y amigo Dr. Marco Antonio Montoya Alcaraz por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación y en mi formación profesional como tutor y mentor. Con gran admiración y respeto agradezco la confianza que ha depositado en mí al permitirme formar parte de un equipo de trabajo y una familia.

Al Dr. Leonel Gabriel García Gómez, por su apoyo como Co-director de tesis, con su gran disposición, experiencia y conocimiento hizo posible la culminación de este proyecto. Con gran respeto y admiración por su labor como profesionista.

Al Dr. José Ricardo Cota Ramírez, por su apoyo en puntos clave durante mi investigación, reconociendo su notable conocimiento y experiencia en el área. Con gran respeto y admiración por su labor como profesionista.

De igual manera, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los miembros del comité evaluador, cuyos conocimientos y experiencia fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Sus observaciones y consejos durante las presentaciones de avances semestrales con el fin de enriquecer y mejorar mi investigación.

A mis queridos padres, Juan Flores y Ana Ruiz, les debo más de lo que las palabras pueden expresar. Su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios innumerables han sido la base sobre la cual he construido este logro. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo dudaba de mí mismo. Su ejemplo de trabajo duro y dedicación ha sido una inspiración continua y una fuente de

motivación.

A mis hermanos Isaac y Saray, quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su amor, comprensión y apoyo incondicional. Gracias por estar siempre ahí, por sus palabras de aliento y por creer en mí.

Resumen

La construcción de carreteras desempeña un papel fundamental en el crecimiento económico a nivel mundial al facilitar el movimiento de personas y bienes en todo el planeta. Sin embargo, este progreso tiene un impacto ambiental considerable, especialmente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), donde el dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales contribuyentes al cambio climático. Una de las formas para contribuir con la disminución de la generación de emisiones, es por medio del uso e implementación del “Life Cycle Analysis” (LCA) en los pavimentos, ya que permite identificar de diferentes maneras su generación y abordar áreas críticas a lo largo del ciclo de vida del pavimento. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es desarrollar un procedimiento útil para cuantificar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en carreteras basado en el LCA, para evaluar su impacto ambiental y definir recomendaciones específicas que permitan mejorar el desempeño ambiental de los pavimentos. Derivado de lo anterior se desarrolló una metodología que permite determinar la cantidad de emisiones de CO₂ que se emiten por las distintas actividades que conforman cada etapa del ciclo de vida de los pavimentos y plantear maneras para disminuir la generación de emisiones tomando como referencia una carretera ubicada en el estado de Baja California. Mediante los resultados obtenidos, se determinó que las etapas de “extracción y producción de materiales” y “fase de uso” son las que más contribuyen al impacto ambiental. Se concluye que la metodología planteada para cuantificar emisiones de CO₂ contribuye en la mejora del desempeño ambiental de los pavimentos ya que este enfoque permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia del proceso constructivo y reducir el impacto ambiental. Esto incluye la reducción de emisiones y el uso responsable de recursos no renovables, lo anterior permite a las agencias viales reducir los impactos ambientales relacionados con la construcción de infraestructura vial.

Abstract

Road construction plays a critical role in global economic growth by facilitating the movement of people and goods across the planet. However, this progress has a considerable environmental impact, especially in terms of greenhouse gas (GHG) emissions, where carbon dioxide (CO₂) is one of the main contributors to climate change. One of the ways to contribute to the reduction of emissions generation is through the use and implementation of “Life Cycle Analysis” (LCA) in pavements, since it allows their generation to be identified in different ways and address critical

areas. throughout the life cycle of the pavement. Therefore, the objective of this research is to develop a useful procedure to quantify carbon dioxide (CO₂) emissions on roads based on LCA, evaluate their environmental impact and define specific recommendations to improve the environmental performance of pavements. Derived from the above, a methodology was developed that allows determining the amount of CO₂ emissions emitted by the different activities that make up each stage of the pavement life cycle and proposing ways to reduce the generation of emissions taking as reference a road located in the state from Baja California. Through the results obtained, it was determined that the stages of “extraction and production of materials” and “use phase” are the ones that contribute the most to the environmental impact. It is concluded that the proposed methodology to quantify CO₂ emissions contributes to improving the environmental performance of pavements since this approach allows identifying opportunities to improve the efficiency of the construction process and reduce the environmental impact. This includes the reduction of emissions and the responsible use of non-renewable resources, allowing highway agencies to reduce the environmental impacts related to the construction of highway infrastructure.

Índice

1. Introducción.	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Hipótesis.	3
1.4 Justificación.	4
1.5 Metodología general.	5
1.6 Descripción del caso de estudio.	6
2. Revisión de la literatura.	8
2.1 Contaminación ambiental y sus efectos en la salud.	8
2.1.1 Emisiones generadas por el transporte.....	10
2.2 Análisis del ciclo de vida como respuesta a la reducción de la contaminación ambiental.	13
2.3 Modelos de LCA aplicados para la reducción del CO ₂ en pavimentos asfálticos.	17
3. Metodología de análisis.	26
3.1 Descripción específica de la aplicación del modelo al caso de estudio.	26
3.2 Recopilación de datos.	27
3.2.1 Geometría y estructura del pavimento.	27
3.2.2 Datos viales.....	32
3.2.3 Estrategias de conservación del pavimento.....	35
3.3 Análisis de las emisiones generadas por las diversas intervenciones.	40
3.3.1 Bacheo.....	40
3.3.2 Sello de grietas.....	41
3.3.3 Fresado y reencarpetado.....	41
3.3.4 Reconstrucción.....	46
3.4 Análisis de las emisiones generadas por el tránsito durante el periodo de análisis del pavimento...63	
3.5 Análisis de las emisiones generadas por el retiro y disposición final del material desechado del pavimento a su previa reconstrucción.....	68
3.5.1 Retiro y disposición final del fresado y reencarpetado.	68
3.5.2 Retiro y disposición final de la reconstrucción.	69
4. Resultados.	71
4.1 Emisiones generadas en la etapa de extracción y producción de materiales.	71
4.1.1 Fresado y reencarpetado.....	72
4.1.2 Sub-base.....	73
4.1.3 Base granular.	73
4.1.4 Base asfáltica	74
4.1.5 Carpetas asfálticas.....	75
4.1.6 Total de emisiones generadas en la extracción y producción de materiales.	77

4.2 Emisiones generadas en la etapa de construcción.....	78
4.2.1 Sub-base.....	78
4.2.2 Base granular.	79
4.2.3 Base asfáltica.	79
4.2.4 Carpeta asfáltica.....	79
4.2.5 Total de misiones generadas en la construcción.	80
4.3 Emisiones generadas en la etapa de fase de uso.	81
4.4 Emisiones generadas en la etapa de mantenimiento y rehabilitación.	83
4.4.1 Bacheo.....	84
4.4.2 Sellado de grietas.	84
4.4.3 Fresado y reencarpetado.....	84
4.4.4 Total de emisiones generadas por el mantenimiento y rehabilitación.	85
4.5 Emisiones generadas en la etapa de fin de vida.	86
4.5.1 Retiro de la carpeta asfáltica durante el fresado y reencarpetado.	86
4.5.2 Carpeta asfáltica.....	87
4.5.3 Base granular.	87
4.5.4 Total de emisiones generadas en la etapa fin de vida.	88
4.6 Total de emisiones generadas en el periodo de análisis del caso de estudio.....	89
4.7 Estrategias de mitigación para reducir las emisiones.....	92
5. Conclusiones.....	100
Referencias.....	104

1. Introducción.

La construcción de carreteras juega un papel vital en el crecimiento económico de México al permitir el movimiento de personas y bienes a lo largo del país. Sin embargo, este avance tiene un impacto ambiental importante, especialmente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con el dióxido de carbono (CO₂) uno de los principales contribuyentes al impacto ambiental.

La Carretera Federal No. 5 Mexicali-San Felipe, también conocida como “Carretera Transpeninsular” fue construida por el Gobierno Federal hace más de 70 años, cumpliendo con una misión muy importante en su momento: comunicar de manera rápida y segura, la Ciudad de Mexicali con San Felipe, un destino turístico popular en la costa del Golfo de California. La elección de esta carretera que conecta con dos grandes ciudades del estado de Baja California, proporciona un caso de estudio valioso debido a la importancia socioeconómica y ambiental que constituyen estas ciudades. Contemplando también la elección de pavimentos flexibles como objeto de estudio ya que es el tipo de pavimento más implementado en la construcción de carreteras en México.

La finalidad de esta investigación es desarrollar una herramienta metodológica para mejorar el desempeño ambiental de los pavimentos en Baja California. A través de la mejora en la toma de decisiones ambientales y económicas en la construcción de carreteras mediante el Análisis del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) que es un método útil para analizar los impactos ambientales durante el ciclo de vida de un material en específico o algún proceso. Dicho análisis se realizará por medio de la cuantificación de la cantidad de recursos que se están utilizando y las emisiones ambientales que se desprenden de los procesos de pavimentación durante todas las etapas de su ciclo de vida. Donde se espera que los resultados de este estudio proporcionen información valiosa para los responsables de la toma de decisiones en el sector de transporte y carreteras, así como para los profesionales involucrados en el diseño y la gestión de infraestructuras viales sostenibles en México.

Esta investigación se divide en 5 capítulos, el capítulo 1 “Introducción” donde se describe de manera detallada el plan de trabajo y los procedimientos que se seguirán para llevar a cabo la presente investigación, el capítulo 2 “Revisión de la literatura” muestra que es lo que dice la literatura existente acerca de la contaminación ambiental y sus efectos en la salud, el análisis del ciclo de vida como respuesta a la reducción de la contaminación ambiental y sobre los modelos

de LCA aplicados para la reducción del CO₂ en pavimentos asfálticos, el capítulo 3 “Metodología de análisis” donde se describe el procedimiento y técnicas que se utilizaron para analizar los datos recopilados durante la investigación, el capítulo 4 “Resultados” se muestra la cantidad de emisiones que se generan por las diferentes etapas del LCA y en el capítulo 5 “Conclusiones” se presentan los hallazgos principales y conclusiones finales sobre la investigación referente a la implementación del LCA en el caso de estudio.

1.1 Planteamiento del problema.

En la actualidad, el mundo enfrenta grandes preocupaciones ambientales que al día de hoy están en primer plano. Donde el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono y el cambio climático son temas de vital importancia, por lo tanto, los gobiernos de todo el mundo están buscando formas de reducir la contaminación y proteger el planeta para disminuir el daño ambiental que se está ocasionando. Aunado a los problemas a nivel global mencionados anteriormente, el sector del transporte influye considerablemente a la contaminación, como menciona Wintruff & Fernández, (2023) a medida que las ciudades de todo el mundo siguen expandiéndose, aumenta la necesidad de una infraestructura eficiente y sostenible. Donde los componentes críticos del desarrollo urbano y los sistemas de pavimento desempeñan un papel fundamental para garantizar redes de transporte fluidas, pero no se debe de pasar por alto los impactos ambientales asociados con la construcción y mantenimiento de los sistemas de pavimento, ya que conlleva la extracción de recursos naturales, el uso de derivados del petróleo y la quema de combustibles para obtener energía.

En el contexto actual sobre el desarrollo y expansión del sector carretero, surge una preocupación por la contaminación ambiental que se genera a través de las infraestructuras del transporte, especialmente por las emisiones generadas de dióxido de carbono (CO₂), ya que cada vez se ha vuelto un tema más relevante. Por lo tanto, el pavimento flexible es esencial en la construcción de carreteras debido a su capacidad de adaptación, durabilidad, comodidad para los usuarios y su potencial para reducir las emisiones ambientales asociadas con la construcción y en el uso de carreteras. Aunque se reconozcan los beneficios por parte de la comunidad académica de la implementación del análisis del ciclo de vida (LCA) para evaluar el impacto ambiental de los pavimentos, aún hace falta información sobre la implementación de un procedimiento útil para cuantificar aproximadamente las emisiones de CO₂ a lo largo de su ciclo de vida en el contexto mexicano. Asimismo, en el caso de los pavimentos en México, no existen controles

normativos para el seguimiento del control de calidad en cada etapa, de hecho, están ligeramente contempladas con el MIA (Manifiesto de Impacto Ambiental). Es decir, la producción de materiales, diseño, construcción, fase de uso, mantenimiento y el fin de vida, se atienden de manera individual, por lo tanto, se desconoce el grado del impacto ambiental generado debido a las emisiones liberadas en cada una de las etapas.

La falta de un procedimiento para determinar las emisiones de CO₂ en los pavimentos flexibles en México limita la capacidad de los responsables de tomar decisiones para evaluar correctamente el impacto ambiental de las carreteras y proponer medidas de mitigación adecuadas para reducir las emisiones. Además, la falta de datos específicos y actualizados sobre las emisiones asociadas a todas las diferentes etapas del ciclo de vida de los pavimentos hace que sea aún más difícil desarrollar estrategias sostenibles para el diseño y mantenimiento de las carreteras. Derivado de lo anterior, es necesario cambiar el modo tradicional en el uso de recursos lineales a un modo denominado economía circular (Assefa & Ambler, 2017). Dado que el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero durante todo su ciclo de vida del pavimento son enormes, y es necesario reducir los impactos ecológicos y ambientales, así como mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales.

1.2 Objetivo.

Desarrollar un procedimiento útil para cuantificar las emisiones de dióxido de carbono en carreteras basado en el LCA (Life Cycle Analysis), para evaluar su impacto ambiental y definir recomendaciones específicas que permitan mejorar el desempeño ambiental de los pavimentos.

Objetivos específicos

- Identificar y analizar las entradas (energía y materia prima) de las etapas que constituye el LCA.
- Determinar la cantidad de emisiones ambientales (CO₂) que se generan por el desarrollo de las actividades ciclo de vida de los pavimentos y cuantificar su impacto ambiental.
- Identificar oportunidades de optimización y proponer recomendaciones para mejorar los procesos asociados al ciclo, así como su desempeño ambiental.

1.3 Hipótesis.

La aplicación del procedimiento permite evaluar el desempeño ambiental de una carretera considerando todas las etapas del ciclo de vida de la misma, lo anterior permite a los tomadores

decisiones establecer estrategias sostenibles en el sector carretero.

1.4 Justificación.

La construcción de carreteras en México es de gran importancia para el desarrollo económico y social del país, pero conlleva un significativo impacto ambiental, especialmente por las emisiones de CO₂ que se generan. Debido al rol fundamental que conllevan las carreteras en la infraestructura nacional con el impacto ambiental, es difícilmente desarrollar estrategias para mitigar estas emisiones y mejorar el desempeño ambiental de los pavimentos.

Por lo tanto, el presente análisis se desarrolla en la Carretera Federal No. 5 Mexicali-San Felipe que proporciona un caso de estudio valioso debido a su importancia socioeconómica y ambiental en el estado de Baja California. Considerando que, al analizar este caso podemos obtener información relevante para aplicarla en otras carreteras de México para analizar el impacto ambiental. Debido a que, en la actualidad, existe una falta de procedimientos para cuantificar las emisiones de CO₂ asociadas con los pavimentos flexibles en México. Esta falta de información dificulta la evaluación precisa del impacto ambiental de las carreteras y la implementación de medidas de mitigación adecuadas. Para trabajar en dirección del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas establecidos para alcanzar en el año 2030, teniendo como uno de los principales el número 13 de “acción por el clima”, cuyo objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para acotar el calentamiento global, además el número 3 “salud y bienestar” y el 13 “producción y consumo responsable”.

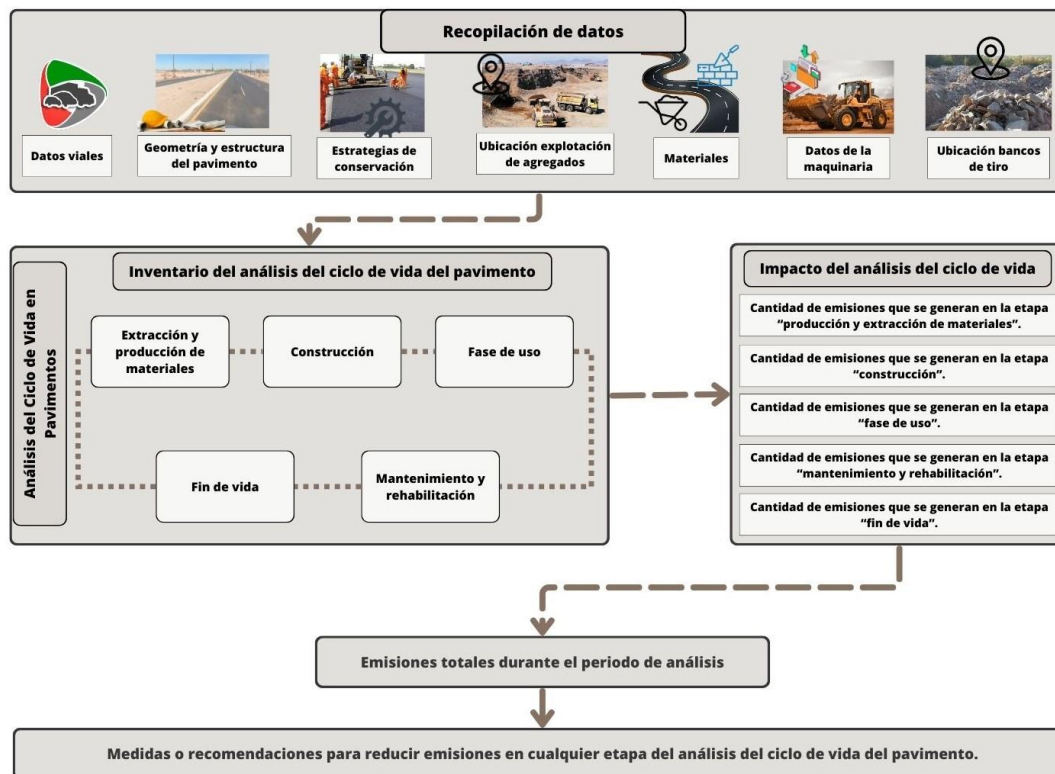
Por ende, el estudio propone desarrollar un procedimiento metodológico basado en el Análisis del Ciclo de Vida (LCA) para cuantificar las emisiones de CO₂ en los pavimentos flexibles de carreteras en México. Cabe mencionar que, el enfoque de ciclo de vida está ganando terreno para satisfacer las necesidades de la construcción sostenible (Summit, 2002). Los resultados de esta investigación proporcionarán información valiosa para los responsables de la toma de decisiones en el sector del transporte y carreteras, así como para los profesionales involucrados en el diseño y gestión de infraestructuras viales sostenibles. Harvey et al., (2016) menciona que el uso de LCA en la comunidad de pavimentos está creciendo y que sus usos más comunes están relacionados con la búsqueda de una mejor selección de materiales, optimización del diseño y construcción, el uso eficiente de recursos y energía, extensión de la vida útil del pavimento a través de estrategias de preservación, mantenimiento y rehabilitación, así como para el uso del reciclaje y reutilización del pavimento.

Asimismo, se espera que este procedimiento no solo permita una evaluación más precisa del impacto ambiental de las carreteras, sino que también identifique oportunidades de optimización y proponga recomendaciones para mejorar su desempeño ambiental. Esto ayudará a informar y orientar a los responsables de la toma de decisiones en la industria, el gobierno y las organizaciones no gubernamentales, contribuyendo así a la adopción de prácticas más sostenibles en el sector carretero mexicano.

1.5 Metodología general.

Tomando como referencia diversos estudios se propone el presente modelo para analizar las distintas etapas que constituyen el análisis del ciclo de vida del pavimento, para determinar la cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) que se emiten por las distintas actividades de cada etapa y plantear maneras para disminuir la generación de emisiones. A continuación, se presenta el modelo propuesto para determinar las emisiones de CO_2 del ciclo de vida del pavimento flexible (Figura 1.1).

Figura 1.1 Diagrama de flujo de la metodología para determinar las emisiones de CO_2 del ciclo de vida del pavimento flexible.

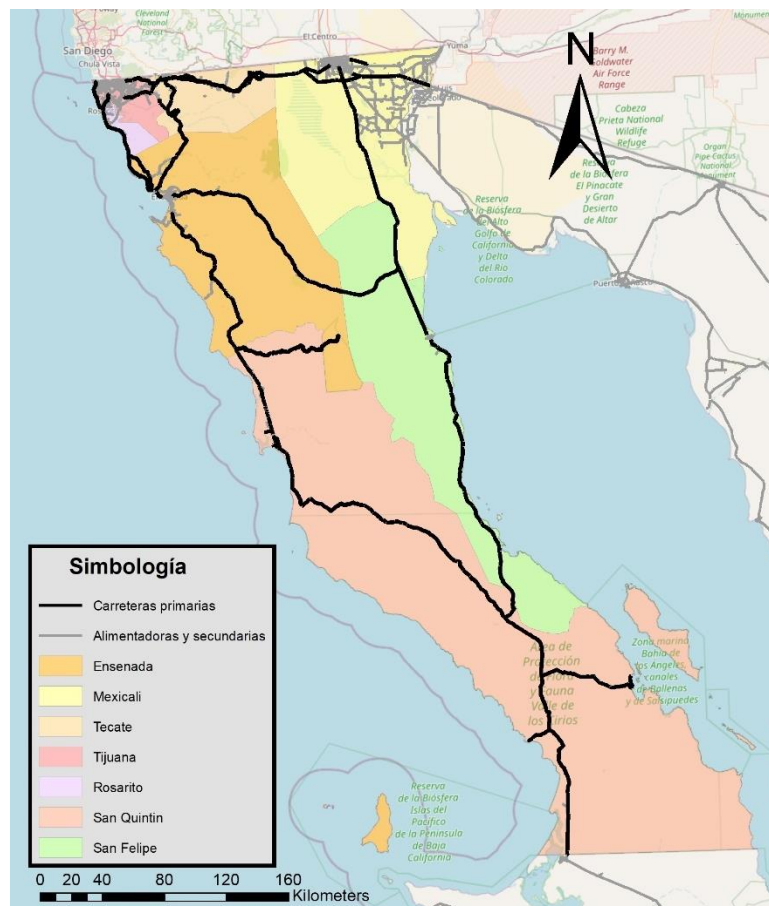


Fuente: Elaboración propia.

1.6 Descripción del caso de estudio.

El estado de Baja California cuenta con una superficie de 71,450 km² que corresponde al 3.6% de la superficie total del país, hace frontera al norte con el Estado de California y Arizona en Estados Unidos, al sur con el estado de Baja California Sur, al este con el estado de Sonora y al oeste con el Océano Pacífico (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2020). El estado de Baja California cuenta con 7 municipios conectados a través de una red carretera que alcanza más de 11 mil kilómetros, entre carreteras de 4 y 2 carriles, caminos revestidos, brechas y terracerías como se muestra en la Figura 1.2.

Figura 1.2 Delimitación municipal y red de carreteras de Baja California.



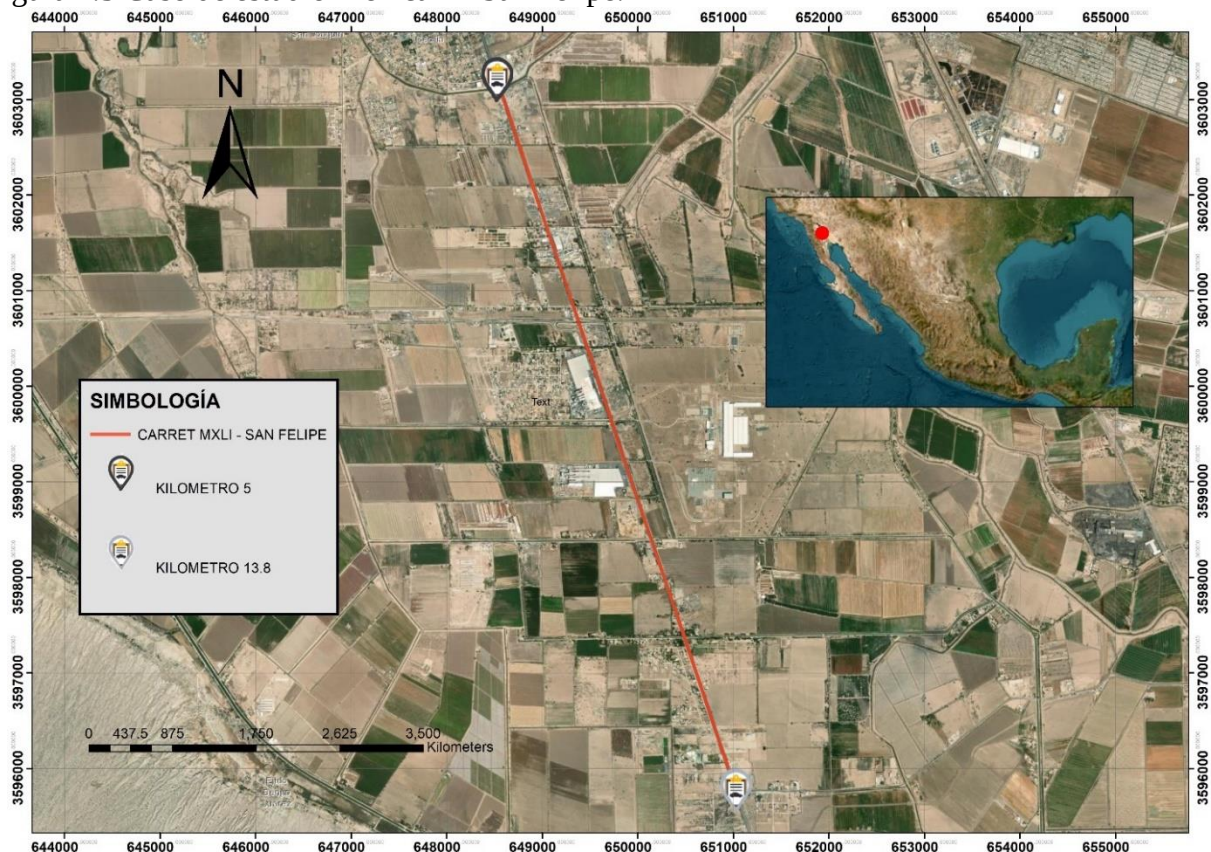
Fuente: Elaboración propia.

La Carretera Federal No. 5 Mexicali-San Felipe fue construida hace más de 70 años cuando Miguel Alemán era presidente, la pavimentación de esta carretera fue un detonante para las actividades pesqueras y turísticas. En el tramo se iniciaron trabajos de modernización en el año

2006, atendiendo necesidades de comunicación entre ciudades, puertos, frontera y centros turísticos con carreteras de altas especificaciones (SCT, 2011). Siguiendo después la completa modernización del tramo carretero Mexicali-San Felipe donde formó parte de los objetivos del Plan Nacional de Infraestructura 2007-2012 del periodo presidencial de Felipe Calderón Hinojosa, en el cual se priorizaron proyectos de construcción y/o modernización con suficiente de rentabilidad económica, financiera y social. La carretera comprende un recorrido de 193.1 km, desde la ciudad de Mexicali, que es la cabecera de la zona metropolitana del mismo nombre, hasta la localidad de San Felipe, ubicada al sur de la ciudad de Mexicali (SICT, 2016).

El tramo de estudio para este análisis inicia en el cadenamiento 5+000 donde termina la mancha urbana (Fraccionamiento Granjas Santa Cecilia) y finaliza en el cadenamiento 13+800 donde se ubica una desviación hacia la carretera Michoacán de Ocampo, tiene una longitud de 7.8 kilómetros como se muestra en la Figura 1.3, está construida de pavimento flexible y es de 2 carriles por sentido, con acotamiento y camellón.

Figura 1.3 Caso de estudio Mexicali – San Felipe.



Fuente: Elaboración propia.

2. Revisión de la literatura.

2.1 Contaminación ambiental y sus efectos en la salud.

Un número creciente de estudios han indicado que la contaminación del aire es un contribuyente importante a una variedad de enfermedades (J. Wang et al., 2019). Por ejemplo, Vedal et al., (2017) muestra los estudios de cohortes epidemiológicas que evalúan la exposición a la contaminación del aire y los efectos en la salud. El estudio de cohortes confirmó que la exposición a las emisiones de los vehículos diésel aumentaba el riesgo de mortalidad por cáncer de pulmón (Attfield et al., 2012).

Bai et al., (2018) menciona que se encontró una relación significativa entre la contaminación del aire relacionada con el tráfico y las visitas al hospital por bronquitis aguda (BA) infantil, particularmente en niños en edad escolar durante las estaciones frías.

Un informe reciente de la Comisión Lancet afirma que, en el año 2019, alrededor de 4.5 millones de muertes se asociaron con la exposición a la contaminación del aire ambiental, el mismo informe también mencionó el hecho de que el número de muertes prematuras aumenta anualmente, de 2.9 millones en 2000 a 4.2 millones en 2015 (Fuller et al., 2022). Por ejemplo, la exposición excesiva a altas concentraciones de partículas en suspensión (PM) se ha relacionado con el desarrollo de enfermedades respiratorias, asma y enfermedades cardiovasculares y puede conducir a un mayor riesgo de mortalidad (Buckeridge et al., 2002; Masiol et al., 2012). Además, el carbono negro (BC) no solo contribuye a las infecciones respiratorias y eleva el riesgo de cáncer (Janssen et al., 2012), sino que sus fuertes características de absorción de luz también desempeñan un papel en la exacerbación de los problemas del cambio climático y el calentamiento global (Bond et al., 2013).

Por lo tanto, se identifica de manera contundente que la contaminación del aire, particularmente la asociada con las emisiones y las partículas de los vehículos diésel, tiene un impacto negativo significativo en la salud humana y el medio ambiente global. La contaminación del aire plantea amenazas importantes para la sociedad, desde aumentar el riesgo de cáncer de pulmón hasta afectar la salud de los niños y aumentar el número de muertes prematuras.

Las emisiones químicas mixtas son responsables de la formación de contaminación secundaria, como el smog fotoquímico, la reducción de la visibilidad y la neblina (Cai & Xie, 2011), lo que provoca un tremendo daño a la salud humana y los ecosistemas (Yang et al., 2018).

La contaminación del aire ambiental es una mezcla compleja de partículas y gases, como PM,

monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) (incluido el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂)), y ozono (O₃) (Europe, 2013; Hoek et al., 2013; Rückerl et al., 2011), donde el PM es el contaminante indicador más utilizado para el monitoreo, con uno de los estándares más estrictos y se ha demostrado que está asociado con numerosos resultados de salud (Burns et al., 2019).

La contaminación del aire exterior ha sido identificada como un riesgo grave para la salud pública, incluido el efecto cancerígeno concluido por la Organización Mundial de la Salud (Benbrahim-Tallaa et al., 2012), asociado con otros impactos adversos como el debilitamiento de la visibilidad, daños a la producción agrícola e impactos en el sistema climático (Shindell et al., 2011; Walsh, 2014).

En la última parte del siglo XX, la preocupación por la salud humana y los cambios socioeconómicos condujeron a reducciones masivas de estos contaminantes, pero el mundo en desarrollo sigue siendo un problema, en algunos casos de magnitud creciente (Bell et al., 2011). Sin embargo, tanto en las regiones desarrolladas como en desarrollo, las áreas urbanas experimentan altas concentraciones de contaminantes asociados directa o indirectamente con las emisiones de los vehículos motorizados en forma de dióxido de nitrógeno (NO₂), óxido nítrico (NO), ozono (O₃) y partículas finas (PM₁₀ y PM_{2.5}) (Bell et al., 2011). En 2019, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que 99 de cada 100 personas respiran aire contaminado y viven en lugares donde los niveles de calidad del aire superan los límites establecidos por la OMS (World Health Organization, 2023).

En consecuencia, la contaminación del aire plantea una grave amenaza para la salud humana y el medio ambiente en todo el mundo. Las emisiones químicas mixtas crean una variedad de contaminantes secundarios que afectan negativamente la calidad del aire, provocando smog fotoquímico, visibilidad reducida y daños a la salud humana y de los ecosistemas. Donde la composición de la contaminación del aire es diversa y peligrosa, incluyendo partículas en suspensión, monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y ozono, todos los cuales están vinculados a efectos adversos en la salud. Además, la contaminación del aire no conoce fronteras, afecta tanto a áreas urbanas desarrolladas como a regiones en desarrollo y contribuye al cambio climático global.

A pesar de los avances previos en la reducción de emisiones, la magnitud del problema persiste y está aumentando en algunas partes del mundo. La Organización Mundial de la Salud estima que

la mayoría de la población mundial respira aire contaminado, lo que subraya la necesidad urgente de adoptar medidas eficaces para combatir esta amenaza.

2.1.1 Emisiones generadas por el transporte.

Los contaminantes del aire están asociados, ya sea directa o indirectamente, con las emisiones de los vehículos motorizados en forma de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y partículas en suspensión (PM) (Bell et al., 2011; Yang et al., 2015), la mayoría de los cuales son contaminantes primarios del aire. Estos contaminantes presentan impactos perjudiciales tanto en aspectos ambientales como de salud humana (Buckeridge et al., 2002; T. L. Chen et al., 2023).

Esto es debido a que el transporte terrestre sigue funcionando en gran medida con combustibles fósiles y, en consecuencia, provoca elevadas emisiones de gases de efecto invernadero, sobre todo dióxido de carbono (CO₂) y contaminantes atmosféricos (Ehrenberger et al., 2021).

Asimismo, como menciona La Notte et al., (2018) que el transporte es una de las principales fuentes de GEI, y más de dos tercios de las emisiones de GEI relacionadas con el transporte son atribuibles a los vehículos de carretera, ya que son los principales contribuyentes a las emisiones de GEI en el sector del transporte.

Por lo tanto, las emisiones contaminantes que se desprenden por los vehículos motorizados, están ligados al uso de combustibles fósiles en el transporte terrestre, lo que genera altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono. Debido a la importancia del transporte con la generación de emisiones, es importante implementar medidas efectivas para reducir las emisiones vehiculares y mitigar así sus efectos negativos en la calidad del aire y el cambio climático.

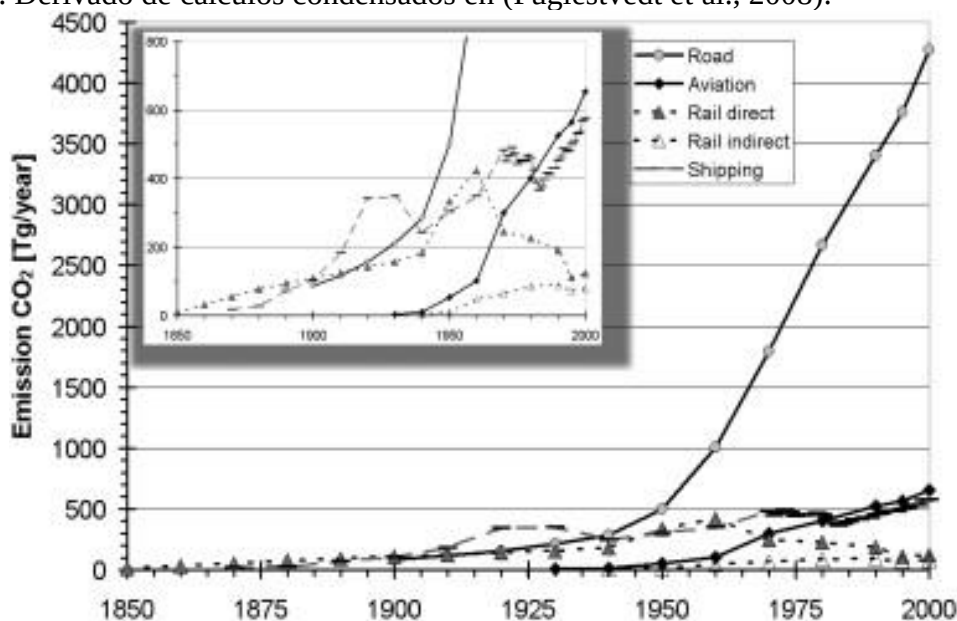
Uherek et al., (2010b) menciona que los barcos y el ferrocarril fueron los primeros emisores dominantes, todavía tienen una relevancia relativamente mayor en el CO₂ acumulado que en las emisiones actuales, como se muestra en la Tabla 2.1. Pero después de 1910 el tráfico por carretera pronto adquirió cada vez más importancia, superando a todos los demás modos de transporte (Uherek et al., 2010). La Figura 2.1 demuestra el enorme aumento de los vehículos de carretera, que hoy en día son responsables de entre el 75% y el 80% de todas las emisiones de CO₂ del transporte.

Tabla 2.1 Emisiones de CO₂ procedentes del transporte en el año 2000 y emisiones acumuladas 1900-2000. Derivado de cálculos condensados en Fuglestvedt et al., 2008.

	2000		Acumulado 1900-2000	
	Emisiones Tg CO ₂	Compartir [%]	Emisiones Tg CO ₂	Compartir [%]
Camino	4282	72.3	114.494	55.1
Carril	124	2.1	20,913	10.1
transporte marítimo	626	10.6	31.940	15.4
Aviación	688	11.6	16.890	8.1

Fuente: Extraído de Uherek et al., 2010.

Figura 2.1 Emisiones de CO₂ procedentes del transporte en el año 2000 y emisiones acumuladas 1900-2000. Derivado de cálculos condensados en (Fuglestvedt et al., 2008).



Fuente: Extraído de Uherek et al., 2010.

Indicando que el tráfico rodado es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de carbono que provocan el cambio climático, donde casi el 25% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con la energía son generadas por el sector del transporte cada año, de las cuales el 75% proviene del tráfico rodado (L. Zhang et al., 2019a).

Esto es debido al rápido desarrollo económico y de la urbanización que continúa acelerándose, la demanda de transporte ha aumentado, lo que ha llevado a que las emisiones relacionadas con el tráfico se conviertan en contribuyentes significativos a la contaminación del aire (Anenberg et al., 2017). Atribuyendo a lo anterior se señala que de todos los sectores emisores, los vehículos

de carretera son una de las fuentes más importantes entre muchos países desarrollados (Maykut et al., 2003; Querol et al., 2007).

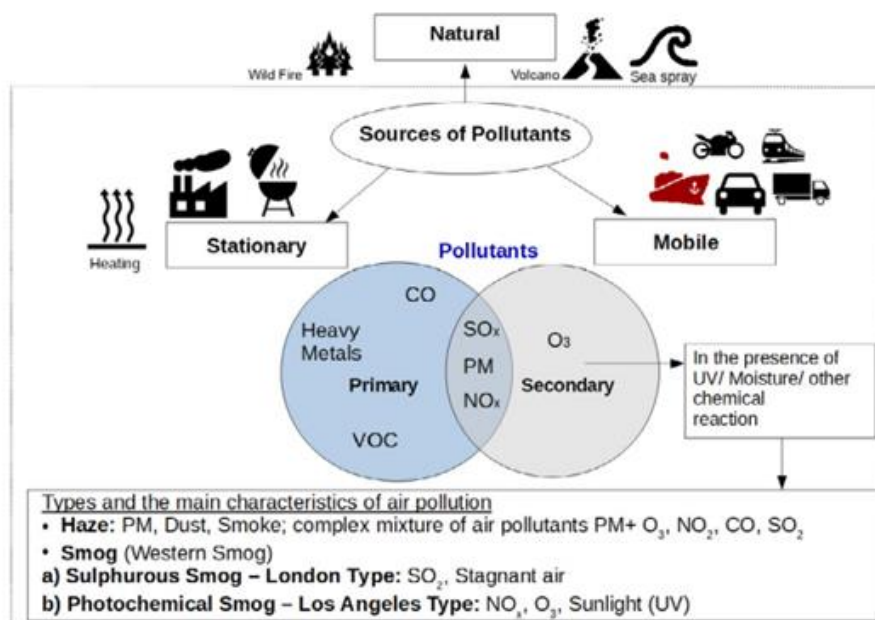
En definitiva, se establece que el transporte por carretera ha experimentado un aumento significativo en su importancia como fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo del tiempo. Aunque los barcos y el ferrocarril fueron los principales emisores en el pasado, el tráfico por carretera superó a todos los demás modos de transporte después de 1910. Hoy en día, los vehículos de carretera son responsables de la mayor cantidad de emisiones de CO_2 , por lo tanto, el uso de vehículos es la principal causa del deterioro ambiental.

Por ende, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) son un elemento importante en el análisis de sostenibilidad de los diferentes modos de transporte, esto es debido a que el transporte tiene otros impactos, tanto en el medio ambiente como en la salud humana: contaminación del aire, ruido, accidentes y daños al hábitat (Agency, 2022). Con respecto a la salud humana, se responsabiliza gran parte las emisiones que se desprenden de los vehículos, ya que la altura del escape del vehículo se encuentra en el rango de respiración del cuerpo humano, lo que hace que los vehículos sean más dañinos para la salud humana que otras fuentes de contaminación (Guo et al., 2016). Por lo tanto, el control de la contaminación de las emisiones vehiculares ha sido motivo de gran preocupación en la mayoría de las megaciudades (Guo et al., 2016).

La reducción de las emisiones al aire desempeña un papel importante en el apoyo al desarrollo sostenible (Fan et al., 2018), entre esas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se encuentran como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6) y trifluoruro de sodio (NF_3) (Zischke, 1974).

La Figura 2.2 resume las fuentes, los tipos de contaminantes del aire y la contaminación (neblina, smog sulfuroso y fotoquímico). Las cuales pueden resumirse en tres áreas de fuentes contaminantes: las naturales que se derivan de incendios forestales o erupciones volcánicas, las estacionarias que se derivan principalmente por fábricas de producción y el área móvil donde la contaminación se deriva de los medios de transporte (auto, avión, tren o barco).

Figura 2.2 Las fuentes y los tipos de contaminantes del aire.



Fuente: Extraído de Fan et al., 2018.

Destacando que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son un aspecto crucial en el análisis de sostenibilidad de los distintos modos de transporte, ya que estos modos tienen múltiples impactos en el medio ambiente y la salud humana, incluyendo la contaminación del aire, el ruido, los accidentes y los daños al hábitat. Es importante destacar que las emisiones vehiculares tienen un impacto significativo en la salud humana, ya que los escapes de los vehículos están ubicados a la altura de la respiración humana, lo que los hace especialmente perjudiciales.

Como efecto resultante de las emisiones que se generan por vehículos, se presenta una variedad de desafíos que surgen del sector del transporte, entre ellos el daño ambiental y el análisis de estos problemas mediante el uso de modelos de transporte podrá ayudar a los tomadores de decisiones a enfrentar estos desafíos (Willumsen, 2001).

2.2 Análisis del ciclo de vida como respuesta a la reducción de la contaminación ambiental.

La norma ISO (2003) define el ciclo de vida como las “etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de producto, desde la adquisición de materia prima o la generación de recursos naturales hasta su eliminación final”. El ciclo de vida completo abarca desde la cuna hasta la tumba: desde la extracción de la materia prima, pasando por la producción, el envasado, el uso, el tratamiento al final de su vida útil y el reciclaje hasta la eliminación final, como se muestra en

la Figura 2.3. A lo largo de cada etapa, el ciclo de vida del producto interactúa con el medio ambiente consumiendo recursos naturales y emitiendo contaminantes. La evaluación del ciclo de vida es un método cuantitativo para describir estas interacciones y sus posibles impactos ambientales (Müller et al., 2020). Por lo tanto, el LCA puede ayudar a los tomadores de decisiones a seleccionar el producto o proceso que genere el menor impacto en el medio ambiente (Curran, 2006). Esta información se puede utilizar con otros factores, como datos de costos y rendimiento, para seleccionar un producto o proceso (Curran, 2006).

Figura 2.3 El enfoque holístico de la evaluación del ciclo de vida tiene en cuenta los impactos ambientales asociados a lo largo de todo el ciclo de vida con todas las etapas del ciclo de vida del producto (círculo en el medio).



Fuente: Extraído de Müller et al., 2020.

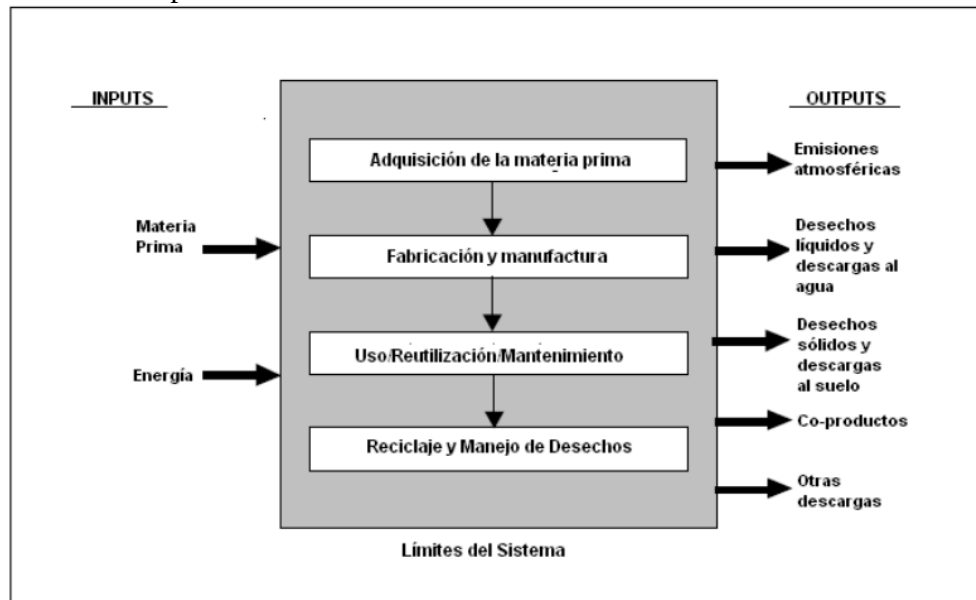
Los datos de LCA identifican la transferencia de impactos ambientales de un medio a otro y/o de una etapa del ciclo de vida a otra (por ejemplo, desde el uso y reutilización del producto hasta la materia prima), fase de adquisición (Curran, 2006). Si no se realizara un LCA, es posible que la transferencia no se reconozca ni se incluya adecuadamente en el análisis porque está fuera del alcance o enfoque típico de los procesos de selección de productos (Curran, 2006).

Por lo tanto, el LCA permite estimar los impactos ambientales acumulativos resultantes de todas las etapas del ciclo de vida del producto, que a menudo incluyen impactos no considerados en

análisis más tradicionales (por ejemplo, extracción de materias primas, transporte de materiales, disposición final del producto, etc.) (Curran, 2006). Al incluir los impactos a lo largo del ciclo de vida del producto, el LCA proporciona una visión integral de los aspectos ambientales del producto o proceso y una imagen más precisa de las verdaderas compensaciones ambientales en la selección de productos y procesos (Curran, 2006).

En la Figura 2.4 se ilustra las variables que conlleva el análisis del ciclo de vida (LCA), donde es primordialmente considerar las entradas (materiales y tipos de energía) que conectan con las actividades a lo largo de la vida útil de un determinado producto, desde la extracción de materia prima, su fabricación, uso y mantenimiento, hasta su disposición final.

Figura 2.4 Las posibles etapas del análisis del ciclo de vida que se pueden considerar en un LCA y las entradas/salidas típicas medidas.



Fuente: Extraído de EPA, 1993.

La aplicación del análisis del ciclo de vida tiene varios beneficios, como la capacidad de identificar áreas donde se puede mejorar la eficiencia en el uso de energía y recursos, tomar decisiones informadas al elegir productos sostenibles y considerar los impactos ambientales en todas las etapas del ciclo de vida. En el contexto de la construcción de carreteras y otras áreas similares, la adopción del LCA tiene un impacto positivo al proporcionar una comprensión exhaustiva y detallada de su impacto ambiental a lo largo de su vida útil. Esto facilita la toma de decisiones más amigables con el medio ambiente desde la fase de diseño hasta el mantenimiento, promoviendo así la reducción de la contaminación y la conservación de recursos.

Algunos investigadores abogan por la implementación de medidas de mitigación del tráfico desde aspectos económicos, técnicos y administrativos para minimizar las emisiones de los vehículos (L. Zhang et al., 2019b).

Por lo tanto, Hao et al., (2000) sugiere que la mejora de los sistemas viales puede mitigar la contaminación del aire de los vehículos. Yue et al., (2015) destaca la importancia de mejorar la calidad del combustible para reducir las emisiones contaminantes.

También se ha establecido que los impactos de los pavimentos se extienden mucho más allá de la extracción y producción de materiales de pavimento (Santero & Horvath, 2009). Por ejemplo, la investigación sobre demoras en el tráfico, interacción vehículo-pavimento y albedo del pavimento muestra oportunidades de reducción prometedoras, particularmente a medida que los modelos de apoyo y la ciencia continúan mejorando (Santero et al., 2011a). La literatura existente brinda principalmente a los formuladores de políticas recomendaciones de políticas de mitigación basadas en análisis cualitativos desde las perspectivas de la economía, la administración, la tecnología y la publicidad (Santero et al., 2011a).

De hecho, investigaciones recientes sugieren que si los impactos de la construcción, operación y mantenimiento de carreteras se agregaran al uso de energía operativa y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los vehículos en carretera, estos impactos ambientales serían aproximadamente un 10% más altos de lo que uno pensaría, ya que la estimación está basada únicamente en las operaciones de los vehículos (Chester & Horvath, 2009).

Por lo tanto, mejorar los sistemas viales puede ayudar a reducir la congestión y mejorar la eficiencia vial, lo que puede reducir las emisiones de los vehículos. Además, la promoción de combustibles limpios y no contaminantes juega un papel importante en la reducción de las emisiones de los vehículos. Asimismo, el impacto de las carreteras y el tráfico en el medio ambiente es un área de estudio cambiante ofrece oportunidades prometedoras para reducir la contaminación y mejorar el rendimiento de las carreteras. Sin embargo, es importante crear estrategias de mitigación efectivas que aborden estos problemas desde una perspectiva económica, técnica, organizacional y de concientización pública.

La reducción de la inercia de los vehículos en condiciones de baja velocidad, la mejora de la eficiencia del combustible y la reducción de la resistencia durante la operación a alta velocidad, en comparación con hace una década, han dado como resultado un menor consumo de energía y una mejor reducción de las emisiones.

2.3 Modelos de LCA aplicados para la reducción del CO₂ en pavimentos asfálticos.

El Dióxido de Carbono (CO₂) es el gas más importante en las emisiones de los gases de efecto invernadero, debido a que es el más abundante y persistente en la atmósfera, es la principal causa del calentamiento global y el cambio climático. Siqueira et al., (2017) menciona que, en la actualidad, el dióxido de carbono (CO₂), que representa el 76% de la fuente total de gases de efecto invernadero (GEI), debido a que es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicos más predominantes que contribuyen al calentamiento global y causan impactos perjudiciales tanto en las condiciones ambientales como en los ecosistemas.

Las carreteras desempeñan un papel importante en la red de transporte, ya que la gente depende cada vez más de los vehículos para sus desplazamientos diarios (Jiang & Wu, 2019). Una gran red de carreteras provoca impactos ambientales adversos, como calentamiento global, consumo de energía, transformación del paisaje y acidificación del suelo (Findlay & Bourdages, 2000).

La industria del transporte ha consumido el 20% de los recursos energéticos mundiales y ha provocado el 25% de las emisiones globales de GEI, el 75% de las cuales se produjeron en el sistema de transporte por carretera (Alshehry & Belloumi, 2017). Las actividades de construcción de carreteras han sido reconocidas como uno de los tres principales impulsores del consumo de recursos (Steger & Bleischwitz, 2011) además, el ciclo de vida del pavimento asfáltico puede emitir aproximadamente el doble de contaminantes atmosféricos que los gases de escape de los vehículos (Khare et al., 2020).

Asimismo, por medio de la implementación del LCA se pueden obtener mejoras en las condiciones del pavimento para reducir el consumo de combustible del tráfico, incluso utilizando la tecnología disponible, por otro lado, los enfoques que involucran mejoras tecnológicas o reducciones de tráfico pueden requerir largos períodos de tiempo (Trupia et al., 2017).

Tal es el caso sobre el crecimiento del tráfico durante el período de análisis ya que tiende a aumentar las emisiones de CO₂, la reducción del factor de emisión afecta los resultados de manera opuesta, ya que los vehículos se vuelven más eficientes en el consumo de combustible (Trupia et al., 2017). Por lo tanto, incluso si el crecimiento del tráfico y los parámetros del factor de emisión afectan los resultados, este impacto combinado no es significativo en general (Trupia et al., 2017).

Y. Zhang et al., (2021) menciona en su estudio en el cual se centró solamente en comparar los impactos ambientales entre diferentes materiales. Donde se consideró que estos impactos eran

los mismos para diferentes materiales alternativos debido a las actividades de construcción similares (Hasan et al., 2020). Asimismo, se determinó que la producción de materiales fue la etapa principal y clave que contribuyó a los impactos ambientales de la base de la carretera y el buen diseño de mezcla fue el punto más crítico para reducir los impactos ambientales en comparación con las bases carreteras (Y. Zhang et al., 2021).

Algunos defensores de la construcción de caminos a menudo sugieren que agregar carriles a una carretera reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero (Martinez Caraballo et al., 2013). Argumentan que, al aliviar la congestión, los próximos carriles reducirán la cantidad de combustible que los vehículos desperdician en el tráfico de paradas y arranques, lo que lleva a menores emisiones de gases de efecto invernadero de automóviles y camiones (Martinez Caraballo et al., 2013).

Indicando que la construcción y el mantenimiento de carreteras son actividades que generan un impacto ambiental considerable. Por ende, es factible lograr mejoras rápidas en la calidad del pavimento utilizando tecnologías disponibles, lo que puede resultar en una disminución del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes.

Además, lo mencionado anteriormente se subraya la importancia de seleccionar cuidadosamente los materiales y diseños en la construcción de carreteras para reducir su impacto ambiental. La producción de materiales y la composición de las mezclas son aspectos cruciales que deben ser examinados detenidamente para minimizar los efectos negativos en el entorno.

Igualmente, se plantea la idea de que la adición de carriles a una carretera puede contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al aliviar la congestión del tráfico. No obstante, esta estrategia debe ser evaluada cuidadosamente para determinar su eficacia real y sus implicaciones en la planificación de infraestructuras.

Li et al., (2020) menciona que el movimiento de tierras es el segundo mayor contribuyente de emisiones de CO₂ para las carreteras. Por lo tanto, reducir el tiempo de trabajo de las maquinarias de transporte y movimiento de tierras tendrá un efecto significativo en la disminución de las emisiones de CO₂ de la construcción de carreteras (D. Li et al., 2020).

El aumento de la distancia de transporte provocó el fuerte aumento de las cargas ambientales, por ende, la optimización de la estrategia de transporte, como la selección de un fabricante más cercano y el uso de un método de transporte sostenible, podría reducir notablemente las cargas ambientales en el transporte de materiales, especialmente los materiales de alto contenido, como

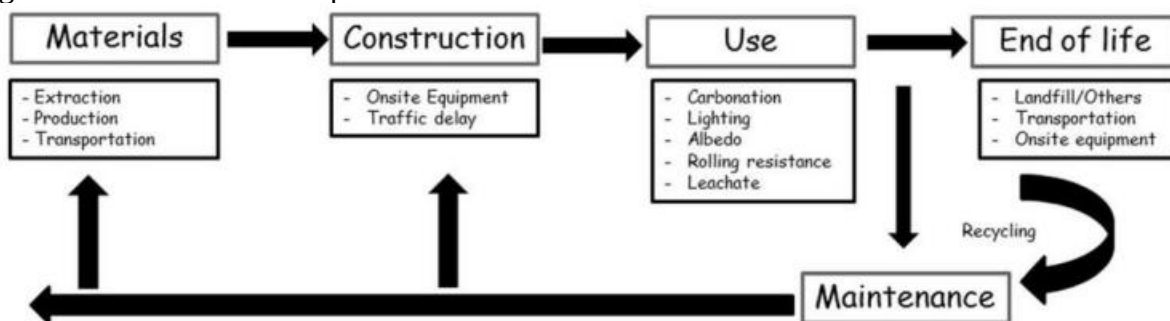
el aglomerante asfáltico y los agregados (F. Wang et al., 2021).

Diversos estudios como en el caso de Araújo et al., (2014) muestra cómo las estrategias optimizadas de mantenimiento dirigidas a reducir el deterioro del pavimento con el tiempo y el uso de materiales adecuados pueden tener una influencia significativa en las emisiones de CO₂ de los vehículos durante la fase de uso de un pavimento (Trupia et al., 2017).

La reutilización representa el nivel más alto en la recuperación de productos de construcción (H. Li, Deng, Zhang, Olanipekun, et al., 2019). Sin embargo, cuando esto no es posible, el reciclaje es un mejor enfoque para reintroducir los materiales en el ciclo y así proteger el medio ambiente (Bârsan & Bârsan, 2009; H. Li, Deng, Zhang, Xia, et al., 2019). Di Maria et al., (2018) menciona que ha encontrado que el reciclaje después de la demolición selectiva puede reducir el 59% de los impactos ambientales en la fase de demolición. La disminución de los impactos ambientales se debe principalmente a que se evita el vertido de residuos de demolición de la recuperación de los materiales de demolición selectiva (H. Li, Deng, Zhang, Olanipekun, et al., 2019). Por tanto, en la fase de demolición, el reciclaje es una solución al impacto ambiental (H. Li, Deng, Zhang, Olanipekun, et al., 2019).

La Figura 2.5 muestra las etapas que constituye el análisis del ciclo de vida en los pavimentos, desde la cuna hasta la tumba, donde se determinan los impactos ambientales, por lo tanto, el ciclo de vida incluye desde la producción de materiales, la construcción, la fase de uso, el mantenimiento y la rehabilitación (M&R) y la fase de fin de vida (EOL) (Santero et al., 2011b).

Figura 2.5. Marco LCA del pavimento.



Fuente: Extraído de Santero et al., 2011b.

Por lo tanto, se identifica que la construcción de carreteras representa una actividad que ejerce un importante impacto ambiental, especialmente en relación con las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y la gestión de materiales. Dos factores clave que contribuyen a las emisiones de CO₂ en esta industria son el movimiento de tierras y la distancia de transporte.

Para abordar de manera efectiva las emisiones de CO₂, es esencial considerar diversas estrategias. Esto abarca la optimización de los procesos de movimiento de tierras para reducir el tiempo operativo de la maquinaria, la elección de estrategias de transporte sostenible que minimicen las distancias para el transporte de materiales, la implementación de estrategias de mantenimiento apropiadas y la selección de materiales que reduzcan su deterioro con el tiempo. Además, la reutilización y el reciclaje de materiales de construcción se presentan como prácticas fundamentales para reducir el impacto medioambiental de la construcción de carreteras. Estas estrategias no solo contribuyen a la disminución de las emisiones, sino que también reducen la cantidad de residuos de demolición y la extracción de nuevos recursos.

En conjunto, la implementación de estas estrategias puede conducir a una construcción de carreteras más sostenible y amigable con el medio ambiente, lo que a su vez contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂ y a la conservación de los recursos naturales.

Mediante la actualización de la tecnología y el equipo de producción, la sustitución de combustibles con alto contenido de carbono por combustibles con bajo contenido de carbono y la adopción de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono pueden reducir efectivamente el factor de emisión de CO₂ (L. T. Liu et al., 2014). El uso de mezcla asfáltica tibia en lugar de mezcla asfáltica caliente también puede reducir las emisiones (Hanson et al., 2012).

La principal razón y motivación para adoptar técnicas de mezcla asfáltica tibia es producir una mezcla asfáltica a una temperatura entre 10 y 40 °C más baja que la mezcla asfáltica en caliente convencional, como se muestra en la Figura 2.6. La baja temperatura de producción de mezcla asfáltica tibia tiene tres beneficios. Puede reducir significativamente las cargas ambientales, incluido el calentamiento global (Mohammad et al., 2015) y las emisiones de gases y humos (F. Ma et al., 2016a).

Figura 2.6. Comparación de HMA y WMA.

Comparative	HMA	150-180	No	High	High	High
	 Asphalt mixture	 Production temperature	 Need additives	 Energy consumption	 Gases emission	 Cost
	WMA	110-140	Yes	Low	Low	Low

Fuente: Extraído de Milad et al., 2022.

Mientras tanto, el uso de camiones propulsados por nuevas fuentes de energía puede reducir las emisiones de CO₂ del transporte; por ejemplo, los camiones eléctricos pueden reducir las emisiones de carbono entre un 25% y un 89% en comparación con los camiones diésel convencionales (Lee et al., 2013).

El escenario de tecnología avanzada significa la modernización de la maquinaria de construcción y la mejora de la tecnología de construcción, reduciendo así el uso de combustible y las emisiones de CO₂ (Y. Liu et al., 2019). El escenario de eficiencia del equipo fuera de carretera describe las mejoras en la eficiencia del motor. Se supone que los factores de emisión de CO₂ de estos dos escenarios también disminuyen un 10% respectivamente, también sería útil incorporar todos los materiales innovadores, alternativas de producción técnicamente aceptables y posibilidades de reciclaje, ya que esto permitiría probar nuevos escenarios y opciones de reducción de emisiones (Y. Liu et al., 2019).

En la Tabla 2.2 de H. Li, Deng, Zhang, Olanipekun, et al., (2019) se ilustra una muestra de un análisis detallado sobre la contribución de las emisiones ambientales al impacto ambiental del proyecto de transporte rápido en cada fase del ciclo de vida, donde considero ocho categorías de impacto ambiental en el proyecto de transporte rápido, que incluyen calentamiento global, acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, smog, agotamiento de los recursos naturales, alteración del hábitat y agotamiento del ozono. En la fase de construcción, se puede ver que el mayor impacto ambiental del proyecto de transporte rápido es el calentamiento global, la acidificación, el smog, el agotamiento de los recursos naturales y el agotamiento del ozono, con una contribución de las emisiones ambientales del ciclo de vida que oscila entre el 61% y el

94%. En la fase de mantenimiento y reparación, las emisiones ambientales tienen una contribución relativamente pequeña en las ocho categorías ambientales, siendo la más alta el impacto del 10% en la Acidificación. Por último, en la fase de demolición, el mayor impacto ambiental del proyecto de transporte rápido es la eutrofización.

Tabla 2.2 La contribución de las emisiones ambientales al impacto ambiental del proyecto de transporte de vía rápida en cada fase del ciclo de vida (%).

Categoría de Impacto	Fase de Construcción	Mantenimiento y Fase de Reparación	Fase de Demolición
① Calentamiento global	61.82	1.48	36.70
② Acidificación	72.50	10.20	17.30
③ Eutrofización	21.00	1.20	77.80
④ Ecotoxicidad	3.98	0.62	95.40
⑤ Smog	85.80	4.06	10.10
⑥ Agotamiento recursos naturales	91.40	2.26	6.30
⑦ Alteración de hábitat	28.30	0.65	71.10
⑧ Agotamiento del ozono	93.20	0.32	6.51

Fuente: Extraído de H. Li, Deng, Zhang, Olanipekun, et al., 2019.

Los resultados de algunos autores sugieren que los esfuerzos destinados a controlar y reducir las emisiones deben centrarse primero en el movimiento de tierras y en la mejora del rendimiento de la maquinaria todoterreno, en segundo lugar, también debe optimizarse la elección de los materiales de construcción, así como los procesos de alteración y restauración de los sistemas ambientales (Barandica et al., 2013).

De modo que surge la necesidad imperante de abordar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en las diversas áreas relacionadas con la construcción de infraestructuras viales con el propósito de mitigar el cambio climático y disminuir el impacto medioambiental. Se enfatiza la relevancia de adoptar tecnologías eco-amigables, prácticas sustentables y estrategias destinadas a reducir las emisiones en estos campos. Además, se hace hincapié en la gestión adecuada de los materiales y en la promoción de la reutilización y el reciclaje como acciones fundamentales para disminuir el impacto en el entorno. La colaboración entre la industria, los gobiernos y la sociedad se convierte en un elemento esencial para alcanzar una construcción y un sistema de transporte más respetuosos con el medio ambiente y sostenibles.

Se determinó que al implementar el LCA en los pavimentos flexibles logra disminuir la cantidad de emisiones de CO₂, donde se identificaron las diferentes actividades que generan emisiones y el establecimiento de estrategias de mitigación para reducir las emisiones contaminantes.

Las actividades que generaron más emisiones es la gran distancia de transporte del material y las

plantas alimentadoras (producción de materiales), tráfico (fase de uso), eutroficación, ecotoxicidad y alteración del hábitat, el traslado y mala disposición inadecuada de los residuos (fin de vida), en el cual los porcentajes pertenecientes de CO₂ en el LCA variaban dependiendo la etapa debido a que fueron analizadas en diferentes contextos del caso de estudio que consideraban cada autor.

Las medida de mitigación con más contribución para reducir la cantidad de emisiones se encuentra en la etapa “fin de vida” que es el reciclaje de residuos generados para su posterior uso de los desechos sólidos que son llevados a cabo para ponerlos a disposición nuevamente en un pavimento, donde se evitan las emisiones que se generan en la etapa “producción de materiales” debido a que se utilizaran parte de los residuos generados.

Asimismo, se destaca la interconexión entre las etapas de planeación y mantenimiento debido a que una buena gestión en estas etapas puede reducir significativamente los costos y emisiones contaminantes. Se deduce que mediante la implementación del análisis del ciclo de vida en los pavimentos flexibles es posible reducir las emisiones de CO₂.

Dicha reducción es viable mediante la incorporación de medidas para disminuir las emisiones de CO₂. Por ejemplo, en la etapa de producción de materiales, al utilizar fabricantes más cercanos, la implementación de transporte sostenible y plantas alimentadoras con electricidad; es posible reducir un 25% a 52% las emisiones. En la etapa fin de vida del pavimento, al utilizar tecnología de captura y almacenamiento de carbono y el reciclaje de residuos generados para su posterior uso de desechos sólidos; pueden reducir un 59% las emisiones generadas en esta etapa. Los porcentajes anteriormente mencionados se muestra en la Tabla 2.3, misma que contiene las distintas etapas que constituyen el ciclo de vida y los rangos de porcentaje de reducción una vez implementadas las medidas de mitigación. Es importante destacar que, para llevar a cabo medidas de mitigación, se deben identificar las actividades que provocan el desprendimiento de emisiones. Así como, su cuantificación a lo largo de la vida del pavimento. Lo anterior, con la finalidad de reducir el impacto ambiental que se refleja en el ciclo de vida del pavimento desde la producción de materiales hasta el fin de su vida.

La Tabla 2.3 muestra las afectaciones presentes en las distintas etapas del ciclo de vida del pavimento flexible que provocan el desprendimiento de emisiones de CO₂, por lo tanto, se toman medidas de mitigación con la finalidad de reducir el porcentaje de CO₂ de las etapas.

Tabla 2.3 Cuadro comparativo de los artículos científicos.

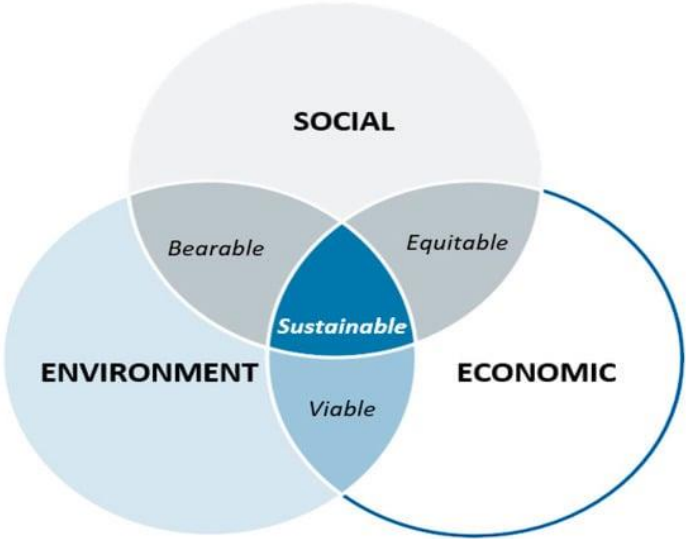
Etapas LCA	Actividades que producen CO ₂	Porcentaje perteneciente de CO ₂ en el LCA	Medidas de mitigación	Porcentaje de reducción de la etapa	Fuente de información
Producción de Materiales	Gran distancia de transporte	86% - 87%	Fabricantes más cercanos, implementar transporte sostenible y plantas alimentadoras con electricidad.	25% - 52%	(X. Chen et al., 2021; Pantini et al., 2018; F. Wang et al., 2021)
	Plantas alimentadas con diésel				
	Maquinaria todo terreno				
Construcción	Retrasos de trafico	63%	Se estableció una ruta alterna para no congestionar el tráfico, se cambió la organización de la construcción de la maquinaria con respecto a los rendimientos.	20% - 20.88%	(Barandica et al., 2013; X. Chen et al., 2021; D. Li et al., 2020; H. Li, Deng, Zhang, Olanipekun, et al., 2019; Y. Liu et al., 2018; Y. Zhang et al., 2021)
	Combustible utilizado				
	Movimiento de tierra (maquinaria pesada)				
Fase de Uso	Macrotextura	62% - 73%	Implementación de estrategias viales para evitar el congestionamiento vehicular, la adaptabilidad de pavimentos de color más claro por el efecto del albedo y el mejoramiento en la estructura y aspereza en el diseño del pavimento.	19.10%	(X. Chen et al., 2021; Y. Liu et al., 2019; Pantini et al., 2018)
	Albedo				
	IRI				
	Rigidez				
	Trafico				
Mantenimiento	Reparación de baches	10.2% - 12%	Utilización de mezclas asfálticas tibias.	7.6% - 9.8%	(H. Li, Deng, Zhang, Olanipekun, et al., 2019; F. Wang et al., 2021)
	Trabajo de fresado				
	Trabajo de recubrimiento				

Fin de Vida	Eutroficación, ecotoxicidad y alteración del habitat	71%	Camiones propulsados por fuentes de energía eléctrica, adopción de tecnología de captura y almacenamiento de carbono, reciclaje de residuo generados para su posterior uso de los desechos sólidos.	59%	(H. Li, Deng, Zhang, Olanipekun, et al., 2019; F. Wang et al., 2021)
	Trituración de caminos				
	Disposición inadecuada de los residuos				
	Traslado de los residuos				

Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo sostenible requiere utilizar menos materias primas naturales debido al alto costo y consumo de energía para su extracción y transporte. El desarrollo sostenible también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y utiliza materiales reciclables sin comprometer los requisitos estándar. La Figura 2.7 muestra que el desarrollo sostenible comprende tres áreas interrelacionadas: desarrollo económico, desarrollo social y preservación del medio ambiente. En detalle, el aspecto económico contribuye a las ganancias y la rentabilidad, mientras que el aspecto social representa la contribución del nivel de vida y la igualdad de oportunidades a la sostenibilidad. Además, el aspecto ambiental refleja los recursos naturales, la prevención de la contaminación y la biodiversidad (Milad et al., 2022).

Figura 2.7. Desarrollo sostenible.



Fuente: Extraído de d’Angelo et al., 2008.

3. Metodología de análisis.

3.1 Descripción específica de la aplicación del modelo al caso de estudio.

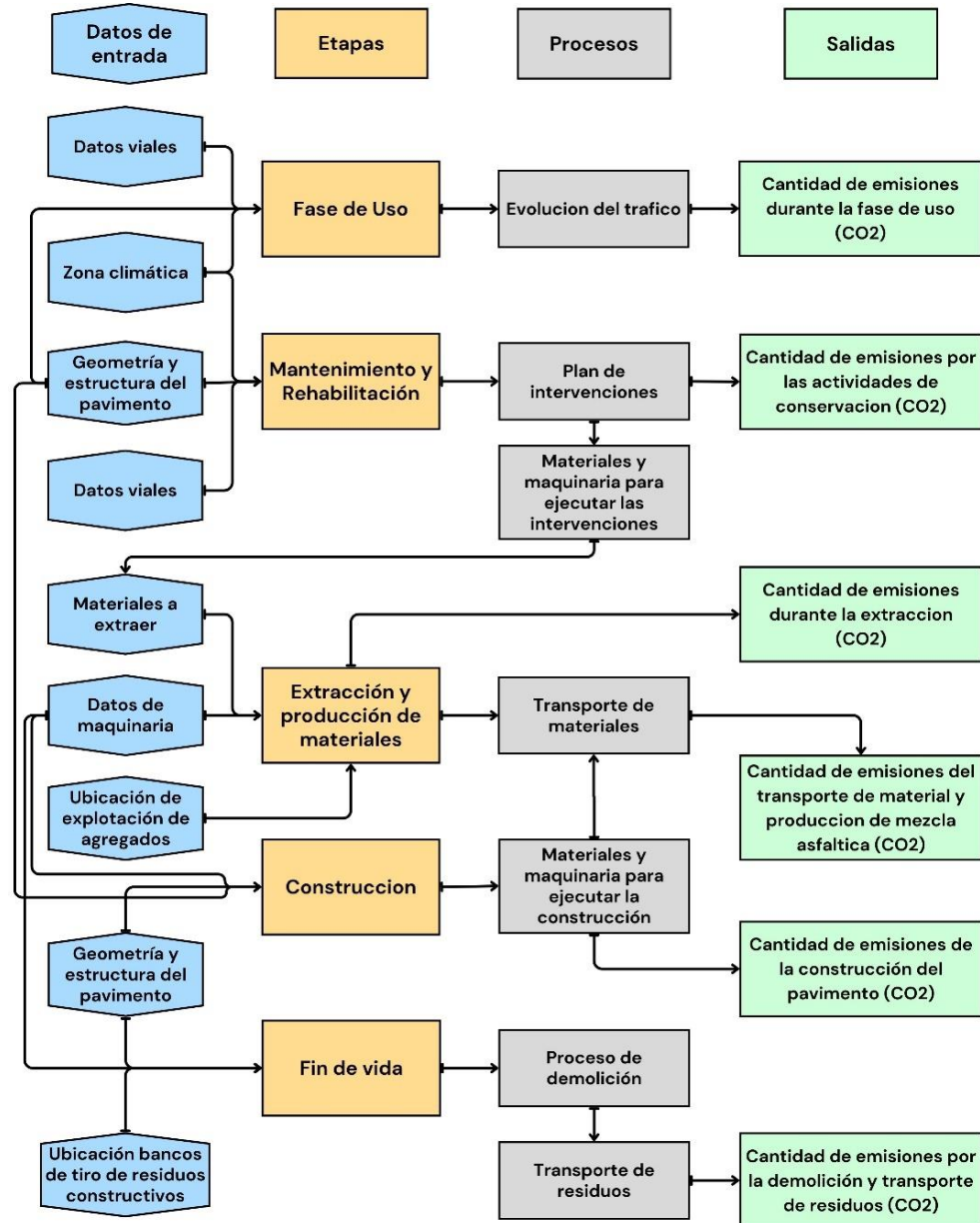
La metodología planteada consiste en un proceso para cuantificar las emisiones que se generan en los distintos procesos o actividades que se involucran en cada una de las etapas del análisis del ciclo de vida del pavimento.

Esta metodología integra los datos de entrada como: la geometría y estructura del pavimento, los datos viales, la zona climática, los materiales a extraer, detalles de la maquinaria, ubicación de los lugares de explotación de agregados y la ubicación de lugares para depositar residuos de construcción. Los datos de entrada son esencial para ejecutar los procesos designados que ubica cada etapa del análisis del ciclo de vida del pavimento, estos mismos datos son analizados para obtener previos resultados como:

- La evolución del tráfico que proviene de la etapa “fase de uso”.
- Los materiales y la maquinaria necesaria para ejecutar las intervenciones que proviene de un plan de intervenciones, que este mismo plan es un resultado de la etapa de “mantenimiento y rehabilitación”.
- El transporte de materiales que proviene de la etapa de “extracción y producción de materiales”.
- El transporte de residuos de construcción que proviene del resultado de un procesos de demolición que su misma vez este resultado proviene de la etapa “fin de vida”.

Finalmente, el análisis brinda la cantidad de emisiones de dióxido de carbono que se generan al transcurso de los diferentes procesos que constituye cada etapa del análisis del ciclo de vida del pavimento. La metodología se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Metodología de Análisis Especifico para el caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Recopilación de datos.

3.2.1 Geometría y estructura del pavimento.

La geometría de un pavimento se refiere a la forma, diseño y características físicas de la carretera, teniendo en cuenta las dimensiones de los carriles por los que circulan los vehículos, la orientación horizontal y vertical, las pendientes y otros aspectos que inciden en la seguridad y el confort del tráfico. La estructura de un pavimento se refiere a la disposición y composición de las

diversas capas de material que componen la carretera, desde la subrasante hasta la superficie de rodadura. La estructura tiene como objetivo dotar de resistencia y durabilidad al pavimento, para soportar las cargas del tráfico y garantizar la seguridad de los usuarios. Para este estudio se utilizaron los datos obtenidos de la auscultación realizada por la SICT (Secretaría de Infraestructura, Construcción y Transporte) en el año 2022. Donde el caso de estudio cuenta con dos carriles (3.5 metros de ancho por carril) y un área de acotamiento (2 metros de ancho) por sentido de vialidad, además cuenta con un ancho de 7.5 metros de camellón. El caso de estudio se visualiza en la Figura 3.2.

Figura 3.2 Tramo del caso de estudio.

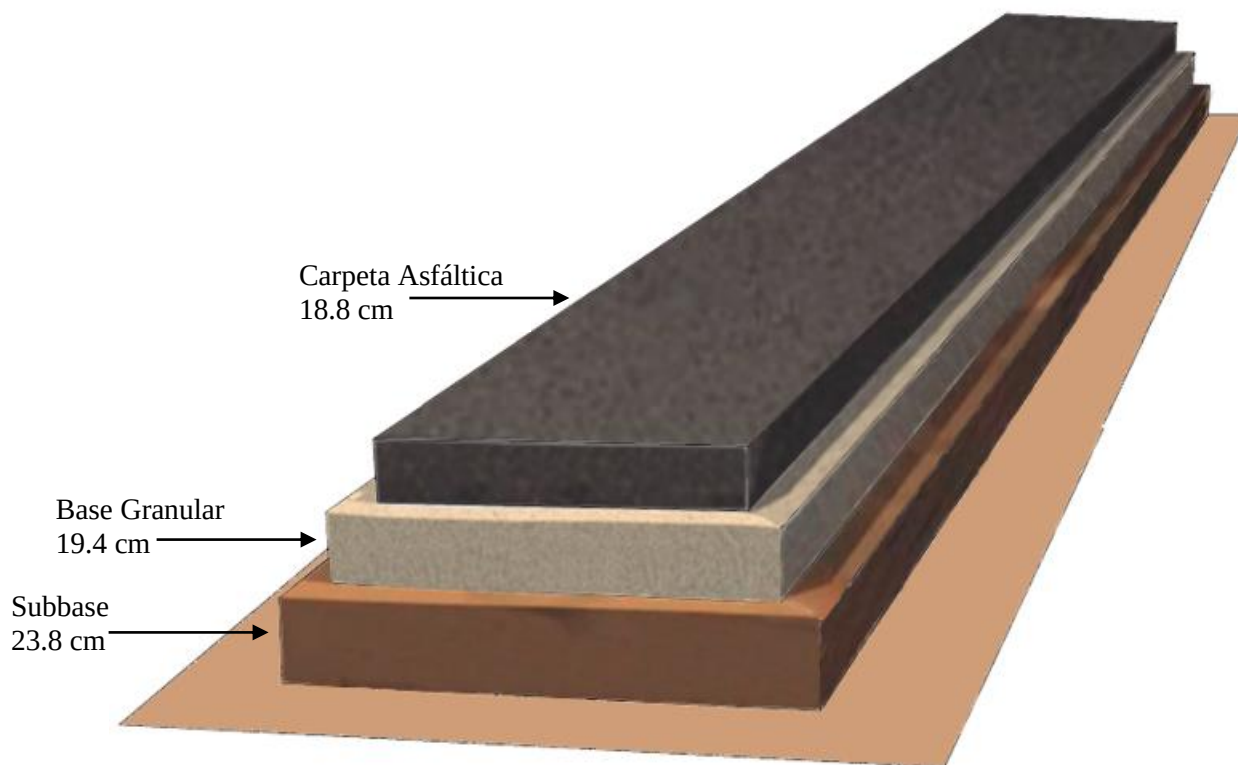


Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los diversos indicadores utilizados para la caracterización de la geometría y condición del pavimento que presenta el caso estudio.

Iniciando por la estructura del pavimento del caso de estudio que está compuesto por 3 capas, la subrasante, la base granular y la capa superficial que es la carpeta asfáltica, como se muestra en la Figura 3.3 con la ilustración de las capas que componen el pavimento flexible, con una longitud total de 7.8 km.

Figura 3.3 Composición estructural del pavimento flexible.



Fuente: Elaboración propia con datos de SCT.

Indicando que la capa de rodadura del tramo de estudio está compuesta por mezcla bituminosa, donde el termino de este tipo mezcla se designa porque todos los materiales en los que un agregado está unido con un aglutinante de hidrocarburos, que es colocada en la capa superficial superior que proporciona la superficie de rodadura para el tráfico (Ingham, 2013).

Para determinar las capacidades estructurales del pavimento del caso de estudio se considera el indicador de desempeño Deflexión (DEF).

La deflexión es la medida de deformación elástica o de recuperación vertical que experimenta un pavimento al paso de una carga, su medición se realiza en forma no destructiva y se utiliza para relacionarla con la capacidad estructural del pavimento (N-SCV-CAR-1-03-010, 2017). Dicho dato fue obtenido por el estudio aplicado en el 2021 por la SICT mediante la obtención de elementos para el pronóstico del comportamiento estructural de pavimento flexible del tramo de estudio, donde se determina que hay una deflexión de 0.46 mm, la obtención de este valor fue por medio de diversos impactos a una fuerza de 700 kPa (kilopascales).

Con el fin de evaluar el estado y la calidad del pavimento en el caso de estudio se considera el valor determinado del IRI (Índice de Rugosidad Internacional), PR (profundidad de rodera) y el

porcentaje de deterioro con respecto al agrietamiento, todos esos valores se obtuvieron mediante un estudio aplicado en el 2022 por la SICT mediante una evaluación de los elementos funcionales de la Red Carretera Federal a través de su auscultación con equipos de alto rendimiento.

EL IRI (Índice de Rugosidad Internacional) es un indicador estadístico de la irregularidad del pavimento y representa la diferencia entre los perfiles longitudinales de una determinada superficie de pavimento con respecto a una superficie plana teórica (Pradena, 2008), donde el tramo de estudio de Mexicali a San Felipe presenta un IRI de 2.48m/km y el tramo de San Felipe a Mexicali cuenta con un IRI de 2.78m/km.

La profundidad de rodera es la deformación vertical permanente del pavimento que se refleja en el perfil transversal y que se presenta como un surco longitudinal a lo largo del camino bajo las huellas de rodamiento, son resultado de la densificación o movimiento lateral de los materiales que constituyen el pavimento flexible por efectos del tránsito (N-CSV-CAR-1-03-009, 2016). En el primer sentido de Mexicali a San Felipe presenta una profundidad media de rodera de 12.27mm a lo largo de todo el tramo y en el otro sentido de San Felipe a Mexicali presenta una profundidad media de rodera de 12.11mm.

El agrietamiento es la principal forma en que falla una estructura de pavimento, causada por la fatiga y el envejecimiento de material, donde el agrietamiento se manifiesta en la capa de rodado, donde una mayor severidad hará menos segura y confortable la circulación vehicular, se elevarán los costos de operación vehicular, los tiempos de viaje, el consumo de combustible y el deterioro del vehículo (Rodríguez Moreno et al., 2013). En el tramo de estudio con dirección de Mexicali a San Felipe se identifica un 36% de área fisurada y en el otro sentido San Felipe a Mexicali se identifica un 8.4% de área fisurada. Lo mencionado anteriormente se resume en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Condiciones estructurales en las que se encuentra la carretera Federal #5 en el año 2022.

Longitud total	7.8 km
Mexicali - San Felipe	
Tipo de material	Mezcla bituminosa
Deflexión	0.46 mm
Rugosidad IRI	2.48 m/km
Área total de fisura	26%
Profundidad media de roderas	12.27 mm
San Felipe - Mexicali	
Tipo de material	Mezcla bituminosa
Deflexión	0.46 mm
Rugosidad IRI	2.78 m/km
Área total de fisura	8.4%
Profundidad media de roderas	12.11 mm

Fuente: Elaboración propia con datos de SCT.

Para la evaluación del pavimento se utilizaron varios indicadores, entre los más utilizados para la evaluación es el IRI, PR y el porcentaje de deterioro con respecto al agrietamiento. Por tanto, los datos recopilados en la Tabla 3.1 se clasifican según los criterios que se muestran en la Tabla 3.2

Tabla 3.2. Criterios de clasificación de las condiciones del pavimento según el grado de deterioro.

Grado de deterioro	Agrietamiento (%)	Desprendimiento de agregados (%)	N° de baches por km	Rotura de borde (m ² por km)	Profundidad media de rodera (mm)	Rugosidad (m por km)
Nuevo	0	0	0	0	0	0
Bien	0	1	0	0	2	2
Regular	5	10	0	10	5	4
Pobre	15	20	5	100	15	6
Malo	25	30	50	300	25	8

Fuente: Extraído de Montoya-Alcaraz et al., 2019.

Después de la evaluación del pavimento por medio de los indicadores mencionados anteriormente se determina en que grado de deterioro se encuentran. Se especifica en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Evaluación del pavimento mediante los indicadores del año 2022.

Indicador	Valor	Grado de deterioro
Mexicali - San Felipe		
Rugosidad IRI	2.48 m/km	Bueno
Área total de fisura	26%	Malo
Profundidad media de roderas	12.27 mm	Regular
San Felipe - Mexicali		
Rugosidad IRI	2.78 m/km	Bueno
Área total de fisura	8.4%	Regular
Profundidad media de roderas	12.11 mm	Regular

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Datos viales.

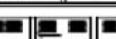
En México, la clasificación de vehículos se divide en tres categorías: vehículos ligeros, vehículos pesados y vehículos especiales. A continuación, se detalla esta clasificación y además en la Figura 3.4 se ilustra de manera esquemática esta categorización, basada en la Norma Oficial Mexicana (NOM-012-SCT, 2008), que establece las dimensiones máximas y el peso permitido para los vehículos de transporte que circulan en las carreteras bajo jurisdicción federal.

Vehículos ligeros: Estos son vehículos con dos ejes o cuatro ruedas.

Vehículos pesados: Se refiere a aquellos vehículos diseñados para transportar carga o pasajeros y que cuentan con dos o más ejes y seis o más ruedas.

Vehículos especiales: Están destinados para usos específicos, como camiones y remolques especiales utilizados para el transporte de maquinaria pesada, cargas voluminosas, así como maquinaria agrícola y de construcción que ocasionalmente transitan por las carreteras.

Figura 3.4 Clasificación general de vehículos en México.

Tipo de Vehículo		Número de ejes	Esquemas		Símbolo
			Perfil	Planta	
Ligeros	Automóvil	2			A2
	Camionetas				A'2
Pesados	Autobuses	2			B2
		3			B3
	Camiones	2			C2
		3			C3
					T2-S1
		5			T3-S2
		6			T3-S3
		9			T3-S2-R4
Especiales	Camiones y/o Remolques	Variables			
	Maquinaria agrícola				
	Bicicletas				
	Otros				

Fuente: Extraído de la NOM-012-SCT, 2008.

Al evaluar el estado actual de la vía, es importante tener en cuenta la información vial proporcionada tanto por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), como en ocasiones, por el organismo responsable de administrar la vía en particular. Estos datos se proporcionan anualmente en forma de informes y permiten identificar los tramos con mayor o menor volumen de tráfico, así como otros aspectos importantes como el tráfico medio diario anual (TDPA). Determinar las tasas de crecimiento del tráfico de vehículos es esencial para pronosticar con mayor precisión la vida estimada del pavimento.

De la publicación de Datos Viales de la Dirección General de Servicios Técnicos del 2011 al 2019 y del año 2022, omitiendo los años que afectó la pandemia en la zona (2020 y 2021), se obtuvieron las tasas de crecimiento anual y clasificación vehicular como a continuación se describen en las Tablas 3.4 y 3.5.

Tabla 3.4. Datos viales utilizados para el sentido 1 de Mexicali a San Felipe.

Mex - San Felipe	
Año	TDPA
2011	9117
2012	9066
2013	10146
2014	10293
2015	10170
2016	9972
2017	11427
2018	12254
2019	12015
2022	13475

Fuente: Elaboración propia por medio de Datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos año 2023 (actualizados al 01 de julio).

Tabla 3.5. Datos viales utilizados para el sentido 2 de San Felipe a Mexicali.

San Felipe - Mexicali	
Año	TDPA
2011	8960
2012	9140
2013	10101
2014	10224
2015	8564
2016	9926
2017	11359
2018	12021
2019	11473
2022	11237

Fuente: Elaboración propia por medio de Datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos año 2023 (actualizados al 01 de julio).

En la Tabla 3.6 se muestran los aforos, clasificación vehicular y TDPA del tramo de estudio, información proporcionada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Tabla 3.6 Clasificación vehicular y TDPA del tramo de estudio.

Carretera Mexicali - San Felipe					CLAVE 02096			RUTA: MEX-005		AÑO: 2022		
LUGAR	ESTACION				CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCENTAJE							
	KM	TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Mexicali	0	3	1	13475	6.40%	78.90%	1.70%	4.20%	3.60%	3.60%	1.00%	0.60%
Mexicali	0	3	2	11237	6.70%	79.40%	1.70%	3.70%	4.00%	3.00%	1.00%	0.50%

Fuente: Elaboración propia por medio de Datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos año 2023 (actualizados al 01 de julio).

3.2.3 Estrategias de conservación del pavimento.

Para determinar las estrategias de conservación se generó un plan de intervención a partir de una recopilación y procesamiento de los siguientes elementos de información:

Red de carretera: La organización de la red vial se logra al agrupar segmentos de carreteras que comparten características similares en términos de aspectos clave, como la geometría del diseño, el tipo y estado del pavimento, el volumen y la composición del tráfico, y datos ambientales.

Flota vehicular: Para cada vehículo, es necesario especificar una serie de características físicas, ya que representa una serie de vehículos que varían en términos de tamaño, peso, tipo de carga y características técnicas. Con la finalidad de evaluar el desgaste y el rendimiento de las carreteras bajo una variedad de condiciones de tráfico.

Estándar de IRI: Se refiere a un conjunto de niveles de servicio que se determinan en función del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y se establecen con el propósito de evaluar el rendimiento de los tramos de carretera. Estos niveles se representan en una escala que categoriza el estado de la carretera como “bueno”, “aceptable” o “no satisfactorio”, lo que a su vez determina el nivel de comodidad o incomodidad experimentado por los vehículos al circular sobre la vía. Cuando el IRI es más elevado, esto indica que la superficie de la carretera es más irregular, por lo tanto, es menos cómoda para la conducción. Además, el estándar también incluye umbrales de IRI que se utilizan como referencia para decidir cuándo es necesario llevar a cabo trabajos de conservación periódica o reconstrucción en la carretera.

Por medio del programa HDM-4, se elabora un proyecto que se ajusta al plan de intervención aplicado al tramo carretero que se está analizando, con el fin de determinar las estrategias de conservación del pavimento. A continuación, se presentan los distintos trabajos que se realizan en cada tipo de mantenimiento y conservación según la Guía de Procedimientos y Técnicas de Conservación (SICT, 2014).

Rutinaria: son las acciones de mantenimiento y reparación que se realizan de manera regular en las carreteras y calles para asegurar su buen estado y seguridad de la capa de rodadura, los márgenes, las infraestructuras de drenaje y subdrenaje, el cercado, los cortes, los rellenos, así como todos los componentes de la vía que se encuentran en el área del derecho de vía. Estas intervenciones son esenciales para prevenir daños mayores y prolongar la vida útil de los pavimentos. Algunas de las actividades comunes que se incluyen en las intervenciones rutinarias son: riegos de sello aislado, reparación de baches, limpieza de drenajes, mantenimiento de

señalización vial, mantenimiento de juntas y bordes, restauración del pavimento y retiro de obstáculos

Periódica: La conservación periódica se refiere a todas las labores de restauración que, ya sea de manera regular u ocasional, son requeridas para mantener un camino en un estado adecuado para su uso. Estas acciones son necesarias debido al deterioro progresivo causado por la circulación de vehículos, las inclemencias del clima y otros factores. Algunas de las intervenciones periódicas en pavimentos pueden incluir el riegos de sello, recubrimiento superficial, fresado y reencarpetado, bacheo profundo, mantenimiento de juntas y bordes, restitución de señalamiento horizontal y obras de prevención de derrumbes.

Reconstrucción: esta actividad se caracteriza por su gran amplitud y costes elevados, ya que implica la restauración parcial o completa de la infraestructura de los pavimentos. Esto incluye la recuperación de una porción de la estructura que se somete a un tratamiento de estabilización previo mediante la inclusión de materiales pétreos, productos asfálticos, cemento Portland u otros aditivos. Además, se ocupa del tratamiento de la capa expuesta, la colocación de la porción recuperada y la aplicación de una nueva capa asfáltica. También abarca la reparación o restitución de elementos menores del sistema de drenaje dañados, la instalación de sistemas de subdrenaje y otras labores relacionadas.

Para desarrollar el proyecto del plan de intervención, es necesario alimentarlo con los datos previamente mencionados de las secciones: Geometría y estructura del pavimento y con los Datos viales. Teniendo un periodo de análisis de 30 años, como año de inicio el 2023. Para obtener las intervenciones durante todo el periodo de análisis (30 años) se debe de implementar algunos estándares de conservación, los cuales contienen umbrales para poder definir en que año se debe de ejecutar una intervención rutinaria (bacheo o sello de grietas), periódica (fresado y reencarpetado) o una reconstrucción del pavimento.

En la Tabla 3.7 se presentan los criterios que definen la condición en la que se encuentra el pavimento, estos indicadores son utilizados para definir los umbrales de intervención con respecto a una conservación periódica o una reconstrucción. Además, el criterio para establecer el umbral para el bacheo y sellado de grietas es que haya un total de 25 baches por kilómetro y que el porcentaje de agrietamiento en el tramo de estudio sea del 10%.

Tabla 3.7 Estado físico del pavimento en función del Índice de Regularidad Internacional.

Nombre	Nivel del servicio (IRI, m/km)		
	Bueno	Regular	Malo
Proyecto Intervenciones	≤ 2.5	2.5 – 3.5	> 3.5

Fuente: Elaboración propia con datos de SICT.

Una vez definidos los umbrales se establecen los estándares de conservación utilizados para generar el plan de intervención, como se muestra en la Tabla 3.8. Los estándares fueron integrados de tal manera que en cualquier año el programa HDM-4 pudiera seleccionar un estándar de mantenimiento rutinario, una conservación periódica o una reconstrucción. Además, se formularon especificaciones separadas de los trabajos de fresado y reencarpetado y de reconstrucción por medio del IRI, donde se indicó en el programa que cuando se interviniera con un fresado y reencarpetado ya no la volviera utilizar.

Tabla 3.8 Estándares de implementación con respecto a la conservación periódica, reconstrucción, bacheo y sello de grietas.

Nombre	Umbrales de intervención (IRI, m/km)		Umbral de intervención (no/km)	Umbral de intervención (%)
	Conservación Periódica	Reconstrucción	Bacheo	Sello de grietas
Proyecto Intervenciones	3.5	4.5	25	10%

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo como resultado el siguiente plan de intervenciones que se muestra en las Tablas 3.9 y 3.10 para los dos sentidos del tramo carretero que se está analizando. Durante el periodo de análisis, se observa que el mantenimiento del pavimento en el tramo de Mexicali a San Felipe ha variado a lo largo de los años. Iniciando con un bacheo seguido de un sellado de grietas, para después intervenir con un fresado y reencarpetado en el año 2030. A lo largo de los años, se ha continuado interviniendo en el pavimento con bacheos y sellados de grietas en distintos momentos, culminando en una reconstrucción completa del pavimento en el año 2047.

Por otro lado, en el sentido San Felipe a Mexicali, inicia con un bacheo y continua con la mismas actividades de bacheo hasta llegar al momento de intervenir con un fresado y reencarpetado en el año 2027. Seguidamente, para mantener un buen servicio en la superficie del pavimento es por medio del sellado de grietas.

Tabla 3.9 Plan de intervenciones durante el periodo de análisis (30 años) sentido 1 (Mexicali – San Felipe).

Mexicali - San Felipe		
Año	Descripción	Cantidad de trabajo
2024	Bacheo	34.11
2029	Sello de grietas	6,030.27
2030	Fresado y reencarpetado	54600
2038	Sello de grietas	6,030.27
2040	Bacheo	67.58
	Sello de grietas	6,030.27
2041	Bacheo	82.31
2042	Bacheo	83.78
	Sello de grietas	6030.27
2043	Bacheo	61.93
2044	Bacheo	56.08
	Sello de grietas	6,030.27
2046	Sello de grietas	6,030.27
2047	Reconstrucción	54,600.00
2052	Sello de grietas	5,987.08

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.10 Plan de intervenciones durante el periodo de análisis (30 años) sentido 2 (San Felipe - Mexicali).

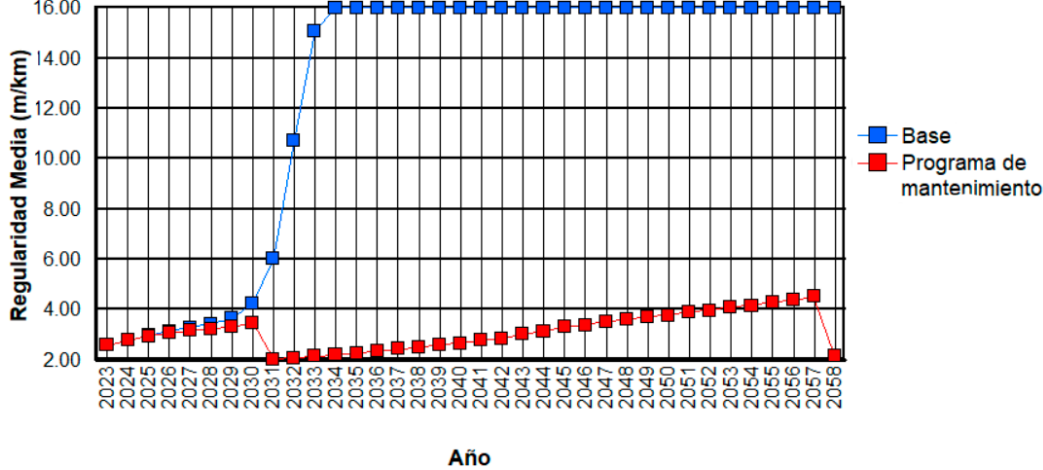
San Felipe - Mexicali		
Año	Descripción	Cantidad de trabajo
2024	Bacheo	30.93
2025	Bacheo	46.16
2026	Bacheo	34.8
2027	Fresado y reencarpetado	54,600
2036	Sello de grietas	5737.09
2038	Sello de grietas	5678.78
2040	Sello de grietas	5608.51
2042	Sello de grietas	5523.67
2044	Sello de grietas	5495.54
2046	Sello de grietas	6030.27
2048	Sello de grietas	6030.27
2050	Sello de grietas	6030.27
2052	Sello de grietas	6030.27

Fuente: Elaboración propia.

La presente grafica representa las condiciones del pavimento en una condición con proyecto y sin proyecto a lo largo del periodo de análisis. La situación sin proyecto se representa por la alternativa base misma que representa la evolución de la condición del pavimento si este no

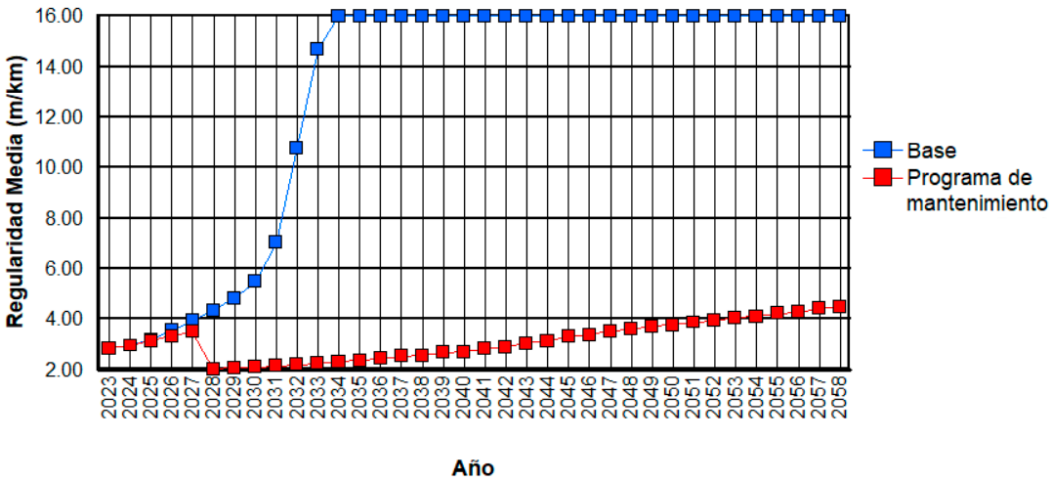
recibiera ninguna estrategia de conservación. Por su parte la situación con proyecto es representada por el programa de mantenimiento mismo que indica las intervenciones que recibirá el tramo y sus efectos en la regularidad del camino, como se muestra en las Figuras 3.5 y 3.6.

Figura 3.5 Grafica de regularidad media sentido Mexicali – San Felipe.



Fuente: Elaboración propia por medio del programa HDM-4.

Figura 3.6 Grafica del indicador del IRI sentido San Felipe - Mexicali.



Fuente: Elaboración propia por medio del programa HDM-4.

En el sentido de Mexicali-San Felipe la situación sin proyecto indica que, a partir del año 2030, la condición del pavimento mostrará una regularidad superficial deficiente. Posteriormente, después del 2031, el pavimento exhibirá una regularidad superficial muy deficiente, lo cual dificultará gravemente el tránsito por la carretera. Mientras tanto, la situación con proyecto muestra cómo se mantiene una regularidad buena y regular por medio del mantenimiento

rutinario (bacheo y sellado de grietas), que a su vez en el año 2030 se realiza un fresado y reencarpetado para mejorar aún más la regularidad superficial del pavimento. Mas tarde, se continúa manteniendo la regularidad del pavimento a través del mantenimiento rutinario hasta el año 2057, cuando se hace necesaria una reconstrucción para mejorar la regularidad superficial del pavimento, como se muestra en la Figura 3.5.

Por otro lado, en el sentido de San Felipe-Mexicali la situación sin proyecto indica que, a partir del año 2027, la condición del pavimento mostrará una regularidad superficial deficiente. Posteriormente, después del 2030, el pavimento exhibirá una regularidad superficial muy deficiente, lo cual dificultará gravemente el tránsito por la carretera. Mientras tanto, la situación con proyecto muestra cómo se mantiene una regularidad buena y regular por medio del mantenimiento rutinario (bacheo y sellado de grietas), que a su vez en el año 2027 se realiza un fresado y reencarpetado para mejorar aún más la regularidad superficial del pavimento. Después se continúa manteniendo la regularidad del pavimento a través del mantenimiento rutinario hasta el año 2057 durante todo el periodo de análisis para mejorar la regularidad superficial del pavimento, como se muestra en la Figura 3.6.

La cuantificación de las emisiones de CO₂ generadas durante las diversas intervenciones a lo largo del periodo de análisis del pavimento se logra mediante un desglose del impacto ambiental que generan las diversas actividades. Este análisis abarca tanto las emisiones asociadas con la maquinaria utilizada para llevar a cabo la obra como aquellas vinculadas a la producción o transporte de los materiales.

3.3 Análisis de las emisiones generadas por las diversas intervenciones.

3.3.1 Bacheo.

El bacheo en los pavimentos se refiere al proceso de reparación de baches, agujeros u otros deterioros de la superficie de la carretera, los baches suelen formarse debido a diversos factores, como el desgaste natural, la existencia del tráfico vehicular constante, las condiciones climáticas adversas, la presencia de agua y la falta de mantenimiento adecuado. Choi, (2019) menciona que para realizar 50m² de bacheo considerando solamente el asfalto y el compactador de platos se generan 38 kgCO₂. Con una relación de 0.76 kgCO₂ por 1m² de bacheo realizado.

Para determinar las emisiones que se generan durante todo el periodo de análisis del pavimento por las intervenciones del bacheo, es por medio de la multiplicación de la cantidad de trabajo

(m²) que se muestra en la Tabla 3.9 y 3.10 por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al atender el bacheo.

3.3.2 Sello de grietas.

El sellado de grietas es un proceso de mantenimiento preventivo que implica aplicar un sellador en las grietas para evitar la entrada de agua. Este método ayuda a prevenir la expansión de las grietas, prolonga la vida útil del pavimento, evita daños mayores y mejora la apariencia estética.

Torres-Machi et al., (2018) menciona que durante el proceso de trabajo del sello de grietas en los pavimentos flexibles se genera 0.11 kgCO₂/m².

Para determinar las emisiones que se generan durante todo el periodo de análisis del pavimento por las intervenciones del sellado de grietas, es por medio de la multiplicación de la cantidad de trabajo (m²) que se muestra en la Tabla 3.9 y 3.10 por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al atender el sellado de grietas.

3.3.3 Fresado y reencarpetado.

En la Tabla 3.9 del sentido Mexicali - San Felipe se establece un fresado y reencarpetado en el año 2030 sobre toda la carpeta de rodadura del pavimento, el fresado es de una profundidad de 5cm y después un reencarpetado de 5cm. La cantidad total de trabajo es de 54,600m².

Para la producción de mezcla asfáltica se consideró la planta llamada “Asfaltos Técnicos de la Baja” ubicada por la carretera estatal número 2, parcela 89, Michoacán de Ocampo km 2.3, B.C., teniendo en consideración que para producir mezcla asfáltica en caliente se necesita la composición del 60% de agregados gruesos y 40% de agregados finos, además un 5% de asfalto de la cantidad total de agregados. Se consultó el Inventario Nacional de Bancos de Materiales que proporciona la SICT (secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte) para identificar el banco de materiales más cercano a la planta que produce asfalto, dicho banco de materiales debe de cumplir con lo necesario para producir los insumos mencionados anteriormente para generar con éxito la mezcla asfáltica en caliente.

En la extracción de los materiales para la elaboración de la mezcla asfáltica interfiere el uso de la maquinaria, por esta misma sustracción del agregado grueso se genera 2.43 kgCO₂ al extraer una tonelada y para el agregado fino se genera 8.60 kgCO₂ (F. Ma et al., 2021), para producir aglomerante asfáltico se generan 174.244 kgCO₂ por tonelada (Eurobitume, 2012), como se muestra en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Composición de los materiales para la elaboración de mezcla asfáltica densa, el CO₂ generado por la extracción de los materiales pétreos y producción de aglomerante asfáltico (fresado y reencarpetado).

Material	% Composición	Material (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Peso (kg)	Peso (ton)	KgCO ₂ /t
Agregado grueso	60%	3,767.4	1,528	5,756,976	5,756.98	2.43
Agregado fino	40%	2,511.6	1,420	3,566,472	3,566.47	8.69
Asfalto	5%	S/N		466,172.4	466.17	174.224

Fuente: Elaboración propia

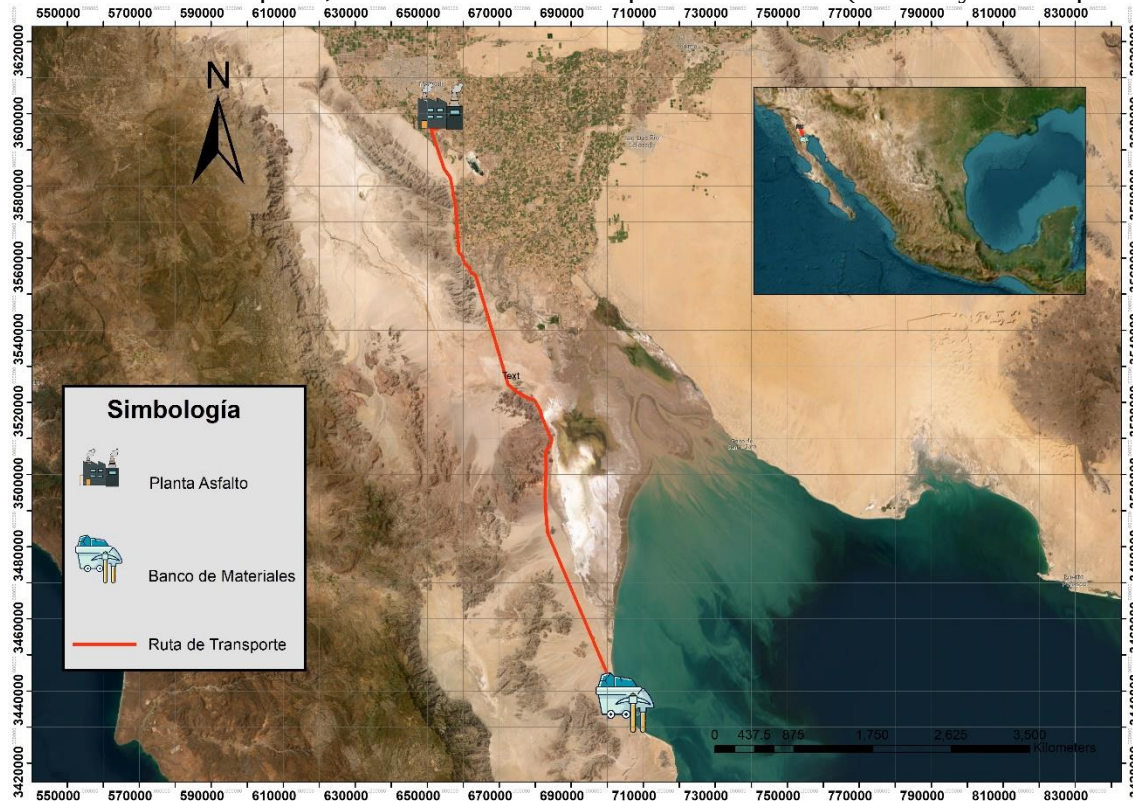
Para determinar las emisiones que se generan en la sustracción de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Calcular la cantidad de material para la elaboración de mezcla asfáltica considerando el factor de compactación del 15%.
- Determinar la cantidad de cada tipo de material necesario con respecto al porcentaje de composición del total de mezcla asfáltica que se necesita elaborar.
- Multiplicar el volumen de material por su densidad para obtener el peso en kilogramos.
- Convertir el peso de kilogramos a toneladas.
- Obtener la cantidad de emisiones por medio de la multiplicación del factor de CO₂ que se genera al extraer una tonelada de cada tipo de material que se muestra en la Tabla 3.11.

El transporte de los materiales para la mezcla asfáltica es desde el banco de materiales llamado “Los Gavilanes” ubicado en la franja exterior de la ciudad de San Felipe hacia la planta de asfalto llamada “Asfaltos Técnicos de la Baja”.

Teniendo un recorrido de 188.56 km de distancia desde el banco de materiales hasta la planta de asfalto como se muestra en la Figura 3.7. El transporte de los materiales es por medio de un camión de volteo con capacidad de 30m³, mejor conocido como camión góndola. El cálculo para transportar el material conlleva el uso de un cargador frontal con un rendimiento de 150m³/hr para colocar el material dentro del camión góndola el cual tiene la capacidad de transportar 30m³ por viaje, el cual genera 1.84 kgCO₂ por kilómetro recorrido (Celauro et al., 2015). Además, se considera que el consumo de 1 litro de diésel genera aproximadamente 2.69 kgCO₂ (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Figura 3.7 Ruta de transporte, banco de materiales – planta de asfalto (fresado y reencarpetado).



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las emisiones que se generan por el transporte de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Determinar el volumen de material de traslado considerando el factor de abundamiento del 12% (agregados gruesos y finos).
- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de material que debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m³.
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Para determinar la cantidad de viajes del camión góndola es por medio de la división entre el total del material que se debe de trasladar entre la capacidad del camión.
- Las emisiones totales que se generan por el traslado del camión desde el banco de materiales a la planta de asfalto se obtienen por la multiplicación de la cantidad de viajes

por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

Para determinar las emisiones de CO₂ que se genera al producir la cantidad necesaria para llevar a cabo el trabajo del fresado y reencarpetado es por medio de los siguientes puntos:

Ma et al., (2019) menciona que al producir 1m³ de mezcla asfáltica en caliente se generan 45.51 kgCO₂.

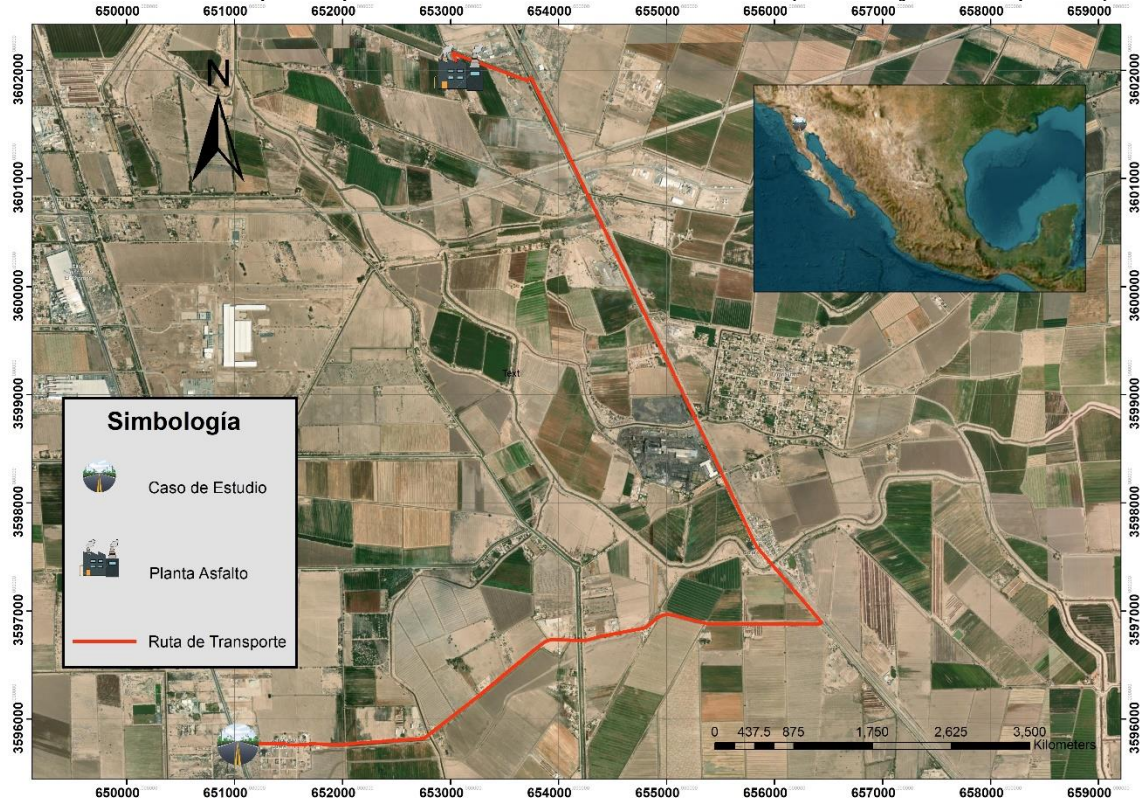
- Determinar el volumen de mezcla asfáltica necesaria para el reencarpetado.
- Multiplicar los metros cúbicos de mezcla asfáltica por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al momento de producir 1m³.

Este resultado es solamente la cantidad de emisiones de CO₂ que genera una planta de producción de mezcla asfáltica en caliente.

El transporte de la mezcla asfáltica lleva un recorrido de 11.72 kilómetros desde la ubicación de la planta de asfalto hasta la ubicación del tramo carretero donde se aplicará el reencarpetado (caso de estudio) como se muestra en la Figura 3.8. Para transportar la mezcla asfáltica se utiliza el camión góndola de 30m³. Para determinar las emisiones de CO₂ que se genera al transportar la mezcla asfáltica al tramo de estudio es por medio de los siguientes puntos:

- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de la mezcla asfáltica que debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m³.
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Determinar la cantidad de viajes del camión góndola mediante la división del volumen total de mezcla asfáltica que se debe de transportar entre la capacidad del camión góndola.
- Multiplicar la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

Figura 3.8 Ruta de transporte, planta de asfalto – caso de estudio (fresado y reencarpetado).



Fuente: Elaboración propia.

Trabajo de la maquinaria del Fresado y Reencarpetado.

Para atender los 54,600m² de fresado y reencarpetado se necesita una fresadora de pavimento, tendedora de asfalto, rodillo liso y compactador neumático, los cuales tienen el siguiente rendimiento de trabajo y la cantidad de combustible que consumen por hora como se muestra en la Tabla 3.12. Mencionando que en el consumo de 1 litro de diésel genera aproximadamente 2.69 kgCO₂ (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Tabla 3.12 Rendimientos y consumo de combustible de la maquinaria (fresado y reencarpetado).

Maquinaria necesaria	Rendimiento	Unidad de consumo
Fresadora de pavimento	500 m ² /hr	37 lts/hr
Tendedora de asfalto	1000 m ² /hr	18,1 lts/hr
Rodillo liso	400 m ² /hr	10 lts/hr
Compactador neumático	400 m ² /hr	10 lts/hr

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la cantidad de las emisiones generadas por el trabajo de la maquinaria es de la siguiente manera:

- Determinar el área total de trabajo en metros cuadrados.
- Calcular las horas de trabajo de la maquinaria con respecto a su rendimiento durante todo el periodo de operación para concluir la intervención.
- Obtener el total de litros consumidos de cada tipo de maquinaria con respecto al total de las horas de trabajo.
- Las emisiones que se generan por el uso de los diferentes tipos de maquinaria se adquieren por medio de la multiplicación de los litros de diésel consumidos por el factor 2.69 kg de CO₂.

Considerando que lo mencionado anteriormente es para poder cuantificar las emisiones del uso de la maquinaria, la producción y traslado de los materiales solo fue descrito para el sentido 1 (Mexicali – San Felipe), por lo tanto, para cuantificar las emisiones del otro sentido es por medio de los mismos pasos.

3.3.4 Reconstrucción.

3.3.4.1 Diseño Dispav-5.

Con el propósito de atender la reconstrucción del pavimento en el año 2047 como lo indica la Tabla 3.9, se diseñó un nuevo pavimento con diferentes espesores de las capas con respecto a la estructura del pavimento existente. El diseño se realizó por medio del programa Dispav-5, el cual es un programa interactivo que utiliza conceptos teórico-empíricos para diseñar secciones estructurales de pavimentos flexibles de caminos normales y de grandes especificaciones (Castillo et al., 2014).

Para llevar a cabo el diseño del pavimento se emplearon los siguientes puntos:

1. Definir el tipo de diseño

Se debe seleccionar la categoría del camino en función de la relevancia y la magnitud del tráfico que se anticipa durante la vida del proyecto. En este caso el camino es importante, con un tránsito de vehículos de flujo considerable, por lo tanto, se estima que lo apropiado es aplicar el diseño como “caminos de altas especificaciones, en los que se desea conservar un nivel de servicio alto al final de la vida del proyecto”.

2. Tránsito del proyecto

Se desconoce el tránsito en el carril de proyecto en millones de ejes estándar, en consecuencia, es necesario calcularlo a partir del tránsito mezclado. La información de esta sección se llenó por medio de la Tabla 3.6, que especifica el TDPA del año en el que se empleara la reconstrucción, la tasa de crecimiento anual del tránsito, el periodo de años del diseño y el tipo de camino, además se emplea la utilización de los pesos según la Norma NOM-012-SCT-2017 para poder actualizar los pesos.

Tabla 3.6 Datos del tránsito de proyecto.

TDPA en el carril del proyecto (en vehículos):	13475
Tasa de crecimiento anual del tránsito en %:	2%
Periodo de proyecto en años:	15
Tipo de camino:	Tipo A

Fuente: Elaboración propia.

3. Composición del tránsito y carga de los vehículos comerciales.

Se considera la Tabla 3.6 de los datos viales donde se muestra la distribución del tránsito, teniendo cuenta que la suma de los porcentajes debe de ser un 100%.

El porcentaje de vehículos cargados para cada uno de los tipos de vehículos se define por medio de la opción “emplear porcentaje de vehículos cargados aplicable a todos los vehículos comerciales” que proporciona el programa, donde se emplea un 70%.

Por medio de la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 se ajustan los valores de la carga que ejercen los distintos vehículos que se consideran en la distribución del tránsito ya que las presiones de contacto de las llantas tienen un efecto significativo en las capas cercanas a la superficie de rodamiento, para definir los valores es por medio de la configuración de ejes, el tipo de vehículo y el tipo de camino. Una vez calculado el tránsito acumulado de proyecto, se define el valor para el daño superficial de 15cm y el valor para el daño profundo de 90cm.

4. Propiedades de los materiales disponibles para el proyecto y valor relativo de soporte de los materiales no aglutinados

La sección estructural del nuevo diseño del pavimento está constituida por carpeta, base granular, sub-base y terracería. Los valores de CBRz% de las diferentes capas del pavimento son basadas en lo que indica la Normativa para la Infraestructura del Transporte en la sección de las

características de los materiales para pavimentos, estos valores se resumen en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Valores de Soporte de California de las distintas capas del pavimento.

Capa	CBRz%
Base granular	100
Sub-base	60
Terracería	5

Fuente: Elaboración propia con datos de (N-CMT-1-01, 2021; N-CMT-4-02-001, 2021; N-CMT-4-02-002, 2022).

5. Módulos de rigidez de los materiales

De acuerdo al Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos Para Las Carreteras de La República Mexicana se considera que la carpeta asfáltica como mínimo debe tener 35,000 kg/cm².

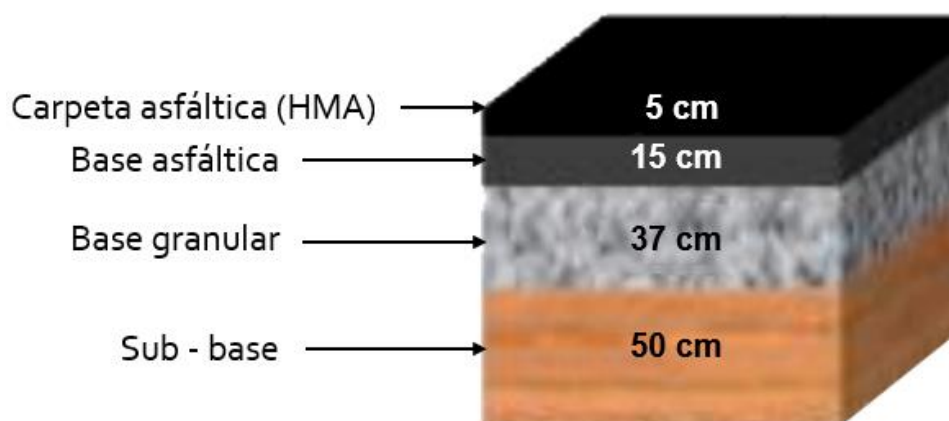
6. Relación de Poisson y el nivel de confianza

Se utilizan los valores de Poisson que genera el programa para cada tipo de material y con un nivel de confianza del proyecto de 85%.

7. Modificar diseño

Por cuestiones de mejorar y optimizar el diseño, se implementó la capa de base asfáltica con el motivo de brindar durabilidad, estabilidad sobre la capacidad de carga del pavimento, ayudando a disminuir los espesores de la demás capas (base granular y sub-base). Además, para que proporcione una base sólida sobre la cual se pueda colocar la capa de rodadura y que ayude a distribuir las cargas del tráfico de manera uniforme. Finalmente, en la Figura 3.9 se muestra el nuevo diseño del pavimento.

Figura 3.9 Estructura del nuevo diseño del pavimento flexible.



Fuente: Elaboracion propia.

3.3.4.2 Capa sub-base

En la extracción de los materiales para la elaboración de la sub-base interfiere el uso de la maquinaria, por esta misma sustracción del agregado grueso se genera 2.43 kgCO₂ al extraer una tonelada y para el agregado fino se genera 8.60 kgCO₂ (Ma et al., 2021), como se muestra en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14 Composición de materiales para la elaboración de la sub-base y el CO₂ generado por la extracción.

Material	% Composición	Material (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Peso (kg)	Peso (ton)	KgCO ₂ /t
Agregado grueso	50%	8,225.5	1,528	12,568,564	12,568.56	2.43
Agregado fino	50%	8,225.5	1,420	11,680,210	11,680.21	8.69

Fuente: Elaboración propia.

Considerando que para la capa de la sub-base no se remueve el material existente, por lo tanto, se coloca el material requerido para cubrir el espesor del nuevo diseño.

Para determinar las emisiones que se generan en la sustracción de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

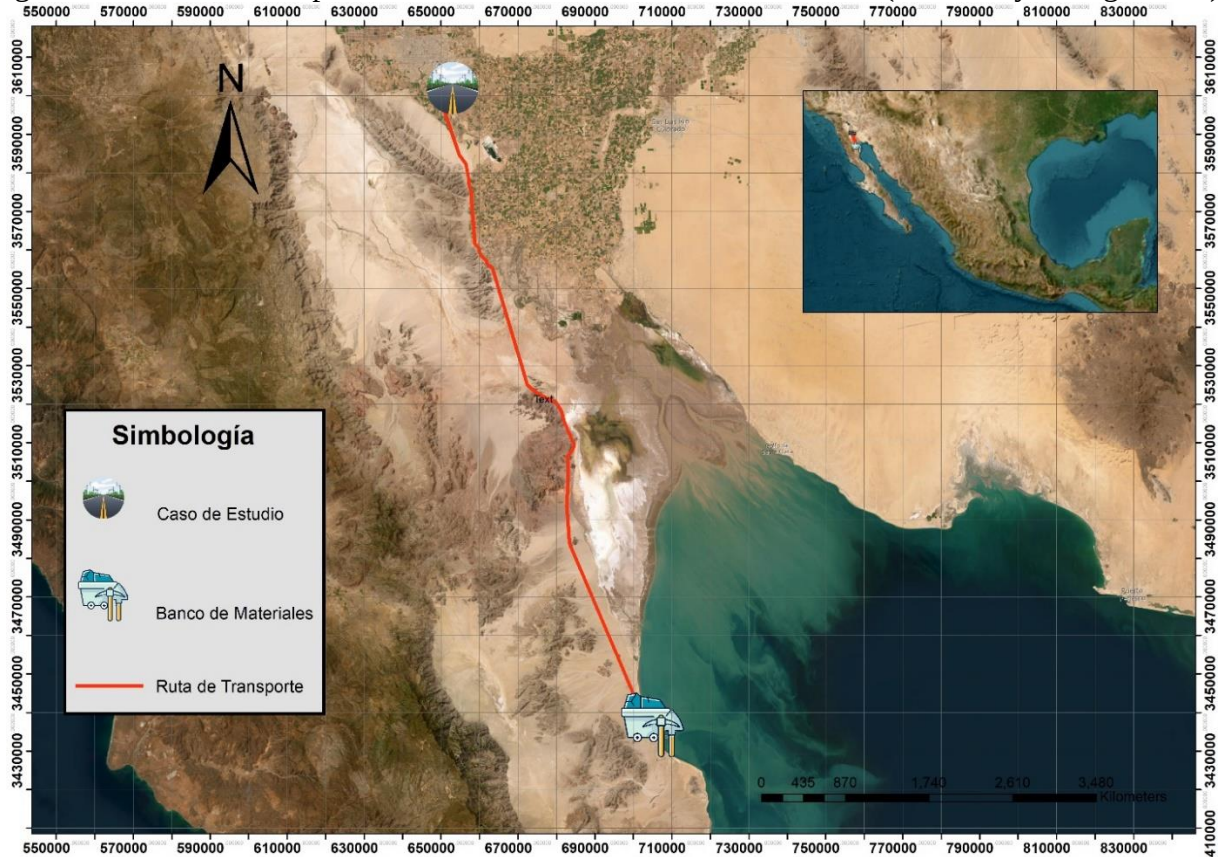
- Calcular la cantidad de material para la elaboración de la sub-base considerando el factor de compactación del 15% y restando el volumen del material ya existente de la sub-base.
- Determinar la cantidad de material necesario con respecto al porcentaje de composición del total del material para la sub-base que se necesita elaborar.
- Multiplicar el volumen de material por su densidad para obtener el peso en kilogramos.

- Convertir el peso de kilogramos a toneladas.
- Obtener la cantidad de emisiones por medio de la multiplicación del factor de CO₂ que se genera al extraer una tonelada de cada tipo de material como se muestra en la Tabla 3.14.

El transporte del material para elaborar la sub-base es desde el banco de materiales llamado “Los Gavilanes” ubicado en una franja exterior de la ciudad de San Felipe hacia el caso de estudio.

Teniendo un recorrido de 177 km de distancia desde el banco de materiales hasta el caso de estudio donde se reconstruirá el pavimento como se muestra en la Figura 3.10. El transporte de los materiales es por medio de un camión de volteo con capacidad de 30m³, mejor conocido como camión góndola. El cálculo para transportar el material conlleva el uso de un cargador frontal con un rendimiento de 150m³/hr para colocar el material dentro del camión góndola el cual tiene la capacidad de transportar 30m³ por viaje, el cual genera 1.84 kgCO₂ por kilómetro recorrido (Celauro et al., 2015). Además, se considera que el consumo de 1 litro de diésel genera aproximadamente 2.69 kgCO₂ (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Figura 3.10 Ruta de transporte, banco de materiales – caso de estudio (sub-base y base granular).



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las emisiones que se generan por el transporte de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Determinar el volumen de material de traslado considerando el factor de abundamiento del 12% (agregados gruesos y finos).
- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de material que se debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que se debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m³.
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Para determinar la cantidad de viajes del camión góndola es por medio de la división entre el total del material que se debe de trasladar entre la capacidad del camión.
- Las emisiones totales que se generan por el traslado del camión desde el banco de materiales a la planta de asfalto se obtienen por la multiplicación de la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

Trabajo de la maquinaria para la capa de la sub-base.

Para atender los 54,600m² de sub-base con un espesor de 50cm se necesita una motoniveladora y un rodillo liso vibratorio, los cuales tienen el siguiente rendimiento de trabajo y la cantidad de combustible que consumen por hora como se muestra en la Tabla 3.15. Considerando que el rendimiento de la motoniveladora incluye un tratamiento del material con un espesor de 30cm que al ser compactado queda en 25cm aproximadamente.

Tabla 3.15 Rendimientos y consumo de combustible de la maquinaria.

Maquinaria necesaria	Rendimiento	Unidad de consumo
Motoniveladora	270 m ² /hr	15 lts/hr
Rodillo liso vibratorio	120 m ³ /hr	10 lts/hr

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la cantidad de las emisiones generadas por el trabajo de la maquinaria es de la siguiente manera:

- Determinar el área total de trabajo en metros cúbicos (rodillo) y metros cuadrados (motoniveladora).

- Calcular las horas de trabajo de la maquinaria con respecto a su rendimiento durante todo el periodo de operación para concluir la intervención, en el caso de la motoniveladora se efectuarán dos capas.
- Obtener el total de litros consumidos de cada tipo de maquinaria con respecto al total de las horas de trabajo.
- Las emisiones que se generan por el uso de los diferentes tipos de maquinaria se adquieren por medio de la multiplicación de los litros de diésel consumidos por el factor 2.69 kg de CO².

3.3.4.3 Capa base granular.

En la extracción de los materiales para la elaboración de la base granular interfiere el uso de la maquinaria, por esta misma sustracción de agregado grueso y fino, se determina que genera una cantidad de emisiones de CO₂ por el diverso uso de maquinaria y equipo en los bancos de materiales (F. Ma et al., 2021), como se muestra en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Composición de materiales para la elaboración de la base granular y el CO₂ generado por la extracción.

Material	% Composición	Material (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Peso (kg)	Peso (ton)	KgCO ₂ /t
Agregado grueso	60%	13,939.4	1,528	21,299,403	21,299.40	2.43
Agregado fino	40%	9,292.9	1,420	13,195,918	13,195.92	8.69

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las emisiones que se generan en la sustracción de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Calcular la cantidad de material para la elaboración de la base granular considerando el factor de compactación del 15%.
- Determinar la cantidad de material necesario con respecto al porcentaje de composición del total del material para la base granular que se necesita elaborar.
- Multiplicar el volumen de material por su densidad para obtener el peso en kilogramos.
- Convertir el peso de kilogramos a toneladas.
- Obtener la cantidad de emisiones por medio de la multiplicación del factor de CO₂ que se genera al extraer una tonelada de cada tipo de material como se muestra en la Tabla 3.16.

El transporte del material para elaborar la base granular es desde el banco de materiales llamado “Los Gavilanes” ubicado en una franja exterior de la ciudad de San Felipe hacia el caso de estudio.

Teniendo un recorrido de 177 km de distancia desde el banco de materiales hasta el caso de estudio donde se reconstruirá el pavimento como se muestra en la Figura 3.10. El transporte de los materiales es por medio de un camión de volteo con capacidad de 30m^3 , mejor conocido como camión góndola. El cálculo para transportar el material conlleva el uso de un cargador frontal con un rendimiento de $150\text{m}^3/\text{hr}$ para colocar el material dentro del camión góndola el cual tiene la capacidad de transportar 30m^3 por viaje, el cual genera 1.84 kgCO_2 por kilómetro recorrido (Celauro et al., 2015). Además, se considera que el consumo de 1 litro de diésel genera aproximadamente 2.69 kgCO_2 (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Para determinar las emisiones que se generan por el transporte de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Determinar el volumen de material de traslado considerando el factor de abundamiento del 12% (agregados gruesos y finos).
- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de material que debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que se debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m^3 .
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO_2 que se genera al consumir un litro de diésel.
- Para determinar la cantidad de viajes del camión góndola es por medio de la división entre el total del material que se debe de trasladar entre la capacidad del camión.
- Las emisiones totales que se generan por el traslado del camión desde el banco de materiales a la planta de asfalto se obtienen por la multiplicación de la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

Trabajo de la maquinaria para la capa de la base granular.

Para atender los $54,600\text{m}^2$ de base granular con un espesor de 37cm se necesita una motoniveladora y un compactador vibratorio de tambor, los cuales tienen el siguiente rendimiento de trabajo y la cantidad de combustible que consumen por hora como se muestra en

la Tabla 3.17. Considerando que el rendimiento de la motoniveladora incluye un tratamiento del material con un espesor de 20cm que al ser compactado queda en 15cm aproximadamente y otra capa de 25cm que al ser compactado queda 20cm aproximadamente.

Tabla 3.17 Rendimientos y consumo de combustible de la maquinaria.

Maquinaria necesaria	Rendimiento	Unidad de consumo
Motoniveladora	300 m ² /hr	15 lts/hr
Motoniveladora	270 m ² /hr	15 lts/hr
rodillo liso vibratorio	120 m ³ /hr	10 lts/hr

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la cantidad de las emisiones generadas por el trabajo de la maquinaria es de la siguiente manera:

- Determinar el área total de trabajo en metros cúbicos (rodillo) y metros cuadrados (motoniveladora).
- Calcular las horas de trabajo de la maquinaria con respecto a su rendimiento durante todo el periodo de operación para concluir la intervención.
- Obtener el total de litros consumidos de cada tipo de maquinaria con respecto al total de las horas de trabajo.
- Las emisiones que se generan por el uso de los diferentes tipos de maquinaria se adquieren por medio de la multiplicación de los litros de diésel consumidos por el factor 2.69 kg de CO₂.

3.3.4.4 Base asfáltica.

Para la producción de mezcla para la base asfáltica se consideró la planta llamada “Asfaltos Técnicos de la Baja” ubicada por la carretera estatal número 2, parcela 89, Michoacán de Ocampo km 2.3, B.C., teniendo en consideración que para producir mezcla asfáltica en caliente se necesita la composición del 65% de agregados gruesos y 35% de agregados finos, además un 6% de asfalto de la cantidad total de agregados. Se consultó el Inventario Nacional de Bancos de Materiales que proporciona la SICT (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte) para identificar el banco de materiales más cercano a la planta que produce asfalto, dicho banco de materiales debe de cumplir con lo necesario para producir los insumos mencionados anteriormente para generar con éxito la mezcla asfáltica en caliente.

En la extracción de los materiales para la elaboración de la mezcla asfáltica interfiere el uso de la

maquinaria, por esta misma sustracción del agregado grueso se genera 2.43 kgCO₂ al extraer una tonelada y para el agregado fino se genera 8.60 kgCO₂ (F. Ma et al., 2021), para producir aglomerante asfáltico se generan 174.244 kgCO₂ por tonelada (Eurobitume, 2012), como se muestra en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18 Composición de los materiales para la elaboración de mezcla asfáltica densa, el CO₂ generado por la extracción de los materiales pétreos y producción de aglomerante asfáltico (base asfáltica).

Material	% Composición	Material (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Peso (kg)	Peso (ton)	KgCO ₂ /t
Agregado grueso	65%	6,122	1,528	9,354,416	9,354.42	2.43
Agregado fino	35%	3,296.5	1,420	4,681,030	4,681.03	8.69
Asfalto	6%	S/N		842,126.8	842.13	174.224

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las emisiones que se generan en la sustracción de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

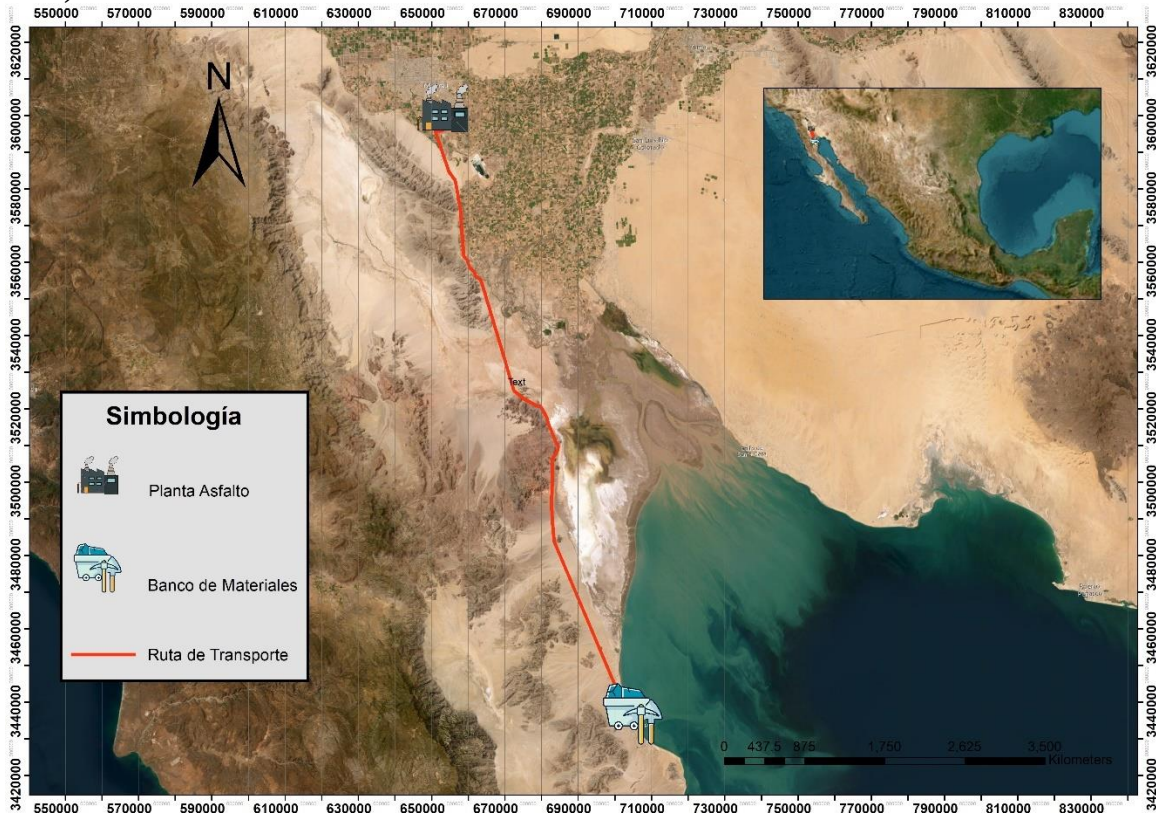
- Calcular la cantidad de material para la elaboración de mezcla asfáltica considerando el factor de compactación del 15%.
- Determinar la cantidad de material necesario con respecto al porcentaje de composición del total de mezcla asfáltica que se necesita elaborar.
- Multiplicar el volumen de material por su densidad para obtener el peso en kilogramos.
- Convertir el peso de kilogramos a toneladas.
- Obtener la cantidad de emisiones por medio de la multiplicación del factor de CO₂ que se genera al extraer una tonelada de cada tipo de material que se muestra en la Tabla 3.18.

El transporte de los materiales para la mezcla asfáltica es desde el banco de materiales llamado “Los Gavilanes” ubicado en una franja exterior de la ciudad de San Felipe hacia la planta de asfalto llamada “Asfaltos Técnicos de la Baja”.

Teniendo un recorrido de 188.56 km de distancia desde el banco de materiales hasta la planta de asfalto como se muestra en la Figura 3.11. El transporte de los materiales es por medio de un camión de volteo con capacidad de 30m³, mejor conocido como camión góndola. El cálculo para

transportar el material conlleva el uso de un cargador frontal con un rendimiento de $150\text{m}^3/\text{hr}$ para colocar el material dentro del camión góndola el cual tiene la capacidad de transportar 30m^3 por viaje, el cual genera 1.84 kgCO_2 por kilómetro recorrido (Celauro et al., 2015). Además, se considera que el consumo de 1 litro de diésel genera aproximadamente 2.69 kgCO_2 (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Figura 3.11 Ruta de transporte, banco de materiales – planta de asfalto (base asfáltica y carpeta asfáltica).



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las emisiones que se generan por el transporte de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Determinar el volumen de material de traslado considerando el factor de abundamiento del 12% (agregados gruesos y finos).
- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de material que debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que se debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m^3 .

- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Para determinar la cantidad de viajes del camión góndola es por medio de la división entre el total del material que se debe de trasladar entre la capacidad del camión.
- Las emisiones totales que se generan por el traslado del camión desde el banco de materiales a la planta de asfalto se obtienen por la multiplicación de la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

La carpeta asfáltica tiene un espesor de 5cm, para determinar las emisiones de CO₂ que se genera al producir la cantidad necesaria para cubrir el área es por medio de los siguientes puntos:

Ma et al., (2019) menciona que al producir 1m³ de mezcla asfáltica en caliente se generan 45.51 kgCO₂.

- Determinar el área total de trabajo en metros cúbicos.
- Multiplicar los metros cúbicos de mezcla asfáltica por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al momento de producir 1m³.

Este resultado es solamente la cantidad de emisiones de CO₂ que genera una planta de producción de mezcla asfáltica en caliente.

El transporte de la mezcla asfáltica lleva un recorrido de 11.72 kilómetros desde la ubicación de la planta de asfalto hasta la ubicación del tramo carretero donde se colocará la base asfáltica (caso de estudio) como se muestra en la Figura 3.12. Para transportar la mezcla asfáltica se utiliza el camión góndola de 30m³. Para determinar las emisiones de CO₂ que se genera al transportar la mezcla asfáltica al tramo de estudio es por medio de los siguientes puntos:

- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de la mezcla asfáltica que debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que se debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m³.
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Determinar la cantidad de viajes mediante la división del volumen total de mezcla asfáltica que se debe de transportar entre la capacidad del camión góndola.
- Multiplicar la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el

factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

Figura 3.12 Ruta de transporte, planta de asfalto – caso de estudio (base asfáltica y carpeta asfáltica).



Fuente: Elaboración propia.

Trabajo de la maquinaria para la carpeta

Para atender los 54,600m² de base asfáltica se necesita una tendedora de asfalto, un rodillo liso y un compactador neumático, los cuales tienen el siguiente rendimiento de trabajo y la cantidad de combustible que consumen por hora como se muestra en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Rendimientos y consumo de combustible de la maquinaria.

Maquinaria necesaria	Rendimiento	Unidad de consumo
Tendedora de asfalto	1000 m ² /hr	18,1 lts/hr
Rodillo liso	400 m ² /hr	10 lts/hr
Compactador neumático	400 m ² /hr	10 lts/hr

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la cantidad de las emisiones generadas por el trabajo de la maquinaria es de la

siguiente manera:

- Determinar el área total de trabajo en metros cúbicos.
- Calcular las horas de trabajo de la maquinaria con respecto a su rendimiento durante todo el periodo de operación para concluir la intervención.
- Obtener el total de litros consumidos de cada tipo de maquinaria con respecto al total de las horas de trabajo.
- Las emisiones que se generan por el uso de los diferentes tipos de maquinaria se adquieren por medio de la multiplicación de los litros de diésel consumidos por el factor 2.69 kg de CO₂.
- Los resultados previstos son el resultado de una capa con el espesor de 5cm, por lo tanto, se multiplica el resultado por 3 debido a que es una capa con un espesor de 15cm.

3.3.4.5 Carpeta asfáltica.

Para la producción de mezcla asfáltica se consideró la planta llamada “Asfaltos Técnicos de la Baja” ubicada por la carretera estatal número 2, de Ocampo km 2.3, parcela 89, Michoacán, B.C., teniendo en consideración que para producir mezcla asfáltica en caliente se necesita la composición del 60% de agregados gruesos y 40% de agregados finos, además un 5% de asfalto de la cantidad total de agregados. Se consultó el Inventario Nacional de Bancos de Materiales que proporciona la SICT (secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte) para identificar el banco de materiales más cercano a la planta que produce asfalto, dicho banco de materiales debe de cumplir con lo necesario para producir los insumos mencionados anteriormente para generar con éxito la mezcla asfáltica en caliente.

En la extracción de los materiales para la elaboración de la mezcla asfáltica interfiere el uso de la maquinaria, por esta misma sustracción del agregado grueso se genera 2.43 kgCO₂ al extraer una tonelada y para el agregado fino se genera 8.60 kgCO₂ (F. Ma et al., 2021), para producir aglomerante asfáltico se generan 174.244 kgCO₂ por tonelada (Eurobitume, 2012), como se muestra en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19 Composición de materiales para la elaboración de mezcla asfáltica densa y el CO₂ generado por la extracción.

Material	% Composición	Material (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Peso (kg)	Peso (ton)	KgCO ₂ /t
Agregado grueso	60%	1,883.7	1,528	2,878,294	2,878.3	2.43
Agregado fino	40%	1,255.8	1,420	1,783,236	1,783.2	8.69
Asfalto	5%	S/N		233,076.5	233.1	174.224

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las emisiones que se generan en la sustracción de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Calcular la cantidad de material para la elaboración de mezcla asfáltica considerando el factor de compactación del 15%.
- Determinar la cantidad de material necesario con respecto al porcentaje de composición del total de mezcla asfáltica que se necesita elaborar.
- Multiplicar el volumen de material por su densidad para obtener el peso en kilogramos.
- Convertir el peso de kilogramos a toneladas.
- Obtener la cantidad de emisiones por medio de la multiplicación del factor de CO₂ que se genera al extraer una tonelada de cada tipo de material que se muestra en la Tabla 3.19.

El transporte de los materiales para la mezcla asfáltica es desde el banco de materiales llamado “Los Gavilanes” ubicado en una franja exterior de la ciudad de San Felipe hacia la planta de asfalto llamada “Asfaltos Técnicos de la Baja”.

Teniendo un recorrido de 188.56 km de distancia desde el banco de materiales hasta la planta de asfalto como se muestra en la Figura 3.11. El transporte de los materiales es por medio de un camión de volteo con capacidad de 30m³, mejor conocido como camión góndola. El cálculo para transportar el material conlleva el uso de un cargador frontal con un rendimiento de 150m³/hr para colocar el material dentro del camión góndola el cual tiene la capacidad de transportar 30m³ por viaje, el cual genera 1.84 kgCO₂ por kilómetro recorrido (Celauro et al., 2015). Además, se considera que el consumo de 1 litro de diésel genera aproximadamente 2.69 kgCO₂ (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Para determinar las emisiones que se generan por el transporte de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Determinar el volumen de material de traslado considerando el factor de abundamiento del 12% (agregados gruesos y finos).
- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de material que debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que se debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m³.
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Para determinar la cantidad de viajes del camión góndola es por medio de la división entre el total del material que se debe de trasladar entre la capacidad del camión.
- Las emisiones totales que se generan por el traslado del camión desde el banco de materiales a la planta de asfalto se obtienen por la multiplicación de la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

La carpeta asfáltica tiene un espesor de 5cm, para determinar las emisiones de CO₂ que se genera al producir la cantidad necesaria para cubrir el área es por medio de los siguientes puntos:

Ma et al., (2019) menciona que al producir 1m³ de mezcla asfáltica en caliente se generan 45.51 kgCO₂.

- Determinar el área total de trabajo en metros cúbicos.
- Multiplicar los metros cúbicos de mezcla asfáltica por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al momento de producir 1m³.

Este resultado es solamente la cantidad de emisiones de CO₂ que genera una planta de producción de mezcla asfáltica en caliente.

El transporte de la mezcla asfáltica lleva un recorrido de 11.72 kilómetros desde la ubicación de la planta de asfalto hasta la ubicación del tramo carretero donde se aplicará el reencarpetado (caso de estudio) como se muestra en la Figura 3.12. Para transportar la mezcla asfáltica se utiliza el camión góndola de 30m³. Para determinar las emisiones de CO₂ que se genera al transportar la mezcla asfáltica al tramo de estudio es por medio de los siguientes puntos:

- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de la mezcla asfáltica que debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que debe de ejecutar para cargar

los camiones de 30m³.

- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Determinar la cantidad de viajes mediante la división del volumen total de mezcla asfáltica que se debe de transportar entre la capacidad del camión góndola.
- Multiplicar la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

Trabajo de la maquinaria para la carpeta

Para atender los 54,600m² de carpeta asfáltica se necesita una tendedora de asfalto, rodillo liso y un compactador neumático, los cuales tienen el siguiente rendimiento de trabajo y la cantidad de combustible que consumen por hora como se muestra en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20 Rendimientos y consumo de combustible de la maquinaria.

Maquinaria necesaria	Rendimiento	Unidad de consumo
Tendedora de asfalto	1000 m ² /hr	18,1 lts/hr
Rodillo liso	400 m ² /hr	10 lts/hr
Compactador neumático	400 m ² /hr	10 lts/hr

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la cantidad de las emisiones generadas por el trabajo de la maquinaria es de la siguiente manera:

- Determinar el área total de trabajo en metros cúbicos.
- Calcular las horas de trabajo de la maquinaria con respecto a su rendimiento durante todo el periodo de operación para concluir la intervención.
- Obtener el total de litros consumidos de cada tipo de maquinaria con respecto al total de las horas de trabajo.
- Las emisiones que se generan por el uso de los diferentes tipos de maquinaria se adquieren por medio de la multiplicación de los litros de diésel consumidos por el factor 2.69 kg de CO₂.

3.4 Análisis de las emisiones generadas por el tránsito durante el periodo de análisis del pavimento.

El modelo se basa en el propuesto por Hammerstrom (1995) y predice las emisiones del escape de los vehículos en función del consumo de combustible y de la velocidad.

El consumo de combustible está en función de la velocidad del vehículo, que a su vez depende de las características del camino y de la propia unidad. De esta manera es posible analizar el cambio en la cantidad de emisiones como resultado de la implementación de diferentes estrategias de mantenimiento y mejora de un camino, o cuando hay cambios mayores en la flota vehicular que transita en la red carretera. Los coeficientes y constantes mencionados en las fórmulas, provienen de diversos estudios con condiciones controladas que han permitido la elaboración de tablas con valores recomendados para su uso en el modelo.

Para determinar la cantidad de emisiones de CO₂ que genera cada tipo de vehículo en la etapa fase de uso, es por medio de la Ecuación 3.1, la cual es basada en un modelo propuesto por Hammerstrom (1995) y predice las emisiones del escape de los vehículos en función del consumo de combustible y de la velocidad.

Los siguientes datos son necesarios para calcular las emisiones:

1. Volumen y composición vehicular en la sección considerada

Es necesario conocer el volumen del tránsito y la composición vehicular para identificar la cantidad de vehículos que transitan por cada tamaño. Debido a la diferencia de consumo de un vehículo ligero a uno pesado, estos datos se muestran en la Tabla 3.21 y 3.22.

Tabla 3.21 Clasificación vehicular y TDPA del tramo de estudio del sentido Mexicali – San Felipe.

Tipo de vehículo	Porcentaje (%)	Cant. vehículos
Vehículos ligero (A-M)	85.3%	11494
Autobús Medio (B)	1.7%	229
Camión (C2)	4.2%	566
Camión pesado (C3)	3.6%	485
Camión Articulado (T3-S2)	3.6%	485
Camión Articulado (T3-S3)	1%	135
Camión Articulado (T3-S2-R4)	0.6%	81
TDPA	100%	13475

Fuente: Elaboración propia por medio de Datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos año 2023 (actualizados al 01 de julio).

Tabla 3.22 Clasificación vehicular y TDPA del tramo de estudio del sentido San Felipe - Mexicali.

Tipo de vehículo	Porcentaje (%)	Cant. vehículos
Vehículos ligero (A-M)	86.1%	9676
Autobús Medio (B)	1.7%	191
Camión (C2)	3.7%	416
Camión pesado (C3)	4%	449
Camión Articulado (T3-S2)	3%	337
Camión Articulado (T3-S3)	1%	112
Camión Articulado (T3-S2-R4)	0.5%	56
TDPA	100%	11237

Fuente: Elaboración propia por medio de Datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos año 2023 (actualizados al 01 de julio).

2. Longitud de la sección

La longitud de la sección es de 7.8 km de distancia en ambos sentidos como se especifica en la Tabla 3.1.

3. Velocidad del vehículo

La velocidad para los diferentes tipos de vehículos es de 65 km/h, ya que es la velocidad máxima

que se permite transitar en el tramo de estudio.

4. El consumo instantáneo de combustible de cada tipo de vehículo

En la Tabla 3.23 se especifica la cantidad de combustible que se consume por cada tipo de vehículo.

Tabla 3.23 Consumo instantáneo de combustible por tipo de vehículo en ml/m.

Tipo de vehículo	lts/100km	ml/m
A - M	8.57	0.086
B	28.6	0.286
C2	10.7	0.107
C3	16.3	0.163
T3-S2	20.5	0.205
T3-S3	23.33	0.233
T3-S2-R4	26.5	0.265

Fuente: Elaboración propia con datos de Bonsu, (2016); Comisión Nacional Para El Uso Eficiente de La Energía, (2023); Jiao & Bienvenu, (2015); Perrotta et al., (2019); Pongthanasawan et al., (2007).

5. Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo para las emisiones de CO₂ se muestran en la Tabla 3.24, son valores que asume el programa HDM-4, los cuales se refieren a un coeficiente o factor de ajuste que se utiliza para reflejar la eficiencia de los vehículos en términos de las emisiones de dióxido de carbono.

Tabla 3.24 Parámetros del modelo para dióxido de carbono.

Veh Nº	Vehicle type	CO ₂
		a0
1	Motorcycle	2.36
2	Small car	2.36
3	Medium car	2.36
4	Large car	2.36
5	Light delivery vehicle	2.36
6	Light goods vehicle	2.36
7	Four wheel drive	2.61
8	Light truck	2.61
9	Medium truck	2.61
10	Heavy truck	2.61
11	Articulated truck	2.61
12	Mini-bus	2.36
13	Light bus	2.61
14	Medium bus	2.61
15	Heavy bus	2.61
16	Coach	2.61

Fuente: Extraído de Hammerstrom, 1995.

Para calcular las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) se utiliza la Ecuación 3.1.

Ecuación 3.1

$$E_{CO_2} = \frac{3.6 a_0 IFC 10^3}{vel}$$

Donde:

E_{CO_2} = Emisiones de CO₂ en gr/vehículo por km

IFC = Consumo instantáneo de combustible, en ml/m

a_0 = Parámetro del modelo

vel = Velocidad del vehículo en km/h

Por otro lado, para obtener los resultados es necesario aplicar la Ecuación 3.2 que utiliza las emisiones de CO₂ generadas por cada tipo de vehículo en gr por cada kilómetro recorrido, el transito promedio anual, la clasificación vehicular y además la distancia total del tramo carretero que se está analizando. Obteniendo la siguiente ecuación:

Ecuación 3.2

$$TEOC = (TDPA * CLV)(E_{CO_2})(D)$$

Donde:

$TEOC$ = Total de emisiones por operación carretera

$TDPA$ = Tránsito diario promedio anual

CLV = Clasificación vehicular

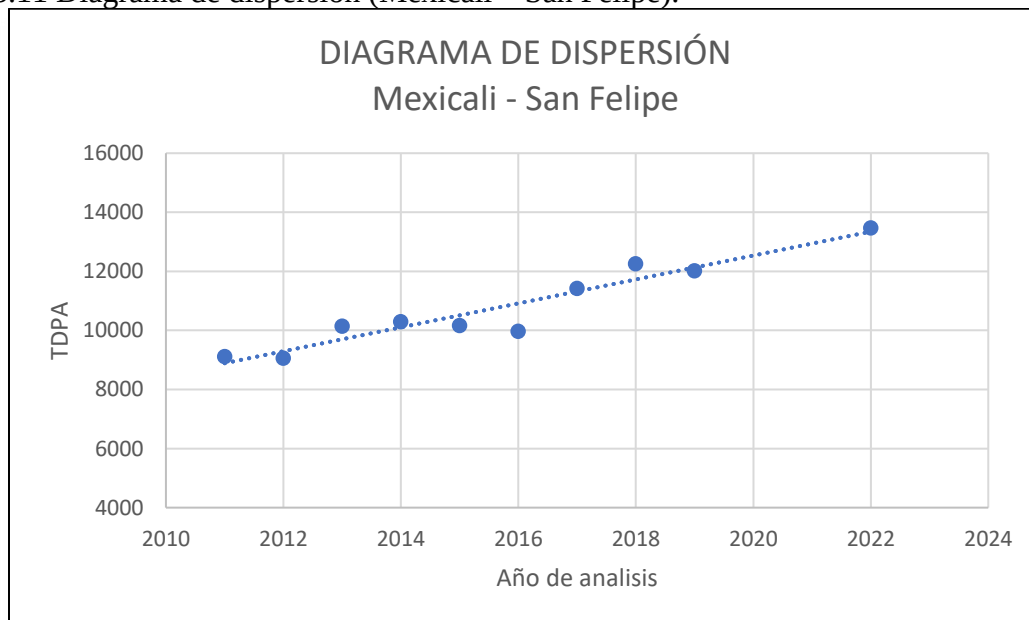
E_{CO_2} = Emisiones de CO_2 en gr/vehículo por km

D = Distancia en kilómetros

Los descrito anteriormente es para calcular las emisiones de CO_2 solamente del año 2022, por lo tanto, para calcular las emisiones de los próximos años es necesario conocer el TDPA durante todo el periodo de análisis. Para calcular el TDPA de los años posteriores al 2022, se realizó un diagrama de dispersión con respecto a los TDPA registrados durante el periodo del 2011 al 2022, omitiendo los años 2020 y 2021 debido a los registros afectados por pandemia del COVID-19.

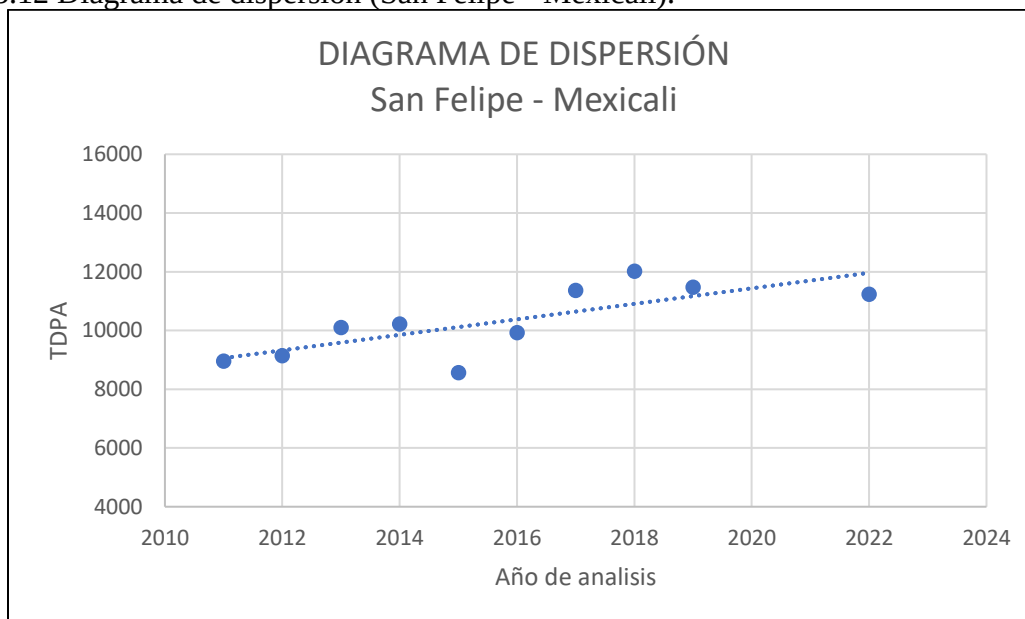
Se elaboraron los diagramas de dispersión por medio del programa Excel, con lo datos de la Tabla 3.4 y 3.5, teniendo como resultado la Figura 3.11 y 3.12, con la Ecuación lineal 3.3 y 3.4.

Figura 3.11 Diagrama de dispersión (Mexicali – San Felipe).



Fuente: Elaboración propia con datos de SICT.

Figura 3.12 Diagrama de dispersión (San Felipe - Mexicali).



Fuente: Elaboración propia con datos de SICT.

Ecuación 3.3

$$Y = 405.07x - 80570$$

Ecuación 3.3

$$Y = 263.87x - 521575$$

Por medio de la Ecuación 3.3 se determina el TDPA de los próximos años del sentido Mexicali a San Felipe, donde la variable “x” es el año que se desea determinar. Se aplica lo mismo para el sentido San Felipe – Mexicali con la ecuación 3.4.

3.5 Análisis de las emisiones generadas por el retiro y disposición final del material desechado del pavimento a su previa reconstrucción.

3.5.1 Retiro y disposición final del fresado y reencarpetado.

Por motivo del que se llevó a cabo un fresado y reencarpetado, el material resultante de la carpeta asfáltica es colocada por medio de un cargador frontal y se vierte en una góndola con una capacidad de 30m³ para ser trasladada al depósito de desechos, en este caso no se consideran las emisiones generadas por la fresadora ya que pertenecen a la etapa de mantenimiento y rehabilitación. El cálculo para transportar el material para desechar conlleva el uso de un cargador frontal con un rendimiento de 150m³/hr para colocar el material dentro del camión góndola el cual tiene la capacidad de transportar 30m³ por viaje, el cual genera 1.84 kgCO₂ por kilómetro recorrido (Celauro et al., 2015). Además, se considera que el consumo de 1 litro de

diésel genera aproximadamente 2.69 kgCO₂ (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Para determinar las emisiones que se generan por el transporte de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Determinar el volumen de material de traslado considerando el factor de abudamiento del 12%.
- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de material que debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m³.
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Para determinar la cantidad de viajes del camión góndola es por medio de la división entre el total del material que se debe de trasladar entre la capacidad del camión.
- Las emisiones totales que se generan por el traslado del camión desde el banco de materiales a la planta de asfalto se obtienen por la multiplicación de la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

3.5.2 Retiro y disposición final de la reconstrucción.

Debido a que se realizó la reconstrucción del pavimento con un nuevo diseño, se retiró el materia que ya no cumplía con la funcionalidad del nuevo pavimento, quitando la capa de base granular y la carpeta asfáltica.

El retiro de la base granular es por medio del escarificador de la motoniveladora para aflojar la capa de la base granular y por medio del cargador frontal colocarlo en la góndola que trasladara el material al lugar de depósito. Para el retiro de la carpeta asfáltica es a través del uso de la fresadora que va removiendo el asfalto mediante el uso de cuchillas rotativas que cortan y levantan el pavimento, con el cargador se coloca el material asfaltico removido en la góndola para ser trasladado al lugar de depósito. Los rendimiento de la maquinaria y el consumo de combustible se muestran en la Tabla 3.25 y la ruta de transporte se ilustra en la Figura 3.13.

Tabla 3.25 Rendimientos y consumo de combustible de la maquinaria.

Maquinaria necesaria	Rendimiento	Unidad de consumo
Fresadora de pavimento	500 m ² /hr	37 lts/hr
Cargador frontal	150 m ³ /hr	8 lts/hr
Motoniveladora	460 m ² /hr	15 lts/hr

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la cantidad de las emisiones generadas por el trabajo de la maquinaria es de la siguiente manera:

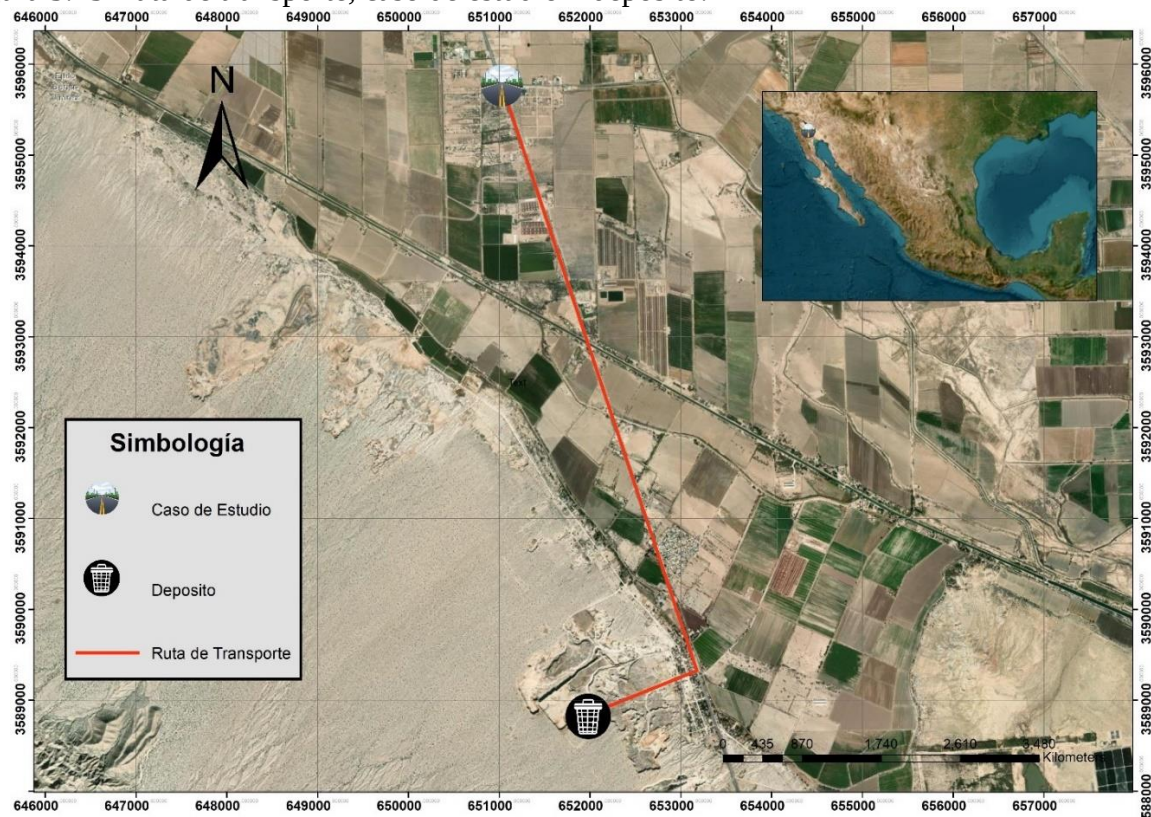
- Determinar el área total de trabajo en metros cuadrados para analizar la motoniveladora y los metros cúbicos la fresadora de pavimento.
- Calcular las horas de trabajo de la maquinaria con respecto a su rendimiento durante todo el periodo de operación para concluir el retiro del material.
- Obtener el total de litros consumidos de cada tipo de maquinaria con respecto al total de las horas de trabajo.
- Las emisiones que se generan por el uso de los diferentes tipos de maquinaria se adquieren por medio de la multiplicación de los litros de diésel consumidos por el factor 2.69 kg de CO₂.

Para determinar las emisiones que se generan por el transporte de los materiales es por medio de los siguientes puntos:

- Determinar el volumen de material de traslado considerando el factor de abundamiento del 12%.
- Calcular las horas de trabajo del cargador frontal con respecto a su rendimiento y el volumen de material que se debe de colocar en el camión góndola.
- Obtener el consumo de diésel (litros) por el trabajo total que debe de ejecutar para cargar los camiones de 30m³.
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO₂ que se genera al consumir un litro de diésel.
- Para determinar la cantidad de viajes del camión góndola es por medio de la división entre el total del material que se debe de trasladar entre la capacidad del camión.
- Las emisiones totales que se generan por el traslado del camión desde el banco de

materiales al lugar de depósito se obtienen por la multiplicación de la cantidad de viajes por la distancia de recorrido de cada viaje (km) y por el factor de emisiones que se genera por cada kilómetro recorrido.

Figura 3.13 Ruta de transporte, caso de estudio – deposito.



Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados.

Una vez descrita la metodología de análisis específico (MAE) se procederá a describir los resultados de investigación

4.1 Emisiones generadas en la etapa de extracción y producción de materiales.

El total de emisiones de CO₂ que se consideran en la atapa “extracción y producción de materiales” contempla el fresado y reencarpetado, la creación de la sub-base, la base granular, base asfáltica, y la carpeta asfáltica, debido al uso de diversos material para la creación de las capas del pavimento, lo cual también conlleva las emisiones generadas por el transporte de estos mismos materiales y las emisiones generadas por la producción de un material en específico (mezcla asfáltica).

4.1.1 Fresado y reencarpetado.

La intervención del fresado y reencarpetado que se implementó en ambos sentidos de la vialidad del caso de estudio se requiere una cantidad de $6,279\text{m}^3$ de mezcla asfáltica de granulometría densa para emplear la nueva carpeta con un espesor de 5cm.

Para llevar a cabo la creación de la carpeta es necesario producir mezcla asfáltica, la cual lleva una composición de agregados gruesos, finos y asfalto, las emisiones generadas para la extracción y producción de estos materiales se muestran en la Tabla 4.1 y las emisiones generadas por el transporte de los agregados del banco de materiales a la planta de asfalto se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1 Emisiones generadas por la extracción de materiales para la mezcla asfáltica densa.

Material	Peso (Ton)	TonCO ₂
Agregado grueso	5,756.98	13.99
Agregado fino	3,566.47	30.99
Asfalto	466.17	81.22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2 Emisiones generadas por el transporte de agregados del banco de materiales a la planta de asfalto.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	7,032.5	47	8 lts/hr	376	1011.4	1.01
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	7,032.5	235	188.56	1.84 KgCO ₂	81,533.3	81.53

Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones que se generan para producir $6,279\text{m}^3$ de mezcla asfáltica se muestran en la Tabla 4.3 y para transportar la mezcla asfáltica de la planta de asfalto al caso de estudio se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.3 Emisiones generadas por la producción de mezcla asfáltica para atender el reencarpetado.

1 m ³ de mezcla asfáltica	45.51 KgCO ₂
6,279 m ³ de mezcla asfáltica	285,757.3 KgCO ₂
6,279 m ³ de mezcla asfáltica	285.76 TonCO ₂

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4 Emisiones generadas por el transporte de mezcla asfáltica de la planta de asfalto al caso de estudio.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	6,279	42	8 lts/hr	336	903.8	0.90
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	6,279	210	11.72	1.84 KgCO ₂	4,528.6	4.53

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Sub-base.

Para llevar a cabo la elaboración de la sub-base, la cual lleva una composición de agregados gruesos y finos, las emisiones generadas por la extracción de estos materiales se muestran en la Tabla 4.5 y las emisiones generadas por el transporte de los agregados del banco de materiales al caso de estudio se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.5 Emisiones generadas por la extracción de materiales para sub-base.

Material	Peso (Ton)	TonCO ₂
Agregado grueso	12,568.56	30.54
Agregado fino	11,680.21	101.50

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6 Emisiones generadas por el transporte de agregados del banco de materiales al caso de estudio.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	18,425.1	123	8 lts/hr	984	2,647	2.65
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	18,425.1	615	177	1.84 KgCO ₂	200,293	200.29

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Base granular.

Para llevar a cabo la elaboración de la base granular, la cual lleva una composición de agregados gruesos y finos, las emisiones generadas por la extracción estos materiales se muestran en la Tabla 4.7 y las emisiones generadas por el transporte de los agregados del banco de materiales al caso de estudio se muestra en la Tabla 4.8.

Tabla 4.7 Emisiones generadas por la extracción de materiales para la mezcla asfáltica densa.

Material	Peso (Ton)	TonCO ₂
Agregado grueso	21,299.40	51.76
Agregado fino	13,195.92	114.67

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8 Emisiones generadas por el transporte de agregados del banco de materiales al caso de estudio.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	26,020.2	174	8 lts/hr	1,392	3,744.5	3.75
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	26,020.2	868	177	1.84 KgCO ₂	282,690	282.69

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Base asfáltica

Para llevar a cabo la elaboración de la base asfáltica es necesario producir mezcla asfáltica, la cual lleva una composición de agregados gruesos, finos y asfalto, las emisiones generadas para la extracción y producción de estos materiales se muestran en la Tabla 4.9 y las emisiones generadas por el transporte de los agregados del banco de materiales a la planta de asfalto se muestra en la Tabla 4.10.

Tabla 4.9 Emisiones generadas por la extracción de materiales para la mezcla asfáltica densa.

Material	Peso (Ton)	Ton CO ₂
Agregado grueso	9,354.42	22.73
Agregado fino	4,681.03	40.68
Asfalto	842.13	146.74

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.10 Emisiones generadas por el transporte de agregados del banco de materiales a la planta de asfalto.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	10,548.7	71	8 lts/hr	568	1,527.9	1.53
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	10,548.7	352	188.7	1.84 KgCO ₂	122,217	122.22

Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones que se generan para producir 9,418.5m³ de mezcla asfáltica se muestran en la Tabla 4.11 y para transportar las mezcla asfáltica de la planta de asfalto al caso de estudio se muestra en la Tabla 4.12.

Tabla 4.11 Emisiones generadas por la producción de mezcla asfáltica para atender el reencarpetado.

1 m ³ de mezcla asfáltica	45.51 KgCO ₂
9,418.5 m ³ de mezcla asfáltica	428,635.9 KgCO ₂
9,418.5 m ³ de mezcla asfáltica	428.64 TonCO ₂

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.12 Emisiones generadas por el transporte de mezcla asfáltica de la planta de asfalto al caso de estudio.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	9,418.5	63	8 lts/hr	504	1,355.8	1.36
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	9,418.5	314	11.72	1.84 KgCO ₂	6,771.3	6.77

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Carpeta asfáltica.

Para llevar a cabo la creación de la carpeta es necesario producir mezcla asfáltica, la cual lleva una composición de agregados gruesos, finos y asfalto, las emisiones generadas para la extracción y producción de estos materiales se muestran en la Tabla 4.13 y las emisiones generadas por el transporte de los agregados del banco de materiales a la planta de asfalto se muestra en la Tabla 4.14.

Tabla 4.13 Emisiones generadas por la extracción de materiales para la mezcla asfáltica densa.

Material	Peso (Ton)	Ton CO ₂
Agregado grueso	2,878.29	6.99
Agregado fino	1,783.24	15.50
Asfalto	233.08	40.61

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14 Emisiones generadas por el transporte de agregados del banco de materiales a la planta de asfalto.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	3,516.2	24	8 lts/hr	192	516.5	0.52
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	3,516.2	118	188.56	1.84 KgCO ₂	40,940.1	40.94

Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones que se generan para producir 3,139.5m³ de mezcla asfáltica se muestran en la Tabla 4.15 y para transportar las mezcla asfáltica de la planta de asfalto al caso de estudio se muestra en la Tabla 4.16.

Tabla 4.15 Emisiones generadas por la producción de mezcla asfáltica para atender el reencarpetado.

1 m ³ de mezcla asfáltica	45.51 KgCO ₂
3,139.5 m ³ de mezcla asfáltica	142,878.6 KgCO ₂
3,139.5 m ³ de mezcla asfáltica	142.88 TonCO ₂

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.16 Emisiones generadas por el transporte de mezcla asfáltica de la planta de asfalto al caso de estudio.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	3,139.5	21	8 lts/hr	168	451.9	0.45
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	3,139.5	105	11.72	1.84 KgCO ₂	2,264.3	2.26

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6 Total de emisiones generadas en la extracción y producción de materiales.

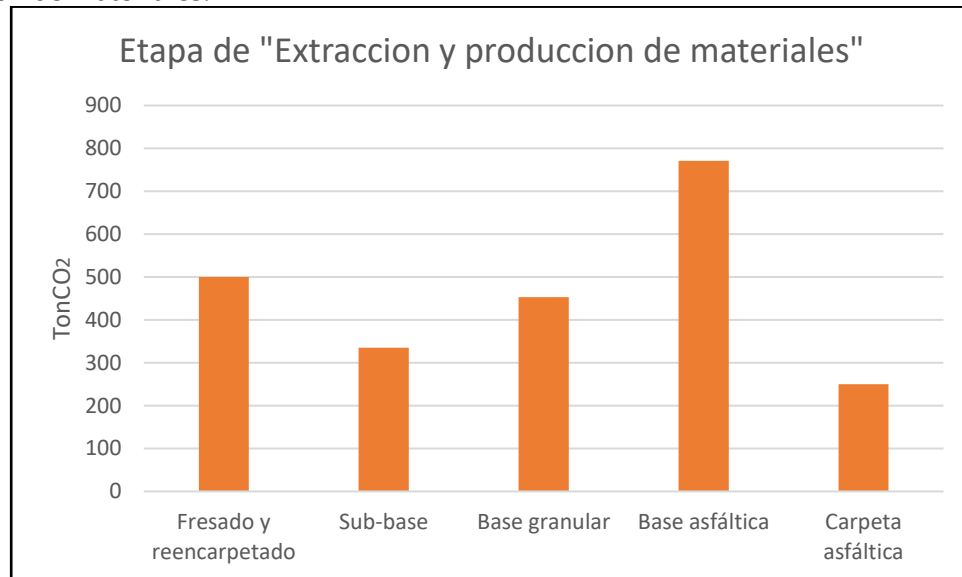
La cantidad de emisiones de CO₂ que se generaron durante todo el periodo de análisis del ciclo de vida del pavimento en la etapa de “extracción y producción de materiales” se muestra en la Tabla 4.17, que a su vez se visualiza en la Figura 4.1.

Tabla 4.17 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “producción y extracción de materiales”.

Fresado y reencarpetado	
Extracción de materiales	126.2 TonCO ₂
Transporte de agregados	82.54 TonCO ₂
Producción de mezcla	285.76 TonCO ₂
Transporte de mezcla	5.43 TonCO ₂
Reconstrucción	
Sub-base	
Extracción de materiales	132.04 TonCO ₂
Transporte de agregados	202.94 TonCO ₂
Base granular	
Extracción de materiales	166.43 TonCO ₂
Transporte de agregados	286.44 TonCO ₂
Base asfáltica	
Extracción de materiales	210.15 TonCO ₂
Transporte de agregados	123.75 TonCO ₂
Producción de mezcla	428.64 TonCO ₂
Transporte de mezcla	8.13 TonCO ₂
Carpeta asfáltica	
Extracción de materiales	63.10 TonCO ₂
Transporte de agregados	41.46 TonCO ₂
Producción de mezcla	142.88 TonCO ₂
Transporte de mezcla	2.71 TonCO ₂
Cantidad de emisiones	2,308.60 TonCO ₂

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “producción y extracción de materiales.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Emisiones generadas en la etapa de construcción.

El total de emisiones de CO₂ que se consideran en la atapa “construcción” contempla el uso de la maquinaria para ejecutar la elaboración de la sub-base, la base granular, base asfáltica y la carpeta asfáltica. La cuantificación de las emisiones es por medio del consumo de combustible (diésel) que utiliza la maquinaria, liberando 2.69 kg de CO₂ por cada litro de diésel consumido.

4.2.1 Sub-base.

Las emisiones que se generan por la construcción de la capa sub-base se muestra en la Tabla 4.18, teniendo en consideración que la motoniveladora realiza un trabajo por periodos de dos capas de 30cm.

Tabla 4.18 Emisiones generadas por el uso de la maquinaria para elaborar la sub-base.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	TonCO ₂
Capa 1 Motoniveladora	270 m ² /hr	54,600 m ²	203	15 lts/hr	3,045	8.19
Capa 2 Motoniveladora	270 m ² /hr	54,600 m ²	203	15 lts/hr	3,045	8.19
Rodillo liso vibratorio	120 m ³ /hr	16,451 m ³	137	10 lts/hr	1,370	3.69

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Base granular.

Las emisiones que se generan por la construcción de la capa base granular se muestra en la Tabla 4.19, teniendo en consideración que la motoniveladora realiza un trabajo por periodos de dos capas, una de 20cm y otra de 25cm.

Tabla 4.19 Emisiones generadas por el uso de la maquinaria para elaborar la base granular.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	TonCO ₂
Capa 1 Motoniveladora	300 m ² /hr	54,600 m ²	182	15 lts/hr	2,730	7.34
Capa 2 Motoniveladora	270 m ² /hr	54,600 m ²	203	15 lts/hr	3,045	8.19
Rodillo liso vibratorio	120 m ³ /hr	23,232 m ³	194	10 lts/hr	1,940	5.22

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Base asfáltica.

Las emisiones que se generan por la construcción de la capa base asfáltica que se muestra en la Tabla 4.20, teniendo en consideración que se realiza el proceso 3 veces, esto es debido a que cada proceso es para realizar una capa de 5cm de base asfáltica, por ende, se debe de cumplir un espesor de 15cm.

Tabla 4.20 Emisiones generadas por el uso de la maquinaria para elaborar la base asfáltica.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	TonCO ₂
Tendedora de asfalto	1000 m ² /hr	54,600 m ²	55	18.1 lts/hr	995.5	2.68
Rodillo liso	400 m ² /hr	54,600 m ²	137	10 lts/hr	1,370	3.68
Compactador neumático	400 m ² /hr	54,600 m ²	137	10 lts/hr	1,370	3.68
Emisiones por 1 capa de 5 cm						10.04
Emisiones por 3 capas de 5 cm						30.12

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Carpeta asfáltica.

La cantidad de emisiones que se generan por la colocación de la carpeta asfáltica se muestran en la Tabla 4.21, cumpliendo con un espesor de 5cm.

Tabla 4.21 Emisiones generadas por el uso de la maquinaria para elaborar la carpeta asfáltica.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	TonCO ₂
Tendedora de asfalto	1000 m ² /hr	54,600 m ²	55	18.1 lts/hr	995.5	2.68
Rodillo liso	400 m ² /hr	54,600 m ²	137	10 lts/hr	1,370	3.68
Compactador neumático	400 m ² /hr	54,600 m ²	137	10 lts/hr	1,370	3.68

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Total de misiones generadas en la construcción.

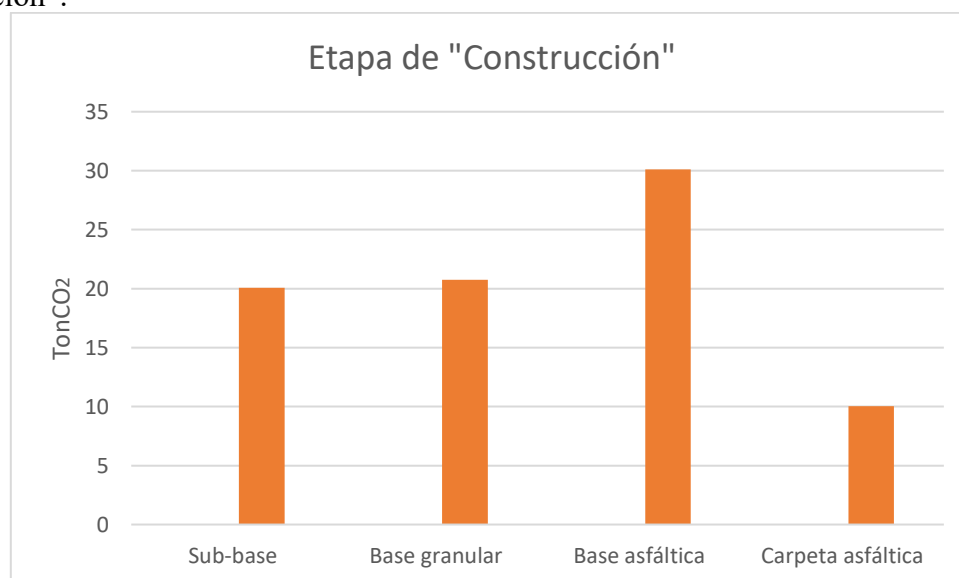
La cantidad de emisiones de CO₂ que se generaron durante todo el periodo de análisis del ciclo de vida del pavimento en la etapa de “construcción” se muestra en la Tabla 4.22, que a su vez se visualiza en la Figura 4.2.

Tabla 4.22 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “construcción”.

Actividades	TonCO ₂
Sub-base	20.07
Base granular	20.75
Base asfáltica	30.12
Carpeta asfáltica	10.04
Cantidad de emisiones	80.98

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “construcción”.



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Emisiones generadas en la etapa de fase de uso.

El total de emisiones de CO₂ que se consideran en la atapa “fase de uso” se muestran en la Tabla 4.23, donde se muestran las toneladas de emisiones que se generan cada año durante todo el periodo de análisis. Las emisiones que se generan cada año consideran la distancia del caso de estudio y la cantidad de vehículos que transitan por ese segmento. Asimismo, en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se visualizan estos mismos datos.

Tabla 4.23 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “fase de uso”.

Sentido 1			Sentido 2		
Año	TDPA	TonCO ₂	Año	TDPA	TonCO ₂
2023	13,756	1.55	2023	12,234	1.38
2024	14,161	1.60	2024	12,498	1.41
2025	14,566	1.64	2025	12,762	1.44
2026	14,971	1.69	2026	13,026	1.47
2027	15,376	1.73	2027	13,289	1.50
2028	15,781	1.78	2028	13,553	1.53
2029	16,186	1.82	2029	13,817	1.56
2030	16,591	1.87	2030	14,081	1.59
2031	16,996	1.92	2031	14,345	1.62
2032	17,401	1.96	2032	14,609	1.65
2033	17,806	2.01	2033	14,873	1.68
2034	18,211	2.05	2034	15,137	1.71
2035	18,616	2.10	2035	15,400	1.74
2036	19,022	2.14	2036	15,664	1.77
2037	19,427	2.19	2037	15,928	1.80
2038	19,832	2.23	2038	16,192	1.83
2039	20,237	2.28	2039	16,456	1.86
2040	20,642	2.33	2040	16,720	1.89
2041	21,047	2.37	2041	16,984	1.92
2042	21,452	2.42	2042	17,248	1.95
2043	21,857	2.46	2043	17,511	1.98
2044	22,262	2.51	2044	17,775	2.01
2045	22,667	2.55	2045	18,039	2.04
2046	23,072	2.60	2046	18,303	2.07
2047	23,477	2.65	2047	18,567	2.10
2048	23,882	2.69	2048	18,831	2.13
2049	24,287	2.74	2049	19,095	2.16
2050	24,693	2.78	2050	19,359	2.19
2051	25,098	2.83	2051	19,622	2.22
2052	25,503	2.87	2052	19,886	2.25

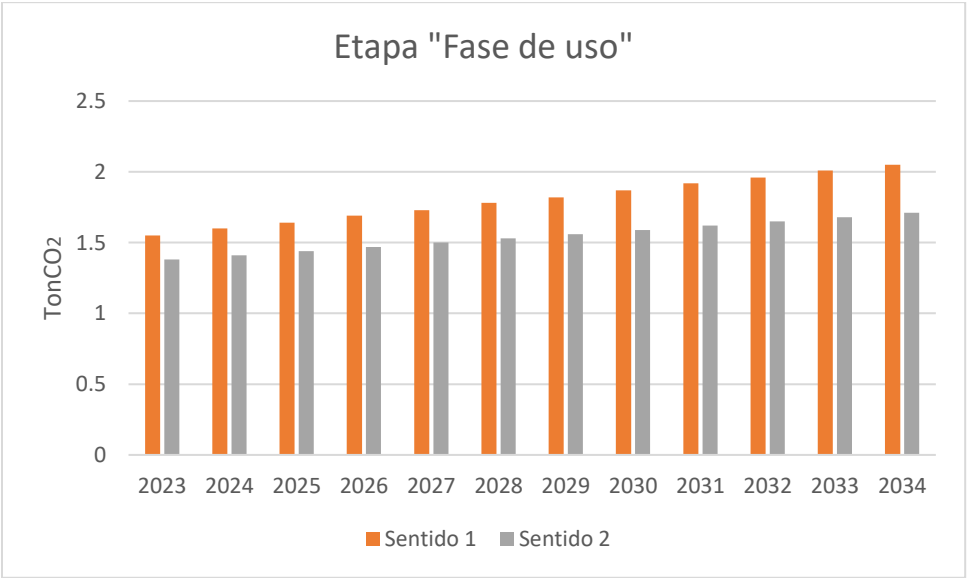
2053	25,908	2.92
2054	26,313	2.96
2055	26,718	3.01
2056	27,123	3.06
2057	27,528	3.10
Cantidad de emisiones		81.41

2053	20,150	2.28
2054	20,414	2.31
2055	20,678	2.34
2056	20,942	2.37
2057	21,206	2.40
Cantidad de emisiones		66.15

Fuente: Elaboración propia.

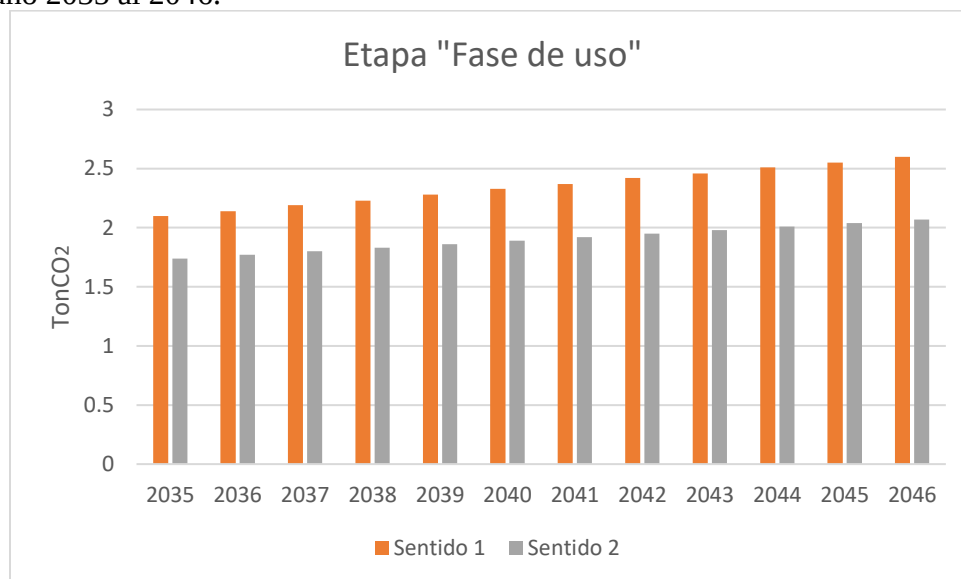
Con un total de emisiones por ambos sentidos de 147.56 toneladas de dióxido de carbono generadas durante el periodo de análisis.

Figura 4.3 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “fase de uso”, del año 2023 al 2034.



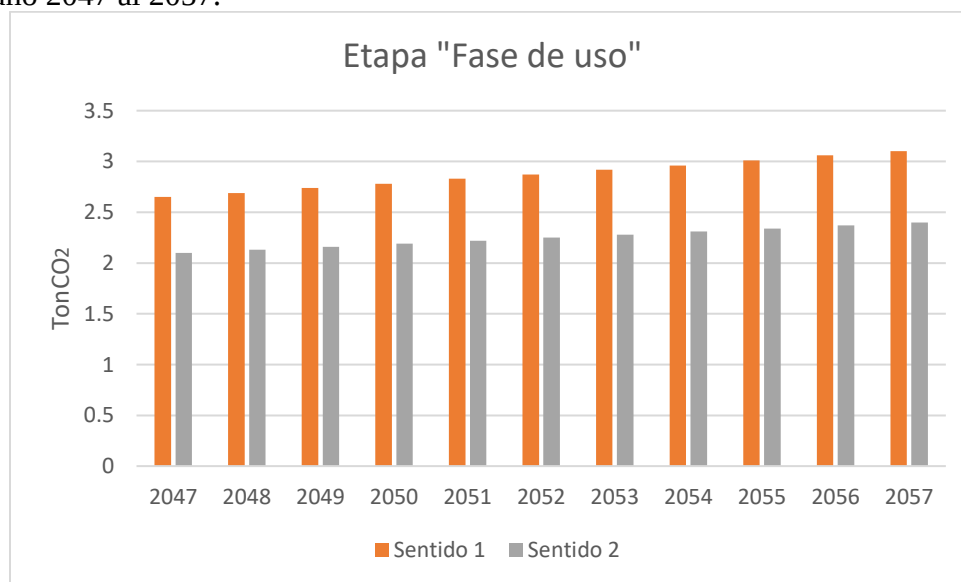
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.4 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “fase de uso”, del año 2035 al 2046.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “fase de uso”, del año 2047 al 2057.



Fuente: Elaboración propia.

4.4 Emisiones generadas en la etapa de mantenimiento y rehabilitación.

El total de emisiones de CO₂ que se consideran en la etapa “mantenimiento y rehabilitación” contempla las intervenciones del sellado de grietas y bacheo que se realizan en los diferentes años y el uso de la maquinaria para ejecutar el fresado y reencarpetado para ambos sentidos.

4.4.1 Bacheo.

En la Tabla 4.24 se muestran las emisiones de CO₂ que se generan por realizar bacheo en la superficie de rodadura para ambos sentidos.

Tabla 4.24 Emisiones generadas por el bacheo.

Sentido 1		Sentido 2	
Baches		Baches	
Año	kgCO ₂	Año	kgCO ₂
2024	23.51	2024	22.55
		2025	33.07
		2026	24.52

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Sellado de grietas.

En la Tabla 4.25 se muestran las emisiones de CO₂ que se generan por llevar a cabo el sellado de grietas que se presenta en la superficie de rodadura de ambos sentidos.

Tabla 4.25 Emisiones generadas por el bacheo.

Sentido 1		Sentido 2	
Sello de grietas		Sello de grietas	
Año	kgCO ₂	Año	kgCO ₂
2029	629.18	2037	643.08
2037	629.18	2039	640.90
2039	624.68	2041	638.48
2041	619.56	2043	635.79
2043	613.74	2045	632.80
2045	607.11	2047	629.48
2047	644.14	2049	625.78
2049	663.33	2051	621.67
2051	663.33	2053	657.76
2053	663.33	2055	663.33
2055	663.33	2057	663.33

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Fresado y reencarpetado.

La cantidad de emisiones que se generan por el fresado y reencarpetado se muestran en la Tabla 4.26, esto es debido al trabajo del retiro de la carpeta asfáltica dañada para colocar una nueva con espesor de 5cm. El total de las emisiones que se muestra en la tabla son las que se generan para ambos sentidos.

Tabla 4.26 Emisiones generadas por el uso de la maquinaria para ejecutar el fresado y reencarpetado.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	TonCO ₂
Fresadora de pavimento	500 m ² /hr	109,200 m ²	219	37 lts/hr	8,103	21.80
Tendedora de asfalto	1000 m ² /hr	109,200 m ²	109	18.1 lts/hr	1,972.9	5.31
Rodillo liso	400 m ² /hr	109,200 m ²	273	10 lts/hr	2,730	7.34
Compactador neumático	400 m ² /hr	109,200 m ²	273	10 lts/hr	2,730	7.34

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4 Total de emisiones generadas por el mantenimiento y rehabilitación.

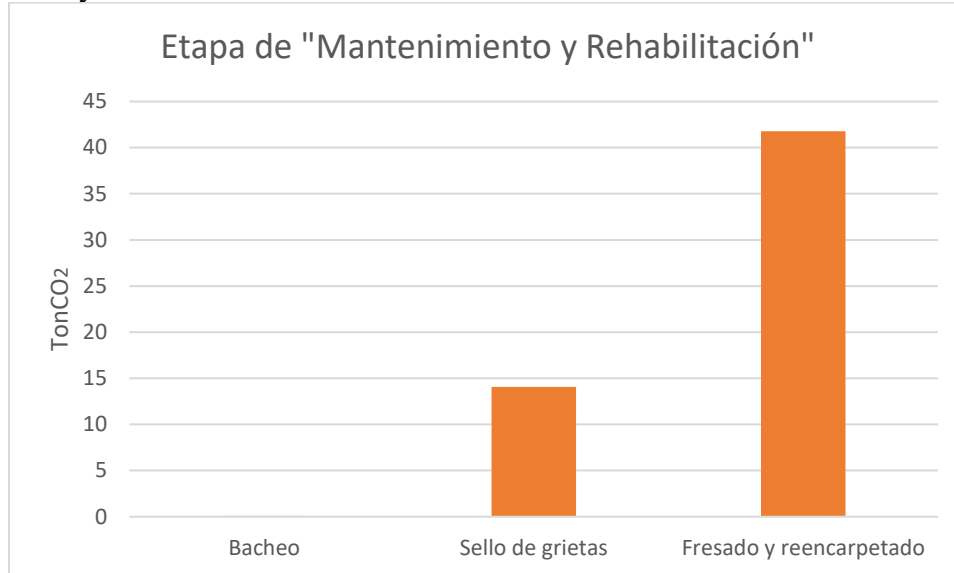
La cantidad de emisiones de CO₂ que se generaron durante todo el periodo de análisis del ciclo de vida del pavimento en la etapa de “mantenimiento y rehabilitación” se muestra en la Tabla 4.27, que a su vez se visualiza en la Figura 4.6.

Tabla 4.27 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “mantenimiento y rehabilitación”.

Actividades	TonCO ₂
Bacheo	0.10
Sellado de grietas	14.07
Fresado y reencarpetado	41.79
Cantidad de emisiones	55.96

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.6 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “mantenimiento y rehabilitación”.



Fuente: Elaboración propia.

4.5 Emisiones generadas en la etapa de fin de vida.

El total de emisiones de CO₂ que se consideran en la etapa “fin de vida” contempla el uso de la maquinaria para remover las capas dañadas del pavimento deteriorado y el equipo de colocación y traslado del material al lugar de desecho.

4.5.1 Retiro de la carpeta asfáltica durante el fresado y reencarpelado.

Las emisiones que se generan por el uso de la maquinaria para trasladar todo el material desecho de la carpeta asfáltica cuando se aplicó la intervención del fresado y reencarpelado en ambos sentidos del caso de estudio se muestra en la Tabla 4.28, teniendo en consideración que el uso de la fresadora para remover la carpeta no se considera en esta parte debido a que ya se contempla en la etapa de construcción.

Tabla 4.28 Emisiones generadas por el transporte de la carpeta asfáltica desechada del caso de estudio al lugar de depósito.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	6,279	42	8 lts/hr	336	903.8	0.90
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	6,279	210	8.1	1.84 KgCO ₂	3,129.8	3.13

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Carpeta asfáltica.

Las emisiones que se generan por el uso de la maquinaria para remover la carpeta asfáltica se muestran en la Tabla 4.29 y las emisiones que se generan para transportar el material se muestra en la Tabla 4.30.

Tabla 4.29 Emisiones generadas por el uso de la maquinaria para remover la carpeta asfáltica.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	TonCO ₂
Fresadora de pavimento	500 m ² /hr	109,200 m ²	219	37 lts/hr	8,103	21.80

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.30 Emisiones generadas por el transporte de la carpeta asfáltica desechada del caso de estudio al lugar de depósito.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	22,993.2	153	8 lts/hr	1,224	3,292.6	3.29
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	22,993.2	767	8.1	1.84 KgCO ₂	11,431.4	11.43

Fuente: Elaboración propia.

4.5.3 Base granular.

Las emisiones que se generan por el uso de la maquinaria para remover la carpeta asfáltica se muestran en la Tabla 4.31 y las emisiones que se generan para transportar el material se muestra en la Tabla 4.32.

Tabla 4.31 Emisiones generadas por el uso de la maquinaria para remover la carpeta asfáltica.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	Ton CO ₂
Motoniveladora	460 m ² /hr	109,200 m ²	238	15 lts/hr	3,570	9.60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.32 Emisiones generadas por el transporte de la carpeta asfáltica desechada del caso de estudio al lugar de depósito.

Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Horas trabajadas	Unidad de consumo	Litros consumidos	KgCO ₂	TonCO ₂
Cargador frontal	150 m ³ /hr	23,726.9	159	8 lts/hr	1,272	3,421.7	3.42
Maquinaria	Rendimiento	Cantidad de trabajo (m ³)	Viajes	Distancia (km)	Emisiones por km	KgCO ₂	TonCO ₂
Góndola	30 m ³ -viaje	23,726.9	791	8.1	1.84 KgCO ₂	11,789.1	11.79

Fuente: Elaboración propia.

4.5.4 Total de emisiones generadas en la etapa fin de vida.

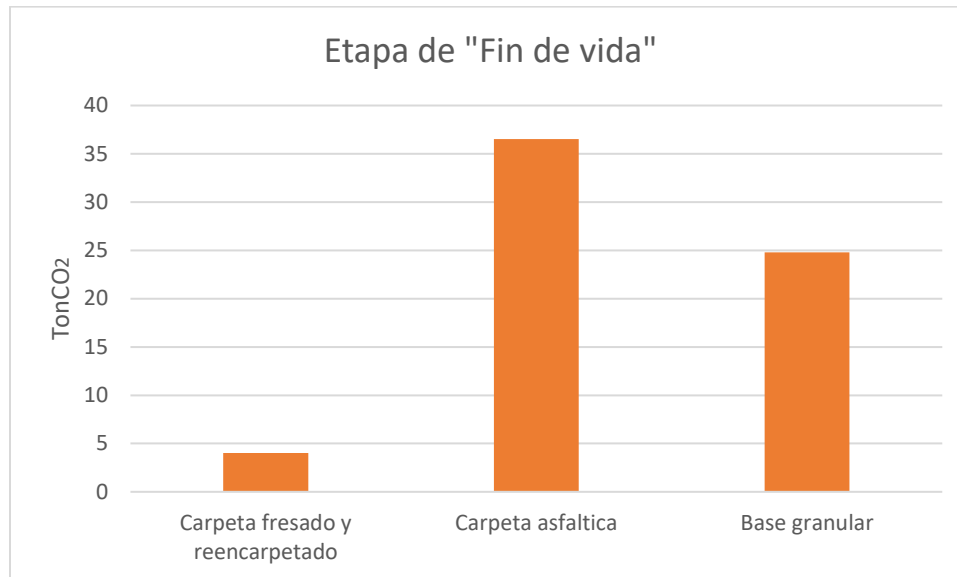
La cantidad de emisiones de CO₂ que se generaron durante todo el periodo de análisis del ciclo de vida del pavimento en la etapa de “fin de vida” se muestra en la Tabla 4.33, que a su vez se visualiza en la Figura 4.7.

Tabla 4.33 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “fin de vida”.

Sección del pavimento	TonCO ₂
Carpeta del fresado y reencarpetado	4.03
Carpeta asfáltica	36.52
Base granular	24.81
Cantidad de emisiones	65.36

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.7 Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “fin de vida”.



Fuente: Elaboración propia.

4.6 Total de emisiones generadas en el periodo de análisis del caso de estudio.

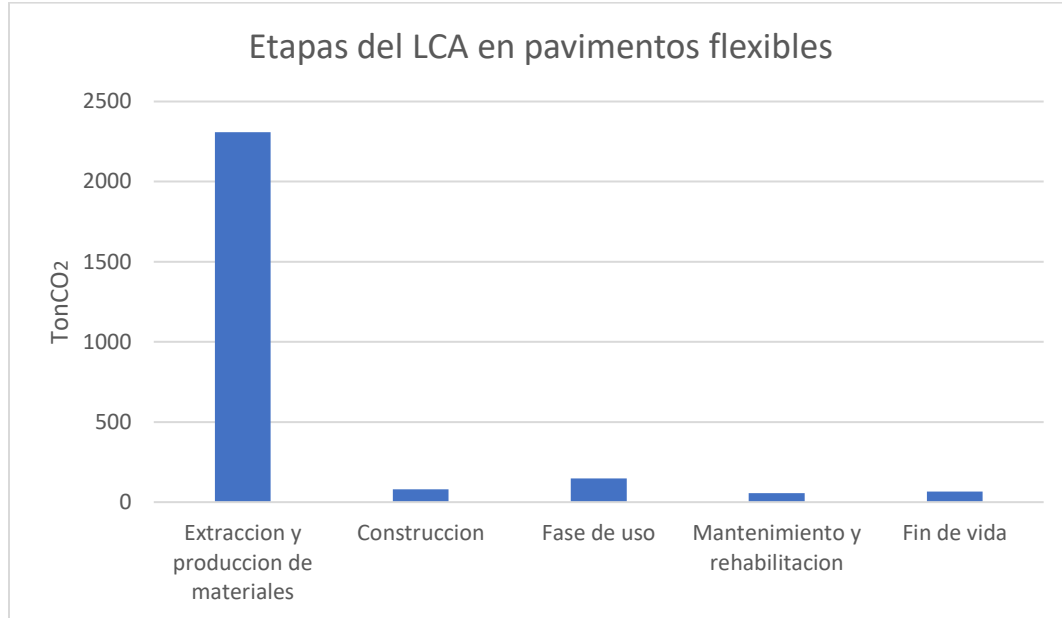
El total de las emisiones que se generaron durante el periodo de análisis de 35 años sobre el caso de estudio durante todas las etapas es un total de 2,658.46 toneladas de CO₂. En el cual la distribución de las emisiones por las distintas etapas se muestra en la Tabla 4.34 y se ilustra en la Figura 4.8.

Tabla 4.34 Total de emisiones generadas en las diferentes etapas del análisis del ciclo de vida del pavimento.

Etapa del LCA	Cantidad de emisiones
Extracción y producción de materiales	2,308.6 TonCO ₂
Construcción	80.98 TonCO ₂
Fase de uso	147.56 TonCO ₂
Mantenimiento y rehabilitación	55.96 TonCO ₂
Fin de vida	65.36 TonCO ₂
Total de emisiones	2,658.46

Fuente: Elaboración propia.

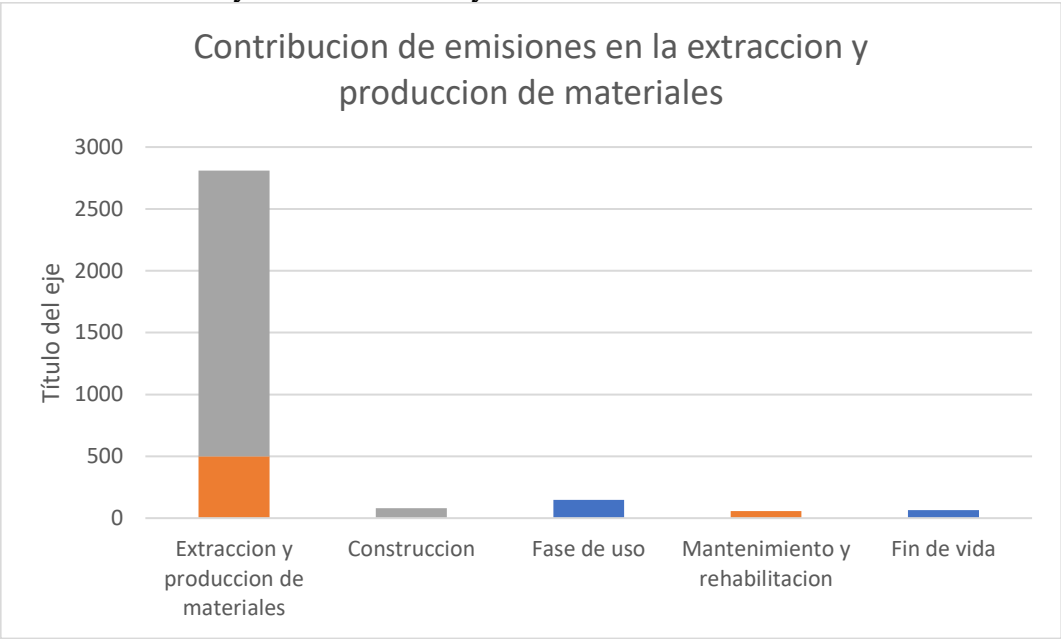
Figura 4.8 Total de emisiones generadas en las diferentes etapas del análisis del ciclo de vida del pavimento.



Fuente: Elaboración propia.

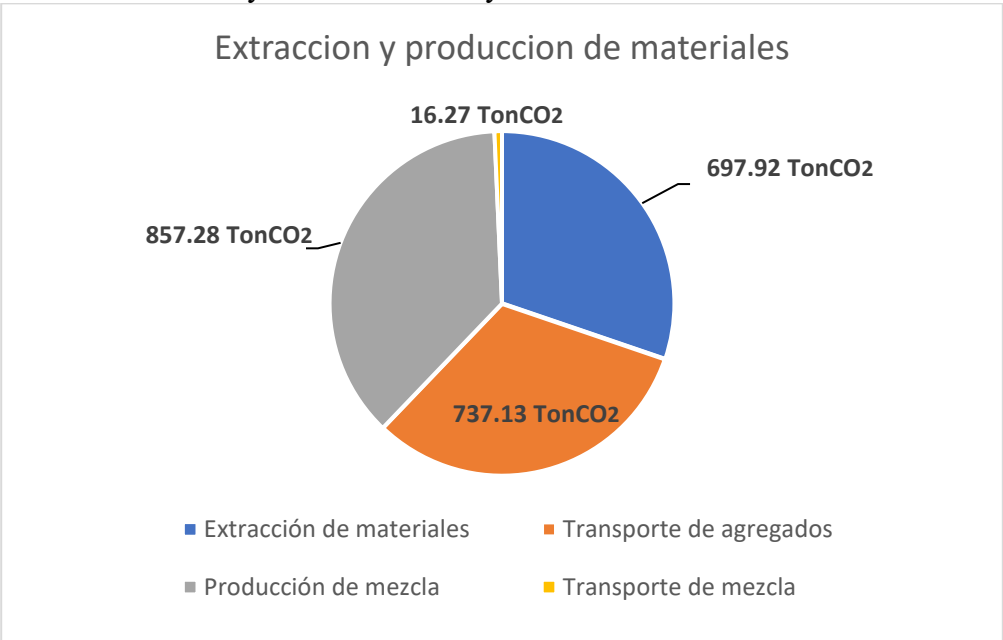
Además, en la Figura 4.9 se muestra la cantidad de emisiones con la que contribuyen las etapas de “construcción” y “mantenimiento y rehabilitación” hacia la etapa de “extracción y producción de materiales”, esto es debido ya que al realizar cualquier actividad es necesaria la extracción de materiales de cantera y la producción de mezcla asfáltica. Asimismo, en la figura 4.10 se ilustra la cantidad de emisiones que se generan por las distintas actividades que constituye la etapa de “extracción y producción de materiales”, debido a que es la etapa que genera más emisiones.

Figura 4.9 Contribución de emisiones en la extracción y producción de materiales referente a las etapas de “construcción” y “mantenimiento y rehabilitación”.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.10 Contribución de emisiones en la extracción y producción de materiales referente a las etapas de “construcción” y “mantenimiento y rehabilitación”.

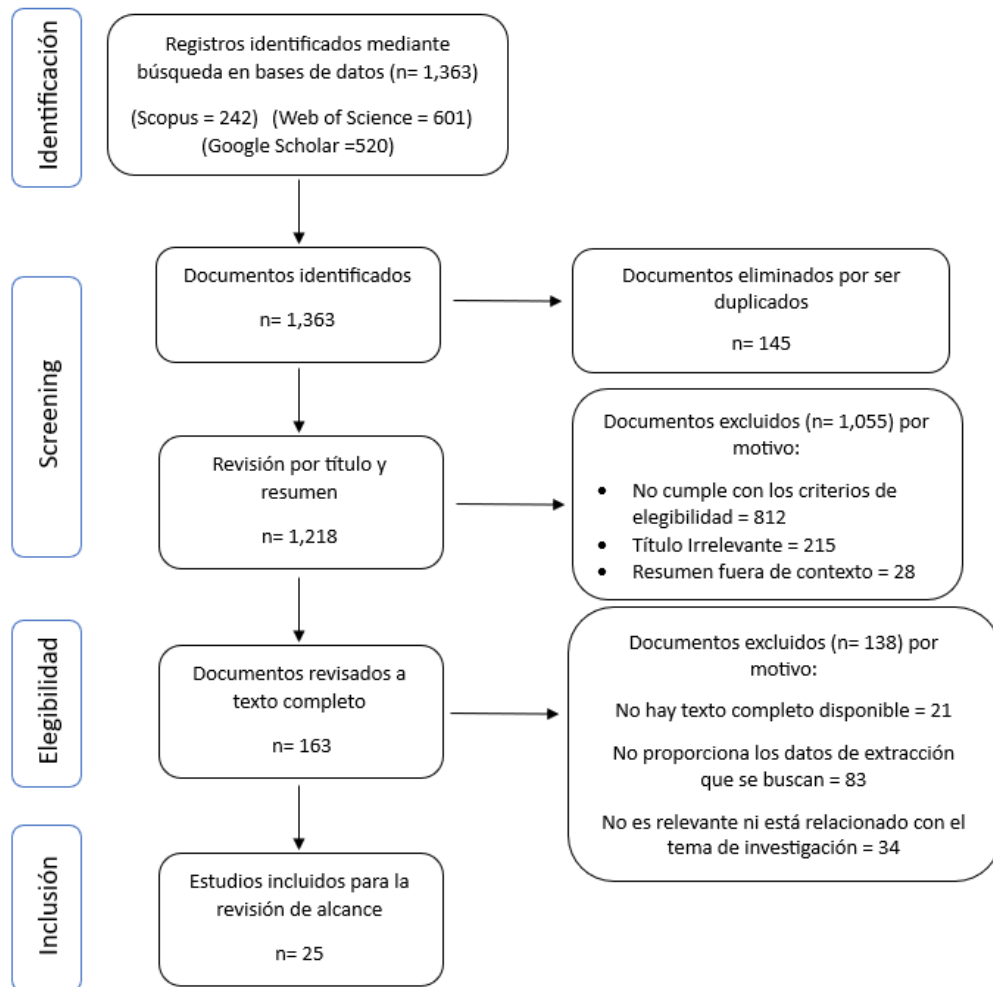


Fuente: Elaboración propia.

4.7 Estrategias de mitigación para reducir las emisiones.

Se realizó una revisión de la literatura siguiendo la metodología descrita en “Elementos de Informes Preferidos para Revisiones Sistemáticas y extensión de Metanálisis para Revisiones de Alcance” (PRISMA-ScR) de (Peters et al., 2020), con el objetivo de identificar diversas maneras para contrarrestar las emisiones de dióxido de carbono que se generan en las distintas etapas del LCA. La revisión constó por una serie de etapas, en la cual se identificaron un total de 1,363 publicaciones extraídas en diversas bases de datos (Scopus, Google Scholar y Web of Science) que fueron revisadas por la herramienta de gestión de referencias Rayyan (Ouzzani et al., 2016) para la gestión, valoración y revisión eficiente de la información, especialmente en títulos y resúmenes, de las cuales 145 publicaciones fueron eliminadas como duplicadas. Por tanto, se examinaron los títulos y resúmenes de 1,218 publicaciones, de las cuales 1,055 publicaciones fueron excluidas por los siguientes motivos: no cumple con los criterios de elegibilidad de la aplicación del LCA en pavimentos flexibles ($n = 812$); título irrelevante ($n = 215$); y resumen fuera de contexto ($n = 28$). Las 163 publicaciones restantes fueron seleccionadas para una evaluación adicional, que implicó una revisión del texto completo. Se aplicó un filtrado final, excluyendo 138 publicaciones debido: no hay texto completo disponible ($n = 21$), no proporciona los datos de extracción que se buscan ($n = 83$) no es relevante ni está relacionado con el tema de investigación ($n = 34$), seleccionando un total de 25 publicaciones para esta revisión de literatura en la cual presentaban correctamente la implementación del LCA en pavimentos asfálticos considerando las etapas que componen dicho análisis. Lo mencionado anteriormente se muestra en la Figura 4.11.

Figura 4.11 Diagrama de flujo PRISMA-ScR del proceso de selección de la literatura.



Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de documentos analizados fueron de 25 artículos. Logrando identificar 15 estrategias de mitigación implementadas por los distintos autores en sus investigaciones conforme al contexto del caso de estudio en cuestión, que se muestran en la Tabla 4.35.

Tabla 4.35 Medidas de mitigación para reducir emisiones.

No°	Medidas de mitigación para reducir emisiones	Referencias	Citas
1	Pavimento asfáltico recuperado (PAR)	(Han et al., 2023), (Assaf & Abu Abdo, 2022), (Zhong et al., 2023), (Milad et al., 2022), (Giani et al., 2015), (F. Wang et al., 2021), (Y. Liu et al., 2019), (Huang et al., 2009), (Luvizão & Trichês, 2023), (Hasan et al., 2020), (Q. Liu et al., 2024), (Huang et al., 2022), (Pantini et al., 2018) and (F. Ma et al., 2016b)	14
2	Mezcla asfáltica tibia (MAT)	(D. Li et al., 2020), (Milad et al., 2022), (Giani et al., 2015), (Noland & Hanson, 2015), (Luvizão & Trichês, 2023), (Hasan et al., 2020), (Q. Liu et al., 2024) (F. Ma et al., 2016b)	8
3	Combustibles ligeros (CL)	(Han et al., 2023), (Zhong et al., 2023), (Nauar da Silva & Maués, 2021), (D. Li et al., 2020), (F. Wang et al., 2023) and (Y. Liu et al., 2019)	6
4	Eficiencia en el transporte (ET)	(Han et al., 2023), (Zhong et al., 2023), (Nauar da Silva & Maués, 2021), (D. Li et al., 2020), (F. Wang et al., 2023) and (Y. Liu et al., 2019)	6
5	Adopción de energías renovables (AER)	(F. Wang et al., 2023), (Noland & Hanson, 2015), (Huang et al., 2022), (Barbieri et al., 2021) and (Pantini et al., 2018)	5
6	Mejorar el rendimiento de la maquinaria (MRM)	(Barandica et al., 2013), (Y. Liu et al., 2019), (Han et al., 2023), (Y. Liu et al., 2017) and (F. Ma et al., 2016b)	5
7	Mantenimiento y Rehabilitación (MYR)	(Noland & Hanson, 2015), (Huang et al., 2022), (Jiang et al., 2020), (Barbieri et al., 2021) and (X. Chen et al., 2021)	5
8	Técnicas de construcción ecológica (TCE)	(X. Wang et al., 2015), (Zhou et al., 2022), (Y. Liu et al., 2019) and (F. Ma et al., 2016b)	4
9	Optimización de los materiales utilizados (OMU)	(Barandica et al., 2013), (F. Wang et al., 2023), (Noland & Hanson, 2015) and (Huang et al., 2022)	4
10	Material reciclado (MR)	(Assaf & Abu Abdo, 2022), (F. Wang et al., 2023), (Huang et al., 2009) and (Hasan et al., 2020)	4
11	Optimización de la logística de transporte (OLT)	(F. Wang et al., 2021), (Noland & Hanson, 2015) and (Pantini et al., 2018)	3
12	Dispositivos de captura y almacenamiento de carbono (DCAC)	(D. Li et al., 2020) and (Y. Liu et al., 2019)	2
13	Utilización de nuevos materiales (UNM)	(Zhong et al., 2023) and (Nauar da Silva & Maués, 2021)	2
14	Reciclaje en el sitio (RS)	(Giani et al., 2015)	1
15	Camiones propulsados por nuevas energías (CPNE)	(D. Li et al., 2020)	1

Fuente: Elaboración propia.

Además, señalando las medidas para reducir las emisiones utilizadas por cada autor en su investigación, también demostrando cual es la reducción por la implementación de estas medidas

e indicando cuál de las etapas conlleva una mayor aportación de las emisiones generadas. Lo resultados descrito anteriormente se muestran en la Tabla 4.36.

Tabla 4.36 Resultados de la literatura del LCA en pavimentos flexibles.

Artículo o Referencia	Medidas para reducir emisiones	Reducción de CO ₂	Etapas de mayor aportación de emisiones
(Han et al., 2023)	PAR MRM CL ET	MRM y CL, podría reducir hasta un 41% de las emisiones de CO ₂ .	Las emisiones de carbono en la etapa de construcción es 1.41 veces mayor que en la etapa de materiales.
(Barandica et al., 2013)	MRM OMU		Los movimientos de tierras son la principal actividad involucrada en la generación de emisiones, con una contribución entre el 60% y el 85% de las emisiones en la etapa de construcción.
(X. Wang et al., 2015)	TCE		Más del 80% de las emisiones, procedieron de la producción de materias primas. En promedio, alrededor del 12% de las emisiones provinieron de la construcción.
(Zhou et al., 2022)	TCE		La etapa con mayor consumo de energía es la de producción de materiales, mientras que la etapa de operación y mantenimiento tiene los valores de consumo de energía más pequeños.
(Assaf & Abu Abdo, 2022)	PAR MR	La sustitución del 20% de los materiales vírgenes por plástico reduce las emisiones de CO ₂ de 13.4 millones de kg a 9.7 millones de kg. Reemplazar un 40% de los materiales vírgenes por PAR redujo las emisiones de CO ₂ alrededor de 7 millones de kg.	La producción de materiales vírgenes y HMA tiene el mayor consumo de energía e impacto ambiental.
(Zhong et al., 2023)	PAR CL UNM ET	La utilización de PAR disminuye un 30% las emisiones, los combustibles limpios un 10% y por medio de los polímeros un 20%.	
(Nauar da Silva & Maués, 2021)	UNM CL ET	La incorporación de polvo de caliza como material de relleno podría promover una reducción del 42% en la etapa de producción de insumos. La sustitución del ACP por combustible ligero habría reducido un 19% las emisiones de CO ₂ al medio ambiente.	Las porciones de CO ₂ emitidas en la etapa de producción de los insumos y manufactura fueron las que más contribuyeron a los valores totales.
(D. Li et al., 2020)	CL ET DCAC	Camiones eléctricos pueden reducir las emisiones de carbono entre un 25% y un 89 % en	

	MAT CPNE	comparación con los camiones diésel convencionales.	
(Milad et al., 2022)	PAR MAT	MAT tiene un 15 % menos de impacto ambiental que HMA. La producción de MAT resultó en un ahorro de combustible del 12% al 14%.	Las fases críticas son las de producción de materias primas y mezcla de asfalto, las cuales aportan el 97.19% del total de emisiones de GEI, de las cuales el 43.18% proviene de la producción de materias primas y el 54.01% de la mezcla de asfalto.
(Jiang et al., 2020)	MYR		Se generan más emisiones en la etapa fase de uso a comparación con la etapa de mantenimiento y rehabilitación, donde la fase de uso representa el 99.2% y la fase de mantenimiento y rehabilitación de 0.8%, durante el periodo de 10 años de análisis.
(Giani et al., 2015)	PAR MAT RS	Utilización de PAR y ahorro de materiales vírgenes, junto con la producción de MAT, es la clave para un diseño sustentable de pavimentos de carreteras, abordando la mejora ambiental.	La extracción y procesamiento de materiales, donde se incluye la producción de betún y la extracción de áridos, es la etapa con mayores impactos con un 40% del total en el ciclo de vida del pavimento.
(F. Wang et al., 2021)	PAR OLT		Las cargas ambientales generadas en la etapa de extracción de materiales ocupan un rango de porcentaje considerable con 47.41% al 71.29% de CO ₂ .
(F. Wang et al., 2023)	OMU CL MR ET AER		La etapa de extracción de materiales causó mayor proporción de emisiones en el caso de las carreteras de China, mientras que la etapa de construcción fue la principal contribuyente de emisiones en el caso de las carreteras de Noruega.
(Noland & Hanson, 2015)	OMU OLT AER MYR MAT		La producción de materiales contribuyó con la mayoría de las emisiones de GEI con un 62%, seguida por las emisiones generadas de los materiales directos con el 14%. La mayor parte del resto de las emisiones de GEI proviene del mantenimiento del ciclo de vida contribuyendo con un 10% y la movilización con el 11%.
(Y. Liu et al., 2019)	PAR CL TCE ET DCAC MRM	Con la utilización de PAR se obtiene un 30% de reducción de emisiones de CO ₂ . TCE y DCAC hay una reducción del 10% de emisiones de CO ₂ . MRM sobre los equipos todo terreno se disminuye un 10% las emisiones.	
(Huang et al., 2009)	PAR MR		La producción de mezcla asfáltica, betún y agregados consumió aproximadamente el 62%, 23% y 6% de la energía total, por lo tanto, produjo más emisiones que otros

			procesos.
(Luvizão & Trichês, 2023)	PAR MAT	El uso de PAR puede reducir el impacto total en un 45% y MAT puede reducirlo en un 25% aproximadamente.	
(Hasan et al., 2020)	MR PAR MAT	Con la utilización de un 60% de composición de residuos de demolición como material alternativo para la base, sub-base y base granular del pavimento, se genera una reducción de 16.33% de emisiones.	La etapa de materia prima fue la que más contribuyó al impacto ambiental, ya que generó el 63.96% de las emisiones. La etapa de construcción representó la segunda más alta con un 21.78%.
(Q. Liu et al., 2024)	PAR MAT	Adoptar MAT es la medida de reducción de emisiones más efectiva.	La etapa fase de uso y la etapa de mantenimiento son las que más contribuyen a las emisiones de carbono, representando aproximadamente el 86% del total.
(Huang et al., 2022)	AER OMU PAR MYR	La optimización de MYR y la adopción de vehículos eléctricos podrían reducir las emisiones de GEI durante el ciclo de vida en aproximadamente 11%. La OMU y MYR pueden reducir sustancialmente las emisiones de GEI del ciclo de vida hasta en un 16% y 11%, respectivamente.	La fase de uso es la que más contribuye a las emisiones totales, seguida de la producción de materiales y MYR.
(Barbieri et al., 2021)	AER MYR		En la etapa fase de uso, los vehículos ligeros y los vehículos pesados son responsables de aproximadamente el 85% y el 15% de las emisiones, respectivamente, relacionadas con el módulo de resistencia a la rodadura. En las carreteras de Noruega se genera gran cantidad de emisiones de CO ₂ , los principales responsables serían el efecto del albedo y la resistencia a la rodadura.
(X. Chen et al., 2021)	MYR		Las emisiones de CO ₂ de la fases de producción de materias primas representa entre el 86% – 87% del total de emisiones, demostrando que son significativamente mayor que las otras fases de transporte, construcción y retrasos en el tráfico que representan entre el 13% – 14% de emisiones. El IRI más bajo provocó menos emisiones de CO ₂ debido a la resistencia a la rodadura de los neumáticos.
(Pantini et al., 2018)	OLT PAR AER	Los beneficios del uso del PAR en mezclas asfálticas en caliente pueden disminuir parcialmente si el PAR se transporta a largas	

		distancias o si el rendimiento de la mezcla asfáltica con PAR es peor que el de las mezclas tradicionales, estos aspectos deben investigarse profundamente a nivel local.	
(Y. Liu et al., 2017)	MRM		La extracción y producción de materiales son responsables de la mayoría de las emisiones, representando el 81.3%. La maquinaria todoterreno es la segunda fuente de emisiones con un 13.9%.
(F. Ma et al., 2016b)	TCE MRM MAT PAR		Los resultados muestran que las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la fase de producción de mezcla son las más altas y representan aproximadamente el 54% de la cantidad total. La segunda fase con mayor emisión de GEI es la producción de materias primas. La producción de materias primas es la que emite la mayor cantidad, alrededor del 98%. El 54.01% son de la fase de mezclado de la mezcla y el 43.18% son de la fase de producción de materias primas.

Fuente: Elaboración propia. Aceite Combustible Pesado (ACP); Gases Efecto Invernadero (GEI); Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

Obteniendo algunos resultados por parte de los autores en sus investigación como se describen a continuación:

Han et al., (2023) menciona que al mejorar el rendimiento de la maquinaria en los distintos trabajos y la utilización de combustibles ligeros (gasolina, queroseno y gas natural) podrían reducir hasta un 41% de las emisiones de CO₂. Donde Nauar da Silva and Maués, (2021) corrobora la mención anterior aportando que la sustitución de HFO (Heavy Fuel Oil) traducido al español como “Aceite Combustible Pesado” al ser sustituido por tipos de combustible ligero habría una reducción del 19% de las emisiones de CO₂ al medio ambiente.

Assaf and Abu Abdo, (2022) señala que al sustituir un 20% de los materiales vírgenes por plástico triturado reduce las emisiones de CO₂ de 13.4 millones de kilogramos a 9.7 millones de kilogramos. Además, Hasan, Whyte and Al Jassmi, (2020) indican que la utilización de un 60% de composición de residuos de la demolición como material alternativo para la base, sub-base y base granular del pavimento se genera una reducción de 16.33% de emisiones.

Giani et al., (2015) indica que la utilización de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) traducido al español como “Pavimento asfáltico recuperado” junto con la producción de mezcla asfáltica tibia, es la clave para un diseño sustentable de pavimentos de carreteras, abordando la mejora ambiental. Debido a que remplazar un 40% de los materiales vírgenes por RAP existe una reducción de las emisiones de CO₂ alrededor de 7 millones de kilogramos (Assaf & Abu Abdo, 2022). Además, con la utilización de RAP se obtiene un 30% de reducción de emisiones de CO₂ (Y. Liu et al., 2019). Por otro lado, el uso de mezclas asfálticas tibias tiene un 15% menos de impacto ambiental que la incorporación de mezclas asfálticas en caliente, de tal manera que la producción de mezcla asfáltica tibia resulta en un ahorro de combustible del 12% al 14%.

5. Conclusiones.

La literatura existente acerca de la implementación del análisis del ciclo de vida en los pavimentos flexibles proporciona una visión clara del valor y utilidad de esta metodología para evaluar el impacto ambiental que se genera a través del sector carretero. La presente investigación confirma que el LCA permite una evaluación integral del ciclo de vida de los pavimentos flexibles, desde su extracción para fabricar algún tramo carretero hasta la disposición final. Por ende, la literatura respalda la importancia del LCA como una herramienta valiosa para evaluar y mejorar el desempeño ambiental de los pavimentos flexibles debido a que proporciona información objetiva y cualitativa sobre el impacto ambiental que se genera por los diversos procesos que conforman cada etapa del ciclo de vida del pavimento, por lo tanto, permite a los responsables de la toma de decisiones seleccionar las opciones más sostenibles desde el punto de vista ambiental.

Al momento de aplicar el análisis del ciclo de vida a los pavimentos, diversos autores plantean diferentes alcances para evaluar el impacto ambiental, que regularmente son:

- De la cuna a la tumba del pavimento, donde este alcance evalúa el impacto ambiental de todas las etapas del ciclo de vida del pavimento, desde la extracción y producción de materiales hasta su eventual disposición final o reutilización.
- De la cuna a la puerta del material para la construcción del pavimento, donde evalúa el impacto ambiental que se genera por la extracción y producción de materiales para la fabricación del pavimento y considera también el traslado de estos materiales al lugar de la construcción.
- De la puerta a la tumba del pavimento construido, que permite evaluar el impacto ambiental desde la construcción del pavimento hasta su disposición final, por tanto, este alcance considera las etapas de construcción, fase de uso, mantenimiento y rehabilitación y la etapa de fin de vida.
- De la puerta a la puerta del proceso de construcción del pavimento, donde este alcance evalúa el impacto ambiental solamente de las etapas de extracción y producción de materiales y la de construcción.

Además, algunos autores limitan su investigación debido a que se enfocan en algunas etapas o en la evaluación de una emisión en específico lo anterior debido a que aplicación del LCA puede ser diverso y extenso al momento de presentar sus resultados. Por ejemplo, su aplicación puede

cuantificar una variedad de impactos ambientales a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida del pavimento. Asimismo, permite la evaluación de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, la cuantificación de los recursos naturales utilizados en cada etapa para la construcción del pavimento, estimar la generación de residuos, evaluar el impacto de la calidad del aire y el agua debido a la contaminación atmosférica, evaluar el uso del suelo asociado a la construcción debido a la pérdida de hábitat natural y la fragmentación del paisaje o evaluar los impactos en la biodiversidad causados por la construcción y el uso del pavimento.

De acuerdo con lo anterior, el enfoque utilizado depende del interés del autor y los resultados que desea obtener, dependiendo el contexto del caso de estudio que se está analizando.

La presente investigación se enfocó en el alcance “de la cuna a la tumba del pavimento” para evaluar el impacto ambiental, con un enfoque en la cuantificación de emisiones de CO₂ que se generan a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida del pavimento flexible.

La metodología planteada ofrece una manera accesible para calcular las emisiones de CO₂ que se generan en las distintas etapas del LCA, ya que la información necesaria para realizar el análisis puede obtenerse de fuentes oficiales de acceso libre, o trabajos de campo que no requieren equipo especializado.

Además, este método permite identificar las actividades en las distintas etapas del LCA que tienen un mayor impacto ambiental. Esta información resulta crucial para las autoridades ambientales y los responsables de la toma de decisiones, ya que les permite intervenir con estrategias para disminuir la generación de emisiones. La metodología establecida solamente permite cuantificar emisiones de CO₂, sin embargo, al ajustar los factores de generación de otras emisiones, como los óxidos de nitrógeno y el metano es posible determinar la cantidad de emisiones.

Los valores obtenidos son el resultado del análisis de rendimientos de maquinaria, distancias de transporte y el uso de equipo para la producción de mezcla asfáltica, que se presentan en manuales de usuario, literatura, reportes técnicos. No obstante, estos valores pueden ser ajustados y calibrados con datos reales obtenidos en campo, lo que facilitaría una cuantificación más precisa de las emisiones. Sin embargo, una oportunidad de mejora es integrar todos los procesos en una única herramienta para facilitar la tarea en la cuantificaciones de emisiones.

Los resultados de la investigación revelan que se generan aproximadamente 2,658.45 toneladas de CO₂ a lo largo del periodo de análisis del ciclo de vida del pavimento en el caso de estudio.

Donde la etapa de “extracción y producción de materiales” destaca como la principal fuente de emisiones, con un total de 2,308.60 TonCO₂, seguida de la etapa “fase de uso” como más contribuyente en emisiones con una cantidad de 80.98 TonCO₂ y la etapa de “construcción” con 80.98 TonCO₂. Mientras que las etapas con menos generación de emisiones fueron la de “fin de vida” con 65.35 TonCO₂ y “mantenimiento y rehabilitación” con 55.96 TonCO₂. Dichos resultados concuerdan con lo establecido por Wang et al., (2015), Assaf and Abu Abdo, (2022), Nauar da Silva and Maués, (2021), Milad et al., (2022), Noland and Hanson, (2015), Hasan, Whyte and Al Jassmi, (2020) y Liu, Wang and Li, (2017), afirmando que la etapa de “extracción y producción de materiales” es la que más contribuye al impacto ambiental.

Estos resultados destacan la necesidad urgente de adoptar enfoques más sostenibles en la planificación, diseño y gestión de carreteras en México. En particular, se requieren estrategias que aborden eficazmente la reducción de emisiones a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de los pavimentos flexibles, desde la selección de materiales hasta la implementación, construcción y disposición final de los materiales en estrategias de reciclado. Tal es el caso en la etapa de “extracción y producción de materiales” que destaca como la principal contribuidora al impacto ambiental. Esta situación se atribuye a las diversas actividades que conforman esta etapa, donde los procesos de extracción de los agregados pétreos, la producción de aglomerante asfáltico, las rutas de transporte para mover las grandes cantidades de material (agregados pétreos o mezcla asfáltica) y los procesos para generar la mezcla asfáltica son las principales fuentes de emisiones. A consecuencia se debe de intervenir con diversas maneras para mitigar este impacto ambiental, por ejemplo, hacer uso del reciclado del asfalto, la fabricación de mezcla asfáltica tibia y la incorporación de cierto porcentaje de plástico triturado por el material virgen o la utilización de residuos de demolición como material alternativo para la sub-base y base granular.

La metodología planteada en esta investigación permite a cualquier usuario determinar la cantidad de emisiones de CO₂ durante las diferentes etapas del ciclo de vida del pavimento. Adicionalmente, la metodología se plantea de manera clara lo que permite que sea replicable en diferentes casos de estudio. Los datos de entrada más relevantes del modelo y que permitirán su aplicación del método en otros contextos son: la geometría y estructura del pavimento, el tráfico vehicular que circula, la ubicación de los bancos de materiales pétreos y de las plantas de producción de asfalto, los rendimientos de la maquinaria y las estrategias de mantenimiento y

rehabilitación.

Un aspecto a tomar en futuras líneas de investigación es la integración completa del análisis del ciclo de vida en la evaluación de pavimentos, debido a que permitirá una comprensión más completa de los impactos ambientales asociados al sector carretero de México. Además, la línea de investigación puede seguir con el análisis comparativo entre los diferentes materiales, diseños y técnicas de construcción de pavimentos. Esto permite a los responsables de la toma de decisiones seleccionar la opción más sostenible en función de sus objetivos y restricciones específicas.

Se concluye que la metodología planteada para cuantificar emisiones de CO₂ contribuye en la mejora del desempeño ambiental de los pavimentos ya que este enfoque permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia del proceso constructivo y reducir el impacto ambiental. Esto incluye la reducción de emisiones y el uso responsable de recursos no renovables, lo anterior permite a las agencias viales reducir los impactos ambientales relacionados con la construcción de infraestructura vial.

Referencias.

- Agency, E. E. (2022). *Transport and Environment Report 2021 Decarbonising Road Transport—The Role of Vehicles, Fuels and Transport Demand*. Publications Office of the European Union Luxembourg.
- Alshehry, A. S., & Belloumi, M. (2017). Study of the environmental Kuznets curve for transport carbon dioxide emissions in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1339–1347. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.122>
- Anenberg, S. C., Miller, J., Minjares, R., Du, L., Henze, D. K., Lacey, F., Malley, C. S., Emberson, L., Franco, V., Klimont, Z., & Heyes, C. (2017). Impacts and mitigation of excess diesel-related NOx emissions in 11 major vehicle markets. *Nature* 2017 545:7655, 545(7655), 467–471. <https://doi.org/10.1038/nature22086>
- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., & Silva, H. M. R. D. (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. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2014.07.006>
- Assaf, H., & Abu Abdo, A. (2022). Life cycle assessment of incorporating recycled materials in pavement design. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUES.2022.04.001>
- Assefa, G., & Ambler, C. (2017). To demolish or not to demolish: Life cycle consideration of repurposing buildings. *Sustainable Cities and Society*, 28, 146–153. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2016.09.011>
- Attfield, M. D., Schleiff, P. L., Lubin, J. H., Blair, A., Stewart, P. A., Vermeulen, R., Coble, J. B., & Silverman, D. T. (2012). The Diesel Exhaust in Miners Study: A Cohort Mortality Study With Emphasis on Lung Cancer. *JNCI Journal of the National Cancer Institute*, 104(11), 869. <https://doi.org/10.1093/JNCI/DJS035>
- Bai, L., Su, X., Zhao, D., Zhang, Y., Cheng, Q., Zhang, H., Wang, S., Xie, M., & Su, H. (2018). Exposure to traffic-related air pollution and acute bronchitis in children: season and age as modifiers. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 72(5), 426–433. <https://doi.org/10.1136/JECH-2017-209948>
- Barandica, J. M., Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Delgado, J. A., & Acosta, F. J. (2013). Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects. *Journal of Cleaner Production*, 57, 79–91. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.05.036>
- Barbieri, D. M., Lou, B., Wang, F., Hoff, I., Wu, S., Li, J., Vignisdottir, H. R., Bohne, R. A., Anastasio, S., & Kristensen, T. (2021). Assessment of carbon dioxide emissions during production, construction and use stages of asphalt pavements. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 11, 100436. <https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2021.100436>
- Bârsan, L., & Bârsan, A. (2009). Some Aspects Concerning the Design for Recycling and Waste Minimisation. *WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering*, 2.
- Bell, J. N. B., Honour, S. L., & Power, S. A. (2011). Effects of vehicle exhaust emissions on urban wild plant species. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 1984–1990. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2011.03.006>
- Benbrahim-Tallaa, L., Baan, R. A., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Guha, N., Loomis, D., Straif, K., & International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. (2012). Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *The Lancet Oncology*, 13(7), 663–664. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(12\)70280-2](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(12)70280-2)
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11), 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/JGRD.50171>
- Bonsu, E. O. (2016). *Estimation of vehicular emissions and fuel consumption on road links using HDM-*

- IV in Ghana - A case study on the George Walker Bush Motorway (14.1km) Accra.*
<https://ir.knust.edu.gh/handle/123456789/10201>
- Buckeridge, D. L., Glazier, R., Harvey, B. J., Escobar, M., Amrhein, C., & Frank, J. (2002). Effect of motor vehicle emissions on respiratory health in an urban area. *Environmental Health Perspectives*, 110(3), 293–300. <https://doi.org/10.1289/EHP.02110293>
- Burns, J., Boogaard, H., Polus, S., Pfadenhauer, L. M., Rohwer, A. C., Van Erp, A. M., Turley, R., & Rehfuss, E. (2019). Interventions to reduce ambient particulate matter air pollution and their effect on health. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2019(5).
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD010919.PUB2>
- Cai, H., & Xie, S. (2011). Traffic-related air pollution modeling during the 2008 Beijing Olympic Games: The effects of an odd-even day traffic restriction scheme. *Science of the Total Environment*, 409(10), 1935–1948. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.025>
- Castillo, G., Alexandra, H., López, O., Noguera, J. A. H., Mandujano, D. A., Fabián, M., Rodríguez, H., Ulises, S., & González, A. (2014). *Dispav-5 Versión 3.0: Actualización del sistema para el diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones Serie INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO*. <http://www.ii.unam.mx>
- Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., & Lo Casto, B. (2015). Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 41–51.
<https://doi.org/10.1016/J.TRD.2014.10.001>
- Chen, T. L., Hsiao, T. C., Chuang, H. C., Ting, Y. C., & Wang, C. H. (2023). A mobile platform for characterizing on-road tailpipe emissions and toxicity of ultrafine particles under real driving Conditions. *Environmental Research*, 216. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114523>
- Chen, X., Wang, H., Horton, R., & DeFlorio, J. (2021). Life-cycle assessment of climate change impact on time-dependent carbon-footprint of asphalt pavement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91, 102697. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102697>
- Chester, M. V., & Horvath, A. (2009). Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 4(2).
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/024008>
- Choi, J. ho. (2019). Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement. *Journal of Cleaner Production*, 209, 88–100.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.226>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2023).
- Curran, M. A. (2006). EPA: Life cycle assessment: Principles and practice. *Scientific Applications International Corporation (SAIC)*.
- d'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., & Newcomb, D. (2008). *Warm-mix asphalt: European practice*. United States. Federal Highway Administration. Office of International Programs.
- Di Maria, A., Eyckmans, J., & Van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management*, 75, 3–21. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.01.028>
- Ehrenberger, S., Seum, S., Pregger, T., Simon, S., Knitschky, G., & Kugler, U. (2021). Land transport development in three integrated scenarios for Germany – Technology options, energy demand and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102669.
<https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102669>
- EPA. (1993). *Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles.: Vol. EPA/600/R-92/245*.
- Eurobitume. (2012). *Life Cycle Inventory: Bitume, 2nd ed.*
- Europe, W. R. O. for. (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. *World Health Organization*. <https://doi.org/10.1007/BF00379640>
- Fan, Y. Van, Perry, S., Klemeš, J. J., & Lee, C. T. (2018). A review on air emissions assessment: Transportation. *Journal of Cleaner Production*, 194, 673–684.

- <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.151>
- Findlay, C. S., & Bourdages, J. (2000). Response Time of Wetland Biodiversity to Road Construction on Adjacent Lands/Tiempo de Respuesta de la Biodiversidad de Humedales a la Construcción de Caminos en Tierras Adyacentes. *Conservation Biology*, 14(1), 86–94.
<https://doi.org/10.1046/J.1523-1739.2000.99086.X>
- Fuglestad, J., Berntsen, T., Myhre, G., Rypdal, K., & Skeie, R. B. (2008). Climate forcing from the transport sectors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(2), 454–458. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0702958104>
- Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., ... Yan, C. (2022). Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535–e547. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0)
- Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & 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.
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2015.08.006>
- Guo, X., Fu, L., Ji, M., Lang, J., Chen, D., & Cheng, S. (2016). Scenario analysis to vehicular emission reduction in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China. *Environmental Pollution*, 216, 470–479.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.05.082>
- Hammerstrom, U. (1995). *Proposal for a vehicle exhaust model in HDM-4*.
- Han, Y., Li, H., Liu, J., Xie, N., Jia, M., Sun, Y., & Wang, S. (2023). Life cycle carbon emissions from road infrastructure in China: A region-level analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 115, 103581. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2022.103581>
- Hanson, C., Noland, R., & Cavale, K. (2012). Life-cycle greenhouse gas emissions of materials used in road construction. *Transportation Research Record*, 2287, 174–181. <https://doi.org/10.3141/2287-21>
- Hao, J., He, D., Wu, Y., Fu, L., & He, K. (2000). A study of the emission and concentration distribution of vehicular pollutants in the urban area of Beijing. *Atmospheric Environment*, 34(3), 453–465.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00324-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00324-6)
- Harvey, J., Meijer, J., Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Saboori, A., & Kendall, A. (2016). *Pavement life cycle assessment framework*. United States. Federal Highway Administration.
- Hasan, U., Whyte, A., & Al Jassmi, H. (2020). Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. *Journal of Cleaner Production*, 257.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120531>
- Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., & Kaufman, J. D. (2013). Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review. *Environmental Health*, 12(1), 43. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-43>
- Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283–296.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2008.06.005>
- Huang, Y., Wolfram, P., Miller, R., Azarijafari, H., Guo, F., An, K., Li, J., Hertwich, E., Gregory, J., & Wang, C. (2022). Mitigating life cycle GHG emissions of roads to be built through 2030: Case study of a Chinese province. *Journal of Environmental Management*, 319, 115512.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115512>
- Ingham, J. P. (2013). Bituminous mixtures. *Geomaterials Under the Microscope*, 171–174.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407230-5.50018-2>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2020). *Geografía y Medio Ambiente*.
<https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=02#tabMCCollapse-Indicadores>
- Iso, I. S. O. (2003). 14040: 1997—Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and framework. *International Organization for Standardization (ISO), Switzerland*.

- Janssen, N. A., Gerlofs-Nijland, M. E., Lanki, T., Salonen, R. O., Cassee, F., Hoek, G., Ischer, P., Brunekreef, B., & Krzyzanowski, M. (2012). *Health effects of black carbon*. <http://www.euro.who.int/pubrequest>
- Jiang, R., Wu, C., Song, Y., & Wu, P. (2020). Estimating carbon emissions from road use, maintenance and rehabilitation through a hybrid life cycle assessment approach – A case study. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123276. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123276>
- Jiang, R., & Wu, P. (2019). Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 148–163. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.10.010>
- Jiao, X., & Bienvenu, M. (2015). Field Measurement and Calibration of HDM-4 Fuel Consumption Model on Interstate Highway in Florida. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 4(1), 29–45. <https://doi.org/10.1260/2046-0430.4.1.29>
- Khare, P., Machesky, J., Soto, R., He, M., Presto, A. A., & Gentner, D. R. (2020). Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors. *Science Advances*, 6(36), eabb9785.
- La Notte, A., Tonin, S., & Lucaroni, G. (2018). Assessing direct and indirect emissions of greenhouse gases in road transportation, taking into account the role of uncertainty in the emissions inventory. *Environmental Impact Assessment Review*, 69, 82–93. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2017.11.008>
- Lee, D. Y., Thomas, V. M., & Brown, M. A. (2013). Electric urban delivery trucks: Energy use, greenhouse gas emissions, and cost-effectiveness. *Environmental Science and Technology*, 47(14), 8022–8030. <https://doi.org/10.1021/ES400179W>
- Li, D., Wang, Y., Liu, Y., Sun, S., & Gao, Y. (2020). Estimating life-cycle CO₂ emissions of urban road corridor construction: A case study in Xi'an, China. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120033. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120033>
- Li, H., Deng, Q., Zhang, J., Olanipekun, A. O., & Lyu, S. (2019). Environmental Impact Assessment of Transportation Infrastructure in the Life Cycle: Case Study of a Fast Track Transportation Project in China. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 1015, 12(6), 1015. <https://doi.org/10.3390/EN12061015>
- Li, H., Deng, Q., Zhang, J., Xia, B., & Skitmore, M. (2019). Assessing the life cycle CO₂ emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1496–1506. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.102>
- Liu, L. T., Zhang, Y., Shen, L., Gao, T., Xue, J., & Chen, F. (2014). A review of cement production carbon emission factors: progress and prospects. *Resour. Sci.*, 36(1), 110–119.
- Liu, Q., Yi, X., Falchetto, A. C., Wang, D., Yu, B., & Qin, S. (2024). Carbon emissions quantification and different models comparison throughout the life cycle of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 411, 134323. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134323>
- Liu, Y., Wang, Y., & An, D. (2018). Life-cycle CO₂ emissions and influential factors for asphalt highway construction and maintenance activities in China. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12(7), 497–509. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1402108>
- Liu, Y., Wang, Y., & Li, D. (2017). Estimation and uncertainty analysis on carbon dioxide emissions from construction phase of real highway projects in China. *Journal of Cleaner Production*, 144, 337–346. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.01.015>
- Liu, Y., Wang, Y., Li, D., Feng, F., Yu, Q., & Xue, S. (2019). Identification of the potential for carbon dioxide emissions reduction from highway maintenance projects using life cycle assessment: A case in China. *Journal of Cleaner Production*, 219, 743–752. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.081>
- Luvizão, G., & Trichês, G. (2023). Case Study on Life Cycle Assessment Applied to Road Restoration Methods. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 6679, 15(8), 6679. <https://doi.org/10.3390/SU15086679>
- Ma, F., Dong, W., Fu, Z., Wang, R., Huang, Y., & Liu, J. (2021). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from asphalt pavement maintenance: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125595. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125595>
- Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., & Wang, C. (2016a). Greenhouse gas emissions from asphalt

- pavement construction: A case study in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(3), 351.
- Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., & Wang, C. (2016b). Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Construction: A Case Study in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2016, Vol. 13, Page 351, 13(3), 351. <https://doi.org/10.3390/IJERPH13030351>
- Ma, H., Zhang, Z., Zhao, X., & Wu, S. (2019). A comparative life cycle assessment (LCA) of warm mix asphalt (WMA) and hot mix asphalt (HMA) pavement: A case study in China. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9391857>
- Martinez Caraballo, E., Redruello Almandoz, I., González-Díaz, M. J., Muench, S., & García Navarro, J. (2013). Quantity of CO₂ Emissions in the Life Cycle of a Highway Infrastructure. *The International Journal of Environmental Sustainability*, ISSN 2325-1077, 2013, Vol. 8, No. 3. <http://ijse.cgpublisher.com/product/pub.272/prod.28>
- Masiol, M., Hofer, A., Squizzato, S., Piazza, R., Rampazzo, G., & Pavoni, B. (2012). Carcinogenic and mutagenic risk associated to airborne particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons: A source apportionment. *Atmospheric Environment*, 60, 375–382. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2012.06.073>
- Maykut, N. N., Lewtas, J., Kim, E., & Larson, T. V. (2003). Source Apportionment of PM_{2.5} at an Urban IMPROVE Site in Seattle, Washington. *Environmental Science and Technology*, 37(22), 5135–5142. <https://doi.org/10.1021/ES030370Y>
- Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M., & Yusoff, N. I. M. (2022). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022, Vol. 19, Page 14863, 19(22), 14863. <https://doi.org/10.3390/IJERPH192214863>
- Mohammad, L. N., Hassan, M. M., Vallabhu, B., & Kabir, M. S. (2015). Louisiana's experience with WMA technologies: Mechanistic, environmental, and economic analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014185.
- Montoya-Alcaraz, M., Mungaray-Moctezuma, A., & García, L. (2019). Sustainable Road Maintenance Planning in Developing Countries Based on Pavement Management Systems: Case Study in Baja California, México. <https://doi.org/10.3390/su12010036>
- Müller, L. J., Kätelhön, A., Bachmann, M., Zimmermann, A., Sternberg, A., & Bardow, A. (2020). A Guideline for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization. *Frontiers in Energy Research*, 8, 505883. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2020.00015/BIBTEX>
- Nauar da Silva, I., & Maués, L. M. F. (2021). Inventory of sand and pebble production for use in hot mix asphalt: A case study in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126271. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126271>
- N-CMT-1-01. (2021). Materiales para Terraplén. In *CMT. Características de los Materiales*. Materiales para terracerías.
- N-CMT-4-02-001. (2021). Materiales para Subbases. In *CMT. Características de los Materiales*. Materiales para pavimentos.
- N-CMT-4-02-002. (2022). Materiales para Bases Hidráulicas. In *CMT. Características de los Materiales*. Materiales para pavimentos.
- N-CSV-CAR-1-03-009. (2016). Determinación de la Profundidad de Rodera (PR). In CSV. *Conservación: Vol. CAR. Carreteras*. Evaluación de pavimentos.
- Noland, R. B., & Hanson, C. S. (2015). Life-cycle greenhouse gas emissions associated with a highway reconstruction: a New Jersey case study. *Journal of Cleaner Production*, 107, 731–740. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.05.064>
- NOM-012-SCT. (2008). Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. In *SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES*.
- N-SCV-CAR-1-03-010. (2017). Determinación de las deflexiones de un pavimento (DEF). In CSV.

- Consrveacion: Vol. CAR. Carreteras. Evaluacion de pavimentos.*
- Pantini, S., Borghi, G., & Rigamonti, L. (2018). Towards resource-efficient management of asphalt waste in Lombardy region (Italy): Identification of effective strategies based on the LCA methodology. *Waste Management*, 80, 423–434. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.09.035>
- Perrotta, F., Parry, T., Neves, L. C., Buckland, T., Benbow, E., & Mesgarpour, M. (2019). Verification of the HDM-4 fuel consumption model using a Big data approach: A UK case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 109–118. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2018.11.001>
- Peters, M. D., Godfrey, C., Mcinerney, P., Munn, Z., Tricco, A. C., & Khalil, H. (2020). 3 Introduction 11.2.4 Inclusion criteria 11.2.5 Search Strategy 11.2.6 Source of evidence selection 11. 11(2). <https://doi.org/10.46658/JBIMES-20-12>
- Pongthanaisawan, J., Sorapipatana, C., & Limmeechokchai, B. (2007). Road transport energy demand analysis and energy saving potentials in Thailand. *Asian J. Energy Environ*, 8(1), 49–72.
- Pradena, M. (2008). *Análisis del índice de regularidad internacional de construcción en superficies asfálticas utilizando el software HDM-4= Analysis of the construction international roughness index in asphalt surfaces using the HDM-4 software.*
- Querol, X., Viana, M., Alastuey, A., Amato, F., Moreno, T., Castillo, S., Pey, J., de la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Artíñano, B., Salvador, P., García Dos Santos, S., Fernández-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillón, M. C., Monfort, E., Gil, J. I., Inza, A., ... Zabalza, J. (2007). Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain. *Atmospheric Environment*, 41(34), 7219–7231. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2007.05.022>
- Rodríguez Moreno, M., Thenoux Zeballos, G., & González Vaccarezza, A. (2013). Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos asfálticos en carreteras de Chile. *Revista de La Construcción*, 12(2), 152–165. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000200012>
- Rückerl, R., Schneider, A., Breitner, S., Cyrys, J., & Peters, A. (2011). Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence. *Inhalation Toxicology*, 23(10), 555–592. <https://doi.org/10.3109/08958378.2011.593587>
- Santero, N. J., & Horvath, A. (2009). Global warming potential of pavements. *Environmental Research Letters*, 4(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/034011>
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011a). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.03.010>
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011b). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.03.010>
- SCT. (2011). *Dictamen de factibilidad técnica, económica y ambiental de la carretera Mexicali-San Felipe.*
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (n.d.). *Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana.*
- Shindell, D., Faluvegi, G., Walsh, M., Anenberg, S. C., Van Dingenen, R., Muller, N. Z., Austin, J., Koch, D., & Milly, G. (2011). Climate, health, agricultural and economic impacts of tighter vehicle-emission standards. *Nature Climate Change* 2011 1:1, 1(1), 59–66. <https://doi.org/10.1038/nclimate1066>
- SICT. (2014). Evaluación superficial de los pavimentos (IRI, PR, MAC, DET), mediante el uso de equipos de alto rendimiento en diversos tramos de la Red Carretera Federal (autopistas de cuota, Corredores y Red Básica Libre). In *Dirección General de Servicios Técnicos.*
- SICT. (2016). *Mappir, Traza tu ruta.* Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. <http://ttr.sct.gob.mx/mappir/>
- Siqueira, R. M., Freitas, G. R., Peixoto, H. R., Do Nascimento, J. F., Musse, A. P. S., Torres, A. E. B., Azevedo, D. C. S., & Bastos-Neto, M. (2017). Carbon dioxide capture by pressure swing adsorption. *Energy Procedia*, 114, 2182–2192.

- Steger, S., & Bleischwitz, R. (2011). Drivers for the use of materials across countries. *Journal of Cleaner Production*, 19(8), 816–826.
- Summit, J. (2002). World summit on sustainable development. *Johannesburg, South Africa*, 9(3), 67–69.
- Torres-Machi, C., Osorio-Lird, A., Chamorro, A., Videla, C., Tighe, S. L., & Mourgues, C. (2018). Impact of environmental assessment and budgetary restrictions in pavement maintenance decisions: Application to an urban network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 192–204. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.12.017>
- Trupia, L., Parry, T., Neves, L. C., & Lo Presti, D. (2017). Rolling resistance contribution to a road pavement life cycle carbon footprint analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(6), 972. <https://doi.org/10.1007/S11367-016-1203-9>
- Uherek, E., Halenka, T., Borken-Kleefeld, J., Balkanski, Y., Bernsten, T., Borrego, C., Gauss, M., Hoor, P., Juda-Rezler, K., Lelieveld, J., Melas, D., Rypdal, K., & Schmid, S. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4772–4816. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2010.01.002>
- United States Environmental Protection Agency. (2023). Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>
- Vedal, S., Han, B., Xu, J., Szpiro, A., & Bai, Z. (2017). Design of an Air Pollution Monitoring Campaign in Beijing for Application to Cohort Health Studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/IJERPH14121580>
- Walsh, M. P. (2014). PM2.5: global progress in controlling the motor vehicle contribution. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 8(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/S11783-014-0634-4/METRICS>
- Wang, F., Hoff, I., Yang, F., Wu, S., Xie, J., Li, N., & Zhang, L. (2021). Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126659. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126659>
- Wang, F., Li, X., Wu, S., Zheng, L., Luo, Q., Zhang, J., & Barbieri, D. M. (2023). Comparative study for global warming potentials of Chinese and Norwegian roads with life cycle assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 1168–1180. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2023.07.063>
- Wang, J., Wu, Q., Liu, J., Yang, H., Yin, M., Chen, S., Guo, P., Ren, J., Luo, X., Linghu, W., & Huang, Q. (2019). Vehicle emission and atmospheric pollution in China: problems, progress, and prospects. *PeerJ*, 7. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.6932>
- Wang, X., Duan, Z., Wu, L., & Yang, D. (2015). Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: a case study in southwest region of China. *Journal of Cleaner Production*, 103, 705–714. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.10.030>
- Willumsen, L. G. (2001). *Modelling transport*. Wiley-Blackwell.
- Wintruff, N. C., & Fernandes, J. L. (2023). A Review on Life Cycle Assessment of Pavements in Brazil: Evaluating Environmental Impacts and Pavement Performance Integrating the International Roughness Index. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 14373, 15(19), 14373. <https://doi.org/10.3390/SU151914373>
- World Health Organization. (2023). *Ambient (outdoor) air pollution*. World Health Organization. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Yang, H., Huang, X., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2015). Enforcement key to China's environment. *Science*, 347(6224), 834–835. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.347.6224.834-D>
- Yang, H., Ma, M., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2018). Waste management, informal recycling, environmental pollution and public health. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 72(3), 237–243. <https://doi.org/10.1136/JECH-2016-208597>
- Yue, X., Wu, Y., Hao, J., Pang, Y., Ma, Y., Li, Y., Li, B., & Bao, X. (2015). Fuel quality management versus vehicle emission control in China, status quo and future perspectives. *Energy Policy*, 79, 87–98. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2015.01.009>
- Zhang, L., Long, R., Chen, H., & Geng, J. (2019a). A review of China's road traffic carbon emissions.

- Journal of Cleaner Production*, 207, 569–581. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.003>
- Zhang, L., Long, R., Chen, H., & Geng, J. (2019b). A review of China's road traffic carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 207, 569–581. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.003>
- Zhang, Y., Gong, H., Jiang, X., Lv, X., Xiao, R., & Huang, B. (2021). Environmental impact assessment of pavement road bases with reuse and recycling strategies: A comparative study on geopolymer stabilized macadam and conventional alternatives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102749. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102749>
- Zhong, Y., Xu, S., Zhang, B., Cheng, H., Wang, M., Niu, Y., & Li, R. (2023). A study on carbon dioxide emissions of high-polymer road maintenance technology based on life cycle assessment evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 426, 138944. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.138944>
- Zhou, X., Zhang, X., Zhang, Y., & Adhikari, S. (2022). Life cycle assessment of asphalt and cement pavements: Comparative cases in Shanxi Province. *Construction and Building Materials*, 315, 125738. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125738>
- Zischke, J. B. (1974). Reporting Requirements. *Real Property, Probate and Trust Journal*, 9. <https://heinonline.org/HOL/Page?handle=hein.journals/rpptj9&id=467&div=&collection=>