





# Herramienta para el análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> en carreteras de pavimento asfáltico: caso de estudio Baja California, México

## Tool for the Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions on Asphalt Pavement Roads: Case Study Baja California, Mexico

Juan Diego Flores Ruiz <sup>1</sup>, Marco Antonio Montoya Alcaraz <sup>2</sup>, Leonel Gabriel García Gómez <sup>3</sup>, Cynthia Carolina Martínez Lazcano <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Baja California-México, [diego.flores50@uabc.edu.mx](mailto:diego.flores50@uabc.edu.mx)

### Cómo citar

J. D. Flores Ruiz, M. A. Montoya Alcaraz, L. G. García Gómez, and C. C. Martínez Lazcano, "Herramienta para el análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> en carreteras de pavimento asfáltico: caso de estudio Baja California, México," Ingeniería: ciencia, tecnología e innovación, vol. 12, 2025. <https://doi.org/10.26495/dx868577>

### Información del artículo

Recibido: 06/05/2025  
Aceptado: 31/08/2025  
Publicado: 30/12/2025

### Autor correspondencia

Juan Diego Flores Ruiz  
[diego.flores50@uabc.edu.mx](mailto:diego.flores50@uabc.edu.mx)

Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons Attribution

(CC BY) 

**RESUMEN:** El **objetivo** de la presente investigación fue desarrollar e implementar una herramienta para calcular las emisiones de dióxido de carbono generadas durante las etapas de fase de uso y fin de vida de una sección de pavimento asfáltico, considerando como caso de estudio un tramo de la carretera Mexicali-San Felipe, Baja California, México, con un periodo de análisis de 35 años. La **metodología** empleada consistió en aplicar los principios del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) establecidos en las normas ISO 14040 y 14044, recopilando datos específicos como el tránsito vehicular, la geometría y estructura del pavimento, el rendimiento y consumo de combustible de la maquinaria utilizada para retirar y transportar el material asfáltico. Los **resultados** mostraron que, durante el periodo de estudio, la etapa fase de uso generó aproximadamente 147.56 toneladas de CO<sub>2</sub> asociadas al tráfico vehicular proyectado, lo que refleja un impacto acumulativo por el uso continuo de la carretera, mientras que la de fin de vida aportó 61.33 toneladas de CO<sub>2</sub> generadas por las actividades de retiro y eliminación de materiales dañados (residuos de construcción). Por lo tanto, se **concluye** que ambas etapas contribuyen de forma significativa al impacto total del pavimento y que se deben de incorporar en los próximos estudios de ACV para obtener una evaluación ambiental más precisa. En este sentido, la herramienta propuesta es práctica, adaptable y replicable, que representa un apoyo para la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad en el diseño, operación y rehabilitación de la infraestructura vial.

**Palabras clave:** análisis del ciclo de vida, huella de carbono, impacto ambiental, pavimentos asfálticos, transporte por carretera.

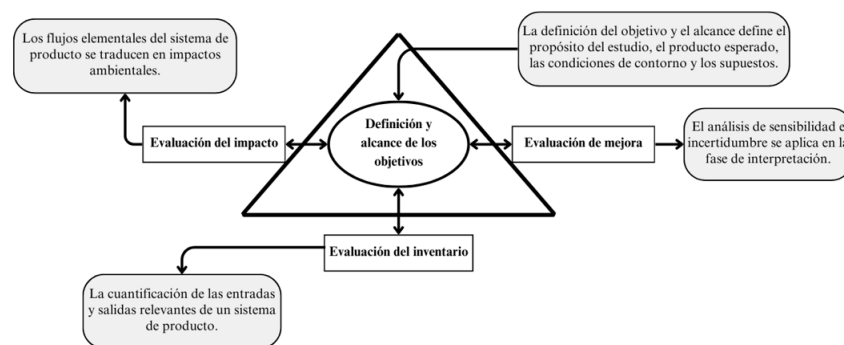
**ABSTRACT:** The **objective** of this research was to develop and implement a tool to calculate the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions generated during the use phase and end-of-life phase of an asphalt pavement section, using as a case study a segment of the Mexicali-San Felipe highway in Baja California, Mexico, with an analysis period of 35 years. The **methodology** applied was based on the Life Cycle Assessment (LCA) principles established in ISO 14040 and ISO 14044 standards, collecting specific data such as traffic volume, pavement geometry and structure, as well as the fuel consumption and performance of the machinery used for removing and transporting the asphalt material. The **results** showed that during the study period, the use phase generated approximately 147.56 metric tons of CO<sub>2</sub> associated with the projected vehicular traffic, reflecting a cumulative impact from the continuous use of the roadway, while the end-of-life phase contributed 61.33 metric tons of CO<sub>2</sub> from the activities of removing and disposing of damaged materials (construction waste). Therefore, it is concluded that both phases significantly contribute to the total impact of the pavement and should be incorporated into future LCA studies to obtain a more accurate environmental assessment. In this regard, the proposed tool is practical, adaptable, and replicable, representing a valuable support for decision-making aimed at sustainability in the design, operation, and rehabilitation of road infrastructure.

**Keywords:** Asphalt pavements, carbon footprint, life cycle assessment, environmental impact, road transportation.

## 1. INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental de la infraestructura vial se ha convertido en un área de interés creciente en los últimos años, debido al impacto generado por las emisiones de gases de efecto invernadero y el agotamiento de los recursos naturales. Los pavimentos asfálticos, ampliamente utilizados en carreteras a nivel mundial, generan una cantidad significativa de emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) no solo en su construcción y mantenimiento, sino también durante su fase de uso y al final de su vida útil. Asimismo, se determina que aproximadamente las emisiones totales de CO<sub>2</sub> que se producen por el consumo energético a nivel mundial fueron de 37,079.18 millones de toneladas en 2023 [1]. Este aumento continuo de emisiones genera repercusiones relevantes en la salud pública. Por ejemplo, [2] 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. Sumando a esto, en el año 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 [3].

Para intervenir con este problema, se han ideado diversas alternativas, una de ellas es la implementación del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que es una metodología que proporciona una evaluación integral y sistemática de los impactos ambientales de productos y sistemas a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final [4], [5]. El marco metodológico está dado por los lineamientos establecidos en la norma ISO 14040 y la ISO 14044, donde se definen cuatro etapas interrelacionadas del ACV que son el objetivo y el alcance, el Inventario del Ciclo de Vida (ICV), la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (ECV) y la Interpretación, como se muestra en la Figura 1 [6], [7].



**Figura 1.** Marco de ACV según la norma ISO 14044. Fuente: elaboración propia.

Dentro del campo de la infraestructura vial, la implementación del análisis del ciclo de vida en los pavimentos es de gran importancia ya que permite evaluar los efectos ambientales asociados al sector carretero. Este enfoque permite la medición de los impactos ecológicos generados a lo largo del periodo de servicio del pavimento, abarcando desde la etapa de extracción y producción de materiales hasta su disposición final. Uno de ellos es la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan por las diversas actividades que constituyen cada etapa del ciclo de vida. Las emisiones excesivas de estos gases son uno de los principales impulsores del cambio climático global, siendo el dióxido de carbono el principal contribuyente, representando aproximadamente el 60 % del efecto invernadero [8]. Asimismo, esta investigación analiza los pavimentos asfálticos ya que son ampliamente utilizados en todo el mundo debido a su buen desempeño en carreteras, fácil rehabilitación y las cómodas condiciones de conducción que ofrecen [9].

Diversos estudios han abordado el impacto ambiental del ciclo de vida de los pavimentos. Investigaciones como las de [10] y [11] han demostrado que la sustitución de materiales vírgenes por la incorporación de un porcentaje de plástico triturado logra reducir en un 20 % las emisiones de CO<sub>2</sub> y la utilización de pavimento asfáltico reciclado reduce las emisiones en un 30 %. Además, trabajos recientes han destacado la importancia de emplear el tipo de mezcla asfáltica tibia para la construcción de la capa de rodadura del pavimento, debido a que tiene un impacto ambiental del 15 % menor, que, a diferencia de utilizar el tipo de mezcla asfáltica caliente, esto se atribuye a que la producción de mezcla asfáltica tibia tiene un ahorro de combustible entre el 12 % y 14 % [12]. Por lo tanto, la implementación de estrategias de diseño sostenible, junto con sistemas de captura y almacenamiento de carbono (CAC), puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 10 %. Esto requiere

establecer directrices claras que prioricen las prácticas respetuosas con el medio ambiente y las tecnologías de mitigación del cambio climático [13].

El objetivo fue desarrollar una herramienta para analizar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en las etapas de fase de uso y fin de vida de los pavimentos asfálticos. Donde se busca evaluar el impacto ambiental producido por la operación de la vialidad, plantear el periodo de vida y determinar la cantidad de emisiones generadas en los procesos de retiro y disposición final del pavimento. Asimismo, tomando como referencia un caso de estudio ubicado en México, sobre la carretera Mexicali-San Felipe.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El método planteado para cuantificar las emisiones de CO<sub>2</sub> de las etapas de “fase de uso” y “fin de vida” es por medio de dos modelos que son:

- Modelo de análisis para la etapa de Fase de Uso.
- Modelo de análisis para la etapa de Fin de Vida.

Para llevar a cabo el análisis de emisiones por los distintos modelos planteados, primeramente, se debe de recopilar información. Esta etapa inicial permite obtener los datos necesarios sobre los insumos, procesos y actividades involucradas, lo cual es clave para estimar las emisiones asociadas.

### 2.1. Recopilación de datos

Para realizar el análisis de las etapas indicadas, se debe tener en consideración distintos datos acerca del caso de estudio. Donde se tiene que tener la información acerca de la geometría y estructura del pavimento, los datos viales y las estrategias de conservación del pavimento para determinar el periodo de servicio que ofrece la vialidad.

#### 2.1.1. 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 2.



**Figura 2.** Tramo del caso de estudio. Fuente: elaboración propia.

Además, la estructura del pavimento del caso de estudio está compuesta por 3 capas, la subrasante, la base granular y la capa superficial que representa la carpeta asfáltica, con una longitud total de 7.8 km. El espesor de la carpeta asfáltica es de 18.8 cm, la base granular de 19.4 cm y la sub-base de 23.8 cm.

## 2.1.2. 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 se ilustra de manera esquemática esta categorización, basada en la Norma Oficial Mexicana [14], 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.

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
		5			T2-S1
		6			T3-S2
		9			T3-S3
					T3-S2-R4
Especiales	Camiones y/o Remolques	Variables			
	Maquinaria agrícola				
	Bicicletas				
	Otros				

**Figura 3.** Clasificación general de vehículos. Fuente: extraído de [14].

Los datos viales del caso de estudio 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 tránsito diario promedio 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 1 y 2.

**Tabla 1.** 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 enero).

**Tabla 2.** 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 enero).

En la Tabla 3 se muestran los aforos, clasificación vehicular y TDPA del tramo de estudio, información proporcionada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

**Tabla 3.** 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
Sentido 1	0	3	1	13475	6.40 %	78.90 %	1.70 %	4.20 %	3.60 %	3.60 %	1.00 %	0.60 %
Sentido 2	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 enero).

## 2.2. Modelo de análisis para la etapa Fase de Uso

Este modelo se basa en el propuesto por Hammerstrom [15] 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. Los coeficientes y variables mencionadas 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 CO<sub>2</sub> que genera cada tipo de vehículo en la etapa fase de uso, es por medio de la Ecuación 1, la cual es basada en el modelo propuesto por Hammerstrom y predice las emisiones que produce el escape de los vehículos en función al consumo de combustible y de la velocidad.

Para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> se utiliza en (1).

$$E_{CO_2} = \frac{3.6 a_0 IFC 10^3}{vel} \quad (1)$$

Donde:

$E_{CO_2}$  = Emisiones de CO<sub>2</sub> 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 (2) que utiliza las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por cada tipo de vehículo en gr por cada kilómetro recorrido, el tránsito promedio anual, la clasificación vehicular y además la distancia total del tramo carretero que se está analizando.

$$TEOC = (TDPA * CLV)(E_{CO_2})(D) \quad (2)$$

Donde:

*TEOC* = Total de emisiones por operación carretera

*TDPA* = Tránsito diario promedio anual

*CLV* = Clasificación vehicular

*E<sub>CO2</sub>* = Emisiones de CO<sub>2</sub> en gr/vehículo por km

*D* = Distancia en kilómetros

Los descrito anteriormente es para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> 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. Donde el periodo de análisis del pavimento se determinó por medio del programa RevPav-5 el cual nos permite conocer la vida previsible de una estructura de pavimento ya existente, conociendo sus parámetros geométricos y de resistencia para cada capa, como son los espesores, valores de CBR, Módulos de Residencia y la Relación de Poisson, obteniendo como resultado que la estructura del pavimento necesita una reconstrucción en el año 2057, quedando un periodo de análisis desde el año 2023 al 2057 [16].

Asimismo, 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 1 y 2, teniendo como resultado las ecuaciones (3) y (4).

$$Y = 405.07x - 80570 \quad (3)$$

$$Y = 263.87x - 521575 \quad (4)$$

Por medio de la Ecuación 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 4.

### 2.3. Modelo de análisis para la etapa de Fin de Vida

Debido a que se realizó la reconstrucción del pavimento con un nuevo diseño, se retiró el material 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 asfáltico removido en la góndola para ser trasladado al lugar de depósito, que se encuentra a una distancia de 8.1 kilómetros de distancia.

Señalando que el transporte de los materiales es por medio de un camión de volteo con capacidad de 30m<sup>3</sup>, mejor conocido como camión góndola. Para transportar el material conlleva el uso de un cargador frontal con un rendimiento de 150m<sup>3</sup>/hr para colocar el material dentro del camión góndola el cual tiene la capacidad de transportar 30m<sup>3</sup> por viaje, el cual genera 1.84 kgCO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido [17]. Además, se considera que el consumo de 1 litro de diésel genera aproximadamente 2.69 kgCO<sub>2</sub> [18] Los rendimientos de la maquinaria y el consumo de combustible se muestran en la Tabla 4 y la ruta de transporte se ilustra en la Figura 4.



**Tabla 4.** Rendimientos y consumo de combustible de la maquinaria.

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

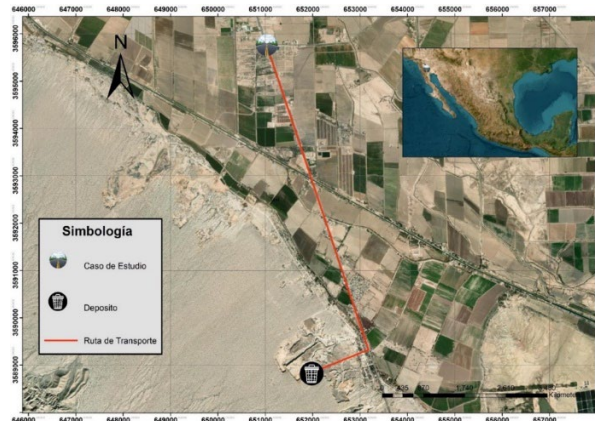
Fuente: elaboración propia.

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 cúbicos para la fresadora de pavimento y en metros cuadrados para analizar la motoniveladora.
- 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 CO<sub>2</sub>.

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 30m<sup>3</sup>.
- Multiplicar el total de litros consumidos por el factor de emisiones de CO<sub>2</sub> 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 4.** Ruta de transporte, caso de estudio - deposito. Fuente: elaboración propia.

### 3. RESULTADOS

Como parte del Análisis de Ciclo de Vida aplicado al caso de estudio, se evaluaron las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generadas durante las etapas de uso y fin de vida del pavimento. Estas etapas suelen ser menos exploradas en estudios tradicionales, pese a que pueden representar una fracción significativa del impacto ambiental total del sistema.

3.1. Fase de uso

Durante la etapa de uso, se estimaron las emisiones asociadas al tránsito vehicular sobre el tramo carretero analizado, tomando en cuenta el crecimiento proyectado del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) desde 2023 hasta 2057. La estimación considera la distancia del tramo y la cantidad de vehículos que transitan por la vialidad anualmente. Por lo tanto, los resultados muestran un incremento progresivo en las emisiones, directamente relacionadas con el crecimiento del TDPA. Por ejemplo, en el sentido Mexicali–San Felipe las emisiones aumentaron de 1.55 TonCO<sub>2</sub> en 2023 a 3.10 TonCO<sub>2</sub> en 2057, mientras que en el sentido contrario pasaron de 1.38 a 2.40 TonCO<sub>2</sub> durante el mismo periodo, como se muestra en la Tabla 5.

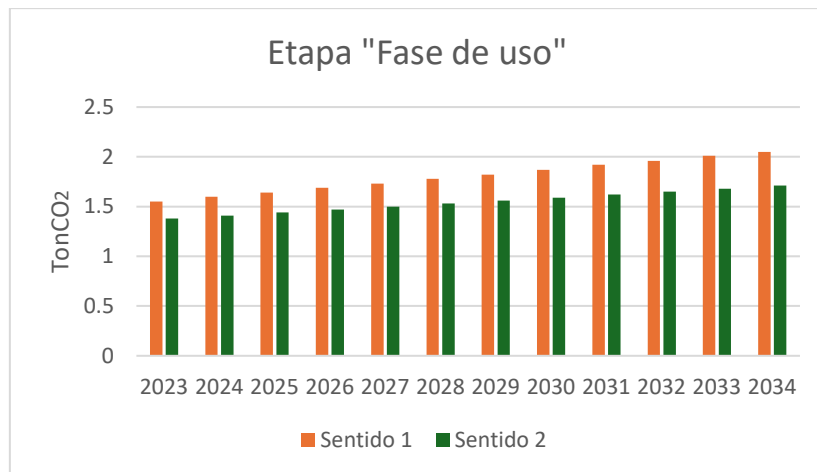
Tabla 5. Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de “fase de uso”.

Sentido 1			Sentido 2		
Año	TDPA	TonCO <sub>2</sub>	Año	TDPA	TonCO <sub>2</sub>
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	2053	20,150	2.28
2054	26,313	2.96	2054	20,414	2.31
2055	26,718	3.01	2055	20,678	2.34
2056	27,123	3.06	2056	20,942	2.37
2057	27,528	3.10	2057	21,206	2.40
Cantidad de emisiones		81.41	Cantidad de emisiones		66.15

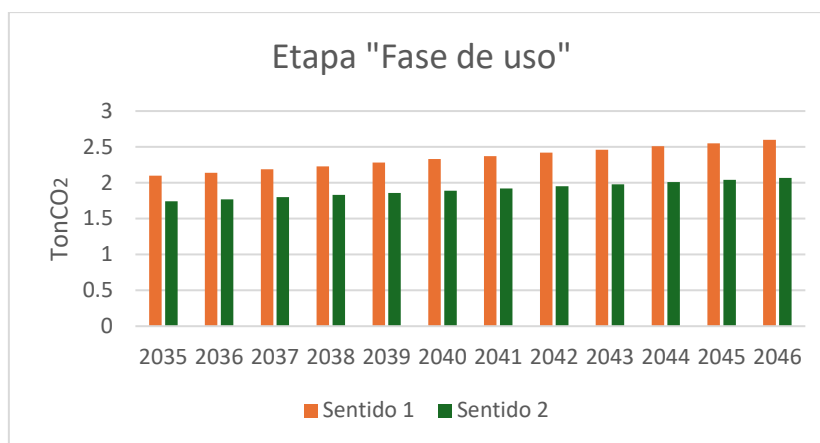
Fuente: elaboración propia.

El resultado acumulado de emisiones para ambos sentidos de circulación fue de 147.56 toneladas de CO<sub>2</sub>, desglosadas en 81.41 TonCO<sub>2</sub> para el sentido 1 y 66.15 TonCO<sub>2</sub> para el sentido 2. Este incremento progresivo de emisiones a lo largo de los años refleja el crecimiento sostenido del tránsito y resalta la importancia de considerar esta etapa dentro de los estudios de ACV en la infraestructura vial. Asimismo, en las Figuras 5, 6 y 7 se visualizan estos mismos datos.

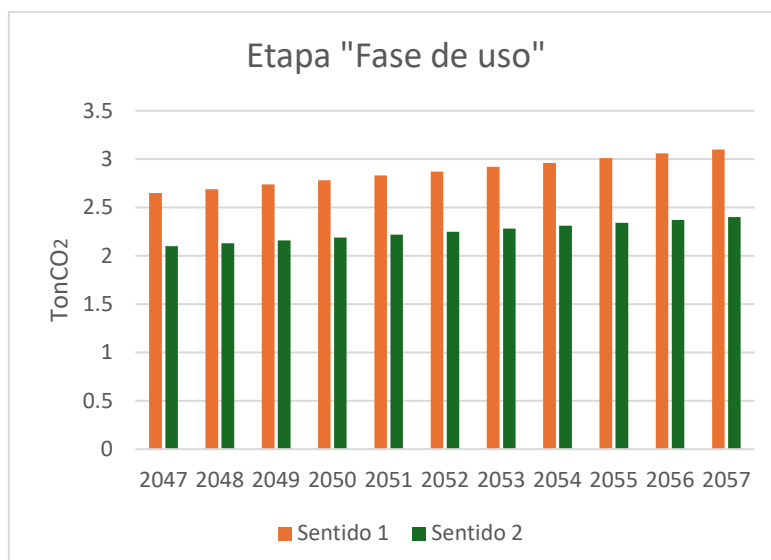




**Figura 5.** Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de "fase de uso", del año 2023 al 2034. Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.** Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de "fase de uso", del año 2035 al 2046. Fuente: elaboración propia.



**Figura 7.** Total de emisiones generadas en las diferentes actividades en la etapa de "fase de uso", del año 2047 al 2057. Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Fin de vida

En la etapa de fin de vida se consideran las emisiones generadas por el uso de la maquinaria para la demolición de la carpeta asfáltica y la base granular, así como del transporte de los residuos hasta el sitio de disposición. A diferencia de la fase de uso, en este caso se trata de un evento puntual asociado a la reconstrucción del pavimento al final de su periodo de servicio.

#### Carpeta asfáltica

Las emisiones que se generan por el uso de la maquinaria para remover la carpeta asfáltica se muestran en la Tabla 6 y las emisiones que se generan para transportar el material se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 6.** 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 <sub>2</sub>
Fresadora de pavimento	500 m <sup>2</sup> /hr	109,200 m <sup>2</sup>	219	37 lts/hr	8,103	21.80

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 7.** Emisiones generadas por el transporte de la carpeta asfáltica desechada del caso de estudio al lugar de depósito.

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

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la carpeta asfáltica, se contabilizaron 21.80 TonCO<sub>2</sub> por el uso de maquinaria (fresadora) y un total de 14.72 TonCO<sub>2</sub> por actividades de transporte (cargador frontal y góndolas), sumando un total de 36.52 TonCO<sub>2</sub>.

#### • Base granular

Las emisiones que se generan por el uso de la maquinaria para remover la base granular se muestran en la Tabla 8 y las emisiones que se generan para transportar el material se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 8.** Emisiones generadas por el uso de la maquinaria para remover la base granular.

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

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 9.** Emisiones generadas por el transporte de la base granular desechada del caso de estudio al lugar de depósito.

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

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la base granular, las emisiones por maquinaria (motoniveladora) fueron de 9.60 TonCO<sub>2</sub>, mientras que el transporte generó 15.21 TonCO<sub>2</sub>, para un total de 24.81 TonCO<sub>2</sub>.

Por lo tanto, la etapa fin de vida del pavimento aportó 61.33 toneladas de CO<sub>2</sub>, lo que representa una contribución relevante al impacto total del sistema evaluado.

## 4. DISCUSIONES

### 4.1. Valor agregado de la investigación

Este estudio presenta una nueva forma de evaluar el impacto ambiental de los pavimentos asfálticos, al incorporar de manera explícita las etapas de fase de uso y fin de vida útil dentro del análisis de ciclo de vida. La mayoría de las investigaciones previas en México y a nivel internacional tienden a enfocarse con mayor interés en las etapas de extracción y producción de materiales, la construcción del pavimento y sobre el mantenimiento y rehabilitación del mismo, ignorando las etapas posteriores. La herramienta desarrollada no solo permite cuantificar las emisiones de CO<sub>2</sub> en estas etapas, sino que también es adaptable a diferentes contextos y condiciones viales, lo que la convierte en un recurso replicable para proyectos similares.

### 4.2. Limitaciones del estudio

La estimación de emisiones en la etapa de fase de uso se realizó utilizando el modelo planteado por Hammerstrom en 1995, el cual no considera variables como la aceleración, frenado, la rugosidad (IRI, Índice de Regularidad Internacional) o la congestión vehicular que se puede presentar en el caso de estudio, por lo tanto, estas variables podrían incrementar las emisiones reales en escenarios urbanos o con tráfico irregular. Además, la investigación se limita a un solo caso de estudio (carretera Mexicali-San Felipe), por lo que las conclusiones no deben generalizarse sin adaptaciones a otras regiones. Tampoco se evaluaron otros GEI (Gases de Efecto Invernadero) como metano (CH<sub>4</sub>) u óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que podrían aportar una visión más completa del impacto ambiental.

### 4.3. Implicaciones prácticas

Los resultados indican que, durante un periodo de 35 años, la fase de uso generó 147.56 toneladas de CO<sub>2</sub> y la etapa fin de vida 61.33 toneladas de CO<sub>2</sub>. Esto sugiere que los responsables de la planeación y gestión de carreteras deberían:

- Mejorar la geometría y estructura del pavimento para reducir la resistencia vehicular y mantener un buen nivel de servicio con respecto al IRI.
- Políticas de gestión del tráfico que promuevan el uso de vehículos con menor generación de emisiones.
- La inclusión de tecnologías como vehículos eléctricos, que, aunque no fueron contemplados en este estudio, modificarían sustancialmente las proyecciones de emisiones.
- Optimizar la logística de transporte de materiales y priorizar el reciclaje in situ en la etapa de fin de vida para disminuir emisiones asociadas a la maquinaria y traslado.
- La adopción de maquinaria más eficiente o con menor consumo energético.

### 4.4. Contraste con otros estudios

Los resultados coinciden con revisiones recientes que señalan acerca de muchos ACV aplicados en pavimentos que no consideran o abordan de manera limitada las etapas de fase de uso y fin de vida, lo que podría no reflejar completamente el efecto total de los gases de efecto invernadero. Por ejemplo, de 67 estudios analizados, la etapa de fase de uso y la de fin de vida se consideraron en un menor número de estudios, donde fueron alrededor del 41 % y el 24 % de los casos [19]. Esto se debe a que la etapa fase de uso es la parte más desafiante y también incierta de todas las etapas del ciclo de vida, ya que en muchas ocasiones puede haber escasez de datos o dificultades para estimar con precisión los factores que puedan afectar los impactos en esta etapa [20].

En cuanto a otros estudios se ha demostrado que la reutilización del asfalto y el uso de nuevas tecnologías como la incorporación de mezclas asfálticas tibias logran reducir las emisiones de GEI entre un 12 % y 19 %, esto se debe a que la temperatura de la mezcla es más baja y el consumo energético es menor, mientras que en escenarios de alto contenido de asfalto recuperado puede presentarse una disminución de hasta el 60% [21], [22]. En la etapa de fin de vida, diversos estudios indican que la gestión del material de pavimento recuperado, la utilización de mezclas recicladas y el reciclaje in situ pueden reducir las emisiones hasta en un 65 % dependiendo la proporción de material reciclado [23], [24].

## 5. CONCLUSIONES

El presente estudio aporta una visión más amplia sobre como evaluar el impacto ambiental de los pavimentos asfálticos. Esto se logra al incluir de manera específica las etapas de fase de uso y fin de vida en el análisis de ciclo de vida. Este enfoque responde a la escasa atención que estas etapas han recibido en investigaciones nacionales y se alinea con tendencias internacionales en el manejo sostenible de las infraestructuras viales. Esto permite detectar impactos que han sido habitualmente omitidos, pero logran constituir una parte importante de las emisiones totales generadas a lo largo de su ciclo de vida.

Los resultados obtenidos muestran que al incluir estas etapas en el ACV del pavimento asfáltico es fundamental para obtener una estimación más precisa del impacto ambiental generado por las distintas actividades que constituyen cada etapa. Asimismo, resalta la importancia de implementar medidas de mitigación tanto en la operación diaria de la vía como al finalizar su vida útil, por ejemplo:

- Durante la fase de uso: Optimizar el flujo vehicular, promover el transporte sostenible o emplear pavimentos con menor resistencia al rodamiento.
- En el fin de vida: Reutilizar materiales, implementar técnicas de reciclaje in situ o reducir emisiones en los procesos de demolición y transporte.

Además, la herramienta desarrollada en este estudio ofrece una solución práctica y adaptable para futuros ACV en proyectos carreteros por parte de organismos públicos y privados. Su diseño permite aplicarse en diferentes contextos regionales o tecnológicos, facilitando evaluar de forma clara y consistente el daño que las actividades pueden causar al medio ambiente. Su adopción podría mejorar la toma de decisiones para impulsar infraestructuras viales más sostenibles.

Por último, la investigación recomienda ampliar el análisis para incorporar otros gases de efecto invernadero y evaluar distintos escenarios de gestión de pavimentos en diversas condiciones climáticas y de tráfico. Esto fortalecerá la base técnica para el diseño de políticas de infraestructuras bajas en carbono y para la adopción de prácticas constructivas más responsables. Por lo tanto, el incorporar de manera sistemática las etapas de fase de uso y fin de vida en los estudios de ACV no es una opción, sino un requisito esencial para avanzar hacia carreteras sostenibles y capaces de adaptarse a los retos futuros.

## 6. ACERCA DEL ARTÍCULO

**Financiamiento:** Los autores no recibieron patrocinio para la realización de la investigación.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen al CONAHCyT por el apoyo en la beca de doctorado de uno de los autores y a la Universidad Autónoma de Baja California, en especial a la Facultad de Ingeniería, Campus Mexicali, por el respaldo institucional brindado.

### Contribuciones de autoría:

Juan Diego Flores Ruiz: Conceptualización, metodología, software, validación, investigación, recursos, curación de datos, redacción, redacción,

Marco Antonio Montoya Alcaraz: Análisis formal, recursos, visualización,

Leonel Gabriel García Gómez: Análisis formal, recursos, redacción, supervisión, administración del proyecto.

Cynthia Carolina Martínez Lazcano: Validación, investigación, recursos, redacción, supervisión.

**Declaración del investigador principal:** Declaro que asumo la responsabilidad total por el contenido, la integridad académica y los resultados presentados en este trabajo, garantizando su rigor científico y cumplimiento ético.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## REFERENCIAS

- [1] EIA U.S. Energy Information Administration, "Data, Petroleum and Other Liquids, Natural Gas, Coal and Coke, Hydrocarbon Gas Liquids, Biofuels, Electricity, Total Energy, and Other Statistics," eia.gov. Accessed: Sep. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/international/data/world#/>
- [2] L. Bai et al., "Exposure to traffic-related air pollution and acute bronchitis in children: season and age as modifiers," *J. Epidemiol. Community Health*, vol. 72, no. 5, pp. 426–433, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1136/jech-2017-209948>
- [3] World Health Organization, "Ambient (outdoor) air pollution," who.int. Accessed: Sep. 14, 2023. Available: [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)
- [4] R. Frischknecht, *Lehrbuch der Ökobilanzierung*, 1st ed. Wiesbaden, Cham, Germany: Springer Spektrum, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54763-2>
- [5] ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [6] Y. Aryan, A. K. Dikshit, and A. M. Shinde, "A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures," *J. Environ. Manage.*, vol. 336, p. 117697, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117697>
- [7] European Commission - Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, and International Reference Life Cycle Data System, *General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*, Luxembourg, European Union, 2010. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC48157>
- [8] EPA, United States Environmental Protection Agency, "Report on the 2016 U.S. Environmental Protection Agency (EPA) International Decontamination Research and Development Conference," National Homeland Security Research Center, 2016. [URL](#)
- [9] H. Zhang, Z. Chen, C. Zhu, and C. Wei, "An innovative and smart road construction material: thermochromic asphalt binder," In *New Materials in Civil Engineering*, Elsevier, 2020, pp. 691–716. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00022-3>
- [10] H. Assaf, and A. Abu Abdo, "Life cycle assessment of incorporating recycled materials in pavement design," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 36, no. 7, pp. 473–484, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.04.001>
- [11] Y. Zhong et al., "A study on carbon dioxide emissions of high-polymer road maintenance technology based on life cycle assessment evaluation," *J. Clean. Prod.*, vol. 426, p. 138944, Nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138944>
- [12] A. Milad et al., "A comparative review of hot and warm mix asphalt technologies from environmental and economic perspectives: Towards a sustainable asphalt pavement," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 22, p. 14863, Nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214863>
- [13] Y. Liu, Y. Wang, D. Li, F. Feng, Q. Yu, and S. Xue, "Identification of the potential for carbon dioxide emissions reduction from highway maintenance projects using life cycle assessment: A case in China," *J. Clean. Prod.*, vol. 219, pp. 743–752, May. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.081>
- [14] 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, NOM-012-SCT-2-2017, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2017. [https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6890/sct5a12\\_C/sct5a12\\_C.html](https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6890/sct5a12_C/sct5a12_C.html)
- [15] U. Hammerstrom, "Proposal for a Vehicle Exhaust Model in HDM-4," Swedish National Road Admin. Road Traffic Managem. Div., Borlänge, Sweden, Final Report ISOHDM, 1995.
- [16] G. Castillo, J. A. Pérez, F. A. Núñez, and R. Gómez, *Dispav-5 Versión 3.0: Actualización del sistema para el diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones*, Serie Investigación y Desarrollo, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2014. [Online]. Available: <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/consultasspii/DetallePublicacion.aspx?id=4972>
- [17] C. Celauro, F. Corriere, M. Guerrieri, and B. Lo Casto, "Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 34, pp. 41–51, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.001>
- [18] United States Environmental Protection Agency (EPA), "Greenhouse Gases Equivalencies Calculator – Calculations and References," epa.gov, 2023. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>

- [19] Y. Aryan, A. K. Dikshit, and A. M. Shinde, "A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures," *J. Environ. Manage.*, vol. 336, p. 117697, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117697>
- [20] N. J. Santero, E. Masanet, and A. Horvath, "Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 9–10, pp. 801–809, Jul. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
- [21] M. R. Gruber, and B. Hofko, "Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from recycled asphalt pavement production," *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4629, Mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/su15054629>
- [22] X. Liu, L. Deng, H. Zhang, and J. Yu, "Quantitative study on carbon emissions of modified recycled asphalt mixture based on life cycle assessment method," *Developments in the Built Environment*, vol. 20, p. 100584, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100584>
- [23] J. Shacat, R. Willis, and B. Ciavola, *The Carbon Footprint of Asphalt Pavements A Reference Document for Decarbonization*, Greenbelt, Maryland: National Asphalt Pavement Association, 2024, pp. 1-62. <https://www.asphaltpavement.org/uploads/documents/Climate/NAPA-SIP109-TheCarbonFootprintOfAsphaltPavements-March2024.pdf>
- [24] X. Chen, and H. Wang, "Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect," *J. Clean. Prod.*, vol. 187, pp. 148–157, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.207>