



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

ACV una alternativa para definir el perfil medio ambiental de los pavimentos asfálticos

David Alejandro Gómez Marín¹, Andrea Del Pilar Salinas Acosta²,
Ezequiel García Rodríguez³, Rafael Soto Espitia⁴

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, 1216197b@umich.mx

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, 2146560h @umich.mx

³ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, ezequiel.garcia@umich.mx

⁴ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, rsoto@umich.mx

Resumen

A nivel mundial, el fenómeno del cambio climático representa una preocupación de considerable magnitud en la actualidad. Según proyecciones para el periodo 2020-2100, se espera un incremento de temperatura que oscila entre 2.7 y 4.5 °C. En el sector carretero, se generan pasivos ambientales durante la construcción y conservación contribuyendo al calentamiento global. Por lo anterior, es necesario realizar estrategias de conservación integrales que sean sostenibles y sustentables, priorizando la consideración del medio ambiente. Aunque actualmente existen metodologías para evaluar el perfil ambiental de los pavimentos, estas no abarcan todas las fases involucradas en la creación de productos, procesos o servicios relacionados.

El propósito de la presente investigación es analizar la reconstrucción de pavimentos utilizando el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) como herramienta principal para definir el perfil medioambiental de dichos pavimentos. El enfoque del ACV será integral, cubriendo todas las etapas desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, conocido como "de la cuna a la tumba". Esta metodología nos permitirá examinar detalladamente productos, procesos y servicios, proporcionando información específica de cada fase. El objetivo principal será identificar las etapas críticas que generan mayor contaminación, especialmente relevantes para la evaluación del impacto ambiental en los tramos carreteros. Con base en estos resultados, se podrán definir estrategias eficaces para la conservación y construcción de pavimentos más sostenibles desde el punto de vista ambiental. Este enfoque implicará la implementación de una combinación estratégica de sistemas convencionales y nuevas tecnologías, buscando reducir significativamente el impacto ambiental negativo asociado con la infraestructura vial.

Palabras Clave: ACV, Sostenibilidad, Sustentabilidad, Pavimentos.

1 Introducción

A nivel mundial el cambio climático, en particular, juega un papel significativo ya que se estima que genera una disminución de los recursos naturales. Este fenómeno impacta de manera notable en todos los sectores, incluyendo especialmente el de la construcción y mantenimiento de carreteras. Por lo tanto, resulta fundamental implementar mejoras y contribuciones efectivas para mitigar este fenómeno y sus efectos adversos.

Actualmente en el mantenimiento, conservación y construcción de carreteras existen metodologías para la elaboración de proyectos, donde se contemplan aspectos económicos y de desempeño de los pavimentos, así mismo agregan aspectos medio ambientales, como extensiones de impacto ambientales o manifestaciones de impacto ambiental, ya que en ellas se abordan cuestiones de manera general.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología, que nos ayuda a definir los perfiles ambientales de una manera profunda y proporciona la bases para cualquier estrategia de sostenibilidad.

El ACV tiene la virtud de acotar o ampliar el análisis de acuerdo con los alcances y objetivos a los que se quiera llegar de cada proyecto, abarcando desde la cuna a la tumba en la cual se contempla desde la extracción de la materia prima, hasta el fin de su vida útil. Para llevar a cabo la evaluación del Análisis



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

de Ciclo de Vida, existen software especializados que facilitan el cálculo y la interpretación de los resultados, asegurando así una aplicación eficiente y precisa de esta metodología en el contexto de la infraestructura vial.

En este artículo se establece el perfil ambiental de un proyecto de conservación de pavimentos mediante la aplicación de la metodología antes mencionada.

2 Antecedentes

La metodología del ACV puede tener diferentes alcances y ser tan profunda o tan superficial dependiendo requerimientos específicos de cada caso. Esta evaluación puede ser desde una perspectiva amplia, conocida técnicamente como "Cradle to grave" (cuna a la tumba), que cubre desde la extracción de la materia prima hasta que se convierte en residuo que es la disposición final del producto, proceso o servicio. También existe el enfoque "de la cuna a la cuna" (Cradle to Cradle), que considera la recirculación del producto a través del reciclaje o reutilización, cerrando así el ciclo de vida y promoviendo la economía circular.

Esta metodología es utilizada con gran frecuencia en las empresas para evaluar sus productos o los productos que planean adquirir y definir la aportación de daño medio ambiental que estos generan regularmente para la definición de declaraciones ambientales de productos en donde es requerida lo cual da una mayor claridad en la adquisición de estos. Además, proporciona una comparación objetiva entre dos o más productos.

En el contexto de la construcción, rehabilitación y conservación de carreteras, el ACV es fundamental para desarrollar proyectos con criterios de sostenibilidad. A pesar de que existen normas locales e internacionales que describen el ACV como la Norma ISO 14040 sobre Análisis del Ciclo de Vida (ACV), igualmente la normativa nacional mexicana NMX-SAA-14040-IMNC-2008. Estas normas ofrecen un marco general para la realización de análisis del ciclo de vida aplicables a diversas industrias. Sin embargo, hasta la fecha, ninguna de estas normativas está específicamente diseñada para abordar el análisis en el sector de pavimentos. Esto resalta la necesidad de definir con mayor precisión cómo aplicar esta metodología a cada etapa de los proyectos viales, incluyendo manifestaciones y extensiones de impacto ambiental que actualmente se utilizan para nuevas construcciones.

Las herramientas actuales para la elaboración de proyectos de obras nuevas o conservación de carreteras a menudo no integran de manera integral el perfil medioambiental en el análisis económico y funcional del proyecto, lo cual limita la capacidad de alcanzar criterios de sostenibilidad. El enfoque de ciclo de vida del ACV facilita la toma de decisiones basadas en evidencia científica y técnica, permitiendo la selección de las mejores tecnologías disponibles desde la etapa de diseño para mitigar los impactos ambientales de los productos, procesos o servicios involucrados.

3 Metodología

En este contexto y hablando específicamente de la metodología y sus lineamientos, nos basamos en la metodología de la norma internacional ISO14044, la cual propone 4 etapas específicamente, como se muestra en la Figura 1. Estas son:

3.1 Definición del alcance y objetivos

Es aquí en este punto donde se determinan los límites del estudio, en ellos se expresan las peticiones y se define la dirección de estudio de cada producto, proceso o servicio.

3.2 Análisis de inventario



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

En esta etapa se define el inventario y parámetros de las entradas al sistema es decir se obtienen cantidades de materiales, energía y transporte en otras palabras se debe llegar hasta los flujos elementales.

3.3 Evaluación de impacto ambiental

Es el proceso de cálculo, caracterización y cuantificación de los efectos medio ambientales del sistema estudiado.

3.4 Interpretación de resultados

Se analizan e identifican los puntos estudiados en el sistema, así como lo resultados en cada etapa y se determina la fiabilidad y coherencia de ellos, finalmente es aquí donde se determinan las conclusiones de este.

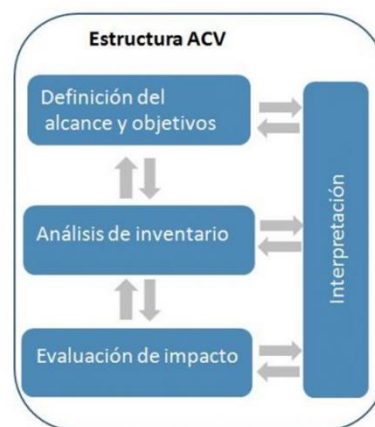


Figura 1. Estructura de ACV según la norma ISO 14044

Es importante mencionar que la estructura propuesta es caracterizada por las relaciones interconectadas representadas por flechas entre cada una de sus etapas. Esta característica es clave, ya que cualquier error en la definición de los alcances y objetivos en una etapa puede tener repercusiones significativas en etapas posteriores, incluida la interpretación de los resultados. De esta manera, todas las etapas están intrínsecamente relacionadas entre sí. Pues bien se podrá llegar a la etapa de interpretación de resultados y percatarse que se definieron incorrectamente los alcances y objetivos o alguna otra etapa.

Debido a la complejidad en el cálculo de las afectaciones ambientales, se recurre a diversos softwares especializados para modelar todos los procesos involucrados en este sistema, entre los más usados se pueden mencionar a GaBi, OpenLCA, SiMaPRo, Umberto, Ecoinvent, entre otros.

4 Resultados

Se llevo a cabo el estudio bajo los procesos propuestos por la metodología normada, sin embargo, se consideró necesario ampliar estas 4 etapas a razón de mejorar el proceso para el estudio del pavimento, la cual se presenta en la Figura 2. En el transcurso de la investigación se evidenció que es necesario profundizar en algunas etapas para una mejor definición.

La cual, en lugar de emplear 4 etapas, contiene 7, donde se le incorporan las etapas de: Unidad funcional, flujo de referencia y límites del sistema.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

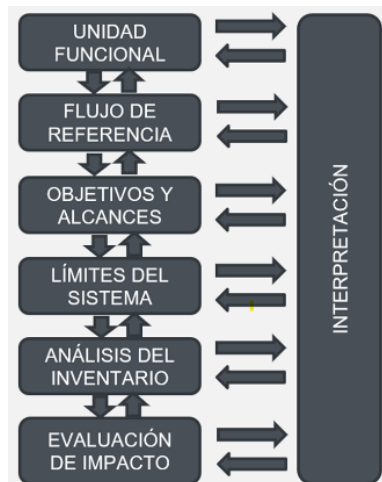


Figura 2. Propuesta de estructura para el ACV de pavimentos

4.1 Unidad funcional

Es una unidad de referencia para la evaluación de los pavimentos, que pueda servir como un multiplicador para evaluaciones masivas o posteriormente mayores, la cual debe contestar específicamente las preguntas de; ¿Qué hace?, ¿Cuánto tiempo?, ¿Qué tan bien?, ¿Dónde definir características? y ¿Qué estructura de pavimento tiene?

Para este caso de estudio se consideró la “Construcción de un pavimento carretero de una estructura de carpeta asfáltica de 10 centímetros de espesor y base hidráulica de 30 centímetros de espesor; compacto y corrido; que favorece la funcionalidad del tránsito, de un 1 kilómetro y ancho de carriles de 3.5 metros cada uno respectivamente, para un periodo de retorno de 20 años, dicha propuesta se ubica en Ario de Rosales, Michoacán México, se consideraron características que cumpla con la calidad, comodidad y desempeño de acuerdo con las normativas nacionales aplicables”.

4.2 Flujo de referencia

Se define las características generales del pavimento o carretera, es decir, se definirá el tipo de carretera, sus anchos, además de que se obtienen más datos, se tendrán datos duros del inventario del ciclo de vida.

4.3 Límites del sistema

Se acota el sistema, es aquí donde se definen las entradas y salidas estableciendo que tan amplio será el análisis e identificando posibles errores de sistema.

Los alcances del sistema quedan de la siguiente manera:

4.3.1 Objetivo

Definir el perfil medio ambiental de la rehabilitación de un pavimento flexible utilizando como herramienta de apoyo la metodología del Análisis de Ciclo de Vida.

4.3.2 Alcance

Para el estudio se consideran todas las entradas y salidas que contienen cada una de las etapas de la rehabilitación de un pavimento flexible, las cuales son: Fresado, construcción de base hidráulica, construcción de carpeta asfáltica, conservación, Rehabilitación, vida útil y disposición final o fin de vida útil. Es decir, el sistema es “De la cuna A la tumba”.

4.4 El Inventario de ciclo de vida



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Se definieron las cantidades de cada una de las etapas, que se representan en 3 principales rubros, que son la materia prima que se definen las cantidades de cada material utilizado y para cada etapa, su unidad es Toneladas o kilogramos, la segunda es la energía, es importante definir este insumo para cada etapa donde su unidad funcional es en kilowatts por hora y finalmente se define el transporte que esta dado en la unidad de toneladas transportadas por cada kilómetro. Es importante mencionar la importancia que tiene la correcta definición del inventario de ciclo de vida en cada proceso, el éxito de los análisis de ciclo de vida radica esencialmente en un buen inventario de ciclo de vida. Se presenta en la Tabla 1. el resultado del inventario de ciclo de vida para el pavimento en estudio para cada etapa.

Tabla 1. Inventario de ciclo de vida por procesos

Resumen por procesos Pavimento convencional			
Proceso	Materiales (ton)	Energía(KWH)	Transporte (Tkm)
Fresado	6190.9848	343.23	58167.20
Base Hidráulica	4695.6	34865.83	68495.28
Carpeta Asfáltica	1582.42	28264.30	60155.32
Conservación	7120.89	5035.73	270698.92
Rehabilitación	791.25	14175.05	30077.84
Fin de vida útil	0.7462	85.80	14541.80
Total	20381.88831	82769.94804	502136.3656

4.5 Evaluación de los impactos ambientales

Debido a que el cálculo de las afectaciones ambientales es complejo, se utilizan diversos softwares especializados en ello y esencialmente ya cuentan con bibliotecas con diferentes materiales previamente evaluados. En este estudio se utilizó la herramienta digital SIMAPRO 8.2.3.0, una empresa líder en software de análisis de ciclo de vida y sostenibilidad con sede en Alemania, en este software se modeló el análisis del pavimento.

La interfaz de esta herramienta tiene las 4 etapas marcadas en la normativa ISO 14044 tal como se muestra en la Figura 3, es por ello por lo que resulta ser una herramienta muy amigable al momento de modelar el sistema a estudiar. El método que utiliza la SIMAPRO es el método ReCiPe el cual consiste en evaluar y caracterizar los impactos ambientales de los sistemas, ReCiPe que proviene de “Re” Recurso, “Ci” Impacto y “Pe” efectos potenciales.

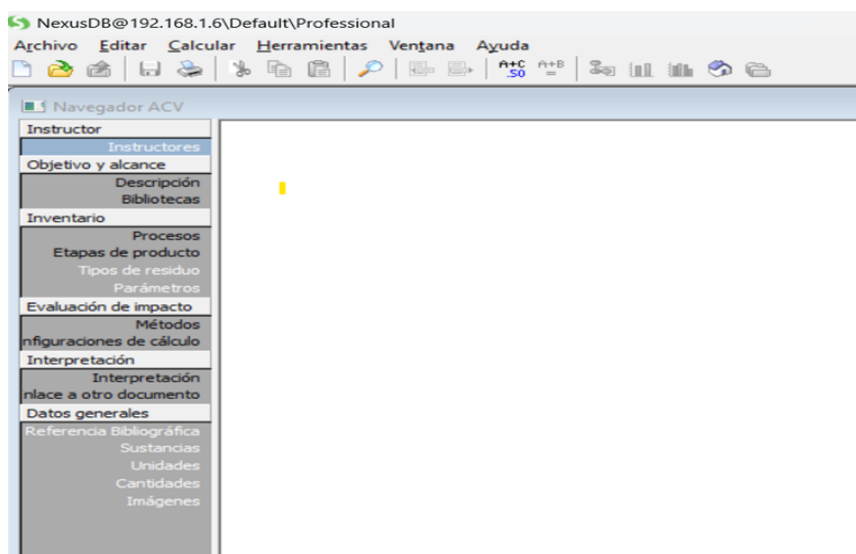


Figura 3. Interfaz del software SIMAPRO



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

4.6 Interpretación de resultados

Una vez modelado el sistema en la herramienta SIMAPRO, los resultados que se incluyen en la Tabla 2. Se incluyen 18 flujos elementales como son: Cambio climático, Desgaste de la capa de ozono, Acidificación terrestre, Eutrofización de agua dulce, Eutrofización marina, Toxicidad humana, Formación de oxidantes Fotoquímicos, Formación de material particulado, Ecotoxicidad Terrestre, Ecotoxicidad en Agua fresca, Ecotoxicidad Marina, Radiación ionizante, Ocupación del suelo Agrícola, Ocupación suelo urbano, Transformación suelo natural, Uso de agua, Agotamiento de los metales y Uso de combustibles fósiles; que a su vez los podemos clasificar en 3 flujos específicos de afectación, que son: La Salud Humana, Entorno Natural y los recursos naturales.

Tabla 1. Flujos elementales para el ACV y su clasificación.

Flujo Elemental	Salud Humana	Entorno Natural	Recursos Naturales
Cambio climático	✓	✓	
Desgaste de la capa de ozono	✓	✓	
Acidificación terrestre		✓	
Eutrofización de agua dulce		✓	
Eutrofización marina		✓	
Toxicidad humana	✓		
Formación de oxidantes fotoquímicos	✓	✓	
Formación de material particulado	✓	✓	
Ecotoxicidad terrestre		✓	
Ecotoxicidad en agua fresca		✓	
Ecotoxicidad marina		✓	
Radiación ionizante	✓	✓	
Ocupación del suelo agrícola		✓	
Ocupación suelo urbano		✓	
Transformación suelo natural		✓	
Uso de agua			✓
Agotamiento de los metales			✓
Uso de combustibles fósiles			✓

Los resultados obtenidos de este análisis se presentan a continuación en la tabla 3. Presentan la categoría que más contamina a la que menos contamina, esto nos ayuda a identificar en qué etapa del proceso estamos contaminando y que tipo de contaminación se eleva. En el caso de estudios se encontró que la etapa donde se genera la mayor contaminación es en la etapa de vida útil, en la categoría es la toxicidad humana. Al llegar a este punto, podríamos redefinir algunos conceptos, tal como los alcances, objetivos, así como el inventario del ciclo de vida habría que ampliarlo o mejorarlo, entre otros.

Tabla 3. Resultados del Análisis de ciclo de vida del pavimento de estudio

Categoría de impacto	Unidad	Fresado	Base Hidráulica	Carpeta asfáltica	Vida Útil	Fin	Total
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq	116156.1005	1801568.4309	959849.5917	4678238.7274	19567.5979	7,575,380.4483
Ecotoxicidad Marina	kg 1,4-DB eq	101167.1395	1842649.1086	1000272.5634	4261594.6093	19050.8294	7,224,734.2501
Cambio climático	kg CO2 eq	15977.9377	128888.6324	53140.5072	399387.1500	2453.8435	599,848.0708
Agotamiento del recurso fósil	kg oil eq	5716.7821	42301.0789	30291.2786	177157.9139	902.5104	256,369.5640
Ocupación de suelo Agrícola	m2a	248.9836	4280.1734	12967.8271	45608.7029	35.8197	63,141.5066
Radiación ionizante	kBq U235 eq	1213.9096	11884.3869	10033.5660	38702.4622	190.7867	62,025.1115
Agotamiento de los metales	kg Fe eq	848.6985	6175.5266	9139.4882	13996.9146	85.9805	30,246.6084
Ocupación de Suelo Urbano	m2a	543.3660	4782.9705	3212.6438	9560.5199	130.3213	18,229.8215
Uso de agua	m3	58.6543	5479.0904	2055.3772	8728.2540	8.9087	16,330.2846
Ecotoxicidad de Agua fresca	kg 1,4-DB eq	126.2720	2838.8838	1004.1624	5209.8808	22.4248	9,201.6238
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	94.5760	791.5715	382.6382	2789.4557	15.6619	4,073.9033
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	111.9403	622.3001	348.1046	2028.9982	19.4267	3,130.7700
Formación de material particulado	kg PM10 eq	38.8318	413.5265	177.1064	1176.7135	7.2970	1,813.4752
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq	49.1407	284.6338	128.3805	545.0253	20.0926	1,027.2729
Transformación natural del Suelo	m2	6.0003	75.1723	60.9206	219.0521	0.9707	362.1160
Eutrofización de Agua Fresca	kg P eq	1.8607	49.6611	20.3995	132.0463	0.2305	204.1979
Eutrofización Marina	kg N eq	4.2324	32.5648	19.1801	93.5651	0.7162	150.2586
Desgaste de la capa de Ozono	kg CFC-11 eq	0.0028	0.0155	0.0251	0.0702	0.0005	0.1141



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

5 Conclusiones

El ACV es una herramienta que define los impactos generalmente en Toxicidad humana, Entorno natural y recursos naturales las cuales se refieren a la extensión de estos, esto nos indica la profundidad de la metodología evaluando estas tres líneas importantes en la toma de decisiones en gestión por afectaciones medioambientales.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se presenta como una herramienta altamente confiable para definir el perfil medioambiental en la construcción de carreteras en general. Esta metodología proporciona un análisis profundo y detallado que permite obtener resultados precisos y fundamentados.

El ACV no solo nos brinda una comprensión integral de los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un proyecto, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, sino que también facilita la evaluación comparativa entre diferentes opciones y tecnologías. Esto es crucial para la toma de decisiones y definición de estrategias de conservación y construcción que promuevan prácticas con criterios sostenibles.

Se puede definir el ACV como una herramienta de mejora, es decir, que el estudio se puede mejorar y ampliar tanto como sea posible y necesario para cada caso de acción. Se considera conveniente incluir el ACV en la elaboración de proyectos carreteros, para definir proyectos sostenibles. Pues con el presente estudio se puede decir que si es posible definir el perfil medio ambiental de los pavimentos asfálticos utilizando la metodología de Análisis de ciclo de vida.

6 Bibliografía

ISO 14044. (2006). ISO 14044:2006 Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices. Normas ISO.

Acevez Gutiérrez, H., López Chávez, O., Mercado Ibarra, S., & Arévalo Razo, J. (2020). Huella de carbono de una pavimentación con la metodología del ACV y SIMAPRO. *Energías Renovables*, 8-20.

Sosa-Rodríguez, F. S. (2015). Política del cambio climático en México. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 6-7.

NMX-SAA-14040-IMNC-2008. (2008). Gestión Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Principios y Marco de Referencia (ISO 14040:2006, IDT).