

Análisis comparativo económico de la implementación de pavimentos reciclados y mezcla asfáltica en caliente en un tramo carretero.

Comparative economic analysis of the implementation of recycled pavements and hot mix asphalt on a highway section.

Chávez Valencia, Luis Elías*, Pérez Hernández, Diana Teresa**,
Martínez Molina, Wilfrido***

*Doctor en Administración y Gestión Empresarial. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. México. Email: lechavez@ugto.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0830-7747>.

**Maestra en Gerencia de Proyecto de Construcción. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. México. Email: diaupt@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8440-9412>.

***Doctor en Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. Email: wilfrido.martinez@umich.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3301-4949>.

Correo para recibir correspondencia:

Luis Elías Chávez Valencia
lechavez@ugto.mx

RESUMEN

OBJETIVO: Mostrar las ventajas económicas y ambientales por medio de la generación de los precios a costo directo de pavimentos reciclados y de mezclas asfálticas en caliente.

MATERIAL Y MÉTODO: Consistió en la indagación documental de los detalles técnicos de dos secciones tipo en tangente, con una longitud de un kilómetro y un ancho de corona de 10.5 metros, una de la sección se hipotetizó con intervención por rehabilitación con pavimento reciclado y la otra con mezcla asfáltica en caliente.

RESULTADOS: Se observó que es más económico optar por un sistema de reciclado con un ahorro de 16.56% con respecto a la mezcla asfáltica virgen. Así mismo, el mayor impacto económico se puede notar en los materiales, aun cuando se tiene mayor gasto en equipo, se logra un ahorro de 78.38 % con respecto a la mezcla asfáltica virgen.

CONCLUSIONES: Este análisis comparativo del presupuesto a costo directo de rehabilitación mediante mezclas en caliente de planta y la reciclada en el sitio, permitió concluir que, aunque implica un mayor gasto en equipo, el ahorro es significativo en materiales lo que es muy acorde con la Ley General de Economía Circular (MX).

PALABRAS CLAVE: ventaja comparativa, rehabilitación pavimentos, costo directo, presupuesto, explosión de insumos.

ABSTRACT

OBJECTIVE: To demonstrate the economic and environmental advantages by determining the direct costs of recycled pavements compared to hot mix asphalt.

MATERIAL AND METHOD: A desk study was conducted on the technical specifications of two typical tangent sections, each measuring one kilometer in length with a crown width of 10.5 meters. One section was modeled using rehabilitation with recycled pavement, while the other utilized hot mix asphalt.

RESULTS: The recycling system proved more economical, yielding a 16.56% cost reduction compared to virgin asphalt mix. Furthermore, the most significant economic impact was observed in raw materials: despite higher equipment expenses, a 78.38% savings in materials was achieved relative to virgin asphalt mix.

CONCLUSIONS: This comparative direct-cost budget analysis between plant-produced hot mix asphalt rehabilitation and on-site recycling demonstrates that, while equipment costs increase, material savings are substantial—aligning closely with Mexico's General Circular Economy Law (*Ley General de Economía Circular*).

KEYWORDS: comparative advantage, pavement rehabilitation, direct cost, budget, resource breakdown structure.

Los pavimentos se construyen con el objetivo de satisfacer necesidades urbanas y sociales de manera rápida y eficiente, tales como el movimiento y traslado de personas, bienes y servicios (Pérez y Chávez, 2024). Para alcanzar estas metas es necesario elaborar una combinación de estrategias sustentables que permitan el empleo racional de los recursos sin comprometer su disponibilidad para las futuras generaciones, y teniendo en cuenta el ahorro económico que esto representa (Peralta, 2020). El pavimento de una carretera, que es la capa superior de rodamiento, está sujeto a la acción continua del tráfico que genera falla por flujo plástico y por efectos del medio ambiente (Chávez et al., 2011), que provoca envejecimiento natural de los materiales que redundan en la disminución de los niveles de seguridad y confort del tráfico, a tal grado que, en general, se requiere realizar una intervención de conservación periódicamente.

Los pavimentos asfálticos deben ser intervenidos desde la conservación, rehabilitación o reconstrucción durante su vida útil, lo que implica inversiones onerosas de millones de pesos. Sin embargo, los costos directos de estas actividades pueden disminuir mediante el uso de materiales reciclados en comparación con los materiales de banco (Méndez, 2025). Aunado a lo anterior, existen consecuencias ambientales que incluyen el agotamiento de recursos naturales, emisiones de gases de efecto invernadero y problemas relacionados con la disposición de materiales residuos de la construcción (Pérez y Chávez, 2024). Esta técnica de intervención en los pavimentos presenta ventajas técnicas y económicas que son tan significativas que el Gobierno Federal de México inició la entrega de 30 trenes de repavimentación a los gobiernos estatales (SICT, 2025); no obstante, es importante señalar que el “know-how” puede llegar a ser un tema complejo (IMT-Publicaciones, 2025). Por lo anterior, los pavimentos reciclados no sólo llegan a ser una opción de innovación tecnológica que reduce la alteración del ambiente, sino que presenta una relación alta de costo-efectividad económica sobre la forma de construcción tradicional. Por lo que esta investigación se encauzó en realizar un estudio de costo-efectividad por medio del análisis de precios unitarios a costo directo por kilómetro para la rehabilitación con mezcla asfáltica reciclada y mezcla asfáltica en caliente.

MATERIAL Y MÉTODO

La metodología empleada en la investigación consistió en la indagación documental de los detalles técnicos de dos secciones tipo en tangente con una longitud de un kilómetro y un ancho de corona de 10.5 metros, una de la sección se hipotetizó con intervención por rehabilitación con pavimento reciclado y la otra con mezcla asfáltica en caliente; y, específicamente, se buscaron todas las actividades relacionadas con el proceso constructivo ya que son la base de los trabajos

o partidas que a su vez reflejan los conceptos (materiales, mano de obra y maquinaria) fundamentales que integran el costo directo del análisis comparativo económico.

Proceso constructivo

El primer paso es evaluar la capacidad estructural del pavimento existente para verificar que la vida remanente sea mayor que la vida de servicio esperada de la capa asfáltica rehabilitada, de forma que la intervención presente una alta viabilidad. La durabilidad estimada, la efectividad y desempeño de los diferentes procesos de reciclado en caliente en el lugar dependen de la capacidad estructural remanente, de las condiciones locales, del clima, del tránsito, del tipo de técnica, de la calidad de los materiales usados y de calidad del trabajo de intervención y sus niveles confieren una alta factibilidad (Pérez y Chávez, 2024). Además, se debe verificar que el pavimento a reciclar tenga un espesor mínimo de tres pulgadas y sin capas intercaladas de materiales (FHWA, 2025).

Para mezcla asfáltica en caliente desde planta, se requiere:

- **Carpeta asfáltica:** Se escarifica y remueve la carpeta que genera materiales de desperdicio por unidad de obra terminada.
- **Base Hidráulica:** Se procede al mejoramiento de la capa de base hidráulica existente, agregando material pétreo en el porcentaje necesario, de tal manera que se obtenga un espesor de 20 cm. El material que forme esta capa se deberá humedecer al grado óptimo y compactar al 100% de su peso volumétrico seco máximo (PVSM) de la prueba AASHTO modificada (Pérez y Chávez, 2024). Los materiales mezclados previo a su utilización deberán cumplir con las normas de calidad contenidas en N.CMT.4.02.002 (IMT_Normas, 2025) y para su ejecución se deberán seguir todos los lineamientos indicados en inciso G de N.CTR.CAR.1.04.002 (IMT_Normas, 2025).
- **Riego de Impregnación:** Se aplica una capa de emulsión asfáltica catiónica sobre la superficie de la capa de base hidráulica debidamente terminada y verificada su calidad en todo el ancho de la sección, superficialmente seca y barrida a razón de 1.5 L/m². En los hombros de los taludes del material que formen el pavimento se aplicará doble riego de impregnación en un ancho de 0.50 m. La emulsión catiónica debe ser del tipo consignado en el inciso G de la Norma N.CTR.CAR.1.04.004 (IMT_Normas, 2025); así mismo deberá cumplir con la calidad establecida en la Norma N.CMT.4.05.001 (IMT_Normas, 2025).

- **Riego de Liga:** Se aplica una capa de emulsión asfáltica catiónica en todo el ancho de la sección donde se aplicó previamente el riego de impregnación a razón de 0.5 L/m² sobre la superficie de la capa de base hidráulica debidamente terminada y verificada su calidad. La emulsión catiónica deberá ser del tipo mencionado en el inciso G de la Norma N.CTR.CAR.1.04.005 (IMT_Normas, 2025), así mismo deberá cumplir con las normas de calidad establecidas en la Norma N.CMT.4.05.001 (IMT_Normas, 2025).
- **Carpeta Asfáltica:** La carpeta asfáltica tiene un espesor de 10 cm en estado terminado y debe cumplir con las características establecidas en el proyecto, así como lo indicado en la norma N.CMT.4.05.003.D.1.1.1 (IMT_Normas, 2025), además de alcanzar el 95% de su Masa Volumétrica Máxima por procedimiento Marshall.

Es conveniente mencionar que el Recuperado de Pavimento Asfáltico (RAP) permite ahorros económicos en materias primas debido a que el agregado pétreo se retoma del pavimento en uso, lo que reduce costos debido a la explotación, triturado, transporte y secado de estos materiales, y también decrementa el costo de fabricación de las mezclas ya que disminuye la cantidad de asfalto por diseño, porque el RAP tiene una cantidad remanente significativamente aprovechable (Guzmán et al., 2021), para la rehabilitación con mezcla asfáltica RAP, se requiere:

- **Precalentadoras:** Consiste en 2 calentadores, las cuales irradian energía térmica a base de aire caliente de inyección y retorno hacia el pavimento asfáltico existente, a la profundidad de la penetración requerida sin romper los agregados, ni calcinar el pavimento existente y evitar la producción de reacciones adversas contaminantes. El mecanismo de calentamiento está equipado de tal forma que la aplicación de calor se da debajo de las camas cerradas para suavizar la capa superficial del pavimento y poderlo así fresar. (Pérez y Chávez, 2024)
- **Fresadora:** El material asfáltico es disgregado y no pulverizado por medio de un molino de tambor rotatorio con un ancho de 3.50 m, el cual corta el pavimento existente aprovechable de 2.0 hasta 7.0 cm de profundidad. El material que es removido se mezcla con un “agente rejuvenecedor” para restituir las propiedades mermadas durante el envejecimiento del cemento asfáltico, después se almacena en forma de camellón al centro de la sección fresada con una temperatura de salida de 80 a 110 °C.
- **Mezcladora Secadora:** Una vez acamellonado el material se agrega al pugmill para realizar la mezcla en la tolva de la Mixer con hasta un 25 % de mezcla asfáltica en caliente de planta. El proceso de mezclado continua hasta crear un producto homogéneo que es

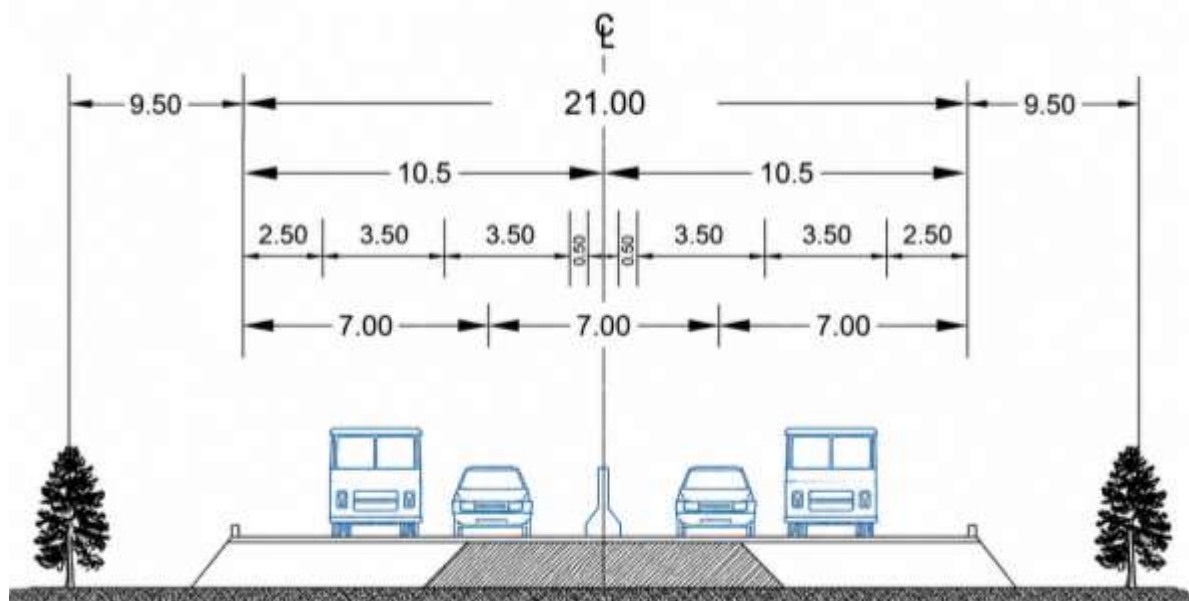
depositado en la tolva de la extendidora. La mezcla final (75% Recuperado + 25% Adicionado) se deposita en la extendidora (Finisher) para ser tendida y compactada dando cumplimiento en la curva de diseño Marshall, para una carretera de acuerdo con la norma N-CTR-1-04-006-00 (IMT_Normas, 2025).

Precios unitarios a costo directo

Después de conocer el procedimiento constructivo, se determinaron los precios unitarios (PU) que permitieron evaluar la alternativa más rentable, para dos secciones tipo en tangente con una longitud de un kilómetro y un ancho de corona de 10.5 metros cada una (Figura 1 y Figura 2). En un primer caso, la intervención a la sección fue con sustitución de carpeta y colocación de mezcla nueva, y un segundo caso fue para una sección con reciclado en caliente en el lugar. Además se asumió que la capacidad estructural de ambas secciones es la misma, con una expectativa de vida útil de la rehabilitación de 10 años (Pérez y Chávez, 2024).

La Ley de Obra Pública y Servicios relacionados con la misma, para el Estado y los Municipios de Guanajuato, en el Artículo 63, Fracción I, define los costos directos como los cargos por concepto de materiales, mano de obra, incluidos los de previsión y seguridad social, herramienta, maquinaria y equipo de construcción que requiera el proyecto (Congreso-Guanajuato, 2025).

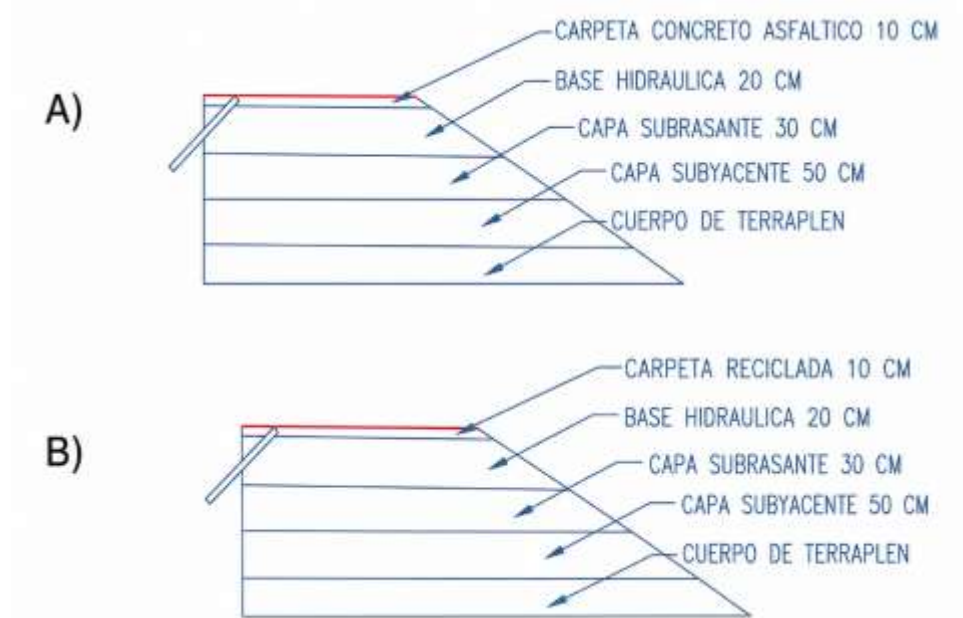
Figura 1
Sección tipo tangente



Nota. Elaboración propia.

Figura 2

Detalle de la estructura del pavimento



Nota. Elaboración propia. Donde A es la sección con sustitución de carpeta asfáltica y colocación de mezcla asfáltica nueva; y B es la sección con reciclado en caliente.

De acuerdo con el Artículo 185 del Reglamento de Obra Pública y Servicios Relacionados con la Misma (RLOPSRM), se entiende como precio unitario el importe de la remuneración o pago total que debe cubrirse al contratista por unidad de concepto terminado y ejecutado conforme al proyecto, especificaciones de construcción y normas de calidad (Pérez y Chávez, 2024). El precio unitario se integra con los costos directos correspondientes al concepto del trabajo, de los costos indirectos, del costo por financiamiento, del cargo por la utilidad del contratista y de los cargos adicionales (Pérez, 2024).

El costo directo son las erogaciones hechas por la contratista por los materiales, la mano de obra y la maquinaria utilizada para la realización de un concepto de trabajo conforme a las especificaciones de proyecto y las normas aplicables para su correcta ejecución. El costo directo por los materiales es el correspondiente a las erogaciones que hace el contratista para adquirir o producir todos los materiales necesarios que se obtiene al multiplicar el costo básico unitario vigente de mercado¹, y el consumo de materiales por unidad de medida del concepto de trabajo

¹ Que cumpla con las normas de calidad especificadas para el concepto de trabajo de que se trate y que sea el más económico por unidad del material puesto en el sitio de los trabajos. Los materiales que se usen en los trabajos podrán ser permanentes o temporales, los primeros son los que se incorporan y forman

(Pérez y Chávez, 2024). El costo directo por la mano de obra es el que se deriva de las erogaciones que hace el contratista por el pago de salarios reales al personal que interviene en la ejecución del concepto de trabajo², se obtiene al dividir el salario real y el rendimiento del personal que interviene directamente en la ejecución de cada concepto de trabajo por jornada de ocho horas³ (Pérez y Chávez, 2024). El salario real se obtiene al multiplicar salarios tabulados de las diferentes categorías y especialidades por factor de salario real, de acuerdo con lo dispuesto en el Artículo 191 de RLOPSRM.

Los salarios reales son propuestos por el licitante o contratista de acuerdo con la zona o región donde se ejecuten los trabajos; así mismo, el rendimiento es la cantidad de trabajo que desarrolla el personal que interviene directamente en la ejecución del concepto de trabajo por jornada de ocho horas y es relativo al tipo de trabajo a desarrollar y las condiciones ambientales, topográficas y en general aquellas que predominen en la zona o región donde se ejecuten (Pérez y Chávez, 2024).

El costo horario directo de la maquinaria o equipo de construcción (Art.194 de RLOPSRM) es el que se deriva del uso correcto de las máquinas o equipos adecuados y necesarios para la ejecución del concepto de trabajo, de acuerdo con lo estipulado en las normas de calidad y especificaciones generales y particulares que determine la dependencia o entidad y conforme al programa de ejecución convenido. El costo horario directo por maquinaria o equipo de construcción es el que resulta de dividir el importe del costo horario de la hora efectiva de trabajo entre el rendimiento de dicha maquinaria o equipo en la misma unidad de tiempo (Pérez y Chávez, 2024).

Para la determinación del costo horario directo por hora efectiva de trabajo de la maquinaria o equipo de construcción es necesario tomar en cuenta la operación y uso adecuado de la máquina o equipo seleccionado, de acuerdo con sus características de capacidad y especialidad para desarrollar el concepto de trabajo de que se trate. Este costo se integra con costos fijos,

parte de los trabajos; los segundos son los que se utilizan en forma auxiliar y no forman parte integrante de los trabajos. En este último caso se deberá considerar el costo en proporción a su uso.

² Incluyendo al primer mando, que está integrado hasta la categoría de cabo o jefe de una cuadrilla de trabajadores. No se considerarán dentro de este costo las percepciones del personal técnico, administrativo, de control, supervisión y vigilancia que corresponden a los costos indirectos. Art. 192.

³ Salvo las percepciones del personal técnico, administrativo, de control, supervisión y vigilancia que corresponden a los costos indirectos, incluyendo todas las prestaciones derivadas de la Ley Federal del Trabajo, la Ley del Seguro Social, la Ley del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores o de los contratos colectivos de trabajo en vigor.

consumos y salarios de operación, calculados por hora efectiva de trabajo (Pérez y Chávez, 2024).

El rendimiento horario de la máquina o equipo considerados como nuevos dentro de su vida económica, en las condiciones específicas del trabajo a ejecutar y en las correspondientes unidades de medida debe corresponder a la cantidad de unidades de trabajo que la máquina o equipo ejecuta por hora efectiva de operación, de acuerdo con los rendimientos que determinen, en su caso, los manuales de los fabricantes respectivos, la experiencia del contratista, así como las características ambientales de la zona donde se realizan los trabajos (Pérez y Chávez, 2024).

El sobrecosto contempla los indirectos de oficina central y de campo, los intereses por el financiamiento de la obra en caso de ser aplicable, la utilidad de la contratista ejecutora de los trabajos y los cargos adicionales solicitados por la contratante. Así mismo, el costo indirecto corresponde a los gastos generales necesarios para la ejecución de los trabajos no incluidos en los costos directos que realiza el contratista, tanto en sus oficinas centrales como en el sitio de los trabajos, y comprende entre otros: los gastos de administración, organización, dirección técnica, vigilancia, supervisión, construcción de instalaciones generales necesarias para realizar conceptos de trabajo, el transporte de maquinaria o equipo de construcción, imprevistos y, en su caso, prestaciones laborales y sociales correspondientes al personal directivo y administrativo (Art. 211. RLOPSRM) (elpreciounitario, 2026).

El financiamiento corresponde a los gastos derivados por la inversión de recursos propios o contratados que realice el contratista para dar cumplimiento al programa de ejecución de los trabajos calendarizados y valorizados por periodos. (Art. 214. RLOPSRM.) Es decir, los intereses que cobra el contratista por financiar la obra. Además, el cargo por utilidad es la ganancia que recibe el contratista por la ejecución del concepto de trabajo; será fijado por el propio contratista (Art. 219. RLOPSRM) (elpreciounitario, 2026).

Los cargos adicionales son las erogaciones que debe realizar el contratista, por estar convenidas como obligaciones adicionales que se aplican después de la utilidad del precio unitario, porque derivan de un impuesto o derecho que se cause con motivo de la ejecución de los trabajos y que no forman parte de los costos directos, indirectos y por financiamiento, ni del cargo por utilidad. Únicamente quedarán incluidos en los cargos adicionales aquellos que deriven de ordenamientos legales aplicables o de disposiciones administrativas que emitan autoridades competentes en la

materia, como derechos e impuestos locales y federales y gastos de inspección y supervisión. (Art. 220. RLOPSRM) (elpreciounitario, 2026).

RESULTADOS

Después de considerar una sección longitudinal de un kilómetro con un ancho de corona de 10.5 metros y un espesor de 10 centímetros, se analizaron los precios unitarios a costo directo, de la Tabla 1 a la Tabla 4, se muestra el análisis de precios unitarios (PU), y en la Tabla 5 se presenta el presupuesto, así mismo la Tabla 6 es la explosión de insumos para la rehabilitación de carpeta con mezcla asfáltica virgen.

Tabla 1

Análisis de PU de escarificación y remoción de las capas

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Equipo costo horario					
Eq-MT	Motoniveladora Caterpillar modelo 120k	h	0.016686	1154.02	19.26
Eq-CF	Cargador de ruedas Caterpillar modelo 950 GC	h	0.008343	1034.99	8.63
	Suma de equipo costo horario				27.89
	Auxiliar				
Aux-001	Acarreo de material primer km	m3-km	1	10.21	10.21
Aux-002	Acarreo de material para km subsecuentes	km-sub	1	8.16	8.16
	Suma de auxiliar				18.37
	Costo directo				46.26
	Indirectos de oficina			0%	0.00
	Indirectos de campo			0%	0.00
	Financiamiento			0%	0.00
	Utilidad			0%	0.00
	Cargos adicionales			0%	0.00
	Otros porcentajes			0%	0.00
	Total de sobre costos			0%	0.00
	Precio unitario				46.26
	Cuarenta y seis pesos 26/100 MXN				

Nota. Elaboración propia. Donde importe es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y costo, en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso.

Tabla 2

Análisis de PU del mejoramiento de la base hidráulica al 100%

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material					
MT-Agreg 1 1/2	Agregado de 1 1/2 a fino (precio incluye merma, abundamiento y acarreo)	m3	1	370.2	370.20
	Suma de material				370.20
Auxiliar					
Aux-001	Acarreo de material primer km	m3-km	1	56.95	56.95
Aux-002	Acarreo de material km subsecuente	km-sub	1	10.21	10.21
Aux-003	Operaciones de mezclado, tendido, compactado al 100%de PVSM, incluye incorporación de humedad	m3	1	8.16	8.16
	suma de auxiliar				75.32
	Costo directo				445.52
	Indirectos de oficina			0%	0.00
	Indirectos de campo			0%	0.00
	Financiamiento			0%	0.00
	Utilidad			0%	0.00
	Cargos adicionales			0%	0.00
	Otros porcentajes			0%	0.00
	Total de sobrecostos			0%	0.00
	Precio unitario				445.52
	Cuatrocientos cuarenta y cinco pesos 52/100 MXN				

Nota. Elaboración propia. Donde importe es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y costo, en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso

Tabla 3

Análisis de PU del riego de impregnación con emulsión asfáltica catiónica a razón de 1.5 L/m²

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material					
MT-EM60	Emulsión asfáltica para impregnación de rompimiento lento al 60%	L	1	9.25	9.25
	suma de material				9.25
Equipo costo horario					
Eq-CKW	Camion Kenworth t300 motor Paccar PX-60 240 HP platform	h	0.001667	616.74	1.03
Eq-Petro	Petrolizadora computarizada y automatizada Seaman Gunnison Modelo CRC-H capacidad 6000 L	h	0.001667	619.33	1.03
	suma de equipo costo horario				2.06
	Costo directo				11.31
	Indirectos de oficina			0%	0.00
	Indirectos de campo			0%	0.00
	Financiamiento			0%	0.00
	Utilidad			0%	0.00
	Cargos adicionales			0%	0.00
	Otros porcentajes			0%	0.00
	Total de sobrecostos			0%	0.00
	Precio unitario				11.31
	Once pesos 31/100 MXN				

Nota. Elaboración propia. Donde importe es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y costo, en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso.

Tabla 4

Análisis de PU de carpeta asfáltica compactada a 95%

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material					
MT-Cta	Carpeta asfáltica en caliente gruesa 1/2 modificada cemento asfáltico Grado PG 76-22	m3	1	2400.75	2400.75
	Suma de material				2400.75
	Equipo costo horario				
Eq-Barr	Barredora frontal Rosco 4820 autopropulsada	h	0.02	284.29	5.68
	Suma de equipo costo horario				5.69
Auxiliar					
Aux-001	Acarreo de material primer km	m3-km	1	10.21	10.21
Aux-002	Acarreo de material km subsecuente	km-sub	4	8.16	32.64
Ope-Tend	Operaciones de tendido y compactado de carpeta y base asfáltica en caliente	m3	1	169.17	169.17
Aux-004	Aplicación de riego de liga	L	16.67	16.13	268.8871
	Suma de auxiliar				480.91
	Costo directo				2887.34
	Indirectos de oficina			0%	0.00
	Indirectos de campo			0%	0.00
	Financiamiento			0%	0.00
	Utilidad			0%	0.00
	Cargos adicionales			0%	0.00
	Otros porcentajes			0%	0.00
	Total de sobrecostos			0%	0.00
	Precio unitario				2887.34
	Dos mil ochocientos ochenta y siete pesos				
	34/100 MXN				

Nota. Elaboración propia. Donde importe es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y costo, en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso.

Tabla 5

Presupuesto de rehabilitación de carreteras con mezcla asfáltica virgen

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
001	Asfalto				
01	Escarificación y remoción de las capas de pavimentación distintas a la carpeta existente construida con anterioridad desperdiciando el material por unidad de obra terminada EP 01.T	m3	1050	46.26	48573.90
			Cuarenta y seis pesos 26/100 MXN		
02	Mejoramiento de base hidráulica al 100 %	m3	2100	445.52	935592.00
			Cuatrocientos cuarenta y cinco pesos 52/100 MXN		
03	Riego de impregnación con emulsión asfáltica catiónica a razón de 1.5 L/m2	L	15750	11.31	178140.80
			Once pesos 31/100 MXN		
04	Carpeta asfáltica compactada al 95%	m3	1050	2887.34	3031710.05
			Dos mil ochocientos ochenta y siete pesos 34/100 MXN		
	Total de asfaltos				4194016.80
	Subtotal del presupuesto				4194016.80

Nota. Elaboración propia. Donde PU es precio unitario e importe es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y PU, ambas columnas en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso.

Tabla 6

Explosión de insumos de rehabilitación con mezcla asfáltica virgen

Clave	Descripción	Unidad	Tipo	Cantidad	P.U.	Monto
Tipo:	Materiales					3918524.69
MT-Aceite	Lubricante Aceite	L	Material	152.28	80.00	12182.40
MT-Agre 1 1/2	Agregado 1 1/2 a fino (precio incluye merma, abundamiento y acarreo)	m3	Material	2100.00	370.20	777420.00
MT-Agua	Agua apta para su uso en la construcción	m3	Material	630.00	40.00	25200.00
MT-CTA	Carpeta asfáltica en caliente, gruesa 1 1/2 modificada, cemento asfáltico PG 76-22	m3	Material	1050.00	2400.75	2520787.50
MT-Diesel	Diesel	L	Material	16899.81	18.25	308421.53
MT-EM60	Emulsión asfáltica catiónica para impregnación con rompimiento lento al 60%	L	Material	15750.00	9.25	145687.50
MT-EM65	Emulsión asfáltica catiónica con rompimiento rápido al 65%	L	Material	14002.80	9.20	128825.76
Tipo:	Mano de obra					138277.75
MO-Cabo	Cabo de oficios	Jor	Mano de obra	13.67	509.91	6970.47
MO-OEM	Operador de equipo mediano	Jor	Mano de obra	25.59	509.91	13048.60
MO-Operador	Operador maquinaria pesada	Jor	Mano de obra	71.14	672.48	47840.23
MO-R	Rastrillero	Jor	Mano de obra	164.05	429.25	70418.46
Tipo:	Herramienta					3869.52
%EQ-Seguridad	Equipo de seguridad	(%) mo	Herramienta	0.02	77390.3	1547.80
%Herr-Menor	Herramienta menor	(%) mo	Herramienta	0.03	77390.3	2321.70
Tipo:	Equipo					133347.58
C.F. Eq-Barr	Barredora frontal ROSCO 4820 autopropulsado motor diésel turbo	h	Equipo	21.00	44.4	932.40
C.F. Eq-CAC	Camión cisterna de 8 m3 de capacidad sobre camión t300 Kenworth motor Paccar PX-6 200 HP	h	Equipo	157.50	63.8	10048.50

Continúa

Tabla 6

Explosión de insumos de rehabilitación con mezcla asfáltica virgen

Clave	Descripción	Unidad	Tipo	Cantidad	P.U.	Monto
Tipo:	Materiales					3918524.69
C.F. Eq-CF	Cargador de ruedas Caterpillar modelo 950 GC	h	Equipo	8.76	504.12	4416.0912
C.F. Eq-Ckw	Camion Kenworth t300 motor Paccar PX-6 240 HP	h	Equipo	253.85	69.6	17667.96
C.F. Eq-CN	Plataforma Compactador de neumáticos Caterpillar modelo CW 34 lastre 27t	h	Equipo	35.00	334.01	11690.35
C.F. Eq-CS	motor C4.4 131HP Compactador doble rodillo vibratorio Caterpillar modelo CB-534D lastre 10.4t vibración de amplitud variable modelo 3054C 130 HP	h	Equipo	56.00	325.26	18214.56
C.F. Eq-MT	Motoniveladora Caterpillar modelo 120k	h	Equipo	35.02	712.33	24945.79
C.F. Eq-PAV	Asfaltadores Caterpillar modelo AP655D	h	Equipo	26.25	1063.4	27914.25
C.F. Eq-Petro	Petrolizadora computarizada Seaman Gunnison modelo CRC-H capacidad 6000 L	h	Equipo	47.48	137.98	6551.29
C.F. Eq-Vol7	Camión volteo capacidad de 7 m3 Henworeth t300 motor Paccar Px-6 240 HP	h	Equipo	167.99	65.28	10966.38
Importe a	costo	directo	en	presupuesto:		4194019.55

Nota. Elaboración propia. Donde PU es precio unitario y monto es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y PU, ambas columnas en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso.

Asimismo, en la Tabla 7 se muestra el análisis de precio unitario (PU) y en la Tabla 8 se presenta el presupuesto, además la Tabla 9 es la explosión de insumos para la rehabilitación con mezcla asfáltica reciclada.

Tabla 7

Análisis de precios unitarios de rehabilitación con mezcla asfáltica reciclada

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Monto
Tipo:	Materiales				
MT-Diesel	Diesel	L	35.00	18.25	638.75
	Suma material				638.75
	Tipo: Mano de obra				
MO-C1	Cuadrilla 1 (1/4 cabo + 2 ayudantes)	Jor	0.041667	1035.21	43.13
MO-Oper	Operador maquina pesada	Jor	0.020833	672.46	14.01
	Suma de mano de obra				57.14
	Tipo: Equipo				
Eq-Tren	Reciclado AR2000 (precalentadores, fresadora y mixer)	h	0.285	8493.75	2420.72
	Suma de equipo				2420.72
	Tipo: Auxiliar				
MT-Carpeta	Carpeta virgen 25%	m3	0.25	820.73	205.18
	Suma auxiliar				
	Costo directo				3321.79
	Indirectos de oficina			0%	0
	Indirectos de campo			0%	0
	Financiamiento			0%	0
	Utilidad			0%	0
	Cargos adicionales			0%	0
	Otros porcentajes			0%	0
	Total sobrecostos			0%	0
	Precio unitario				3321.79
	Tres mil trescientos veintiún pesos 79/100				
	MXN				

Nota. Elaboración propia. Donde el monto es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y costo, en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso.

Tabla 8

Presupuesto de rehabilitación con mezcla asfáltica reciclada

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
001	Asfalto reciclado	m3	1050	3321.79	3487884.44
001	Tren de reciclaje				
	Total de asfalto reciclado				3487884.44
	Subtotal del presupuesto				3487884.44

Nota. Elaboración propia. Donde PU es precio unitario e importe es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y PU, ambas columnas en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso.

Tabla 9

Explosión de insumos de rehabilitación con mezcla asfáltica reciclada

Clave	Descripción	Unidad	Tipo	Cantidad	P.U.	Monto
Tipo:	Materiales					847037.78
MT-Aceite	Lubricante Aceite	L	Material	13.93	80	1114.40
MT-Agua	Agua apta para su uso en la construcción	m3	Material	26.25	40	1050.00
MT-CTA	Carpeta asfáltica en caliente, gruesa 1 1/2 modificada, cemento asfáltico PG 76-22	m3	Material	65.63	2400.75	157561.22
MT-Diesel	Diesel	L	Material	37660.94	18.25	687312.15
Tipo: Mano de obra						80646.18
MO-Ayd	Ayudante	Jor	Mano de obra	87.51	429.22	37561.04
MO-cabo	Cabo de oficios	Jor	Mano de obra	14.36	509.88	7321.88
MO-OEM	Operador de equipo mediano	Jor	Mano de obra	2.30	509.88	1172.72
MO-Operador	Operador maquinaria pesada	Jor	Mano de obra	25.26	672.486	16987.00
MO-R	Rastrillero	Jor	Mano de obra	41.01	429.25	17603.54
Tipo: Herramienta						3144.16
%EQ-Seguridad	Equipo de seguridad	(%) mo	Herramienta	0.02	63483.25	1269.67
%Herr-Menor	Herramienta menor	(%) mo	Herramienta	0.03	62483.25	1874.50
Tipo: Equipo						2568744.29
C.F. Eq-Barr	Barredora frontal ROSCO 4820 autopropulsado motor diésel turbo	h	Equipo	5.25	44.4	233.1
C.F. Eq-CAC	Camión cisterna de 8 m3 de capacidad sobre camión t300 Kenworth motor Paccar PX-6 200 HP	h	Equipo	6.56	46.7	306.35
C.F. Eq-CN	Compactador de neumáticos Caterpillar modelo CW 34 lastre 27t motor C4.4 131HP	h	Equipo	8.75	67.1	587.12
C.F. Eq.-CS	Compactador doble rodillo vibratorio Caterpillar modelo CB-534D lastre 10.4t vibración de amplitud variable modelo 3054C 130 HP	h	Equipo	8.75	351.29	3073.78

Continúa

Tabla 9

Explosión de insumos de rehabilitación con mezcla asfáltica reciclada

Clave	Descripción	Unidad	Tipo	Cantidad	P.U.	Monto
Tipo:	Materiales					847037.78
C.F. Eq-PAV	Asfaltadores Caterpillar modelo AP655D	h	Equipo	6.56	342.08	2244.04
C.F. Eq-Vol7	Camión volteo capacidad de 7 m3	h	Equipo	18.37	1118.41	20545.19
	Henworeth t300 motor Paccar Px-6 240 HP					
Eq-Tren	Recicladora AR2000 (incluye: precalentadores, fresadora y mixer)			299.25	8493.75	2541754.69
Importe a costo directo en presupuesto:						3499572.41

Nota. Elaboración propia. Donde PU es precio unitario y monto es la cantidad que resulta de la multiplicación de cantidad y PU, ambas columnas en pesos mexicanos a la fecha del estudio de caso.

DISCUSIÓN

Los presupuestos a costo directo de la Tabla 5 y la 8 se resumen en la Tabla 10, donde se puede observar que es más económico optar por un sistema de reciclado con una disminución de \$694,447.14 MXN con respecto a la mezcla asfáltica virgen que representa un ahorro del 16.56%, (Figura 3).

Tabla 10

Presupuesto a costo directo

	Cantidad (m3)	Presupuesto MXN
Mezcla asfáltica virgen	1,050	4,194,019.55
Mezcla asfáltica reciclada	1,050	3,499,572.41

Nota. Elaboración propia.

Asimismo, el mayor ahorro se puede notar en los materiales (Tabla 11), que es el resumen de la explosión de insumos (Tabla 6 y 9), donde se puede observar una diferencia de \$3,071,486.91, a favor del tren de reciclado con respecto a la mezcla asfáltica virgen, aun cuando se tiene mayor gasto en equipo, se obtuvo un ahorro de 78.38 % en los materiales (Figura 3).

Tabla 11

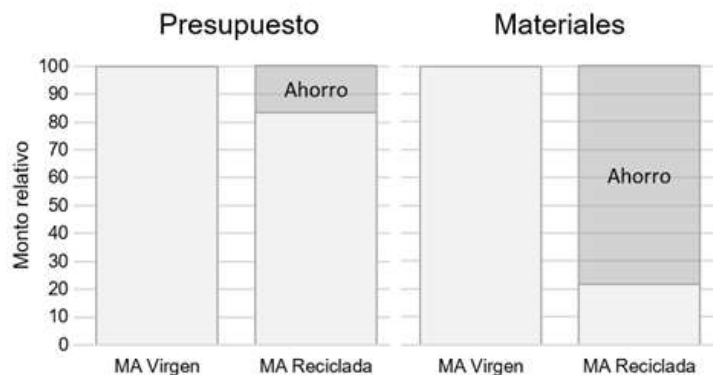
Comparación de explosión de insumos

	Mezcla asfáltica virgen	Mezcla asfáltica reciclada	
Clave	Monto MXN	Monto MXN	Diferencia MXN
Tipo: materiales	3,918524.69	847,037.78	3,071,486.91
Tipo: mano de obra	138,277.75	80,646.18	57,631.57
Tipo: herramienta	3,869.52	3,144.16	725.36
Tipo: equipo	133,347.585	2,568,744.289	-2,435,396.70
Total	4,194,019.55	3,499,572.41	694,447.14

Nota. Elaboración propia.

Figura 3

Ahorros obtenidos en el presupuesto y en los materiales



Nota. Elaboración propia. Donde: MA es mezcla asfáltica.

Por lo anterior, el sistema de reciclado presenta ventajas económicas que redundan en ahorros, siempre y cuando las condiciones técnicas de la vialidad y el lugar permitan el uso en los proyectos viales con alto impacto positivo hacia el medio ambiente y la revalorización de los materiales que es lo que se pretende en la Ley General de Economía Circular (LGEC) de recién entrada en vigencia (Camara_diputados, 2026).

Así mismo, desde el punto de vista ambiental la opción de reciclado es uno de los mejores escenarios del análisis de ciclo de vida de los pavimentos debido “a la capacidad del equipo Remixer de realizar las labores que en otros escenarios requieren de un grupo más numeroso de unidades” (Caballero, 2021, p. 99), ya que la extracción de materias primas desde un entorno natural es mínima, porque se reutiliza gran parte del material de la carpeta asfáltica envejecida.

Finalmente, otros investigadores con análisis similares llegaron a resultados de ahorro de 13.70% de RAP con respecto al pavimento construido con mezcla asfáltica de planta, así como 85.52% de ahorro en materiales que son similares a las obtenidas en esta investigación, además cabe recalcar que: “el proceso de reciclaje ofrece ahorros significativos en energía y materiales no renovables, así como en los fondos económicos destinados a la conservación de las vías” (Ríos-Alcaraz, 2024) coadyuvando a la sostenibilidad ambiental, a los objetivos de desarrollo sustentable, y a mantener un infraestructura vial a largo plazo en condiciones óptimas.

Entonces los beneficios económicos que tiene el reciclaje de materiales proveniente de los pavimentos deteriorados existentes también son una alternativa para reducir los efectos ambientales negativos; por lo que el uso de RAP es una medida que asegura la construcción de caminos y carreteras de una manera rentable y ambientalmente responsable (Pérez y Chávez, 2024).

CONCLUSIONES

Para el tramo tipo analizado (1km de longitud, 10.5m de corona y 10cm de espesor de intervención, con vida útil esperada de 10 años y capacidad estructural equivalente en ambos casos), la rehabilitación mediante reciclado en caliente en sitio presenta un menor costo directo que la rehabilitación con mezcla asfáltica en caliente de planta, con un ahorro total de \$694,447.14 MXN que equivale al 16.56 % del presupuesto por rehabilitación convencional.

El principal origen del ahorro se concentra en materiales, con una diferencia de \$3,071,486.91 MXN a favor del reciclado. Este efecto compensa el incremento del costo directo por equipo asociado al tren de reciclaje, que en el caso estudiado es superior al del método convencional y representa 78.58% de ahorro.

Este análisis comparativo del presupuesto a costo directo de estas formas de rehabilitación mediante mezclas en caliente de planta y la reciclada en el sitio permite concluir que, aunque implica un mayor gasto en equipo, el ahorro es significativo en materiales lo que es muy acorde con la LGEC ya que es importante “incrementar la vida útil de los productos; minimizar, recuperar, aprovechar y valorizar los residuos” (Camara_diputados, p. 1); la alternativa con reciclado se alinea con el principio de aprovechamiento y valorización de residuos al reincorporar material existente al proceso constructivo, reduciendo la demanda de materiales vírgenes y el volumen potencial para disposición. Además, es razonable estimar que el alto costo en equipo puede disminuir conforme el análisis sea mayor a un kilómetro de vialidad, es decir que en un proyecto de mayor longitud se podrán observar mayores rendimientos de la maquinaria, por dilución de costos fijos del equipo, dejando así una mejor utilidad para la empresa. Esta condición debe verificarse mediante escenarios explícitos (p. ej., 2, 5 y 10 km) para estimar el punto a partir del cual el reciclado maximiza la rentabilidad y la eficiencia operativa.

Los resultados presentados corresponden exclusivamente a costos directos (materiales, mano de obra, herramienta y equipo) bajo los rendimientos y precios unitarios adoptados. Por tanto, para decisiones de inversión y contratación se recomienda complementar con: costos indirectos, financiamiento, utilidad y cargos adicionales; costos de movilización/desmovilización del tren; y un análisis de sensibilidad a variables críticas (precio del combustible, rendimiento horario, porcentaje de mezcla virgen adicionada, distancias de acarreo y condiciones de operación).

El reciclado ofrece ahorros significativos de energía, de materiales no renovables y de los recursos económicos destinados a la conservación de carreteras, aunado con las nuevas políticas socioeconómicas de México y su uso de trenes de pavimentación en el programa nacional de conservación de carreteras del 2026; además de que el proceso constructivo involucra menores interrupciones de tráfico, mayor seguridad y menores molestias para el usuario que con los métodos convencionales, la rehabilitación con mezcla asfáltica reciclada es una excelente opción para su implementación en la conservación de las vías terrestres mexicanas, nacionales y estatales. En síntesis, para el caso y supuestos analizados, el reciclado en caliente en sitio es la alternativa económicamente preferente a costo directo, principalmente por el ahorro en materiales, manteniendo como condición necesaria la viabilidad técnica del pavimento existente para ser reciclado.

REFERENCIAS

- Caballero, C. (2021). *Análisis de ciclo de vida comparativo de pavimentos en la ciudad de México*. [Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, UNAM]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/RepoFi/17617/6/Tesis.pdf>
- Camara_diputados. (29 de enero de 2026). *Ley general de economía circular*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEC.pdf>
- Chávez, L., Hernández, C. y Manzano, A. (2011). Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(4), 373-382. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432011000400002
- Congreso-Guanajuato. (17 de noviembre de 2025). *Ley de obra pública y servicios relacionados con la misma para el estado y los municipios de Guanajuato*. <https://www.congresogto.gob.mx/leyes/163>
- elpreciounitario. (26 de marzo de 2026). *elpreciounitario*. <https://elpreciounitario.com/analisis-de-precios-unitarios/>
- FHWA. (18 de noviembre de 2025). *Asphalt pavement recycling with reclaimed asphalt pavement (RAP)*. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/rap/>
- Guzmán, D. V., Hernández, J., López, T., Horta, J. y Giraldo, D. (2021). Uso de agregado de pavimento asfáltico reciclado para un pavimento rígido. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22(1), 1-11. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.005>
- IMT_Normas. (25 de noviembre de 2025). Normativa para la Infraestructura del Transporte. <https://normas.imt.mx/>

- IMT-Publicaciones. (21 de noviembre de 2025). *Publicación Técnica*.
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt85.pdf>
- Méndez, A. (17 de 11 de 2025). *Evaluación técnica y económica del uso del pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas*. Repositorio de la Universidad Militar Nueva Granada:
<https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/c707054c-143b-4d52-8a1b-912ca11ceb3a/content>
- Peralta, F. J. (2020). Sustentabilidad y transporte desde un enfoque de jerarquización para la ciudad de Mexicali, Baja California. *Estudios demográficos y urbanos*, 35(1), 215-242.
<https://doi.org/10.24201/edu.v35i1.1920>
- Pérez, D. y Chávez, L. (2024). *Análisis de costo efectividad en la implementación de pavimentos reciclados en carreteras*. [Tesis de EEC, Universidad de Guanajuato].
<http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/4554>
- Pérez, P. A. (2024). *Gestión de la construcción. Presupuesto de obra y control de costos directos*. Editorial ITM. <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-25705586-3c0bb68d01.pdf>
- Ríos-Alcaraz, J. (2024). *Evaluación sustentable del pavimento asfáltico reciclado en carreteras de alto tránsito*. ITESO. <https://hdl.handle.net/11117/11300>
- SICT. (21 de noviembre de 2025). *Gobierno de México*. <https://www.gob.mx/sct/prensa/gobierno-de-mexico-invertira-casi-17-mil-mdp-en-conservacion-en-toda-la-red-carretera-federal-sict>