

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.



**DEPARTAMENTO DEL HÁBITAT Y DESARROLLO URBANO
MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN
SUSTENTABLES**

EVALUACIÓN SUSTENTABLE DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO EN CARRETERAS DE ALTO TRÁNSITO

**TRABAJO RECEPCIONAL que para obtener el GRADO de
MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES**

**Presenta: M.A.C. JOSÉ RIOS ALCARAZ
Tutor: M.I. ROBERTO NÉSTOR MORGADO CASTILLO**

Tlaquepaque, Jalisco, agosto de 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, quien me ha brindado infinito amor, bondad y salud, permitiéndome alcanzar mis objetivos. Agradezco su constante presencia en cada paso que doy, así como por poner en mi camino a aquellas personas que han sido compañeras durante este significativo periodo de mi vida.

A mis padres, Leticia Alcaraz y José Ríos, les dedico un especial reconocimiento. Su creencia en mí, su inmenso amor, comprensión y apoyo incondicional han sido mi soporte primordial. Agradezco la fortuna de contar con unos padres tan excepcionales.

Mi gratitud se extiende hacia mi tutor, el Ingeniero Roberto Néstor Morgado Castillo, maestro en vías terrestres. Su gran ayuda, excelente guía, generoso apoyo y estrecha supervisión a lo largo de todo el Trabajo de Obtención de Grado (TOG) han sido fundamentales en mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) y al Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Occidente (ITESO) por la invaluable contribución que han realizado a mi desarrollo académico y profesional. Su generoso apoyo económico y su compromiso con el fortalecimiento de mis capacidades técnicas han sido pilares fundamentales en mi búsqueda constante de mejora a nivel personal y profesional.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a todas aquellas personas que, de alguna manera, estuvieron involucradas en el desarrollo de este TOG. Su contribución ha sido fundamental para alcanzar los resultados obtenidos.

¡Gracias!





ABSTRACT

The road infrastructure sector is one of the major players in the social and economic development of any country. Today, for the construction and maintenance of asphalt roads, large amounts of natural resources are used (some of them of fossil origin) and a large amount of energy is consumed, the production of which is not always renewable. In recent years, the challenges of global climate change and energy limitation have emerged as priority concerns worldwide.

In this sense, reclaimed asphalt pavement (RAP) has emerged as a relevant solution for road maintenance and construction, comprising a range of techniques by which materials from an existing deteriorated pavement are reprocessed for the construction of a new layer. Recycling the asphalt removed for the construction and repair of a road, both from an economic and environmental perspective, is presented as an imperative strategy for the conservation of our natural resources.

The objective of this TOG is to evaluate and contrast the sustainable, structural, economic and functional potential of recycling asphalt pavement in relation to traditional mixes of hot and cold asphalt pavement for high traffic roads.

KEYWORDS

Asphalt Pavement, RAP, Sustainability, Circular Economy.

TOG MODALITY

Professional development or innovation project.

KNOWLEDGE GENERATION AND APPLICATION LINE

LGAC 3. Technological transfers for habitat improvement

PRONACES

Climate change and energy





RESUMEN

El sector de infraestructura carretera es uno de los mayores protagonistas en el desarrollo social y económico de cualquier país. Hoy día, para la construcción y mantenimiento de carreteras de pavimento asfáltico se utilizan grandes cantidades de recursos naturales (algunos de ellos de origen fósil) y se consume gran cantidad de energía, cuya producción no siempre es renovable. En los últimos años, los desafíos del cambio climático global y la limitación energética han emergido como preocupaciones prioritarias a nivel mundial.

En este sentido, el pavimento asfáltico recuperado (RAP) ha surgido como una solución relevante para el mantenimiento y la construcción de carreteras, comprendiendo una gama de técnicas mediante las cuales los materiales de un pavimento deteriorado existente se reprocesan para la construcción de una nueva capa. Reciclar el asfalto removido para la construcción y reparación de una carretera tanto desde una perspectiva económica como ambiental, se presenta como una imperativa estrategia para la conservación de nuestros recursos naturales.

El objetivo de este TOG es evaluar y contrastar el potencial sustentable, estructural, económico y funcional del reciclaje del pavimento asfáltico en relación con las mezclas tradicionales de pavimento asfáltico en caliente y en frío para carreteras de alto tránsito.

PALABRAS CLAVE

Pavimento Asfáltico, RAP, Sustentabilidad, Economía circular.

MODALIDAD DEL TOG

Proyecto profesionalizante de desarrollo o innovación.

LÍNEA DE GENERACIÓN Y APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO (LGAC)

LGAC 3. Transferencias tecnológicas para el mejoramiento del hábitat

PRONACES

Cambio climático y Energía





ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
ABSTRACT	3
RESUMEN.....	4
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	8
1.1. PREGUNTAS GENERADORAS	13
1.1.1. Pregunta generadora.....	13
1.1.2. Preguntas particulares.....	13
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. General	17
1.3.2. Particulares	17
1.4. IMPORTANCIA DEL PROYECTO	18
CAPÍTULO II: PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	20
2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PAVIMENTOS.....	22
2.1.1. Pavimento flexible	22
2.1.2. Pavimento rígido.....	23
2.1.3. Sección transversal del pavimento	23
2.1.4. Distribución de cargas, en pavimento rígido y pavimento flexible.....	24
2.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS	26
2.2.1. Mezcla asfáltica en caliente (HMA)	28
2.2.2. Mezcla asfáltica tibia (WMA)	28
2.2.3. Mezcla asfáltica en frío (CMA)	29
2.3. ASFALTO	31
2.4. COMPOSICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS	32
2.4.1. Clasificación de cemento asfáltico.....	33
2.4.2. Grado de Viscosidad	33
2.4.3. Asfalto Modificado.....	34
2.4.4. Grado de desempeño (PG)	35
2.5. COMPOSICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES BITUMINOSAS.....	37
2.5.1. Calidad de la emulsión bituminosa	39
2.5.2. Producción de la emulsión.....	39
2.5.3. Rompimiento y curado de la emulsión	40
2.5.4. Selección del tipo y grado de emulsión adecuados	41
2.6. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.....	42
CAPÍTULO III: PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO	44
3.1. PAVIMENTO ASFÁLTICO AL TÉRMINO DE SU VIDA ÚTIL.....	46
3.2. CLASIFICACIÓN DE RAP	48
3.2.1. Reciclaje de mezclas en frío en planta	48
3.2.2. Reciclaje en frío en el lugar.....	49
3.2.3. Reciclaje de mezclas en caliente.....	51
3.3. PRODUCCIÓN DE RAP.....	52





3.3.1.	Almacenamiento de RAP	53
3.3.2.	Porcentajes de RAP y selección del grado de carpeta	54
3.3.3.	Tendido de mezclas de RAP	55
3.4.	EXPERIENCIAS EN EL MUNDO	56
CAPÍTULO IV: DISEÑO, PRODUCCIÓN Y APLICACIÓN		57
	Extracción del asfalto	57
	Análisis granulométrico.....	58
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	59
4.1.1.	Densidad relativa g/cm ³	59
4.1.2.	Resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles	62
4.1.3.	Resistencia a la degradación por abrasión en la Máquina Micro-Deval	63
4.1.4.	Resistencia al intemperismo acelerado de los agregados.	64
4.1.5.	Porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso	66
4.1.6.	Partículas trituradas.....	67
4.1.7.	Angularidad.....	68
4.1.8.	Equivalente de arena	70
4.1.9.	Azul de Metileno.....	71
4.2.	DISEÑO	72
4.2.1.	Determinación de la gravedad específica	79
4.2.2.	Prueba de estabilidad y flujo	81
4.3.	PRUEBAS DE LABORATORIO	83
4.3.1.	Evaluación al daño inducido por humedad: TSR.....	83
4.3.2.	Evaluación a la deformación permanente: Rueda cargada de Hamburgo	85
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA Y LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL RAP		89
5.1.	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	91
5.1.1.	Definición de objetivo y alcance	93
5.1.2.	Descripción y límites de los sistemas.....	94
5.1.3.	Análisis de Inventario.....	100
5.1.4.	Resultados: Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida	106
5.1.5.	Interpretación y discusión de resultados.....	113
5.1.6.	Análisis de sensibilidad	150
5.2.	ECONOMÍA CIRCULAR DEL RAP	161
5.2.1.	Degradación del pavimento asfáltico a lo largo de su ciclo de vida.....	163
5.2.2.	Estrategias preventivas destinadas a prolongar la duración operativa	166
5.2.3.	Técnicas de reparación del pavimento asfáltico	168
5.2.4.	RAP: Como nuevo	169
5.2.5.	Economía circular a través del reciclaje de otros materiales de desecho	171
5.2.6.	Diferentes interpretaciones en diferentes países europeos.....	172
CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN ECONÓMICA		175
6.1.	COSTOS DIRECTOS.....	175
6.2.	SOBRECOSTOS	175
6.3.	ANÁLISIS Y DESARROLLO	176
6.4.	RESUMEN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	182
6.4.1.	Análisis de Retorno de Inversión: Perfiladora de Pavimento en Frío Caterpillar PM102	184
CAPÍTULO VII: PERCEPCIÓN Y ADOPCIÓN		188





7.1. PERCEPCIÓN.....	189
7.1.1. Encuesta I: Docentes, laboratoristas y expertos.....	190
7.1.2. Encuesta II: Contratistas e industria de la construcción	194
7.2. INFORME DE RESULTADOS	198
7.2.1. Encuesta I: Docentes, laboratoristas y expertos.....	198
7.2.2. Encuesta II: Contratistas e industria de la construcción	212
<i>CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN FUTURA.....</i>	232
8.1. HALLAZGOS Y RESULTADOS.....	234
8.2. CONCLUSIONES	240
8.3. RECOMENDACIONES	244
8.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	246
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	248
REFERENCIAS.....	249
ANEXO	252
Resultados: Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida	252
Memoria fotográfica	268





CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En años recientes, se ha subrayado de manera enfática la imperiosa necesidad del desarrollo sostenible con el propósito de asegurar una calidad de vida óptima para las generaciones venideras. Este énfasis se refleja en los compromisos asumidos por diversas naciones, sociedades y sectores industriales en múltiples tratados y acuerdos internacionales, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental. Al integrar la infraestructura vial en el contexto del desarrollo sostenible, resulta fundamental contemplar tanto las dimensiones ambientales y sociales como los aspectos económicos asociados con su construcción y mantenimiento. Este enfoque holístico permitirá no solo la expansión y mejora de las redes viales, sino también la salvaguardia de los recursos naturales, la promoción de la equidad social y la viabilidad económica a largo plazo.

En los países en vías de desarrollo, como México, el transporte tiene un papel fundamental. Desde todo punto de vista, ya sea económico, político o militar, el transporte es la industria más importante del mundo. Un sistema de transporte inadecuado afecta a todo el sector agrícola, reduce la integración nacional, compromete seguridad, frena el crecimiento, etc. Así, el crecimiento del sistema de transporte se muestra como un factor determinante en la búsqueda del mejor desempeño de todos en la economía globalizada.

La longitud total de la red de caminos solo en México es 810 129.97 km totales, lo integran 176 984.20 km de carreteras, 528 596.01 km de caminos rurales, 21 731.93 km de veredas y 82 817.83 km de vialidades (INEGI, 2022). Durante 2021, el PIB de México fue de 26 billones, 273 mil millones de pesos y la relación con el valor de las carreteras significó 5.22 por ciento. Por las carreteras se mueven más de 2 mil 200 millones de pasajeros y más de 513 millones de toneladas de bienes y mercancías; a través de la red carretera del país se mueve el 96.4 por ciento del total de pasajeros y el 68.5 por ciento de la carga nacional (SICT S. , 2022). La red vial es el sistema circulatorio del país, región y continente. Su densidad y condición son esenciales para satisfacer las necesidades básicas del ser humano y su desarrollo. Al mismo tiempo, mantener esta red requiere grandes recursos financieros y no renovables de nuestro planeta.





El pavimento se puede definir como una estructura formada por múltiples capas capaces de resistir la acción dañina del tráfico y del medio ambiente. El desempeño del pavimento está condicionado por un conjunto complejo de factores, entre ellos las propiedades físicas y mecánicas de las capas que lo constituyen. Cada una de las capas comprenden componentes de alto costo y merecen especial atención. Entre los factores que influyen en el comportamiento de una capa asfáltica, se pueden mencionar las características de los materiales, dosificación, condiciones de compactación, construcción, gestión de procesos, conservación y restauración.

Con el uso frecuente de los caminos, la degradación del pavimento es inevitable, deterioro causado principalmente por el alto volumen de tráfico en carreteras sobrecargadas que resulta en la degradación acelerada de las capas de pavimento. Así, cualquier restauración del pavimento tiene como objetivo preparar la estructura y las capas superficiales para resistir los cambios climáticos y cargas de tráfico que actúan sobre el pavimento, garantizando seguridad, comodidad y economía para los conductores.

Una agravante en el caso de las carreteras es el elevado consumo de materiales vírgenes que se requieren en la mayoría de las intervenciones a realizar, tanto de mantenimiento como de nueva construcción. Los materiales vírgenes para pavimentos son principalmente áridos y betún. En el caso de los áridos, aunque las fuentes de materiales son extensas, son finitas. Los bancos de materiales de calidad que están convenientemente ubicadas tienden a agotarse rápidamente. Además, las regulaciones ambientales, las políticas de uso del suelo y la expansión urbana limitan aún más el acceso a fuentes naturales de agregados. En este sentido, si bien aún están disponibles, estas fuentes son cada vez más escasas.

El transporte en carreteras, principalmente sobre pavimentos de asfalto, es crucial para México. También se sabe que los costos de mantenimiento son altos, lo que empuja a empresas e investigadores a buscar nuevas alternativas para mejorar la utilización de materiales, reducir el consumo de energía, agilizar las operaciones de mantenimiento, entre otros. Otro factor clave que se destaca son los temas ambientales, que se ven directamente afectados por la construcción y mantenimiento de carreteras, como en el consumo de recursos





naturales y los costos de combustible/energía. Por lo tanto, se vuelve imperativo reutilizar los materiales deteriorados reciclando el pavimento.

El reciclaje de pavimentos comprende una gama de técnicas mediante las cuales los materiales de un pavimento deteriorado existente se reprocessan para la construcción de una nueva capa. El pavimento deteriorado se modifica y transforma en una estructura homogénea capaz de soportar las cargas de tráfico. Por lo tanto, las autoridades que regulan la infraestructura carretera en conjunto con la industria de construcción y especialistas en él área deben trabajar juntos para desarrollar nuevos métodos y enfoques de diseño para aumentar el reciclaje en la construcción y rehabilitación de pavimentos.

La degradación de la infraestructura vial está estrechamente relacionada con los riesgos climáticos, el tráfico y la composición de la propia estructura del pavimento. La falta de mantenimiento acelera la evolución de la degradación, que en ocasiones puede requerir el uso de costosas técnicas de rehabilitación para restaurar las propiedades iniciales y el rendimiento del pavimento. Por ello es importante mantener una red vial segura y con buen servicio para los usuarios. Varias técnicas de mantenimiento existen en todo el mundo. El asfalto vertido en frío, es una de las técnicas utilizadas. Son materiales bituminosos en frío de espesor fino para capa superficial destinados a proporcionar soportes de adherencia e impermeabilización que cumplan con los requisitos del desarrollo sostenible.

La gestión de una red de carreteras permite administrar las etapas esenciales para su mantenimiento, conservación y la rehabilitación. El establecimiento de una política de gestión vial requiere una jerarquía que permita una clasificación de las vías en subconjuntos homogéneos de diferentes tipos (federales, estatales, autopistas, municipales, etc.). Esta clasificación toma su importancia de los análisis socioeconómicos que muestran el impacto significativo relacionado con cada tipo de vía. Los resultados obtenidos tras estos análisis socioeconómicos permiten definir objetivos (expresados según categorías de carreteras) compatibles con las necesidades de los usuarios y las limitaciones impuestas por el entorno.

Estos objetivos se definen en términos de nivel de servicio. Este último varía según el tiempo. De hecho, el nivel de servicio se ve fuertemente afectado por la degradación de las carreteras



(disminución con el desgaste de las mismas). También es importante destacar que la elección del tipo de vía depende de las técnicas de mantenimiento previstas para garantizar el nivel de servicio inicialmente previsto. Esto lleva a definir una estrategia global de inversión y mantenimiento; La selección de esta estrategia generalmente apunta a determinar un óptimo económico bajo restricciones presupuestarias.

El presente trabajo de investigación “evaluación sustentable del pavimento asfáltico reciclado en carreteras de alto tránsito”, se elaboró a través de la metodología cuantitativa, fundamentándose en reglamentos, normas, libros, informes, tesis, organismos internacionales, publicaciones especializadas, evaluando y contrastando el potencial sustentable, estructural, económico y funcional del reciclaje del pavimento asfáltico en relación con las mezclas tradicionales de pavimento asfáltico en caliente y en frío para carreteras de alto tránsito. Para ello, se empleará la metodología Marshall en su diseño y se llevarán a cabo pruebas de laboratorio que incluyen la caracterización de los agregados y aglutinante, resistencia a tracción indirecta, rueda cargada de Hamburgo y evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad, analizando su ciclo de vida y cuantificando su huella de carbono, asimismo, se efectuará una comparación de los análisis de precios unitarios.

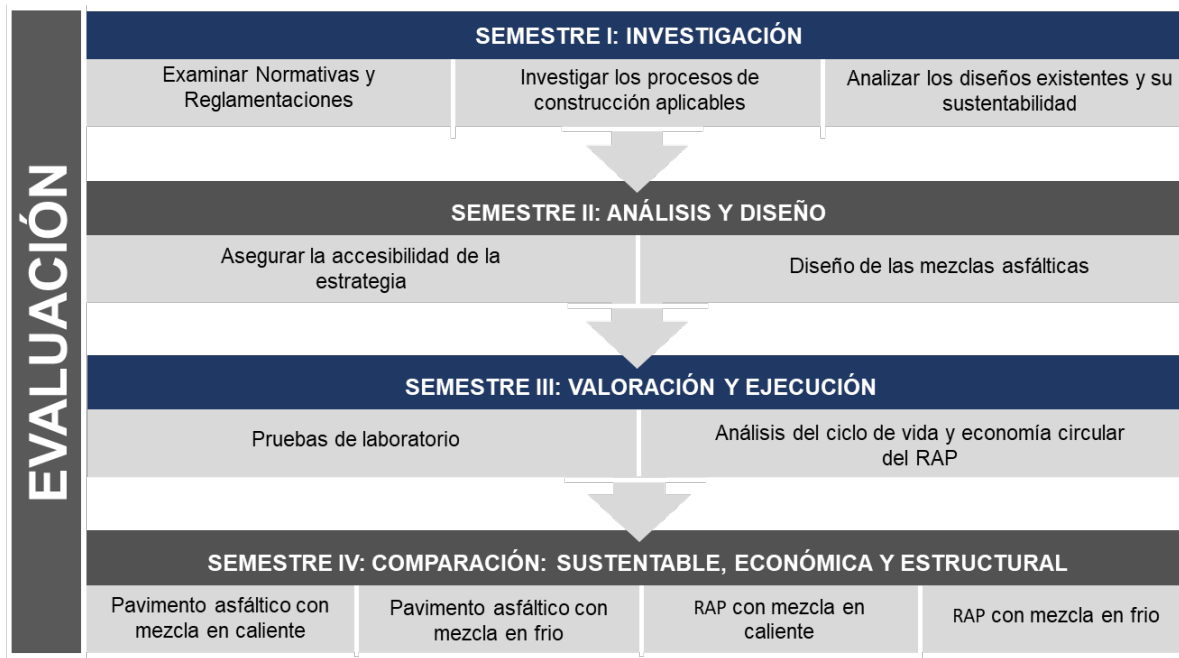


Figura.- 1 Diseño metodológico. Fuente: Elaboración Propia.





El diagrama en la Figura 1 ilustra la metodología empleada en este trabajo de obtención de grado, estructurada en cuatro bloques fundamentales: investigación, análisis y diseño, valoración y ejecución, culminando con una comparativa integral en términos de sostenibilidad, viabilidad económica y robustez estructural.

Se inició con una investigación teórica, en la cual se identificaron y examinaron las normativas y directrices pertinentes a los procedimientos constructivos empleados. Se analizaron los diseños existentes y su nivel de sustentabilidad, proporcionando así una base robusta para la estructura metodológica del trabajo de grado (TOG). A continuación, en la fase de análisis y diseño, se aseguró que la estrategia propuesta fuese viable y que los diseños de las cuatro mezclas a ser comparadas fueran factibles. En la etapa de valoración y ejecución, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para determinar la factibilidad de cada mezcla, a la par el análisis del ciclo de vida y el aporte a la economía circular de cada una de las mezclas. Finalmente, se realizó una comparativa integral, abordando aspectos de sostenibilidad, viabilidad económica y robustez estructural del RAP en contraposición con el pavimento asfáltico de mezcla en caliente y el pavimento asfáltico de mezcla en frío.

Nota aclaratoria: Parte significativa del trabajo desarrollado, así como algunas de las pruebas de laboratorio realizadas, se llevaron a cabo en España, no obstante las metodologías y diseños se basan en las normas operativas mexicanas correspondientes.





1.1. PREGUNTAS GENERADORAS

1.1.1. Pregunta generadora

¿Constituye el diseño, la producción y la implementación de pavimentos asfálticos reciclados, una técnica sostenible que proporciona ventajas medioambientales, económicas y estructurales en comparación con las mezclas tradicionales en caliente y frío?

1.1.2. Preguntas particulares

- ¿El reciclado de pavimentos asfálticos es sustentable?
- ¿Cuál es el porcentaje de disminución de gases contaminantes: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, partículas en suspensión y CO₂ que se emiten a la atmosfera al utilizar pavimento asfáltico reciclado?
- ¿Qué porcentaje de materiales pétreos vírgenes se reducen al utilizar el RAP?
- ¿Es estructural y económicamente factible optar por un pavimento asfáltico reciclado?
- ¿Por qué el RAP no es utilizado de manera masiva?





1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El consumo de alrededor de 1.42 billones de toneladas de agregados vírgenes y 75 millones de toneladas de aglomerante para la producción de 1.50 billones de toneladas de asfalto anualmente (Fenerci, K., et al., 2023) muestra la importancia de un enfoque ambientalmente sostenible en cuanto a la reducción de los efectos ambientales y el consumo de recursos naturales. La difusión del reciclaje de pavimentos tiene el potencial de ahorrar alrededor de mil millones de pesos al año en valor económico en todo el mundo. Disminuir el consumo solo será posible con la aplicación de procesos correctos para reciclar el material asfáltico molido, no desperdiciarlo y además utilizando técnicas efectivas. Así, se minimizarán los efectos del consumo de recursos ambientales y naturales en los procesos productivos.

Cuando se abordan los aspectos económicos y medioambientales de la reutilización de materiales, el reciclaje de pavimentos tiene un alto potencial para satisfacer estas necesidades. El material derivado del fresado de los pavimentos asfálticos es otro material que necesita ser estudiado porque a lo largo de las carreteras se depositan toneladas de este material en cada restauración de una carretera, muchas veces sin un destino adecuado. El correcto uso de este material sirve como alternativa al consumo de áridos naturales muy utilizados actualmente en pavimentos.

La infraestructura vial es de suma importancia para la supervivencia de cualquier país. A medida que aumenta el costo del mantenimiento y rehabilitación de las carreteras, los ingenieros civiles, camineros y administradores enfrentan la dificultad siempre presente de satisfacer las necesidades actuales de conservación, repavimentación y rehabilitación del pavimento. El deterioro de las estructuras viales debido al creciente peso y volumen del tráfico está ocurriendo más rápido de lo previsto, de la mano con la necesidad de nuevos materiales cada vez más escasos y costosos. Ahora es evidente que, para la planificación, el diseño y la construcción de estructuras viales, se deben considerar adecuadamente los procesos, materiales y prácticas más sustentables, eficientes y rentables. El rendimiento de la carretera tiende a disminuir debido a las cargas de tráfico y otros efectos marcados por la aparición de daños en la carretera en forma de daños estructurales o funcionales.





Indudablemente, como se ha mencionado anteriormente y posiblemente de manera reiterativa, uno de los objetivos primordiales del reciclaje de mezclas asfálticas consiste en optimizar los recursos económicos. En otras palabras, se busca proporcionar a los constructores de carreteras una herramienta que les permita reducir los costos asociados, ya sea en la rehabilitación o construcción de carreteras. Además, al aprovechar el material resultante del fresado de una capa asfáltica, se busca reducir de manera significativa el impacto ambiental.

Dentro de un sistema completamente globalizado, donde el aspecto económico juega un papel crucial en la toma de decisiones, la práctica del reciclaje o reutilización de productos existentes que han perdido sus condiciones iniciales representa un ahorro sustancial. Este enfoque conlleva a una disminución en el consumo de productos, como áridos pétreos vírgenes y asfalto, reduciendo así los costos asociados a la producción de nuevas mezclas asfálticas. Además, al incorporar material reciclado (RAP) en la mezcla, se logra una calidad comparable o incluso superior en comparación con mezclas sin RAP, teniendo un impacto económico significativo en la industria de la construcción y rehabilitación de pavimentos asfálticos.

No se puede pasar por alto la dimensión ecológica, que cada vez cobra mayor relevancia en las sociedades globales. El impacto generado por el desperdicio excesivo de mezclas asfálticas, compuestas en su mayoría por materias primas no renovables de origen natural, es alarmante. Dada la necesidad imperante en México de construir y rehabilitar carreteras, la demanda de nuevos productos conlleva a un uso irracional y, por ende, a un impacto ecológico que podría generar problemas a corto plazo si no se aborda de manera adecuada.

En este contexto, la implementación de la técnica de reciclaje de mezclas asfálticas se presenta como una solución para minimizar el uso de nuevos productos en el diseño y fabricación, ofreciendo beneficios diversos al aprovechar el material existente. A pesar de su envejecimiento, el RAP conserva muchas de sus propiedades, permitiendo obtener resultados excelentes en las mezclas recicladas que lo incorporan.





Actualmente, en México, gran parte del RAP se desperdicia de manera exagerada. Las razones de este hecho son múltiples, pero sin duda, las principales son la falta de conocimientos técnicos sobre el tema y la resistencia a cambiar las técnicas tradicionales de construcción o diseño de pavimentos asfálticos. Al mismo tiempo, junto a los aspectos económicos y medioambientales, también están los deseos de la sociedad o los factores sociales. La comunidad quiere carreteras más duraderas, comodidad de conducción, seguridad y un bajo nivel de ruido. Por tanto, es comprensible que todos los aspectos mencionados anteriormente (económicos, ambientales, sociales) deban incluirse y evaluarse en la toma de decisiones.





1.3. OBJETIVOS

1.3.1. General

El objetivo de este TOG es evaluar y contrastar el potencial sustentable, estructural, económico y funcional del reciclaje del pavimento asfáltico en relación con las mezclas tradicionales de pavimento asfáltico en caliente y en frío para carreteras de alto tránsito. Para ello, se empleará una metodología estándar modificada en su diseño y se llevarán a cabo pruebas de laboratorio que incluyen la caracterización de los agregados y aglutinantes, resistencia a tracción indirecta, rueda cargada de Hamburgo y evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad. Se realizará un análisis del ciclo de vida y se cuantificará su impacto ambiental. Además, se llevará a cabo una comparación de los costos mediante el análisis de precios unitarios.

1.3.2. Particulares

- Evaluar el desempeño sustentable, estructural y funcional del pavimento asfáltico reciclado.
- Cuantificar impactos ambientales y evaluación de técnicas.
- Evaluar la importancia del pavimento asfáltico reciclado en la economía circular.
- Analizar el ciclo de vida del pavimento asfáltico reciclado





1.4. IMPORTANCIA DEL PROYECTO

En respuesta a las políticas ambientales para el desarrollo sostenible, se deben implementar acciones técnicas en el campo de la construcción de carreteras, contribuyendo a mejorar el equilibrio ambiental, reduciendo el uso de materias primas naturales no renovables, y reduciendo la energía necesaria para fabricar materiales de construcción.

Reciclar es ahora una respuesta lógica para reducir el consumo de áridos y ligante bituminoso, ayudando a reducir el costo de la energía atribuibles a su fabricación y a reducir su disponibilidad.

En la actualidad, la situación ambiental y de recursos que enfrenta la infraestructura del transporte en el país es cada vez más grave. Es insostenible continuar utilizando el modo de crecimiento tradicional para promover el desarrollo de la infraestructura carretera. Es necesario emprender un camino de ahorro de recursos. Para ello, se deben realizar esfuerzos para desarrollar una economía circular en la infraestructura carretera, promover el aprovechamiento integral de los residuos industriales, desarrollar y fomentar nuevas tecnologías. Fortalecer la investigación, popularización y aplicación de diversas tecnologías de aplicación de regeneración de pavimentos, como el reciclaje de los pavimentos asfálticos ya existentes, una tarea muy importante en la futura construcción de carreteras de nuestro país.

La conciencia sobre el uso correcto de los recursos naturales, la necesidad de la preservación del medio ambiente y la reducción de las emisiones contaminantes ha estimulado la búsqueda de alternativas respetuosas con el medio ambiente a las técnicas de pavimento convencionales. Aunque los métodos aplicables deben ajustarse a cuestiones como la durabilidad y la preservación de las carreteras, cuando se abordan cuestiones ambientales con su debido mérito, estos métodos ahora pueden clasificarse por delante de las técnicas tradicionales.





A principios de siglo, las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) eran de aproximadamente 23 Gt (métricas) por año, pero en 2019 alcanzaron un récord de 36,4 Gt por año; principalmente debido a las actividades humanas. Este aumento de las emisiones antropogénicas de carbono ha provocado un aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera (alcanzando su concentración media anual más alta jamás registrada en la atmósfera de 412.5 ppm en 2020) (NOAA, 2023). Como resultado, la temperatura de la superficie global en las dos primeras décadas del siglo XXI (2001-2020) fue 0.99 [0.84-1.10] °C superior al de 1850-1900 (IPCC, 2021). Esto ha causado, y seguirá causando, una variedad de efectos adversos en el medio ambiente con efectos muy probablemente devastadores en la vida diaria (por ejemplo, fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes e intensos, como olas de calor y fuertes precipitaciones). A su vez, estos efectos también tendrán grandes impactos económicos y sociales.

Por tanto, se vuelve necesario una solución para la producción más limpia de las carreteras, y más concretamente de sus pavimentos. Esto es especialmente cierto dado que estos activos se construyen principalmente con materiales vírgenes y el asfalto (que constituye la gran mayoría de los pavimentos de las carreteras) se fabrica utilizando fuentes de combustible no renovables (es decir, fueloil y gas natural). En este contexto, resulta crucial explorar enfoques innovadores que impulsen la transición hacia pavimentos más sostenibles, fomentando el uso de materiales reciclados, el desarrollo de tecnologías más eficientes y la adopción de prácticas constructivas que minimicen el impacto ambiental. Este planteamiento no solo aborda la necesidad inmediata de reducir la huella ecológica de las carreteras, sino que también contribuye al compromiso global con la transición hacia una economía más sostenible y respetuosa con el entorno.





CAPÍTULO II: PAVIMENTO ASFÁLTICO

Este capítulo presenta una visión detallada y una síntesis del estado actual del pavimento asfáltico, enfatizando la urgente necesidad del país de adoptar prácticas de producción más sostenibles. Comienza con una introducción a los pavimentos, donde se abordan minuciosamente su estructura, composición y clasificación. A continuación, se profundiza en la composición y clasificación de las emulsiones bituminosas, destacando su papel esencial en la formulación y aplicación de pavimentos asfálticos. Posteriormente, se examina con detalle el procedimiento de diseño de los pavimentos asfálticos, teniendo en cuenta aspectos fundamentales como resistencia, durabilidad y comportamiento frente a las cargas vehiculares. Este análisis pormenorizado contribuye a resaltar la importancia de implementar métodos de diseño que no solo cumplan con los requisitos técnicos, sino que también incorporen criterios de sostenibilidad y eficiencia en el uso de recursos. Asimismo, se subraya la relevancia estratégica de los pavimentos asfálticos en el contexto del desarrollo económico y la cohesión social. El estado actual de estos elementos estructurales desempeña un papel fundamental en la infraestructura vial, afectando directamente la movilidad, la conectividad y, por ende, la prosperidad económica y la calidad de vida de la sociedad en su conjunto. La imperativa necesidad de adoptar prácticas más sostenibles en la producción de pavimentos asfálticos se presenta como una iniciativa crucial para asegurar la viabilidad a largo plazo de la infraestructura vial y, simultáneamente, minimizar el impacto ambiental asociado a dichas construcciones.

El pavimento es la estructura vial que consta de capas estratificadas de materiales estructurales colocados sobre el suelo natural o subrasante, con la función principal de soportar las cargas de tráfico de manera segura, eficiente y económica. Al distribuir las cargas de tráfico aplicadas, el pavimento protege la subrasante natural. Esencialmente, un pavimento está diseñado para proporcionar una superficie de calidad de conducción adecuada, suficiente resistencia al derrape y un reflejo de luz favorable. El propósito principal del pavimento es distribuir y reducir suficientemente las tensiones transmitidas por las cargas de las ruedas, para que no excedan la resistencia de la subrasante. Es deseable diseñar un pavimento que tenga una vida útil prolongada con acciones mínimas de mantenimiento y reparación. Según





el comportamiento estructural, existen dos tipos de pavimentos, pavimentos flexibles y pavimentos rígidos.

La mayoría de las carreteras y autopistas en México están pavimentadas con tecnología de mezcla asfáltica en caliente (HMA). La fabricación de mezcla asfáltica en caliente es una fuente clave de consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación del aire, emitiendo monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y partículas en suspensión.

El reciclaje de pavimentos asfálticos ha surgido como una opción significativa en las prácticas de mantenimiento y construcción de carreteras, especialmente a partir de la crisis del petróleo en la década de 1970, que resultó en un incremento notable en los costos de construcción, particularmente en el precio del betún. En años recientes, los beneficios derivados del uso de RAP han experimentado un crecimiento sustancial, impulsado por una mayor conciencia de las problemáticas ambientales y la imperiosa necesidad de conservar los recursos para las generaciones venideras. La utilización de mezclas de emulsión asfáltica en frío con RAP emerge como una alternativa sostenible a los asfaltos de mezcla en caliente. Este proceso implica el fresado de un pavimento existente y la reutilización del RAP, incorporando emulsión bituminosa para la rehabilitación y construcción de nuevos pavimentos asfálticos, todo ello sin recurrir al uso de calor. El RAP, en general, posee materiales agregados de alta calidad y bien clasificados, recubiertos con betún, que pueden ser reutilizados de manera eficaz en la formulación de nuevas mezclas de asfalto.

Este enfoque de reciclaje no solo se erige como una solución técnica y económicamente viable, sino que también se alinea con los imperativos ambientales contemporáneos. La inclusión de RAP en las prácticas de construcción de carreteras no solo contribuye a mitigar la dependencia de recursos no renovables, sino que también aborda las preocupaciones actuales sobre la sostenibilidad al ofrecer una alternativa ecoeficiente que aprovecha los materiales existentes de manera responsable.



2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PAVIMENTOS

2.1.1. Pavimento flexible

La Figura 2 presenta una representación gráfica de un pavimento convencional de tipo flexible, acompañado de su estructura de cimentación correspondiente. La capa superior (carpeta asfáltica), confeccionada con un material de alto rendimiento diseñado específicamente para resistir cargas directas y asegurar una resistencia al deslizamiento óptima, constituye un elemento crucial en la composición del pavimento. En el contexto mexicano, el material más comúnmente empleado para esta capa superficial es el asfalto.

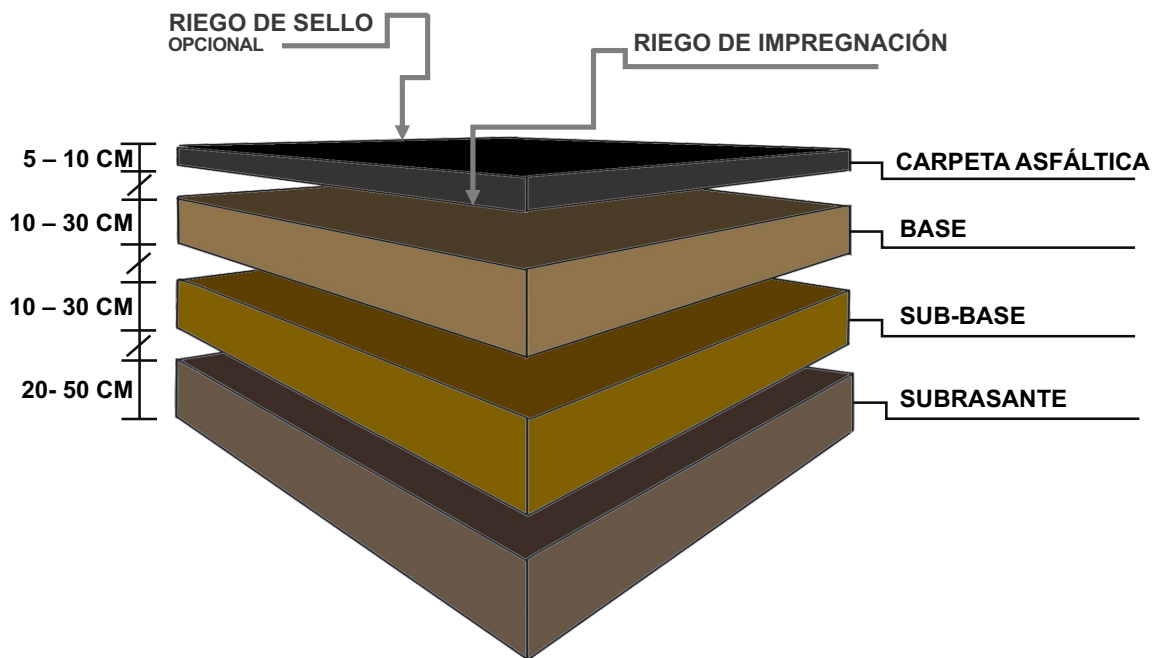


Figura.- 2 Estructura del Pavimento Flexible. Fuente: Elaboración Propia.

En paralelo, la base del pavimento desempeña un papel fundamental al aportar la mayor proporción de su resistencia estructural. Puede estar compuesta por materiales asfálticos, ligados hidráulicamente o de naturaleza granular, contribuyendo así a la estabilidad y durabilidad globales del pavimento.

Por consiguiente, los pavimentos flexibles consisten en varias capas, con materiales más resistentes en la parte superior, donde las tensiones son más altas, y materiales menos robustos en la parte inferior, donde las tensiones se reducen significativamente. En los



pavimentos flexibles, las deformaciones en las capas inferiores (por ejemplo, las ondulaciones en la subrasante) se reflejan en la capa superficial, ya que el pavimento tiene la capacidad de ajustar su posición ante las deformaciones de las capas subyacentes con cambios o daños mínimos.

2.1.2. Pavimento rígido

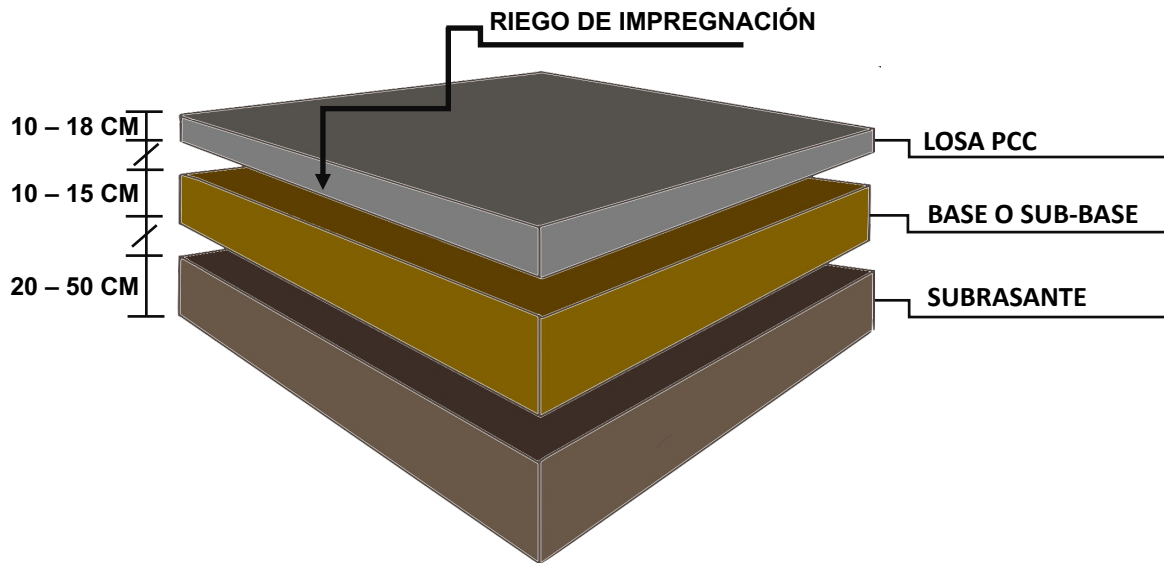


Figura.- 3 Estructura del Pavimento Rígido. Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 3 proporciona una representación visual de un pavimento rígido típico y su estructura de cimentación. Los pavimentos rígidos se construyen utilizando concreto de cemento Portland como capa superficial, la cual se coloca directamente sobre la subrasante preparada o sobre una única capa de material granular. Los pavimentos rígidos poseen una mayor rigidez en comparación con los pavimentos flexibles y actúan como una placa elástica (losa de concreto) que se apoya sobre un material base, distribuyendo las cargas de las ruedas sobre un área de suelo relativamente más extensa debajo.

2.1.3. Sección transversal del pavimento

Un pavimento asfáltico convencional se configura como una estructura estratificada que abarca diversas capas, entre las cuales se incluyen la capa superficial, la capa base, la subbase y la subrasante.





- Superficie de rodadura: La capa superficial se erige típicamente con concreto asfáltico de mezcla en caliente (HMA) de granulometría densa. Esta capa, en contacto directo con el tráfico, debe poseer una estabilidad y durabilidad suficientes para resistir la distorsión ocasionada por las cargas vehiculares y los efectos adversos del entorno, tales como la exposición al aire, al agua y a las variaciones de temperatura, sin evidenciar indicios de fallo. Es esencial que las capas superficiales impidan la infiltración de agua hacia las capas subyacentes, al tiempo que proporcionan la suavidad y resistencia al deslizamiento adecuadas.
- Capa base: La capa base comúnmente se considera la componente estructural más significativa de un pavimento. Su función primordial es distribuir la carga del tráfico y resguardar las capas no cohesionadas subyacentes de tensiones y esfuerzos excesivos.
- Sub-base: Situada debajo de la capa base, la sub-base ofrece soporte estructural a la subrasante. Además, reduce la intrusión de finos desde la subrasante. En conjunto con la subrasante, conforma los cimientos de la estructura vial. No obstante, la inclusión de la subbase puede prescindirse en casos donde el pavimento se erige sobre una subrasante de calidad superior y rigidez.
- Subrasante: Compuesta por materiales no cohesionados como el suelo nativo y agregados triturados y no triturados, la subrasante es la capa encargada de absorber las tensiones transmitidas desde las capas superiores. Para su óptimo desempeño, la subrasante debe ser compactada a una densidad adecuada y no debe estar sujeta a esfuerzos excesivos.

2.1.4. Distribución de cargas, en pavimento rígido y pavimento flexible

Las cargas, conjuntamente con las condiciones ambientales, ejercen un efecto deteriorante sobre el pavimento a lo largo del tiempo. El modelo estructural más elemental para pavimentos postula que cada carga individual provoca un cierto nivel de daño irreparable. Este daño se acumula durante la vida útil del pavimento, y al alcanzar un valor máximo, se



considera que el pavimento ha llegado al término de su vida operativa. En los pavimentos rígidos, predominantemente compuestos de concreto, la distribución de carga se apoya en la rigidez inherente del material. Como se muestra en la Figura 4, la carga se transfiere a una superficie más amplia, y se emplean juntas de contracción para adaptarse a la contracción del hormigón. Estos pavimentos presentan una menor deformación superficial al someterse a cargas considerables.

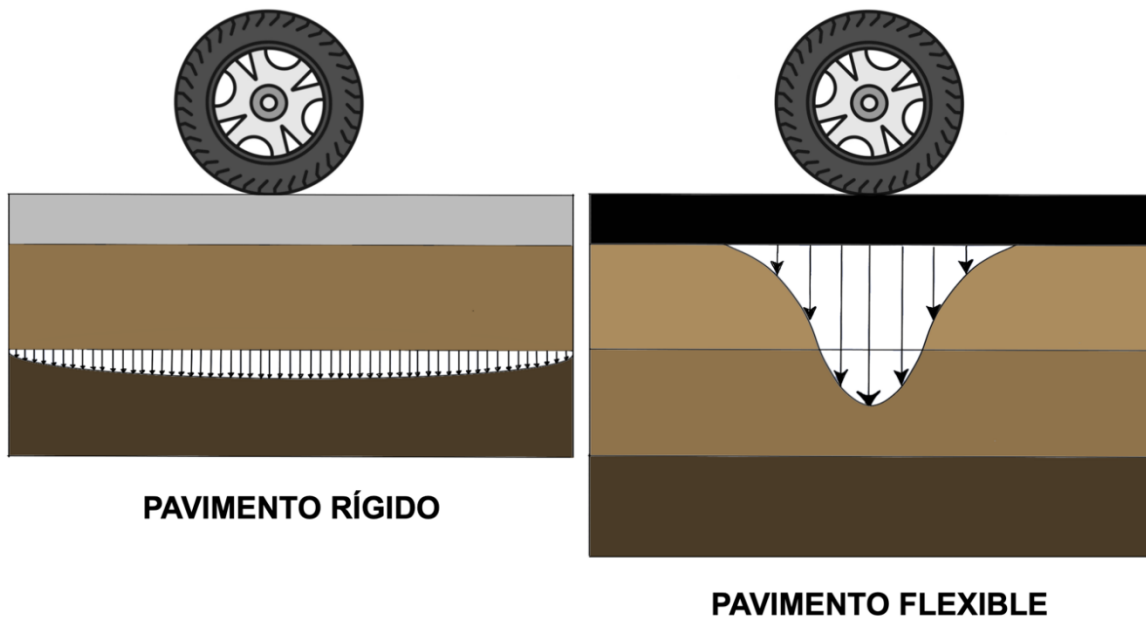


Figura.- 4 Distribución de cargas, en pavimento rígido y pavimento flexible. Fuente: Elaboración Propia.

En contraste, en los pavimentos flexibles, comúnmente elaborados con asfalto, la distribución de cargas se basa en la flexibilidad y capacidad de deformación elástica del material. Tal como se ilustra en la Figura 4, la carga se dispersa sobre una superficie más extensa, caracterizada por una capa superficial más delgada en comparación con el pavimento rígido. La distribución de la carga acontece de forma progresiva a través de las diversas capas, desde la superficie hasta la base.

Ambos tipos de pavimentos exhiben características distintivas, y la elección entre ellos está condicionada por factores como el tipo de tráfico, las condiciones climáticas y las características del suelo. La atención detallada a la distribución de carga se convierte en un imperativo en el diseño de carreteras, con el objetivo de garantizar un rendimiento óptimo y una prolongada duración de la infraestructura vial.



2.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS

La gran mayoría de los pavimentos a nivel mundial se construyen mediante el empleo de mezclas asfálticas. La función de estos materiales varía según su posición en la estructura del pavimento, desempeñando un papel crucial al proporcionar tanto la resistencia estructural de la vía como una superficie suficientemente rugosa para garantizar la adherencia, seguridad e impermeabilidad, velando así por la integridad de los usuarios de la vía. En este contexto, las mezclas asfálticas deben ser capaces de resistir los cambios climáticos y las considerables cargas de tráfico sin sufrir daños excesivos.

Las mezclas asfálticas se componen principalmente de dos elementos: áridos y betún. Los áridos, partículas minerales, contribuyen a la resistencia a la compresión mediante el rozamiento entre ellas, mientras que los ligantes, materiales viscoelásticos, aportan resistencia a la tracción y cohesión. Para asegurar el comportamiento adecuado de la mezcla, es imperativo que áridos y aglomerante trabajen en conjunto. En este contexto, los ligantes desempeñan un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas.

Conforme a la regulación establecida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), las mezclas asfálticas se clasifican según la temperatura de mezclado, lo que da lugar a las categorías de mezclas en caliente (preparadas entre 140 y 180°C) y en frío (preparadas entre 4 y 40°C). Además de estas, se identifican dos variantes intermedias: las mezclas tibias (preparadas entre 110 y 140°C) y las semi calientes (preparadas entre 50 y 100°C), como se ilustra en la Figura 4 adjunta. Por otro lado, es posible clasificarlas según sus propiedades granulométricas, distinguiendo entre mezclas de granulometría densa, discontinua, abierta, y los morteros asfálticos.

La Mezcla Asfáltica en Caliente se define por el uso de cemento asfáltico en su producción, llevada a cabo en una planta de mezclado, donde se elevan las temperaturas de los materiales por encima de los 120°C, de acuerdo con la viscosidad del asfalto empleado. Esta mezcla se aplica y compacta a una temperatura elevada.





Por otro lado, la Mezcla Asfáltica en Frío se caracteriza por el uso de asfalto rebajado o emulsión asfáltica en su elaboración. Esta se realiza ya sea en una planta de mezclado o in situ, donde la mezcla de los materiales se efectúa a temperatura ambiente o, en algunos casos, con el material asfáltico alcanzando un máximo de 60°C. La aplicación y compactación de esta mezcla se lleva a cabo a temperatura ambiente, nunca inferior a los 4°C.





2.2.1. Mezcla asfáltica en caliente (HMA)

La tecnología de mezcla en caliente se usa más comúnmente para producir materiales de pavimentación de carreteras y representa alrededor del 90% del total de mezclas producidas, debido a su flexibilidad, resistencia a la intemperie y capacidad para repeler el agua. Se fabrica en una planta mezcladora central donde el asfalto y los áridos se calientan a una temperatura de entre 150 y 190 °C (según el grado de dureza del betún) se dosifican correctamente y se mezclan. La mezcla de pavimentación terminada se transporta en camiones al sitio de pavimentación, se esparce mediante un esparcidor mecánico en una capa suave y luego se compacta con rodillos mientras aún está caliente. Poco después de que el material se haya enfriado a la temperatura ambiente, el pavimento está listo para abrirse al tráfico (Asphalt Institute, 2020).

Sin embargo, el proceso de producción de HMA se considera una fuente sustancial de emisiones de carbono, las cuales tienen un grave impacto en el medio ambiente (IMT, SICT, 2001). Los peligros para la salud se crean debido a las emisiones de gases del proceso de calentamiento, el riesgo de incendio y quemaduras por la fusión del betún. La producción anual de una planta típica de asfalto es de aproximadamente 200.000 toneladas de HMA, que a su vez produce 13 toneladas de monóxido de carbono (CO), 5 toneladas de compuestos orgánicos volátiles, 2,9 toneladas de óxidos de nitrógeno, 0,65 toneladas de contaminantes atmosféricos peligrosos totales y 0,4 toneladas de óxidos de azufre, según estimaciones de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (USEPA, 2020)

2.2.2. Mezcla asfáltica tibia (WMA)

La mezcla asfáltica tibia (WMA) permite producir y esparcir mezclas asfálticas a temperaturas significativamente más bajas que las HMA. Con esta tecnología, las temperaturas de mezcla y compactación se pueden reducir entre 20 y 40 °C por debajo de las requeridas para HMA sin afectar la calidad de la mezcla. Si bien existen numerosas tecnologías WMA en uso en todo el mundo, las tecnologías más comunes utilizadas para reducir la viscosidad del betún son el uso de aditivos orgánicos, aditivos químicos y procesos de formación de espuma a base de agua o que contienen agua (Asphalt Institute, 2020).





Bajar la temperatura durante la producción reduce la energía requerida y, por lo tanto, el consumo de combustible. También disminuye la huella de carbono de la planta, mejorando así las condiciones de trabajo en la planta y en el lugar de pavimentación. El WMA también se puede transportar a distancias más largas y tiene una aplicación de pavimentación más prolongada, ya que se enfría a un ritmo menor. Sin embargo, aún existe cierta reticencia a la hora de utilizar estas mezclas ya que aún se encuentran en etapa de desarrollo de experimentación y estandarización.

2.2.3. Mezcla asfáltica en frío (CMA)

El asfalto de mezcla en frío (CMA) es una alternativa versátil y sostenible al HMA ya que se mezcla, aplica y compacta a temperatura ambiente sin calentamiento (Jenkins, 2000). Es una combinación de agregado mineral graduado y asfalto emulsionado o diluido y aditivos. Hay varios factores que impulsan el desarrollo de CMA, incluido su impacto ambiental, ahorro de energía y rentabilidad. Desde el punto de vista de la entrada de energía, la fabricación de CMA consume mucha menos energía que la de HMA. La fabricación de una tonelada de CMA requiere el 13% de la energía utilizada para fabricar la misma cantidad de HMA (Le Bouteiller, 2010). Las emisiones de CO₂ de la preparación de CMA son aproximadamente el 14% de las producidas por la producción de HMA.

A pesar de que las ventajas inherentes de las CMA resultan sumamente atractivas en términos medioambientales, económicos y de seguridad, es necesario reconocer que ciertas deficiencias asociadas al rendimiento comparativamente inferior de estas mezclas en relación con las HMA constituyen aspectos cruciales a considerar. Estas limitaciones son discernibles tanto en las fases de fabricación como en el rendimiento durante la vida útil. El rendimiento reducido de las CMA puede atribuirse, en parte, a la necesidad de condiciones térmicas menos rigurosas durante su fabricación en comparación con las HMA. Aunque esta característica conlleva ventajas ambientales al reducir el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, también se traduce en propiedades mecánicas y estructurales potencialmente inferiores en las CMA.





Es crucial abordar estas deficiencias mediante investigaciones y desarrollos que busquen optimizar la formulación y el proceso de fabricación de las CMA. La mejora de su desempeño mecánico y durabilidad será esencial para consolidar la posición de las mezclas asfálticas en frío como una alternativa sostenible y eficaz en términos de recursos. En este contexto, es necesario fomentar la innovación en la ingeniería de pavimentos, identificando soluciones que permitan aprovechar al máximo las ventajas medioambientales y económicas, sin comprometer su rendimiento y seguridad en condiciones reales de aplicación.





2.3. ASFALTO

Según la normativa mexicana (N·CMT·4·05·001/22, 2022), el asfalto se define como un material bituminoso de color negro, compuesto principalmente por asfáltenos, resinas y aceites. Estos componentes le confieren propiedades de consistencia, aglutinación y ductilidad. El asfalto se presenta en estado sólido o semisólido y exhibe características cementosas a temperatura ambiente normal. Su consistencia se vuelve gradualmente líquida al ser sometido a calentamiento.

Los materiales asfálticos encuentran aplicaciones en la confección de conglomerantes, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones. Su uso abarca la unión de materiales pétreos, la conexión de distintas capas del pavimento y la estabilización de bases o subbases. Además, estos materiales pueden emplearse en la construcción, fabricación o impermeabilización de diversas estructuras, como obras complementarias de drenaje, entre otras.

La clasificación de los materiales asfálticos se divide en cementos asfálticos y emulsiones asfálticas, dependiendo del vehículo utilizado para su incorporación o aplicación. Estas categorías están detalladas en la Tabla 1 de la norma antes mencionada.

Tabla 1.- Clasificación de los materiales asfálticos. Fuente: N·CMT·4·05·001/22

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, mezclas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones.





2.4. COMPOSICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

El cemento asfáltico constituye un componente natural presente en gran parte del petróleo. Este material bituminoso, de tonalidad oscura, se presenta en estado sólido o semisólido a temperatura ambiente, experimentando una transición gradual hacia su estado líquido al ser sometido a calor. Sus componentes principales son los bitúmenes, los cuales se encuentran en forma sólida en la naturaleza o se obtienen mediante la refinación del petróleo, ya sea de manera pura o combinados con derivados de este último.

De especial interés para los ingenieros, el cemento asfáltico destaca como un aglutinante resistente, altamente impermeable y duradero. Se caracteriza por conferir flexibilidad y un adecuado control a las mezclas de agregados con las que suele combinarse. Además, demuestra una notable resistencia frente a ácidos, álcalis y sales. Este conjunto de propiedades lo convierte en un material de elección en la construcción y pavimentación de carreteras.

El cemento asfáltico sin modificar como material de pavimentación se ha utilizado durante más de 100 años. Si bien existen depósitos naturales en áreas del mundo en las que se pueden encontrar charcos de cemento asfáltico, la mayor parte del cemento asfáltico utilizado en pavimentación proyectos se deriva del procesamiento de residuos de petróleo crudo. El cemento asfáltico exhibe propiedades termoplásticas, lo que implica que su viscosidad está directamente vinculada a la temperatura del material. En condiciones de elevadas temperaturas, el cemento asfáltico se torna más maleable y propenso a fluir, mientras que, en entornos más fríos, experimenta un endurecimiento que lo vuelve más frágil.

En México el primer pozo petrolero se perforó en mayo de 1901 en el Ebono, San Luis Potosí. En el año de 1925 al emprenderse la construcción de los primeros caminos pavimentados, la primera carretera pavimentada con cemento asfáltico es de México- Pachuca, México- Cuernavaca.





Existen dos tipos de obtención de los asfaltos que son:

- Asfaltos Naturales. Se manifiestan en manantiales, lagos, exudaciones, impregnando rocas.
- Asfaltos derivados del Petróleo. Procedentes de la refinación del petróleo, el petróleo se obtiene de yacimientos existentes en el subsuelo a diferentes profundidades llegando a 7,000 mts o más, su densidad es ligeramente mayor que la del agua.

2.4.1. Clasificación de cemento asfáltico

La clasificación del cemento asfáltico se puede realizar de tres maneras, según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes: por grado de viscosidad, asfalto modificado y por grado de desempeño. En cada una de estas categorizaciones, se busca evaluar la consistencia del cemento asfáltico a una o varias temperaturas, además de analizar propiedades vinculadas a la pureza, susceptibilidad al envejecimiento y aspectos relacionados con la seguridad.

2.4.2. Grado de Viscosidad

Los cementos asfálticos son productos derivados del proceso de destilación del petróleo, mediante el cual se eliminan los solventes volátiles y parte de sus aceites. La viscosidad de estos cementos experimenta variaciones en función de la temperatura. Dentro de sus componentes, las resinas desempeñan un papel fundamental al generar adherencia con los materiales pétreos, actuando como aglutinantes efectivos. Este efecto se potencia al calentarse, permitiendo que se licúen y cubran de manera integral las partículas del material pétreo.

La clasificación de los cementos asfálticos se realiza de acuerdo con las normativas establecidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), siguiendo las pautas delineadas en la norma (N·CMT·4·05·001/22, 2022). La viscosidad dinámica a 60°C sirve como criterio para esta clasificación, proporcionando parámetros específicos para evaluar y diferenciar estos materiales en función de su comportamiento a temperaturas determinadas.





2.4.3. Asfalto Modificado

Los materiales asfálticos modificados resultan de la disolución o incorporación de un polímero o caucho molido de neumáticos al asfalto. Estas sustancias poseen estabilidad frente al paso del tiempo y cambios de temperatura. Al material asfáltico se le añade con el propósito de alterar su aspecto físico y reológico, así como para mitigar su susceptibilidad a la temperatura, humedad y oxidación.

Los modificadores generan una actividad superficial iónica que incrementa la adhesión en la interfaz entre el material pétreo y el material asfáltico, preservándola incluso en presencia de agua. Además, fortalecen la resistencia de las mezclas asfálticas contra la deformación y esfuerzos repetidos de tracción, disminuyendo la fatiga y reduciendo el agrietamiento. Asimismo, disminuyen la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura.

Estos modificadores suelen aplicarse directamente al material asfáltico antes de mezclarlo con el material pétreo. Entre los principales modificadores empleados en los materiales asfálticos se encuentran:

Polímero Tipo I constituye un modificador asfáltico diseñado para mejorar el rendimiento de mezclas asfálticas tanto en condiciones de altas como bajas temperaturas. El proceso de fabricación involucra bloques de estireno en polímeros elastoméricos radiales del tipo bibloque o tribloque, tales como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB). Este polímero se emplea en mezclas asfálticas destinadas a capas delgadas y estructurales de pavimentos con alto tránsito y vehículos pesados, abarcando climas fríos y cálidos. También se utiliza en la preparación de emulsiones para tratamientos superficiales.

Polímero Tipo II actúa como modificador asfáltico destinado a mejorar el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Su composición se basa en polímeros elastoméricos lineales, utilizando configuraciones de caucho Estireno, Látex de Butadieno o Látex de Neopreno. Este polímero encuentra aplicación en diversas mezclas asfálticas para pavimentos que requieran mejoras en su comportamiento en servicio, en climas fríos y





templados. Asimismo, se utiliza en la preparación de emulsiones para tratamientos superficiales.

Polímero Tipo III se presenta como un modificador asfáltico dirigido a mejorar la resistencia al ahuellamiento en mezclas asfálticas, reducir la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y optimizar su comportamiento a elevadas temperaturas. Este polímero, basado en plastómeros, se fabrica mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE). Su aplicación abarca climas cálidos, siendo empleado en mezclas asfálticas para capas estructurales de pavimentos de alto tránsito y en la preparación de emulsiones para tratamientos superficiales.

Caucho de neumáticos, por su parte, funciona como modificador asfáltico destinado a mejorar la flexibilidad y resistencia a la tensión de mezclas asfálticas, disminuyendo la aparición de grietas debido a fatiga o cambios de temperatura. Su fabricación se lleva a cabo a partir del producto resultante del pulido de neumáticos. Este modificador se utiliza específicamente en carpetas delgadas con granulometría abierta y en tratamientos superficiales.

2.4.4. Grado de desempeño (PG)

Los materiales asfálticos clasificados bajo este término se caracterizan por su comportamiento en pavimentos, el cual se encuentra definido por las temperaturas máximas y mínimas anticipadas en el lugar de su aplicación. Dentro de este rango de temperaturas, se garantiza un desempeño adecuado para resistir deformaciones o grietas ocasionadas por condiciones de bajas temperaturas o fatiga. Este comportamiento se establece mediante correlaciones con ensayos especializados y simulaciones de envejecimiento a corto y largo plazo. Dichas pruebas miden propiedades físicas que, a través de los principios de ingeniería, están directamente vinculadas con el comportamiento in situ de los materiales. Estas evaluaciones forman parte de los productos del Programa de Investigación de Carreteras, desarrollado por la Unión Americana y conocido como SHRP Technology.





Según la norma mexicana (N-CMT-4-05-004/18, 2018), el Grado de Desempeño (PG) se define como el rango de temperaturas, desde las máximas hasta las mínimas, en el cual un cemento asfáltico, ya sea convencional o modificado, demuestra un rendimiento satisfactorio. La selección del cemento asfáltico más idóneo para un proyecto específico se realiza considerando el clima predominante, la intensidad de tránsito anticipada y la velocidad operativa a la que la vía estará expuesta durante su vida útil.

Por ejemplo, un cemento asfáltico con clasificación PG 64-16 exhibirá un desempeño adecuado en temperaturas que oscilen desde sesenta y cuatro (64) grados Celsius hasta menos dieciséis (-16) grados Celsius. Estas temperaturas máximas y mínimas pueden ajustarse según sea necesario, con incrementos estandarizados de seis (6) grados. Sin embargo, para esta normativa, las temperaturas máximas se contemplan entre sesenta y cuatro (64) y ochenta y dos (82) grados Celsius, y solo se considerarán temperaturas mínimas entre menos dieciséis (-16) y menos veintidós (-22) grados Celsius.

La determinación de las temperaturas máximas y mínimas para la zona geográfica en la que se llevará a cabo el trabajo se realizará utilizando datos estadísticos climáticos específicos, según lo indicado en la Cláusula D de esta norma.

Los requisitos de calidad del cemento asfáltico seleccionado, de acuerdo con su Grado de Desempeño (PG) para el clima de la zona de construcción, se ajustarán conforme a la intensidad de tránsito prevista, expresada en términos del número de equivalentes de ocho puntos por eje (8,2 toneladas, ΣL), acumulados durante el período de servicio del pavimento, nunca menor a diez (10) años, y de acuerdo a la velocidad operativa.





2.5. COMPOSICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES BITUMINOSAS

Generalmente, una emulsión bituminosa consta de tres componentes principales: betún, agua y un agente emulsionante. En algunas ocasiones, la emulsión bituminosa puede incluir otros ingredientes, tales como estabilizantes, mejoradores de revestimiento o agentes de control de rotura. La mezcla de betún y agua utilizando aditivos químicos y equipos altamente especializados se realiza bajo condiciones cuidadosamente controladas.

El betún es el ingrediente principal de la emulsión bituminosa y en la mayoría de los casos; compone del 50% al 75% de la emulsión. El grado o dureza del betún afecta significativamente las emulsiones producidas que normalmente se fabrican con betún en el grado de penetración 40-250. Ocasionalmente, las condiciones ambientales pueden requerir una base bituminosa más dura o más blanda. En cualquier caso, la compatibilidad del agente emulsionante con el betún es un factor esencial para la fabricación de una emulsión estable. El betún se compone principalmente de grandes moléculas de hidrocarburo. La compleja interacción de estas moléculas hace prácticamente imposible predecir a la perfección el comportamiento del betún a emulsionar. Por lo tanto, es necesario un control de calidad en la fabricación de la emulsión bituminosa.

El agua es el segundo ingrediente de la emulsión bituminosa. Contiene minerales que afectan la fabricación de emulsiones bituminosas estables. En consecuencia, el agua potable podría no ser perfecta para la producción de emulsión bituminosa. El beneficio de los iones de calcio y magnesio en el agua es formar una emulsión catiónica estable porque el cloruro de calcio generalmente se agrega a las emulsiones catiónicas para mejorar la estabilidad durante el almacenamiento. Sin embargo, estos iones pueden ser dañinos en la emulsión aniónica debido a las sales de calcio y magnesio insolubles en agua que se forman en la reacción con las sales de sodio y potasio solubles en agua que generalmente se usan como emulsionantes. Por otro lado, los aniones carbonato y bicarbonato pueden estabilizar la emulsión aniónica debido a su efecto tampón, pero estos aniones desestabilizan la emulsión catiónica al reaccionar con emulsionantes de hidrocloreuro de amina solubles en agua. En consecuencia, no se debe usar agua que contenga materiales particulados o agua impura en la fabricación





de la emulsión, ya que dan como resultado un desequilibrio de los componentes de la emulsión que puede afectar negativamente el rendimiento o provocar una rotura prematura.

Los agentes emulsionantes son agentes tensioactivos que afectan en gran medida las propiedades de la emulsión bituminosa (Asphalt institute, 1989). Los emulsionantes mantienen las gotas de betún en condiciones estables y controlan el tiempo de rotura. Las arcillas y los jabones se usaban como agentes emulsionantes en los primeros días de la fabricación de emulsiones bituminosas. Debido al aumento de la demanda para el uso de emulsión bituminosa, se obtuvieron varios emulsionantes efectivos. Diferentes agentes emulsionantes ahora están disponibles comercialmente. La mayoría de los emulsionantes aniónicos son ácidos grasos, que son derivados de productos de madera como ligninas, aceites de resina y colofonias. Las aminas grasas son los emulsionantes catiónicos más comunes, como las imidazolinias, las amidoaminas y las diaminas. Las aminas se transforman en jabón al reaccionar con un ácido, generalmente clorhídrico. Las sales grasas de amonio cuaternario son otro tipo de agente emulsionante que se utiliza para producir las emulsiones catiónicas. Este tipo de emulsionantes son emulsionantes catiónicos suficientes y estables ya que son sales solubles en agua y no necesitan la adición de ácido. Prácticamente, los tipos aniónicos y catiónicos son los más utilizados en la construcción y mantenimiento de pavimentos. Estos tipos se refieren a las cargas eléctricas que rodean las partículas de betún. El polo del ánodo se carga positivamente y el polo del cátodo se carga negativamente cuando estos dos polos se sumergen en un fluido y pasa una corriente eléctrica. Si esta corriente eléctrica pasa a través de una emulsión bituminosa que contiene partículas de betún cargadas negativamente, estas partículas se moverán hacia el ánodo, por lo que la emulsión se clasifica como aniónica. Por el contrario, las partículas de betún cargadas positivamente migrarán al cátodo y la emulsión se identifica como catiónica. Las partículas de betún neutro no se desplazan a ninguno de los dos polos y la emulsión se clasifica en este caso como no iónica.





2.5.1. Calidad de la emulsión bituminosa

Diferentes variables afectan la producción, almacenamiento y desempeño de las emulsiones bituminosas. Estas variables tienen un efecto significativo que incluye:

- Las propiedades químicas del betún base, dureza, calidad y tamaño de partícula en la emulsión.
- Tipo de agente emulsionante, concentración y propiedades.
- La temperatura y la presión utilizadas durante la fabricación.
- Carga iónica de las partículas de emulsión.
- Orden de adición de los ingredientes.
- Uso de aditivos como modificadores químicos y polímeros.

Estas características se pueden variar para adaptarse a los agregados disponibles o a las condiciones de construcción del pavimento.

2.5.2. Producción de la emulsión

El equipo principal para producir la emulsión bituminosa consiste en un dispositivo mecánico de alta velocidad y alto cizallamiento (generalmente un molino coloidal) para dividir el bitumen en gotitas muy pequeñas. Además, se requieren un contenedor de betún calentado, un contenedor de solución emulsionante, bombas y medidores de flujo.

El molino coloidal tiene un rotor de alta velocidad que gira entre 1000 y 6000 ciclos por minuto. Generalmente, la emulsión bituminosa tiene tamaños de gota muy pequeños, de alrededor de 0,001 milímetros a 0,010 milímetros, y estos tamaños de gota se ven afectados por la intensidad de la energía mecánica que proporciona el molino. Se utilizan bombas separadas para suministrar la solución de betún y emulsionante al molino coloidal.

El betún y el agua se calientan individualmente a la temperatura deseada antes del proceso de emulsificación. El betún y el agua que contiene el emulsionante se bombean al molino coloidal donde se separa en gotitas muy pequeñas. Luego, la emulsión producida generalmente se alimenta a contenedores de almacenamiento a granel. La solución de betún





y emulsionante debe dosificarse con precisión y esto se suele realizar con caudalímetros. La dosificación se puede controlar monitoreando las temperaturas de la solución de betún y emulsionante que ingresa al molino y la temperatura de descarga.

2.5.3. Rompimiento y curado de la emulsión

Si la emulsión bituminosa se utiliza como aglutinante de los áridos en obras viales y para garantizar que la emulsión cumpla su función final, el agua debe separarse de la emulsión bituminosa y evaporarse. Esta separación se llama “ruptura”. Según los usos de la emulsión bituminosa, se formulan para romper por uno de los dos mecanismos de ruptura: químico y evaporativo. El mecanismo de evaporación se realiza principalmente para los grados de emulsión de fraguado lento, mientras que el mecanismo químico se utiliza para romper los grados de fraguado medio y rápido. El tiempo de ruptura de la emulsión de fraguado rápido es considerablemente más corto que el tiempo necesario para las emulsiones de fraguado medio y lento. El tipo y la concentración de los emulsionantes juegan un papel vital en la ruptura de la emulsión, y otros factores (explicados a continuación) también pueden controlar la tasa de ruptura. Para cumplir con los requisitos específicos del uso de emulsiones bituminosas en la ingeniería de pavimentos y obtener resultados óptimos, es fundamental controlar todos estos factores.

El curado incluye el desarrollo de las propiedades mecánicas del betún. Para ello, el agua debe evaporarse por completo o ser absorbida y las partículas de emulsión bituminosa deben unirse y adherirse a la superficie prevista. Los solventes de petróleo se pueden usar en algunas emulsiones bituminosas para ayudar en el proceso de mezcla y recubrimiento y, sin embargo, el tiempo del proceso de curado se verá afectado por el tipo y la cantidad de solventes utilizados.

El tiempo de fraguado y curado de las emulsiones bituminosas se ve afectado por varios factores que incluyen:





- Absorción de agua: Una mezcla de textura rugosa y porosa reduce el tiempo de fraguado al absorber agua de la emulsión.
- Contenido de humedad del agregado: A pesar de que el agregado húmedo puede ayudar en el proceso de recubrimiento, tiende a aumentar el tiempo de curado necesario para la evaporación.
- Condiciones ambientales: la tasa de evaporación del agua se ve afectada por la temperatura, la humedad y la velocidad del viento.
- Presión mecánica: la presión de movimiento lento de los compactadores durante la etapa de compactación obliga al agua a salir de la mezcla y ayuda en la cohesión, el curado y la estabilidad.
- Área superficial: El aumento del área superficial del agregado (cuando se usa un agregado más fino) puede acortar el tiempo de ruptura de la emulsión bituminosa.

2.5.4. Selección del tipo y grado de emulsión adecuados

El rendimiento perfecto de la emulsión bituminosa requiere seleccionar el tipo y grado adecuados para el uso previsto. Hay varias aplicaciones de la emulsión bituminosa, como una mezcla de planta (central o mezclada en el lugar), mezcla reciclada, capa de imprimación, sellado de niebla, sellado de lechada, micropavimento o sellado de astillas. Después de la selección, se deben tomar otras variables del proyecto. Las condiciones ambientales esperadas durante la construcción y la ubicación geográfica son consideraciones importantes. Además, el tipo de agregado, la gradación y la disponibilidad son otros factores que afectan la selección de la emulsión.

El mecanismo de evaporación es principalmente realizado para los grados de emulsión de fraguado lento, mientras que el mecanismo químico es Se utiliza para romper los grados de fraguado medio y fraguado rápido. El tipo y la concentración de los emulsionantes juegan un papel vital en la ruptura de la emulsión, y otros factores (explicados a continuación) también pueden controlar la tasa de rotura. Para cumplir con los requisitos específicos del uso de betún en la ingeniería de pavimentos y para obtener resultados óptimos, es fundamental controlar todos estos factores.





2.6. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Al igual que sucede con cualquier material empleado en el ámbito de la construcción, nuestro entendimiento respecto a las propiedades y características del asfalto y de los sistemas de pavimentación asfáltica ha experimentado una evolución constante con el paso del tiempo. Los métodos contemporáneos empleados para el diseño de las mezclas de pavimentación se perfeccionan de manera continua a medida que se profundiza en nuestro saber.

La relación de componentes fundamentales para una mezcla asfáltica resulta sorprendentemente reducida para un material compuesto que exhibe características de tal complejidad: se limita al cemento asfáltico y a los agregados minerales. Los pavimentos actuales, flexibles y con diversos diseños de mezclas, constituyen meras adaptaciones basadas en las propiedades y proporciones de estos componentes primordiales, así como en las temperaturas, técnicas de manipulación y procedimientos de colocación empleados.

Es imperativo reconocer que no todas las mezclas asfálticas responden a un único propósito, aun cuando se implementen en un mismo perfil de pavimentación. Distintos estratos en la estructura de un pavimento demandan consideraciones específicas en cuanto a diseño se refiere para la elaboración de las mezclas asfálticas pertinentes. Un material que exhiba la resistencia y granulometría adecuadas para fungir como mezcla base podría no ser idóneo para una capa superficial, que necesita presentar características de durabilidad y resistencia al deslizamiento, especialmente cuando se encuentra expuesta a la abrasión y a circunstancias ambientales adversas.

Las mezclas asfálticas son materiales compuestos que consisten principalmente en asfalto como aglutinante, agregados y vacíos. Generalmente se han utilizado como material para la construcción de pavimentos viales flexibles debido a la buena adherencia que existe entre el ligante y agregados. Sin embargo, debido al aumento del volumen de tráfico en términos de repeticiones de carga de tráfico, temperaturas altas y bajas y sensibilidad al agua, pueden aparecer varios tipos de problemas en la superficie de los pavimentos flexibles, como surcos (deformación permanente), segregación y agrietamiento.





El diseño de pavimento flexible perfecto debe ser duradero, fuerte y resistente a la deformación permanente y al agrietamiento, resistiendo así este tipo de fallas, o al menos retrasando el deterioro futuro del pavimento. Aunque las mezclas bituminosas con aditivos tales como polímeros, caucho granulado y caucho natural se han utilizado previamente como un intento de superar el deterioro, todavía existen problemas de deformación permanente y agrietamiento por fatiga. Estos problemas ocurren porque la resistencia a la tracción y al corte de las capas bituminosas es débil (Abdelaziz, Mahrez & Karim, Mohamed, 2010).





CAPÍTULO III: PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO

El reciclaje de pavimentos comprende una variedad de técnicas diseñadas para reutilizar los materiales de un pavimento deteriorado preexistente con el propósito de construir una nueva capa de pavimentación. A través de este procedimiento, el pavimento en estado de deterioro se somete a una serie de transformaciones hasta configurar una estructura uniforme apta para resistir las demandas del tráfico vehicular. El fresado esencialmente, implica la trituración del pavimento preexistente hasta alcanzar una profundidad determinada, generalmente ubicada entre los 65 y 165 mm. Posteriormente, se incorporan componentes como betún, agua, aditivos y áridos. En cuanto al ligante utilizado, puede variar, abarcando desde cemento asfáltico hasta ocasionalmente emulsiones bituminosas o cementos asfálticos expandidos. La inclusión de agua tiene como finalidad facilitar la hidratación y la homogeneización de la mezcla, además de contribuir al proceso de compactación. Todas estas etapas se llevan a cabo directamente en el lugar correspondiente.

La mezcla homogénea resultante se compacta y se deja curar para formar una capa nueva con el soporte estructural deseable para el nuevo pavimento. Luego, la capa reciclada se cubre con una capa de sellado para protegerla contra el tráfico durante el proceso. Normalmente, la carretera se vuelve a abrir al tráfico en una o dos horas. El reciclaje de ligantes de cemento asfáltico aumenta significativamente la capacidad de carga del pavimento, mientras que las deflexiones del pavimento, las tensiones y deformaciones de la subrasante se reducen y las roderas existentes se corrigen, si el espesor de la capa ligada se incrementa lo suficiente.

El reciclaje en caliente en el lugar implica calentar el pavimento desgastado existente para que se ablande lo suficiente como para permitir que se frese a una profundidad específica. Luego, el pavimento de asfalto se vuelve a mezclar y dosificar con una mezcla asfáltica virgen en caliente (agregado), un nuevo betún y, posteriormente, se coloca. La técnica se utiliza para pavimentos que muestran deterioros superficiales menores, como grietas y desmoronamientos, pero con una base sólida. La recuperación de profundidad parcial se usa para un pavimento estructuralmente sólido cuya capa superficial se ha deteriorado. Cuando el deterioro de la carretera se extiende más allá de las capas de pavimento, se utiliza la





recuperación de profundidad total. La recuperación de profundidad completa procesa todo el pavimento existente y una porción predeterminada del material subyacente (base y sub-base).

Debido a que el pavimento viejo se elimina por completo, las grietas profundas se borran, eliminando así cualquier tendencia de agrietamiento reflectante y restaurando el perfil y la caída transversal del pavimento. El proceso suele tardar de dos a tres días después de lo cual se puede reabrir al tráfico.

Por otro parte y siguiendo con el objetivo de este TOG, la incorporación de RAP en una nueva mezcla asfáltica para su aplicación en la capa superficial o de rodadura, esta puede llevarse a cabo mediante dos métodos distintos: el procesamiento en planta y el reciclaje en campo.

El primer método implica la combinación del RAP con los materiales de la nueva mezcla asfáltica. Para ello, se procesa el material RAP hasta alcanzar la granulometría requerida. Posteriormente, se mezcla con agregados y asfalto virgen, en ocasiones con el agregado de rejuvenecedores o agentes específicos, hasta obtener la mezcla asfáltica deseada.

El segundo método, conocido como reciclaje en campo, utiliza el material RAP tal como fue recuperado en el sitio añadiendo agregados de banco. En este proceso, la capa superficial del pavimento se fresará hasta una profundidad fija y se combinará con emulsión asfáltica. Posteriormente, esta mezcla se colocará y compactará utilizando el procedimiento convencional de pavimentación.

En ambos métodos, es crucial considerar la contribución que el asfalto RAP puede aportar a la calidad y características finales de la mezcla asfáltica. Es importante evaluar cuidadosamente las propiedades del RAP y ajustar el proceso de mezcla según sea necesario para garantizar el rendimiento óptimo de la mezcla final.





3.1. PAVIMENTO ASFÁLTICO AL TÉRMINO DE SU VIDA ÚTIL

Las operaciones de mantenimiento serán siempre la primera opción para alargar la vida útil de la vía, evitar la generación de residuos y evitar la explotación de recursos futuros. Sin embargo, cuando las operaciones de prevención y reparación dejan de ser efectivas, el asfalto llega al final de su vida útil y está listo para ser extraído de la carretera y preparado para su reutilización.

Antes de fresar el pavimento existente, el encargado de la construcción o de la supervisión debe realizar (o encargar) controles preliminares para identificar el material a fresar (espesor de las capas, características del material, etc.) y también para proteger los servicios subterráneos, tuberías de agua, pozos de registro, etc.

Luego, el fresado del asfalto existente se realiza convencionalmente mediante fresadoras de orugas o de ruedas, que trituran el material hasta obtener un material más fino. En este proceso es muy importante (cuando sea posible) fresar las hileras existentes de forma independiente (es decir, las capas superficiales por separado de las capas base), con el fin de clasificar el material resultante para fines específicos.

La producción y colocación de la nueva mezcla (que contenga o no material del mismo camino) se realiza una vez preparada la superficie fresada. Los procesos se pueden dividir en dos métodos principales: técnicas en planta o en el sitio.

Estos se pueden subdividir en fríos y calientes.

La reutilización en planta (o fuera en el sitio) consiste en retirar el material del sitio a una planta ubicada en otro lugar, que procesa el asfalto recuperado para reutilizarlo en el proyecto original o en otros proyectos. La reutilización in situ (o en el sitio) permite que el material recuperado se incorpore directamente al nuevo pavimento de asfalto en construcción o mantenimiento.





La elección del proceso dependerá de varios factores, tales como:

- Proximidad de una planta de asfalto adecuada.
- Naturaleza, cantidad, calidad y contenido del asfalto recuperado en la nueva mezcla.
- Cantidad y tipo de posibles contaminantes dentro del material recuperado.
- Duración programada de la obra.
- Disponibilidad de espacio para el almacenamiento provisional de asfalto recuperado antes de su reutilización.
- Desempeño de ingeniería requerido del nuevo pavimento.

Si bien la reutilización del asfalto recuperado con aglutinantes bituminosos estándar con tasas de adición de hasta el 20% se logra regularmente con éxito, están surgiendo nuevos desafíos. En los últimos años, se han utilizado más betunes modificados con polímeros y de calidad más dura en la producción de asfalto y, por lo tanto, el asfalto recuperado basado en ellos puede no reutilizarse adecuadamente de la misma manera. Al mismo tiempo, los factores medioambientales y económicos existentes maximizan de la reutilización del asfalto recuperado incrementando su porcentaje en nuevas mezclas.

Como en todos los trabajos realizados en obra, existe la posibilidad de que se produzcan desviaciones de calidad, lo que requiere una cuidadosa observación y pruebas de calidad durante la construcción. Se realizan pruebas estándar para verificar que los materiales y equipos utilizados sean apropiados, así como para verificar que se cumplan los estándares requeridos.

El uso de algunos materiales de desecho y subproductos en la fabricación de asfalto podría incluso poner en peligro su reutilización y reciclabilidad al final de su vida útil. Por tanto, y aunque parezca paradójico, el uso de este tipo de materiales podría contradecir los principios de la economía circular, ya que obligaría a arrojar a un vertedero un material que de otro modo sería 100% reutilizado y/o reciclado varias veces.





3.2. CLASIFICACIÓN DE RAP

3.2.1. Reciclaje de mezclas en frío en planta

El reciclaje de mezclas en frío en planta representa una estrategia fundamental en la gestión sostenible de infraestructuras viales, ya que permite revitalizar pavimentos deteriorados con un enfoque ecoamigable y económicamente viable. En este proceso, el pavimento existente se somete a un minucioso proceso de trituración y fresado para obtener material triturado de tamaño uniforme, que luego se mezcla en una planta especializada con nuevos componentes como asfalto rejuvenecedor y agregados. Esta mezcla, cuidadosamente ajustada según las necesidades específicas del proyecto y las condiciones del terreno, ofrece una solución resistente y duradera para la renovación de carreteras. Además de su impacto económico positivo al reducir los costos asociados con la extracción y disposición de materiales, el reciclaje de mezclas en frío en planta contribuye significativamente a la conservación de recursos naturales al minimizar la demanda de nuevos materiales vírgenes. Asimismo, al disminuir la cantidad de residuos de construcción y la emisión de gases de efecto invernadero relacionados con la producción y transporte de nuevos materiales, este proceso se alinea con los objetivos de sostenibilidad ambiental. En última instancia, el reciclaje de mezclas en frío en planta promueve la creación de infraestructuras viales más resilientes y de mayor vida útil, lo que se traduce en beneficios a largo plazo para la sociedad en términos de seguridad vial, eficiencia del transporte y cuidado del medio ambiente.

El proceso de reciclaje de mezclas en frío en planta es un método que abarca diversas etapas para garantizar la calidad y eficacia del producto final. Comienza con la preparación del pavimento existente, donde se lleva a cabo una inspección para eliminar cualquier material suelto o contaminante que pueda afectar la nueva mezcla. Luego, mediante el uso de maquinaria especializada como trituradoras de pavimento y fresadoras en frío, el pavimento se tritura y fresado para obtener material triturado de tamaño uniforme. Este material triturado se transporta a la planta de reciclaje, donde se combina con nuevos materiales como asfalto rejuvenecedor y agregados. La mezcla resultante se ajusta cuidadosamente en términos de proporciones y características según las necesidades específicas del proyecto y las condiciones del terreno. En la planta, la mezcla se agita y mezcla de manera uniforme para garantizar una distribución homogénea de los materiales. Una vez lista, la mezcla se





transporta al sitio de trabajo y se aplica en capas sobre la superficie de la carretera utilizando equipos de pavimentación adecuados.

3.2.2. Reciclaje en frío en el lugar

El reciclaje en frío en el lugar es una técnica de rehabilitación en la que los materiales de pavimento de asfalto existentes se reutilizan y se mezclan en el lugar sin la aplicación de calor. El RAP se obtiene mediante el fresado o triturado del pavimento existente. Generalmente se agregan agregados vírgenes, agentes de reciclaje o ambos al RAP, que luego se coloca y compacta. El uso de reciclaje en frío en el lugar puede restaurar el pavimento viejo al perfil deseado, eliminar surcos de ruedas, baches, irregularidades y áreas ásperas existentes. También puede eliminar grietas transversales, reflectantes y longitudinales (ARRA, 2001). Este método para el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos promueve la sostenibilidad y ayuda a limitar el uso de materiales escasos que incluyen grava y roca triturada. El reciclaje en frío en el lugar promueve una alta tasa de producción de mezclas asfálticas, lo que resulta en ahorros de costos, interrupción mínima del tráfico, capacidad para retener el perfil original y beneficios ambientales, todo sin el uso de calor.

El proceso de reciclaje en frío in situ se implementa mediante el uso de maquinaria especializada que incorpora un tambor de fresado dotado de numerosos picos de acero templado. Este tambor gira hacia arriba, llevando a cabo la operación de fresado sobre el material presente en el camino existente, tal como se ilustra en la Figura 5. Conforme se efectúa el fresado del pavimento deteriorado, se introduce agua en la cámara de mezcla mediante una manguera flexible que rocía directamente el fluido.



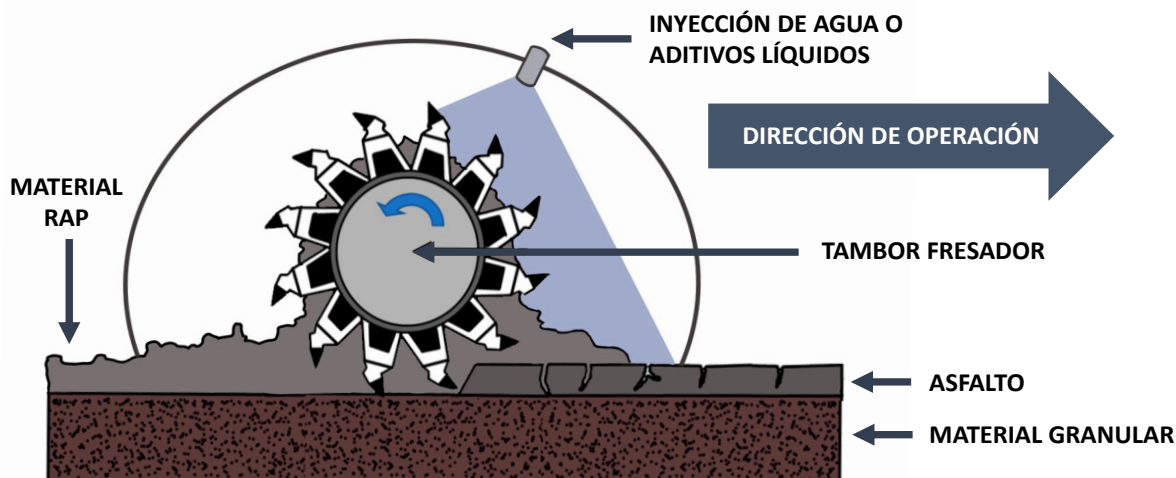


Figura.- 5 Proceso de reciclado de la carpeta existente. Fuente: Elaboración Propia.

La acción combinada de fresado y humectación en tiempo real es esencial para el éxito del proceso. El tambor de fresado realiza una labor precisa al retirar la capa superficial deteriorada, mientras que la inyección controlada de agua contribuye a crear una mezcla homogénea con los materiales fresados. Este enfoque permite la reactivación de los ligantes asfálticos presentes en el material reciclado, facilitando así la creación de una nueva mezcla asfáltica con propiedades mejoradas.

Este método no solo se caracteriza por su eficiencia en la rehabilitación de pavimentos, sino que también destaca por su capacidad para reducir el impacto ambiental al reciclar los materiales in situ. La tecnología empleada garantiza un proceso controlado y preciso, lo que resulta en una rehabilitación efectiva del pavimento con la consiguiente minimización de residuos y la optimización de los recursos disponibles. Es fundamental reconocer la importancia de esta técnica en el contexto de prácticas sostenibles de construcción de carreteras, donde la eficacia operativa se combina con la reducción de la huella ambiental, impulsando así la viabilidad a largo plazo de las infraestructuras viales.



3.2.3. Reciclaje de mezclas en caliente

El pavimento de asfalto reciclado en caliente es una técnica sostenible que involucra la reutilización de material asfáltico existente para la construcción de nuevas capas de pavimento. Este proceso implica el reciclaje térmico del asfalto viejo, que se retira y tritura para luego mezclarse con nuevos materiales, como agregados y aglutinantes, antes de ser recalentado y aplicado en la obra. El pavimento de asfalto reciclado en caliente ofrece beneficios ambientales al reducir la dependencia de recursos naturales y minimizar la eliminación de desechos asfálticos. Además, proporciona un pavimento durable y de alto rendimiento, contribuyendo así a la sostenibilidad y eficiencia en la industria de la construcción de carreteras.

Para producir mezclas de RAP en caliente se utilizan plantas tanto por lotes como por tambores. El material RAP se puede obtener mediante molienda o mediante una operación de trituración. El equipo y los procedimientos de colocación y compactación de la mezcla son los mismos que para la producción de una mezcla HMA. Los porcentajes de RAP oscilan entre el 10 y el 40 por ciento. Las ventajas del reciclaje de mezcla en caliente incluyen un rendimiento igual o mejor en comparación con el convencional y la capacidad de corregir la mayoría de los defectos, deformaciones y grietas de la superficie.

El pavimento asfáltico recuperado debe procesarse hasta obtener un material granular antes de su uso en aplicaciones de mezcla en caliente. Una planta de procesamiento de RAP típica consta de una trituradora, unidades de cribado, transportadores y un apilador. Es deseable producir una fracción gruesa o fina de RAP procesado para permitir un mejor control sobre la entrada a la planta de mezcla en caliente y un mejor control del diseño de la mezcla. El RAP procesado utilizado en la mezcla asfáltica en caliente reciclada debe ser lo más grueso posible y los finos (menos 0,075 mm (tamiz No. 200)) deben minimizarse. Se recomienda una trituración suave con RAP (velocidad controlada de la trituradora y ajuste de espacio en la puerta de salida) para minimizar la fractura del agregado grueso y la generación excesiva de finos.





3.3. PRODUCCIÓN DE RAP

La producción de RAP implica uno o más pasos para crear materiales consistentes que puedan usarse y cumplir con los estándares para mezclas asfálticas de alta calidad. El cribado se utiliza para separar tamaños. Como se señaló anteriormente, el material molido de fuentes rastreables puede tener propiedades muy consistentes y es posible que no requiera procesamiento adicional. En algunos casos, puede ser conveniente filtrar o fraccionar el RAP de origen rastreable para eliminar partículas de gran tamaño o separar el RAP en reservas gruesas y finas para maximizar la cantidad de RAP que se puede usar en mezclas particulares. La separación del RAP según el tamaño aumenta el control y reduce la variabilidad. También permite realizar ajustes por variabilidad dentro de la mezcla de RAP en lugar de solo en la mezcla de agregado virgen.

Generalmente, el RAP (pavimento asfáltico reciclado) se clasifica en dos pilas: gruesas o finas. Sin embargo, con el uso de equipos de fraccionamiento especializados, es posible tamizar hasta el tamaño de tamiz No. 4 (menor a 0,25 pulgadas o 6,35 mm) o incluso hasta el tamaño de tamiz No. 8 (menor a 0,125 pulgadas o 2,36 mm). En este escenario, es factible obtener tres tamaños diferentes, todos con un diámetro máximo de 1 pulgada (menor a 25 mm).

Para acopios de RAP de múltiples fuentes, particularmente acopios que contienen grandes trozos de RAP o losas de pavimento, puede ser necesario triturar el material para producir RAP con un tamaño superior adecuado para usar en nuevas mezclas asfálticas. La trituración también puede mejorar la consistencia del RAP resultante si las múltiples fuentes de RAP se alimentan a la unidad de trituración desde diferentes ubicaciones de la pila sin procesar. Hay varios tipos de sistemas de trituradoras disponibles, como trituradoras de impacto horizontales, trituradoras de impacto de molino de martillos y trituradoras combinadas de mandíbula/rodillo.

Elegir el tamaño superior (es decir, el tamaño máximo de partículas de RAP) para la producción de trituración es una decisión importante. Muchos contratistas seleccionan el tamaño superior para que el RAP triturado pueda usarse en cualquier tipo de mezcla. Sin





embargo, triturar a tamaños superiores más pequeños aumentará el contenido de polvo (porcentaje que pasa el tamiz No. 200 (0,0029 pulgadas (0,075 mm)) en el RAP, lo que puede limitar la cantidad de RAP que se puede usar en nuevos diseños de mezcla.

3.3.1. Almacenamiento de RAP

Se deben utilizar prácticas normales para prevenir o limitar la segregación. Se prefieren pilas de acopio en forma de arco y en capas uniformes para almacenar material RAP fresado o sin procesar (es decir, material de varios tamaños). Al igual que con el agregado virgen, se prefieren pilas cónicas o pilas pequeñas de baja pendiente para almacenar material RAP procesado. Las reservas de RAP deben colocarse sobre una base con drenaje adecuado y construirse en capas para minimizar la segregación y asegurar una cara viable. Para maximizar el porcentaje de RAP en una mezcla, se puede considerar la construcción de acopios separados para cada fuente de RAP según la categoría de RAP, el tamaño del material procesado, la calidad del agregado y el tipo y cantidad de ligante asfáltico. Sin embargo, se deben considerar las limitaciones de espacio.

Todas las reservas de RAP deben mantenerse limpias y libres de materiales extraños. El RAP retiene agua y no drena tan bien como una reserva de agregados, por lo que se deben hacer esfuerzos para manipular y almacenar el RAP de tal manera que se minimice el contenido de humedad. La costra que se forma en la superficie de las reservas ayuda a eliminar el agua, pero se pueden tomar otras medidas, como almacenar RAP en superficies inclinadas pavimentadas y cubrir las reservas de RAP con un techo de un edificio de lados abiertos. En particular, el RAP fino tiene un alto contenido de humedad y puede ser conveniente utilizar un edificio para cubrir la pila.

El RAP no tiende a volverse a compactar en montones grandes, pero puede formar una costra de 8 a 10 pulgadas (203 a 254 mm) de espesor sobre la superficie que se rompe fácilmente con un cargador frontal. Si es posible, no se debe conducir maquinaria pesada sobre la pila de RAP para evitar la compactación.





3.3.2. Porcentajes de RAP y selección del grado de carpeta

Por lo general, corresponde a los contratistas o al laboratorio determinar el porcentaje de RAP que se incorporará y seleccionar el grado de aglomerante con el fin de cumplir con las especificaciones pertinentes. La elección del porcentaje de RAP en la mezcla puede llevarse a cabo mediante la evaluación de la contribución del RAP en el peso total de la mezcla o al determinar la contribución del aglutinante de RAP en el peso total del aglutinante de la mezcla, manteniendo los requisitos de propiedades volumétricas. Dada la influencia endurecedora del ligante envejecido presente en el RAP, podría ser necesario ajustar el grado del ligante especificado para asegurar la conformidad con los estándares requeridos.

El procedimiento implica la utilización de una tabla de mezcla o una ecuación de mezcla para calcular la cantidad de RAP a emplear si se tiene conocimiento del grado de aglutinante recuperado, o para seleccionar el grado de aglutinante virgen si se conoce el porcentaje de aglutinante presente en el RAP.

El RAP se somete a un proceso de extracción y recuperación mediante el uso de un solvente para extraer el aglutinante. Posteriormente, se procede a caracterizar y determinar las propiedades físicas, así como las temperaturas críticas, del aglutinante recuperado del RAP.





3.3.3. Tendido de mezclas de RAP

Los problemas de construcción con mezclas de RAP no son diferentes de los problemas encontrados al pavimentar con HMA convencional producido con materiales vírgenes. Sin embargo, no abordar adecuadamente el procesamiento, así como un control de calidad inadecuado del RAP y un diseño inadecuado de la mezcla aumentarán significativamente la probabilidad de problemas en la colocación y compactación del nuevo pavimento.

No se necesitan equipos o técnicas especializadas al colocar y compactar mezclas que contienen RAP. Sin embargo, las mezclas con un alto contenido de RAP pueden requerir una atención adicional en comparación con las mezclas convencionales debido al aumento de rigidez causado por el RAP. Por lo general, alcanzar la compactación necesaria con mezclas de RAP no es una preocupación, aunque los contratistas deben tener en cuenta que las mezclas recicladas con alto contenido de RAP a veces pueden ser más rígidas y/o requerir temperaturas de producción ligeramente más altas para facilitar la mezcla del RAP con los materiales vírgenes. Al igual que con las mezclas convencionales, se debe controlar la compactación utilizando un dispositivo no destructivo calibrado en los núcleos para garantizar que se alcance la densidad adecuada.





3.4. EXPERIENCIAS EN EL MUNDO

El uso de pavimento asfáltico reciclado en las superficies de rodadura ha ganado una amplia aceptación y ha demostrado ser exitoso en numerosos países a nivel mundial. Algunos ejemplos destacados de esta práctica son:

En Estados Unidos, el reciclaje del asfalto ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas. Estados como California, Texas y Florida han implementado programas de reciclaje de pavimentos que han logrado reducir costos y mejorar la sostenibilidad de las carreteras (National Asphalt Pavement Association, 2024).

En Europa, países como Alemania, Francia y los Países Bajos han adoptado ampliamente el uso de pavimento asfáltico reciclado como parte integral de sus estrategias de infraestructura vial sostenible. Organizaciones como la Agencia Europea de Carreteras promueven activamente el empleo de técnicas de reciclaje para aumentar la eficiencia de las carreteras (Federal Highway Administration, 2024).

En Australia, el reciclaje del asfalto se ha convertido en una práctica común para reducir costos y minimizar el impacto ambiental de las carreteras. El país ha desarrollado tecnologías avanzadas de reciclaje y ha implementado programas de investigación para mejorar aún más la calidad y durabilidad del pavimento asfáltico reciclado (Austroads, 2018).

Japón ha sido pionero en el desarrollo de tecnologías innovadoras de reciclaje de asfalto. El país ha implementado sistemas tanto de reciclaje en caliente como en frío que han demostrado ser altamente efectivos para rehabilitar carreteras existentes y prolongar su vida útil (Japan Road Association, 2016).

En Canadá, el pavimento asfáltico reciclado se ha utilizado ampliamente en regiones como Ontario y Quebec. Estudios han confirmado los beneficios económicos y ambientales del reciclaje del asfalto en las superficies de rodadura (Ontario Ministry of Transportation, 2019).





CAPÍTULO IV: DISEÑO, PRODUCCIÓN Y APLICACIÓN

Extracción del asfalto

La extracción de asfalto mediante centrifugado desempeña un papel crucial en este TOG, cuyo objetivo radica es evaluar y contrastar el potencial sustentable, estructural, económico y funcional del reciclaje del pavimento asfáltico en relación con las mezclas tradicionales. De acuerdo con la normativa mexicana (M-MMP-4-05-049/15, 2015) el proceso inicial implica la extracción de partículas del agregado fino y grueso del RAP para la caracterización de los agregados. La prueba se realizó en el material fresado con el fin de obtener una evaluación preliminar del contenido de asfalto mediante el diseño Marshall con la adición de RAP. Se seleccionó una muestra representativa de 2,716.8 g, la cual fue sometida a un horno a 60 °C y posteriormente a la centrifugadora, con la adición de gasolina hasta que ya no se observó más material.

Procedimos a equipar la centrífuga con un filtro, cerrándola con la tapa de seguridad y la arandela. La interrupción se efectuó cuando, a través de una manguera que expulsaba la mezcla de asfalto y gasolina, se evidenció la ausencia de más líquido. Este procedimiento se repitió en tres ocasiones. Posteriormente, el material extraído de la centrífuga se retiró y se dejó reposar durante 20 minutos a temperatura ambiente para permitir la evaporación de la gasolina. Seguidamente, la muestra se sometió a un horno a 110 °C. Al retirarlas del horno, se registraron sus pesos respectivos con el propósito de calcular el porcentaje de asfalto en cada muestra. El porcentaje de contenido de cemento asfáltico o residuo asfáltico, extraído de la muestra representativa recuperada del km 1+200 de la carretera Federal 200 en Lázaro Cárdenas, Michoacán, fue calculado con base en la norma antes mencionada, la cual aborda la extracción de asfalto por centrifugación. Los resultados se presentan detalladamente en la Tabla 2.

Tabla 2.- Contenido de residuo o cemento asfáltico en el RAP. Fuente: Elaboración Propia.

Extracción de asfalto por centrifuga M-MMP-4-05-049/15			
Masa de la porción de la muestra de mezcla asfáltica [g]	Masa de los materiales [g]	Masa del material mineral contenido en la solución extraída [g]	% Asfalto
2716.8	2603.5	4.1	4.2%





Análisis granulométrico

El propósito del análisis granulométrico es cuantificar la distribución de tamaños de partículas en los agregados gruesos y finos mediante el tamizado, según lo especificado por la norma mexicana (N-CMT-4-04/17, 2017).

Después de tomar la muestra, se somete a un proceso de secado en el horno durante 24 horas hasta que alcanza una masa constante. Una vez que está seca, se requiere que el agregado fino tenga una masa mínima de 300 g para el análisis, mientras que, en el caso del agregado grueso, se selecciona según el tamaño máximo nominal.

Después de la selección y separación según la normativa, se inicia el procedimiento del ensayo. La masa se somete a un secado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante. Se eligen tamices con dimensiones apropiadas, dispuestos en orden descendente según sea la abertura, introduciendo la muestra a ensayar en el tamiz superior. Agitando manualmente los tamices durante un tiempo específico, se asegura que la cantidad de material tomada permita que todas las partículas pasen por las aberturas. Posterior se continúa el tamizado, de manera que no más del 1% de la masa del material retenido en un tamiz pase después de un minuto de tamizado continuo a mano.





4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Los efectos del tamaño de las partículas y la granulometría de los agregados de construcción de pavimentos asfálticos son ampliamente conocidos, pero la forma de las partículas marca la diferencia. La forma, relación de aspecto y textura de los agregados en la construcción influyen significativamente en el desempeño del producto terminado. Para caracterizar los agregados, se emplean diversos ensayos aplicables a los agregados finos y gruesos. Los agregados finos se someten a pruebas como el equivalente de arena, la gravedad específica y absorción, azul de metileno, y al contenido de vacíos no compactados. En cambio, para el agregado grueso, ensayos como el de la gravedad específica y absorción, resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles, porcentaje de partículas planas y alargadas, resistencia a la degradación del agregado pétreo grueso por abrasión en la Máquina Micro-Deval, y partículas fracturadas conforme a la norma mexicana (N-CMT-4-04/17, 2017).

4.1.1. Densidad relativa g/cm³

La prueba de densidad relativa del agregado grueso se emplea con el propósito de calcular la gravedad específica de una muestra de dicho agregado, estableciendo la relación entre el peso de un volumen determinado de dicho material y el peso de un volumen equivalente de agua. La densidad relativa se define como la relación entre la masa del agregado y la masa de un volumen equivalente de agua, correspondiente al volumen total de las partículas que componen dicho agregado, denominado volumen absoluto del agregado. Esta relación también puede expresarse como la proporción entre la densidad de las partículas del agregado y la densidad del agua según la norma (M-MMP-4-04-003/18, 2018).

La prueba se lleva a cabo bajo tres condiciones distintas de muestra: seca al horno (en ausencia total de agua en la muestra), superficie seca saturada (SSS, donde el agua llena los espacios porosos del agregado) y por último la inmersión total en agua (sometido a condiciones acuáticas).





Mediante la consideración de estos tres estados y sus correspondientes pesos, es posible determinar la gravedad específica aparente, la gravedad de la superficie seca saturada (SSS) aparente y la absorción de una muestra en particular. Estos datos son esenciales para calcular relaciones de peso-volumen y para estimar diversas magnitudes asociadas al volumen, tales como los espacios vacíos dentro del agregado mineral y aquellos que se encuentran repletos de asfalto. La absorción, por su parte, se erige como un indicador crucial de la durabilidad del agregado y del potencial volumen de ligante asfáltico que podría absorber.

La determinación de la masa de una muestra de agregado grueso se realiza bajo tres condiciones específicas: en estado SSS, después de un proceso de secado al horno y en estado sumergido. Estos resultados obtenidos se emplean posteriormente para calcular distintas magnitudes, entre las que se incluyen la gravedad específica aparente, la gravedad específica aparente en condiciones SSS y la absorción del material. En cuanto al proceso de preparación de la muestra, se inicia con la homogeneización y subdivisión del agregado, procediendo luego a la eliminación de las partículas cuyo tamaño sea inferior a 4.75 mm (No. 4) mediante un proceso de tamizado en seco.

Para la adecuada preparación del material de agregado, es imperativo proceder con una serie de pasos definidos en la norma mexicana (M-MMP-4-04-003/18, 2018). En primer lugar, es necesario lavar el agregado que ha sido retenido en el tamiz No. 4 (4,75 mm), con el propósito de descartar partículas menores que pudieran estar adheridas a los fragmentos mayores. Posteriormente, el material debe ser sometido a un proceso de secado en un horno a una temperatura de 230°F (110°C) hasta que alcance una masa constante, indicando de esta manera la completa eliminación de la humedad. Una vez finalizado este proceso, es preciso enfriar el agregado hasta alcanzar una temperatura adecuada para su posterior manipulación.

A continuación, se recomienda sumergir el agregado en agua a temperatura ambiente, manteniéndolo sumergido por un lapso comprendido entre 15 y 19 horas. Tras este periodo, es vital asegurarse de que la muestra haya alcanzado una condición de superficie seca saturada (SSS). Un método efectivo para lograr este objetivo consiste en enrollar el agregado en una toalla, seguido de agitar y hacer rodar la muestra de manera lateral. Es posible que durante este proceso se requiera una limpieza adicional de las partículas más grandes.





Una vez que no se observen residuos de agua en las superficies del agregado, se procederá a determinar la masa de la muestra. Tras obtener este dato en condiciones de aire, la muestra se coloca en una canastilla para ser sumergida en agua a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Es esencial eliminar cualquier burbuja de aire presente, agitando la canastilla adecuadamente dentro del líquido.

Finalmente, la muestra fue sometida a un proceso de secado en el horno a una temperatura controlada de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que alcance una masa constante. Una vez culminado este proceso, se permite que la muestra se enfríe hasta alcanzar una temperatura apta para su manipulación, momento en el cual se determina su peso en condición seca al horno.

Tabla 3.- Densidades relativas y absorción de materiales pétreos. Fuente: Elaboración Propia.

Densidad relativa g/cm³ M-MMP-4-04-003/18			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (GRAVA)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
Masa de la muestra seca [g]	3033.00	Masa de la muestra seca [g]	3033.00
Masa de la muestra saturada [g]	3099.00	Masa de la muestra saturada [g]	3101.00
Masa de la muestra sumergida en agua [g]	1946.00	Masa del picnómetro con agua y muestra [g]	1921.00
(Gsb) Gravedad específica bruta[T/m ³]	2.63	(Gsb) Gravedad específica bruta[T/m ³]	2.57
(Gsa) Gravedad específica aparente[T/m ³]	2.79	(Gsa) Gravedad específica aparente[T/m ³]	2.73
Absorción [%]	2.18	Absorción [%]	2.24

Densidad relativa g/cm³ M-MMP-4-04-003/18			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (SELLO)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
Masa de la muestra seca [g]	2155.00	Masa de la muestra seca [g]	2154.00
Masa de la muestra saturada [g]	2202.00	Masa de la muestra saturada [g]	2205.00
Masa de la muestra sumergida en agua [g]	1386.00	Masa del picnómetro con agua y muestra [g]	1351.00
(Gsb) Gravedad específica bruta[T/m ³]	2.64	(Gsb) Gravedad específica bruta[T/m ³]	2.52
(Gsa) Gravedad específica aparente[T/m ³]	2.80	(Gsa) Gravedad específica aparente[T/m ³]	2.68
Absorción [%]	2.18	Absorción [%]	2.37

Densidad relativa g/cm³ M-MMP-4-04-003/18			
ANÁLISIS DE AGREGADO FINO (ARENA)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
Masa de la muestra seca [g]	1545.00	Masa de la muestra seca [g]	1545.00
Masa de la muestra seca al horno [g]	1235.00	Masa de la muestra saturada [g]	1236.00
Masa del picnómetro con agua	500.00	Masa del picnómetro con agua y muestra [g]	500.00
Masa del picnómetro con agua y muestra	492.00	Masa del picnómetro con agua y muestra	487.70
(Gsb) Gravedad específica bruta[T/m ³]	2.59	(Gsb) Gravedad específica bruta[T/m ³]	2.55
(Gsa) Gravedad específica aparente[T/m ³]	2.69	(Gsa) Gravedad específica aparente[T/m ³]	2.72
Absorción [%]	1.46	Absorción [%]	2.52





4.1.2. Resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles

Según la norma mexicana (M-MMP-4-04-006/02, 2002) la prueba de los ángeles es un ensayo de la resistencia de los agregados gruesos a la abrasión o desgaste causado por bolas de acero en un tambor giratorio. Cuantifica el porcentaje de material perdido durante la prueba, proporcionando una indicación de la durabilidad del agregado y su idoneidad para aplicaciones de construcción. La prueba de abrasión de Los Ángeles (LA) es un método de prueba común que se utiliza para indicar la dureza del agregado y las características de abrasión.

El espécimen, seleccionado según las indicaciones de la norma (M-MMP-4-04-006/02, 2002), se lava y se seca en un horno a $110 \pm 5C$ hasta alcanzar una masa constante. El tamaño de la muestra se elige de acuerdo con la granulometría más cercana a la del agregado previsto.

La muestra preparada se coloca en la máquina de prueba de abrasión, rectificamos que la máquina esté totalmente limpia. Luego se coloca un número específico de esferas de acero en la máquina, para esta prueba se colocaron 12 esferas y el tambor se hace girar durante 500 revoluciones a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto. Luego, el material se separa en material que pasa por el tamiz de 1,70 mm (N° 12) y el material retenido en el tamiz de 1,70 mm (N° 12). Finalmente, se lava y seca al horno a una temperatura de $110 \pm 5oC$ hasta alcanzar una masa constante.

Tabla 4.- Desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos. Fuente: Elaboración Propia.

Desgaste de los Ángeles M-MMP-4-04-006/02			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (GRAVA)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
(C) Masa inicial de la muestra [g]	5002.00	(C) Masa inicial de la muestra [g]	5002.00
(Y) Masa final de la muestra [g]	4208.00	(Y) Masa final de la muestra [g]	4096.00
Pérdida por abrasión [%] $(C-Y)/C*100$	15.87	Pérdida por abrasión [%] $(C-Y)/C*100$	18.11

Desgaste de los Ángeles M-MMP-4-04-006/02			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (SELLO)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
(C) Masa inicial de la muestra [g]	5000.00	(C) Masa inicial de la muestra [g]	5000.00
(Y) Masa final de la muestra [g]	4152.00	(Y) Masa final de la muestra [g]	4008.00
Pérdida por abrasión [%] $(C-Y)/C*100$	16.96	Pérdida por abrasión [%] $(C-Y)/C*100$	19.84





4.1.3. Resistencia a la degradación por abrasión en la Máquina Micro-Deval

Esta prueba facilita la evaluación de resistencia a la degradación del agregado pétreo grueso por abrasión según la norma mexicana (M-MMP-4-04-007/23, 2023), la pérdida por abrasión se determina midiendo la cantidad de material degradado que pasa por un tamiz de 1,18 mm (No. 16) o 75 μm (No. 200) después de la prueba. Es poco probable que los materiales que produzcan bajas pérdidas en la prueba muestren una degradación significativa durante su manipulación, mezcla o colocación, y permitirán un mejor desempeño de los pavimentos a largo plazo. Existen métodos de prueba separados para materiales agregados finos o gruesos. Los resultados son valiosos para establecer un índice de calidad en los agregados.

Se prepara una muestra separándola en fracciones de tamaño individual de las masas requeridas. Para este caso 1500 g por ser agregado grueso. La muestra se sumerge en agua del grifo durante un mínimo de 1 hora en el frasco Micro-Deval u otro recipiente adecuado.

A la muestra de prueba preparada se le añade con agua una carga abrasiva de bolas magnéticas de acero inoxidable. La máquina Micro-Deval está configurada para rotar los frascos a 100 rpm durante un período de tiempo específico o durante un número total específico de revoluciones. Al finalizar, la muestra se lava cuidadosamente sobre un tamiz específico y el porcentaje de pérdida se determina comparando la masa secada en horno de la muestra retenida con el peso total original de la muestra. El tamiz No. 200 se utiliza para agregados finos y un tamiz de 1,18 mm (No. 16) para fracciones gruesas.

Tabla 5.- Determinación de la resistencia del agregado a la degradación por abrasión. Fuente: Elaboración Propia.

Desgaste microdeval INV E-238-13			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (GRAVA)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
Masa inicial de la muestra [g]	1501.0	Masa inicial de la muestra [g]	1501
Masa final de la muestra [g]	1397.0	Masa final de la muestra [g]	1361
Pérdida por abrasión en presencia de agua [%]	6.93	Pérdida por abrasión en presencia de agua [%]	9.33

Desgaste microdeval INV E-238-13			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (GRAVA)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
Masa inicial de la muestra [g]	1500	Masa inicial de la muestra [g]	1500
Masa final de la muestra [g]	1371	Masa final de la muestra [g]	1354
Pérdida por abrasión en presencia de agua [%]	8.60	Pérdida por abrasión en presencia de agua [%]	9.73





4.1.4. Resistencia al intemperismo acelerado de los agregados.

Es probable que los agregados resistentes a la degradación por estar expuesto a condiciones climáticas tengan un mejor desempeño a largo plazo en mezclas de asfalto para aplicaciones de pavimentación. Estos materiales generalmente presentan una buena durabilidad y tienen bajas proporciones de huecos y bajas tasas de absorción.

Este ensayo se desarrolló en apego a la norma mexicana (M-MMP-4-04-008/03, 2003), se utilizó una solución de sulfato de sodio, consistente en sumergir 7 libras de sal en 10 litros de agua. El objetivo es asegurar no solo la saturación, sino también un exceso de cristales al preparar la solución para el ensayo. Es esencial agitar la solución periódicamente y cubrirla para evitar la evaporación. La solución debe alcanzar una temperatura de 21 ± 1 C al menos 48 horas antes de su uso, y antes de cada aplicación, es necesario romper la pasta de sal agitando la solución. Además, la solución debe tener una gravedad específica entre 1.154 y 1.171.

Para agregados finos, las porciones de prueba constan de 100 g de material de cada fracción de tamiz especificada.

Con el propósito de preparar la muestra de agregado fino, se realiza un lavado sobre el tamiz No. 50, seguido de un secado hasta alcanzar una masa constante a una temperatura de 110 ± 5 C. Posteriormente, se separan las diversas fracciones mediante el tamizado, asegurando obtener 100 ± 1 g de cada una.

Se registró la masa inicial de cada fracción y sumergió a las muestras en la solución preparada durante 18 horas. Los contenedores se cubrieron para evitar la evaporación o la contaminación, y la temperatura se mantiene y registra a 70 ± 2 °F (21 ± 1 °C). Al final de cada ciclo de inmersión, la muestra se drena, se seca en horno hasta obtener una masa constante y se enfría a temperatura ambiente antes de sumergirla en el siguiente ciclo.





Este proceso se repite 5 veces. Una vez que se completan los ciclos, la muestra se lava con un flujo inverso de agua tibia. El agua de lavado final se analiza con una solución de cloruro de bario para garantizar que la muestra esté completamente libre de solución de sulfato. La solución de bario se volverá turbia si hay sulfatos presentes.

Cada fracción se seca y se tamiza nuevamente y se calcula el porcentaje de pérdida de la gradación inicial. Para agregados más gruesos, también se realiza un examen cualitativo en fracciones más gruesas que 3/4 pulgadas (19,0 mm). Las partículas de estas fracciones se agrupan según el tipo de degradación, como división, descamación, craqueo, desintegración, etc. Las partículas de cada grupo se cuentan y registran.

Tabla 6.- Determinación de la resistencia al intemperismo acelerado. Fuente: Elaboración Propia.

Intemperismo acelerado 5 ciclos M-MMP-4-04-008/03								
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (GRAVA)								
Agregado virgen					Agregado recuperado			
Pasa	Retiene	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Perdida [%]	Total [%]	Pasa	Retiene	Total [%]
3/4"	1/2"	670.7	662.3	1.3	2.66	3/4"	1/2"	2.10
1/2"	3/8"	330.2	328.6	0.5		1/2"	3/8"	
3/8"	Nº 4	300	297.3	0.9		3/8"	Nº 4	

Intemperismo acelerado 5 ciclos M-MMP-4-04-008/03								
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (SELLO)								
Agregado virgen					Agregado recuperado			
Pasa	Retiene	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Perdida [%]	Total [%]	Pasa	Retiene	Total [%]
3/4"	1/2"				2.60	3/4"	1/2"	1.80
1/2"	3/8"					1/2"	3/8"	
3/8"	Nº 4	300.6	292.7	2.6		3/8"	Nº 4	



4.1.5. Porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso

La prueba de partículas planas y alargadas se utiliza para determinar las relaciones dimensionales de los distintos tamaños en los agregados cernidos en un tamiz específico. Esta caracterización se emplea para identificar agregados que pueden tener tendencia a impedir la compactación o tener dificultades para cumplir con las especificaciones de la norma mexicana (M-MMP-4-04-005/08, 2008) debido a la degradación del agregado. Por lo que nos proporcionara un medio para verificar el cumplimiento de las especificaciones que limitan dichas partículas o para determinar las características de forma relativa de los agregados gruesos.

Las partículas del agregado se prueban para determinar las relaciones antes mencionadas, se realiza sobre una muestra de agregado grueso reducida extraída de una muestra representativa. Esta prueba de partículas planas y alargadas utiliza un calibrador proporcional para ayudar a medir las relaciones dimensionales. La proporción especificada se establece en el calibrador y luego se prueban aproximadamente 100 partículas para cada tamaño de tamiz especificado. La muestra se tamiza para separar cada tamaño. Luego, cada tamaño se prueba en un dispositivo de calibre proporcional. Para el índice de aplanamiento, se utiliza el método manual al pasar las piedras una por una por el calibrador de aplanamiento sin forzar ni romper, combinando y pesando todas las partículas que pasaron por las aberturas.

Tabla 7.- Determinación del porcentaje de partículas planas y alargadas. Fuente: Elaboración Propia.

Partículas alargadas y lajeadas M-MMP-4-04-005/08			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (GRAVA)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
(A) Masa inicial de la muestra [g]	3270	(A) Masa inicial de la muestra [g]	3270
Σ de retenido parcial (Total B) [100]	100	Σ de retenido parcial (Total B) [100]	100
Σ de alargadas (Total D) [g]	583.2	Σ de alargadas (Total D) [g]	509.5
Σ de lajeadas (Total C) [g]	445.7	Σ de lajeadas (Total C) [g]	303
Partículas alargadas (Total C/Total A) [%]	18%	Partículas alargadas (Total C/Total A) [%]	16%
Partículas lajeadas (Total D/Total A) [%]	14%	Partículas lajeadas (Total D/Total A) [%]	9%
Total de partículas alargadas y lajeadas [%]	31%	Total de partículas alargadas y lajeadas [%]	25%

Partículas alargadas y lajeadas M-MMP-4-04-005/08			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (SELLO)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
(A) Masa inicial de la muestra [g]	3250	(A) Masa inicial de la muestra [g]	3250
Σ de retenido parcial (Total B) [100]	100	Σ de retenido parcial (Total B) [100]	100
Σ de alargadas (Total D) [g]	497.1	Σ de alargadas (Total D) [g]	461.8
Σ de lajeadas (Total C) [g]	401.5	Σ de lajeadas (Total C) [g]	298.4
Partículas alargadas (Total C/Total A) [%]	15%	Partículas alargadas (Total C/Total A) [%]	14%
Partículas lajeadas (Total D/Total A) [%]	12%	Partículas lajeadas (Total D/Total A) [%]	9%
Total de partículas alargadas y lajeadas [%]	28%	Total de partículas alargadas y lajeadas [%]	23%





4.1.6. Partículas trituradas

El propósito de esta prueba es determinar el contenido de partículas trituradas en los materiales pétreos retenidos en la malla N°4 (4,75 mm) destinados a mezclas asfálticas, conforme a los lineamientos establecidos en la normativa mexicana (M-MMP-4-04-013/09, 2009). El procedimiento consiste en clasificar las partículas según tengan una, dos o más caras fracturadas, con el fin de calcular su porcentaje con respecto a la masa total de las partículas retenidas.

Este procedimiento de prueba determina la cantidad (porcentaje) de partículas de roca con cara de fractura, mediante inspección visual que cumple con requisitos específicos. La cara fracturada de cada partícula de roca debe cumplir con un área transversal mínima. Las especificaciones contienen requisitos para el porcentaje de partículas de agregado triturado, con el propósito de maximizar la resistencia al corte en mezclas de agregados ligados o no ligados. Este método se puede utilizar para determinar la aceptabilidad de agregados gruesos, de granulometría densa y de granulometría abierta con respecto a dichos requisitos.

Comenzamos pesando cada muestra de prueba y extendiendo una de ellas sobre una superficie plana limpia en un área bien iluminada lo suficientemente grande como para permitir que el material se extienda finamente para su inspección. Cada partícula es tomada con la mano y examinada visualmente. Si observamos que al menos el 25% del área de la máxima sección transversal de alguna cara de la partícula está fracturada, la consideramos como una cara fracturada. Clasificamos todas las partículas que tienen solo una cara fracturada en una charola y las que tienen dos o más caras fracturadas en otra. Determinamos la masa de todas las partículas juntas que presentaron solo una cara fracturada, con una aproximación de 0,1 gramos según la norma mexicana (M-MMP-4-04-013/09, 2009).

En la porción de prueba 2, repetimos el procedimiento registrando las masas de las partículas con una cara fracturada y las masas de las partículas con dos o más caras fracturadas, respectivamente. Observamos si la película de polvo oscurece la superficie y dificulta la detección de las caras de las partículas fracturadas, lavamos y secamos en horno la muestra de agregado.





Nota: En caso de que la película de polvo oscurezca la superficie y obstaculice la identificación de las caras de las partículas fracturadas, se recomienda proceder con el lavado y el secado en horno de la muestra de agregado.

Tabla 8.- Determinación del porcentaje de partículas trituradas. Fuente: Elaboración Propia

Partículas Trituradas M-MMP-4-04-013/09 · M-MMP-4-047-013/09			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (GRAVA)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
Part. Trituradas 1 cara	100	Part. Trituradas 1 cara	100
Part. Trituradas 2 o más	100	Part. Trituradas 2 o más	90

Partículas Trituradas M-MMP-4-04-013/09 · M-MMP-4-047-013/09			
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (SELLO)			
Agregado virgen		Agregado recuperado	
Part. Trituradas 1 cara	100	Part. Trituradas 1 cara	100
Part. Trituradas 2 o más	98	Part. Trituradas 2 o más	87

4.1.7. Angularidad

Conforme a la norma (AASHTO, 2008), la prueba constituye un método indirecto destinado a evaluar la angularidad del agregado fino. Esta evaluación reviste importancia debido a que un exceso de agregado fino redondeado, frecuentemente en forma de arena natural, puede propiciar la formación de surcos.

La prueba cuantifica indirectamente la angularidad del agregado fino mediante la medición del contenido de huecos no compactados del mismo. La angularidad se define como el grado de rugosidad, irregularidades superficiales o ángulos agudos presentes en las partículas del agregado. Las partículas angulares experimentan una menor facilidad de compactación en comparación con las redondeadas, ya que sus superficies angulares tienden a bloquearse entre sí, resistiendo la compactación. Por otro lado, las superficies más suaves y redondeadas permiten una compactación más sencilla al deslizarse unas sobre otras.

De este modo, un mayor contenido de huecos no compactados indica una mayor angularidad del material. La presencia de materiales angulares es deseable en las mezclas de pavimentación, ya que tienden a unirse y resistir la deformación después de la compactación inicial. En contraste, los materiales redondeados pueden no generar suficiente fricción entre





partículas para evitar la formación de surcos. La medición de los huecos no compactados se ve afectada por la forma, angularidad y textura del agregado fino, así como por su clasificación y gravedad específica. En última instancia, esta prueba se emplea para asegurar que la mezcla de agregado fino exhiba la angularidad y textura necesarias para resistir la deformación permanente, como la formación de huellas, bajo un determinado nivel de tráfico.

Tabla 9.- Determinación de la angularidad. Fuente: Elaboración Propia.

Angularidad AASHTO T 304-08										
ANÁLISIS DE AGREGADO FINO (ARENA) - AGREGADO VIRGEN										
Método	A		B		B		C		C	
individual	N/A		Nº16		Nº30		Nº50		N/A	
Muestra	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
[ml]	101.7		101.7		101.7		101.7		101.7	
Masa del cilindro [g]	237.3		237.3		237.3		237.3		237.3	
cilindro [g]	380.3	381.1	378.9	379.5	369.6	370.4	365.6	365.7	398.2	397.4
Masa del material [g]	143	143.8	141.6	142.2	132.2	133.1	128.3	128.4	160.9	160.1
Gsb [g/cm ³]	2.548		2.548		2.548		2.548		2.548	
Angularidad [%]	44.8	44.5	45.3	45.1	48.9	48.6	50.5	50.4	37.9	38.2
[%]	44.7		45.2		48.8		50.5		38.1	
Angularidad [%]	44.7				48.1				38.1	

Angularidad AASHTO T 304-08										
ANÁLISIS DE AGREGADO FINO (ARENA) - RAP										
Método	A		B		B		C		C	
individual	N/A		Nº16		Nº30		Nº50		N/A	
Muestra	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
[ml]	101.7		101.7		101.7		101.7		101.7	
Masa del cilindro [g]	237.3		237.3		237.3		237.3		237.3	
cilindro [g]	380.2	380	375.8	373.9	368.8	369.1	364.6	365.8	398.4	397.8
Masa del material [g]	142.9	142.7	138.5	136.6	131.5	131.8	127.3	128.5	161.1	160.5
Gsb [g/cm ³]	2.588		2.588		2.588		2.588		2.588	
Angularidad [%]	45.7	45.8	47.4	48.1	50.0	49.9	51.6	51.2	38.8	39.0
[%]	45.7		47.8		50.0		51.4		38.9	
Angularidad [%]	45.7				49.7				38.9	





4.1.8. Equivalente de arena

De acuerdo con la norma mexicana (M-MMP-4-04-004/16, 2016), la prueba de equivalente de arena constituye un ensayo destinado a revelar las proporciones relativas de polvo fino o materiales arcillosos presentes en agregados finos o suelos granulares. El exceso de polvo o finos plásticos, caracterizados por partículas finas similares a la arcilla, en el agregado puede dar lugar a la falta de estabilidad, manifestada en la formación de surcos, así como a daños y desprendimientos debido a la humedad. La realización de una prueba sencilla para determinar si un agregado específico contiene una cantidad suficiente de polvo o finos plásticos, que puedan comprometer la estabilidad o predisponer a la extracción, resulta crucial para prevenir la elaboración de mezclas con un rendimiento deficiente.

Se inició el procedimiento agregando una muestra preparada de agregado fino a una solución de cloruro de calcio y glicerina en una probeta graduada única. Posteriormente, se procede a agitar el cilindro de manera prescrita, ya sea de forma manual o mediante un dispositivo de agitación mecánico. Después de la agitación, se introduce manualmente un tubo de irrigación de metal en la muestra, llevando a cabo una acción punzante que agrega más solución y suspende las partículas más finas. A continuación, los finos se depositan en la parte superior de la columna de sólidos. Tras un período de sedimentación, se registra la observación del nivel superior de la suspensión de arcilla como lectura de arcilla. Luego, se desciende cuidadosamente un conjunto de patas ponderadas dentro del cilindro para que reposen sobre la muestra, determinando así la lectura de arena. Con estos valores, se puede calcular el equivalente de arena, proporcionando una evaluación cuantitativa de la presencia de finos y su impacto potencial en la estabilidad de la mezcla.

Tabla 10.- Determinación del equivalente de arena. Fuente: Elaboración Propia.

Equivalente de arena M-MMP-4-04-004/16				
ANÁLISIS DE AGREGADO FINO (ARENA)				
Agregado virgen			Agregado recuperado	
Arena [pulg] (A)	3.40		Arena [pulg] (A)	3.50
Arcilla [pulg] (B)	5.30		Arcilla [pulg] (B)	4.10
(SE) Equivalente de arena por réplica [%] (A/B*100)	64.15		(SE) Equivalente de arena por réplica [%] (A/B*100)	85.37
Arena [pulg] (A)	3.10		Arena [pulg] (A)	3.80
Arcilla [pulg] (B)	4.90		Arcilla [pulg] (B)	4.30
(SE) Equivalente de arena por réplica [%] (A/B*100)	63.27		(SE) Equivalente de arena por réplica [%] (A/B*100)	88.37
(SE) Equivalente de arena promedio [%]	63.71		(SE) Equivalente de arena promedio [%]	86.87





4.1.9. Azul de Metileno

La prueba de azul de metileno posibilita la estimación del grado de reactividad de los materiales finos, caracterizados por partículas de tamaño inferior a 0,075 mm (malla N°200), presentes en los materiales pétreos destinados a las mezclas asfálticas según la norma mexicana (M-MMP-4-04-014/09, 2009). El procedimiento implica la adición de dosificaciones controladas de azul de metileno a los finos, hasta que estos dejen de absorberlo. La retención de una mayor cantidad de azul de metileno por parte de los finos indica una mayor actividad, proporcionando así un índice indirecto de su potencial expansivo.

Preparamos una solución de azul de metileno mediante la adición de 10 g de polvo de azul de metileno a 1000 g de agua destilada. Posteriormente, agitamos la solución a una velocidad de 600 rpm durante 45 minutos y la dejamos reposar durante un período de 24 horas. Cabe destacar que la solución debe ser empleada en un plazo no superior a los 28 días. Seguidamente, llevamos a cabo la preparación de una mezcla de áridos consistente en 200 g, que atraviesa un tamiz de 2 mm (N° 10). Incorporamos la mezcla de áridos a 500 g de agua destilada y procedimos a agitarla a 600 rpm durante 45 minutos.

En una fase subsiguiente, introducimos 5 ml de la solución de azul de metileno a la mezcla resultante de árido y agua obtenida. Mezclamos dicha solución durante 1 minuto a una velocidad de 400 rpm. Luego, sumergimos una bureta de vidrio en la mezcla resultante y dejamos caer una gota sobre el papel de filtro. Posteriormente, añadimos 5 ml adicionales de la solución de azul de metileno a la misma mezcla de árido, agua y azul de metileno, y la agitamos durante 1 minuto a 400 rpm. Repetimos los pasos 4 y 5 hasta que se observe la imagen del halo con un centro azul oscuro en el papel de filtro. Al finalizar la prueba, procedemos al cálculo de la cantidad de azul de metileno mediante la aplicación de la fórmula correspondiente especificada en la norma mexicana (M-MMP-4-04-014/09, 2009).

Tabla 11.- Determinación del Azul de metileno. Fuente: Elaboración Propia.

Azul de Metileno M-MMP-4-04-014/09			
Azul de metileno (m/g)	10	15 max.	Recomendación AMAAC RA-05





4.2. DISEÑO

La elección del método de diseño de mezclas asfálticas es un factor crucial para la construcción de pavimentos duraderos y eficientes. En el caso de mezclas recicladas, existen tres métodos principales: Marshall, Hveen y SUPERPAVE. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas, y la selección del método más adecuado depende de diversos factores, como el tipo de mezcla, las condiciones climáticas y las especificaciones locales.

El diseño Marshall es un método tradicionalmente utilizado en ingeniería de pavimentos para diseñar mezclas asfálticas, y ha demostrado ser eficaz y confiable en una variedad de condiciones y aplicaciones. Algunas justificaciones clave para preferir el diseño Marshall sobre métodos alternativos como Hveem o SUPERPAVE al diseñar mezclas recicladas:

Simplicidad y facilidad de implementación: El método Marshall es relativamente simple y fácil de entender e implementar. Esto lo hace ideal para su aplicación en proyectos de pavimentación, especialmente cuando se trata de mezclas recicladas donde la complejidad del proceso de diseño puede ser un factor limitante.

Flexibilidad en la selección de materiales: El diseño Marshall permite cierta flexibilidad en la selección de materiales de mezcla, lo que es especialmente relevante en el caso de mezclas recicladas, donde los materiales pueden variar considerablemente en calidad y composición. Esto facilita la adaptación del diseño a las características específicas de los materiales reciclados disponibles.

Facilidad de implementación: El procedimiento de diseño Marshall es relativamente simple y requiere equipos de prueba comunes en los laboratorios de pavimentos, lo que lo hace práctico y económico de implementar. Esto es importante, especialmente en contextos donde los recursos pueden ser limitados o donde se requiere un diseño rápido de la mezcla.

Historial de éxito: El diseño Marshall ha sido utilizado con éxito en una amplia gama de proyectos de pavimentación en todo el mundo, incluidos aquellos que involucran mezclas





recicladas. Su historial de éxito proporciona confianza en su capacidad para producir mezclas de alta calidad y durabilidad.

Consideración de factores de rendimiento clave: Aunque el método Marshall se centra principalmente en la estabilidad y la deformación de las mezclas asfálticas, también puede integrar la evaluación de otros factores de rendimiento importantes, como la resistencia a la fatiga y la resistencia al agrietamiento por fatiga, lo que garantiza un diseño equilibrado y resistente a las condiciones de servicio.

Compatibilidad con prácticas existentes: Dado que el diseño Marshall es ampliamente conocido y utilizado en la industria, su implementación en el diseño de mezclas recicladas se integra sin problemas con las prácticas y estándares existentes. Esto facilita la aceptación y adopción por parte de los profesionales de la ingeniería y la construcción de carreteras.

Si bien Hveem y SUPERPAVE son métodos valiosos en ingeniería de pavimentos y pueden ser adecuados para ciertas aplicaciones, el diseño Marshall sigue siendo una opción preferida para el diseño de mezclas recicladas debido a su simplicidad, flexibilidad, historial de éxito y compatibilidad con las prácticas y normativas existentes.

El método de diseño de mezcla Marshall consta de 6 pasos básicos:

1. Selección del agregado
2. Selección de ligante asfáltico
3. Preparación de muestras (incluida la compactación)
4. Determinación de la estabilidad
5. Cálculos de densidad y vacíos
6. Selección óptima del contenido de ligante asfáltico

Aunque Hveem no desarrolló específicamente un procedimiento de evaluación y selección de agregados, aquí se incluye uno porque es parte integral de cualquier diseño de mezcla. Una evaluación agregada típica para usar con los métodos de diseño de mezcla Hveem o





Marshall incluye tres pasos básicos:

Determinar las propiedades físicas de los agregados. Este consiste en ejecutar varias pruebas para determinar propiedades tales como:

- Dureza y abrasión
- Durabilidad y solidez
- Limpieza y materiales nocivos
- Forma de partícula y textura superficial.

Determinar otras propiedades físicas descriptivas agregadas. Si el agregado es aceptable de acuerdo con el paso n.º1, se realizan pruebas adicionales para caracterizar completamente el agregado. Estas pruebas determinan:

- Graduación y tamaño
- Gravedad específica y absorción

Cálculos de mezcla para lograr la gradación agregada del diseño de la mezcla. A menudo, se utilizan agregados de más de una fuente o pila de almacenamiento para obtener la gradación final del agregado que se usa en un diseño de mezcla. Las mezclas de prueba de estas diferentes gradaciones generalmente se calculan hasta que se logra una gradación de diseño de mezcla final aceptable.

La prueba Marshall no tiene un procedimiento de evaluación y selección de ligante asfáltico genérico común. Cada entidad especificadora usa su propio método con modificaciones para determinar el betún apropiado y, si los hay, los modificadores. La evaluación del betún puede basarse en la experiencia local, el desempeño anterior o un procedimiento establecido. El procedimiento más común es el sistema ligante Superpave PG. Una vez que se selecciona el ligante, se realizan varias pruebas preliminares para determinar la relación temperatura-viscosidad del ligante asfáltico, para este TOG seleccionamos un PG 76-22 para las mezclas en caliente y una emulsión ECM-65 para las mezclas en frío.





El método Marshall, al igual que otros métodos de diseño de mezclas, utiliza varias mezclas de prueba de aglutinante asfáltico y agregados (normalmente 5 mezclas con 3 muestras cada una para un total de 15 especímenes), cada una con un contenido diferente de aglutinante asfáltico. Luego, al evaluar el desempeño de cada mezcla de prueba, se puede seleccionar un contenido óptimo de ligante asfáltico. Para que este concepto funcione, las mezclas de prueba deben contener una variedad de contenidos de asfalto tanto por encima como por debajo del contenido óptimo de asfalto. Por lo tanto, el primer paso en la preparación de muestras es estimar un contenido de asfalto óptimo. Los contenidos de mezcla de asfalto de prueba se determinan luego a partir de esta estimación.

La Tabla 12 proporciona una descripción de los resultados obtenidos para los cuatro diseños de pavimento asfáltico evaluados en el TOG. Dos de estos diseños utilizan material reciclado, mientras que los otros dos emplean material extraído directamente de bancos de materiales.

Tabla 12.- Resumen de resultados. Fuente: Elaboración Propia.

N-CMT-4-04/17 >30X10 ⁶					
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (GRAVA)					
PRUEBA	REQUERIMIENTO	RESULTADO		PROCEDIMIENTO DE PRUEBA	CONDICIÓN
		AGREGADO VIRGEN	AGREGADO RECUPERADO		
Densidad relativa g/cm ³	2.4 min.	2.63	2.57	M-MMP-4-04-003/18	Cumple
Desgaste de los Ángeles	30 % máx.	15.87	18.11	M-MMP-4-04-006/02	Cumple
Desgaste microdeval	15% máx.	6.93	9.33	INV E-238-13	Cumple
Intemperismo acelerado 5 ciclos (sodio)	15% máx.	2.7	2.1	M-MMP-4-04-008/03	Cumple
Partículas alargadas y lajeadas	35% máx.	31%	25%	M-MMP-4-04-005/08	Cumple
Part. Triruradas 1 cara	100% min.	100	100	M-MMP-4-04-013/09	Cumple
Part. Trituradas 2 o más	90% min.	100	90	M-MMP-4-047- 013/09	Cumple
ANÁLISIS DE AGREGADO GRUESO (SELLO)					
PRUEBA	REQUERIMIENTO	RESULTADO		PROCEDIMIENTO DE PRUEBA	CONDICIÓN
		AGREGADO VIRGEN	AGREGADO RECUPERADO		
Densidad relativa g/cm ³	2.4 min.	2.64	2.52	M-MMP-4-04-003/18	Cumple
Desgaste de los Ángeles	30 % máx.	16.96	19.84	M-MMP-4-04-006/02	Cumple
Desgaste microdeval	15% máx.	8.60	9.73	INV E-238-13	Cumple
Intemperismo acelerado 5 ciclos (sodio)	15% máx.	2.6	1.8	M-MMP-4-04-008/03	Cumple
Partículas alargadas y lajeadas	35% máx.	28%	23%	M-MMP-4-04-005/08	Cumple
Part. Triruradas 1 cara	100% min.	100	100	M-MMP-4-04-013/09	Cumple
Part. Trituradas 2 o más	90% min.	98	87	M-MMP-4-047- 013/09	Cumple
ANÁLISIS DE AGREGADO FINO (ARENA)					
PRUEBA	REQUERIMIENTO	RESULTADO		PROCEDIMIENTO DE PRUEBA	CONDICIÓN
		AGREGADO VIRGEN	AGREGADO RECUPERADO		
Densidad relativa g/cm ³	2.4 min.	2.59	2.55	M-MMP-4-04-003/18	Cumple
Angularidad	45% min.	48.13	49.70	AASHTO T 304-08	Cumple
Equivalente de arena	55% min.	63.71	86.87	M-MMP-4-04-004/16	Cumple
Azul de Metileno	12 mg/g max.	10	5	M-MMP-4-04-014/09	Cumple

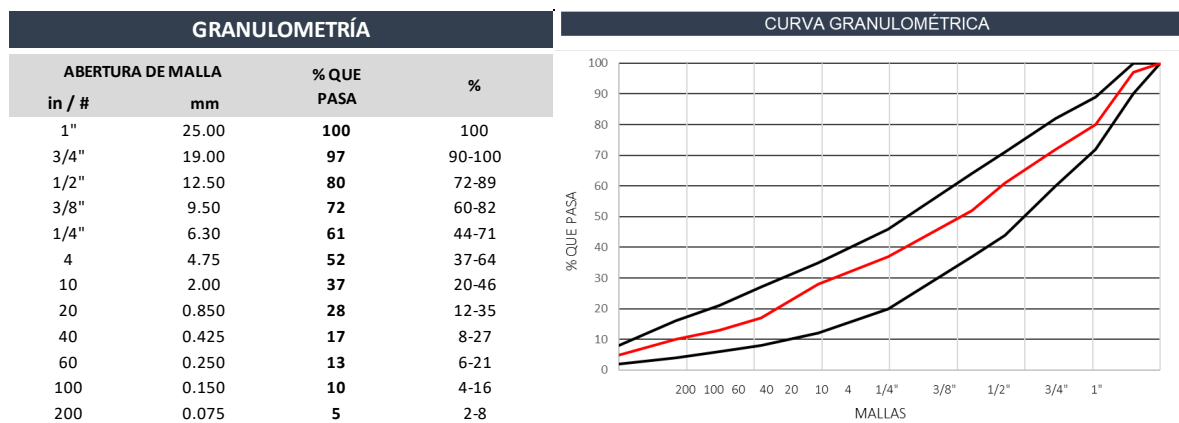




La decisión de agregar un 30% de material reciclado a las dos variantes de pavimento asfáltico, en frío o en caliente, se justifica con base en la premisa de que, a partir del 25% de contenido reciclado, las mezclas resultantes se clasifican como poseedoras de un elevado contenido de RAP. Según las normativas y estándares de la industria de la construcción vial, así como las recomendaciones de ingenieros y expertos en pavimentos asfálticos.

El diseño Marshall realizado reúne las características físicas y mecánicas que deberán ser respetadas durante la elaboración y colocación de la mezcla asfáltica. Se deberán realizar los ajustes necesarios en la planta de producción. A continuación, se presentan los resultados obtenidos del diseño. Las Tablas 13 a 16 exhiben la granulometría de las mezclas teóricas analizadas en el TOG.

Tabla 13.- Características Granulométricas para mezcla de pavimento asfáltico en caliente. Fuente: Elaboración Propia.

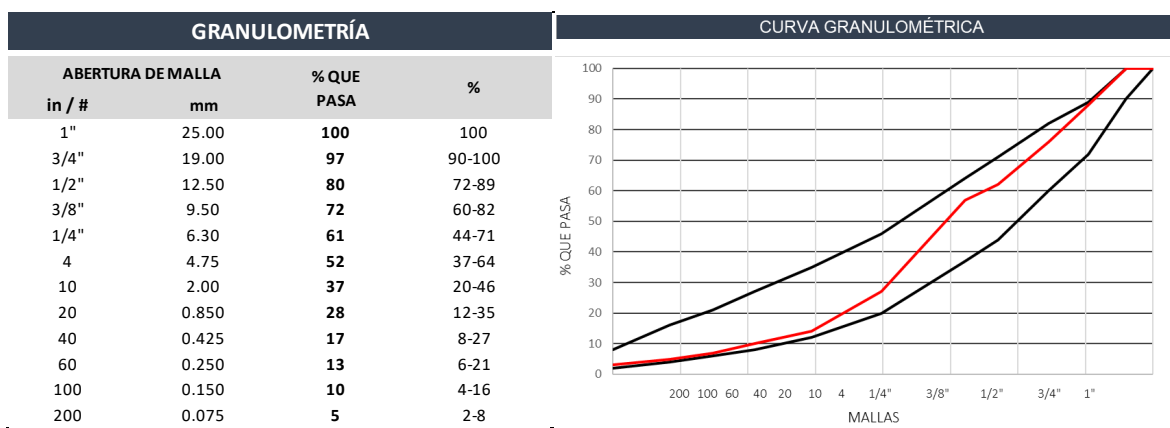


La mezcla para pavimento asfáltico en caliente se caracteriza por una composición física en peso que garantiza su resistencia y estabilidad. Con un 40% de grava de 3/4", un 10% de sello de 3/8" y un 50% de arena de trituración, esta fórmula asegura una adecuada distribución de los agregados para una óptima resistencia mecánica y durabilidad del pavimento. La combinación precisa de estos materiales proporciona una base sólida y confiable para soportar las cargas y condiciones de tráfico.



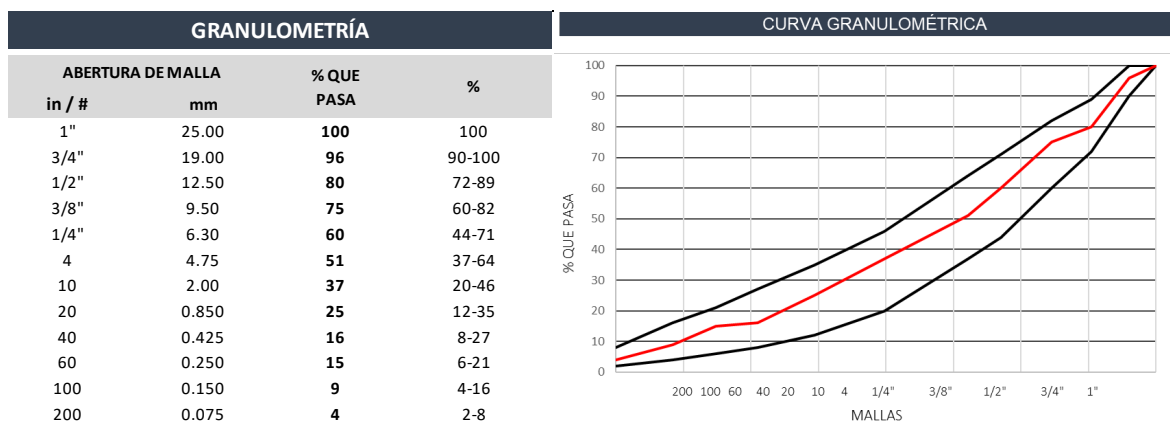


Tabla 14.- Características Granulométricas para mezcla de pavimento asfáltico en frío. Fuente: Elaboración Propia.



La mezcla física en peso para pavimento asfáltico en frío está compuesta por un 40% de grava de 3/4", un 10% de sello de 3/8" y un 50% de arena de trituración. Esta proporción equilibrada garantiza la resistencia y estabilidad necesarias para un pavimento duradero y de alta calidad.

Tabla 15.- Características Granulométricas para mezcla de RAP con mezcla en caliente. Fuente: Elaboración Propia.



La mezcla física en peso para RAP con mezcla en caliente se compone de los siguientes materiales:

- Grava de 3/4": 55% (en peso)
- Sello de 3/8": 5% (en peso)
- Arena de trituración: 40% (en peso)

Total de agregados de banco: 100% (en peso)

Agregados reciclados: 30% (en peso) de la mezcla total de agregados

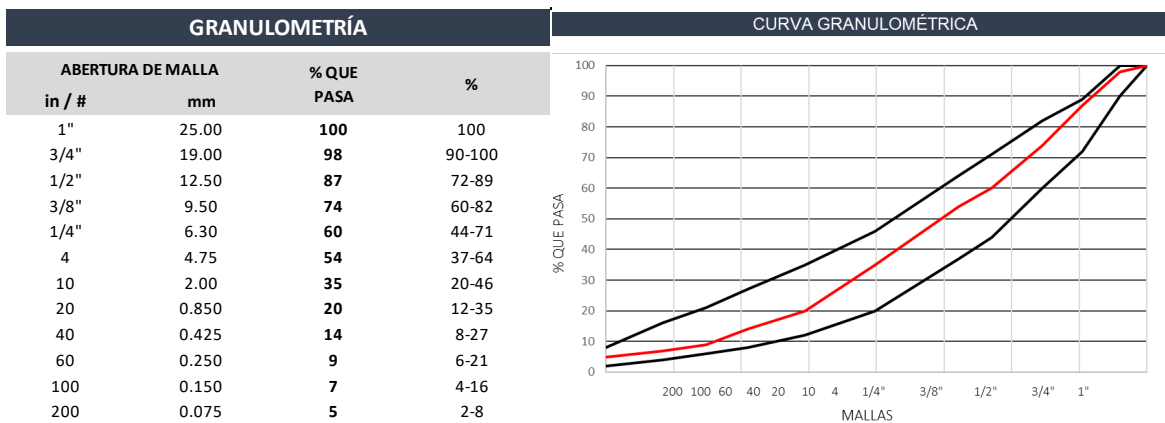




Explicación:

- La mezcla se compone principalmente de grava de 3/4", que proporciona la resistencia y la durabilidad de la carretera.
- El sello de 3/8" ayuda a llenar los vacíos entre las piezas de grava y mejora la impermeabilidad de la superficie.
- La arena de trituración rellena los espacios más pequeños y ayuda a mejorar la trabajabilidad de la mezcla.
- Los agregados de banco son materiales nuevos extraídos de canteras o ríos.
- Los agregados reciclados son materiales provenientes de pavimentos asfálticos antiguos que se han triturado y reutilizado.

Tabla 16.- Características Granulométricas para mezcla de RAP con mezcla en frío. Fuente: Elaboración Propia.



La mezcla física en peso para RAP con mezcla en frío se compone de:

- 55% de grava de 3/4"
- 5% de sello de 3/8"
- 40% de arena de trituración

Estos componentes representan el 100% de los agregados del banco, pero forman solo el 70% de la mezcla total de agregados.

Se agrega un 30% adicional de mezcla de agregados reciclados para completar el 100% de la mezcla total.





Contenido mínimo de asfalto

Tabla 17.- Cálculo del contenido mínimo de asfalto por fórmulas empíricas. Fuente: Elaboración Propia.

CONTENIDO MÍNIMO DE AGLUTINANTE	
DISEÑO	CONTENIDO MÍNIMO
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	4.6%
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	4.8%
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	4.0%
RAP CON MEZCLA EN FRÍO	4.4%

4.2.1. Determinación de la gravedad específica

Según la norma (ASTM D2726, 2021) la gravedad específica es una medida de la densidad de un material (masa por unidad de volumen) en comparación con la densidad del agua a 73,4 °F (23 °C). Por lo tanto, por definición, el agua a 73,4°F (23°C) tiene una gravedad específica de 1.

La prueba de gravedad específica se emplea para determinar la gravedad específica de una muestra compactada. Esta determinación se realiza evaluando la relación entre el peso de la muestra y el peso de un volumen equivalente de agua. La medición del peso de la muestra se lleva a cabo en tres condiciones distintas:

- Seco (sin agua en la muestra).
- Superficie saturada seca (SSS, el agua llena los huecos de aire).
- Sumergido en agua (bajo el agua).

Utilizando estos tres pesos y sus relaciones, se puede calcular la gravedad específica aparente, la gravedad específica aparente y la gravedad específica SSS aparente de una muestra, así como la absorción. La gravedad específica aparente es necesaria para determinar las relaciones peso-volumen y calcular diversas cantidades relacionadas con el volumen, como los huecos de aire y los huecos en el agregado mineral. Un problema crítico con este método es que, si los huecos de aire de una muestra son altos y, por lo tanto, potencialmente interconectados, el agua se drena rápidamente a medida que se retira la muestra. Lo que da como resultado una medición de volumen de muestra erróneamente baja y, por tanto, una gravedad específica aparente erróneamente alta.





Realizamos cada prueba en un lapso aproximado de 7 minutos, excluyendo el tiempo dedicado a la preparación. El procedimiento se inicia con el secado de la muestra hasta alcanzar una masa constante, seguido por su enfriamiento a temperatura ambiente. Posteriormente, se procede a registrar la masa seca de la muestra. Acto seguido, sumergimos la muestra en agua a una temperatura de 77°F (25°C) durante un período de 4 minutos y tomamos nota de la masa sumergida. Este proceso puede realizarse empleando un recipiente lleno de agua dispuesto sobre una báscula, o mediante una canasta suspendida en agua debajo de una báscula. Finalmente, se procede a secar rápidamente la muestra con una toalla húmeda y a registrar la masa seca correspondiente a la superficie. Este enfoque sistemático garantiza la exactitud y consistencia en la obtención de resultados durante la ejecución de las pruebas, asegurando así la fiabilidad de los datos generados.

Tabla 18.- Determinación de la gravedad específica del aglutinante. Fuente: Elaboración Propia.

GRAVEDAD ESPECIFICA DEL AGLUTINANTE		
DISEÑO		GRAVEDAD ESPECÍFICA g/cm ³
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PG 76-22	1.028
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	ECM-65	1.061
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	PG 76-22	1.028
RAP CON MEZCLA EN FRÍO	ECM-65	1.061





4.2.2. Prueba de estabilidad y flujo

La estabilidad de la mezcla, en el contexto del ensayo Marshall y según la norma (ASTM D6927, 2022) se define como la carga máxima que puede soportar una muestra compactada a una temperatura estándar de prueba de 60 °C. El flujo, medido en unidades de 0,25 mm (o en unidades de 0,1 mm), representa la deformación entre la ausencia de carga y la carga máxima que la muestra puede resistir durante el ensayo de estabilidad. Este ensayo persigue determinar el contenido óptimo de aglutinante, ajustado al tipo de mezcla de agregado y la intensidad del tráfico. En esencia, esta prueba nos proporciona información crucial para evaluar la estabilidad Marshall en relación con el porcentaje de betún.

Posterior a la preparación de la mezcla, esta se dispone en un molde Marshall provisto de collar y base, extendiéndola por los lados del molde. Un papel de filtro se coloca tanto debajo como encima de la muestra. El molde se sitúa en el pedestal de compactación Marshall, y se procede a compactar el material con 50 golpes de martillo, o según se especifique, volteando la muestra para compactar la otra cara con igual número de golpes. Tras la compactación, se invierte el molde. Con el collar en la parte inferior, se retira la base, extrayendo la muestra hacia afuera del extractor. La muestra se deja reposar durante algunas horas para su enfriamiento. La masa de la muestra tanto en el aire como cuando está sumergida se utiliza para calcular la densidad de la muestra, permitiendo así el cálculo de las propiedades de los huecos.

Las muestras, previamente calentadas a 60 ± 1 °C en un baño de agua o en un horno según el procedimiento especificado, se ubican en el cabezal de rotura. El medidor de flujo se posiciona sobre uno de los postes y se ajusta a cero. La carga se aplica a una velocidad constante de 50 mm por minuto hasta obtener la lectura de carga máxima en Newton. Simultáneamente, se registra el flujo en el medidor de flujo en unidades de mm.

Tabla 19.- Determinación de estabilidad y flujo. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE ESTABILIDAD Y FLUJO	
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	2500.00
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	870.00
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	1323.00
RAP CON MEZCLA EN FRÍO	860.00





A partir de la dosificación de la mezcla asfáltica con 30% de RAP, se determinó el contenido óptimo de asfalto y se comparó con el de la mezcla estándar. Para ello, se utilizaron las gráficas Marshall, obteniendo información sobre el peso unitario, vacíos de aire, vacíos del agregado mineral, vacíos del cemento asfáltico, estabilidad y flujo de la mezcla. La comparación con la mezcla estándar se enfocará en el contenido óptimo de asfalto, propiedades mecánicas y durabilidad. El análisis permitió determinar la viabilidad del diseño con RAP, considerando las ventajas y desventajas de su uso, como el impacto ambiental, requerimientos técnicos y disponibilidad.

Resumen de resultados

Tabla 20.- Resultados obtenidos del diseño. Fuente: Elaboración Propia.

CARACTERÍSTICAS	DATOS OBTENIDOS				ESPECIFICACIÓN
	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO	
CONTENIDO ÓPTIMO AGLUTINANTE. %	6.40	6.60	5.90	6.10	
PESO ESPECÍFICO TEÓRICO (T/M3)	2350.00	2345.00	2368.00	2256.00	
VACÍOS (%)	3.96	4.49	3.54	4.52	3 A 5
VAM (%)	17.60	14.23	15.30	14.70	13 MIN
ESTABILIDAD (KG)	2500.00	870.00	1323.00	860.00	860 MIN
FLUJO (MM)	2.93	3.10	3.00	3.50	2 A 3.5
V.OCUP. ASF	73.50	71.77	74.83	75.00	65 A 75





4.3. PRUEBAS DE LABORATORIO

4.3.1. Evaluación al daño inducido por humedad: TSR

La susceptibilidad a la humedad es una de las causas principales de deterioro en los pavimentos. El pavimento asfáltico no debe degradarse sustancialmente por la penetración de humedad en la mezcla. Las mezclas pueden considerarse susceptibles a la humedad si la unión interna del aglutinante asfáltico y el agregado se debilita en presencia de agua. Este debilitamiento, si es lo suficientemente grave, puede provocar un desprendimiento.

Según la norma mexicana (M-MMP-4-05-052/21, 2021) se someten dos conjuntos de muestras. Un juego está condicionado por saturación parcial al vacío con agua, sumergido en agua durante 24 horas, el otro conjunto se utiliza como control. La relación de la resistencia retenida a tensión indirecta (TSR) se calcula como la relación de resistencia promedio a la tensión indirecta de los especímenes acondicionados, entre la resistencia promedio a la tensión indirecta de los especímenes no acondicionados.

El procedimiento de ensayo implica la aplicación de una carga de compresión diametral sobre una probeta cilíndrica, cuyas dimensiones son equivalentes a las establecidas para el ensayo Marshall. Esta carga se aplica a lo largo de dos generatrices opuestas de la probeta. La disposición de carga resulta en la generación de un esfuerzo de tracción que actúa de manera relativamente uniforme a lo largo de todo el diámetro del plano de carga vertical de la probeta. Es este esfuerzo de tracción el responsable de agotar la probeta, desencadenando finalmente la rotura en el plano diametral de la muestra.

En otras palabras, la configuración de carga descrita provoca un esfuerzo de tracción homogéneo a través de la probeta cilíndrica, cuya magnitud resulta en el agotamiento progresivo de la muestra hasta que se produce la rotura. Este método de aplicación de carga se ha diseñado con el objetivo de evaluar la resistencia de la mezcla ensayada en condiciones de compresión diametral, proporcionando así información significativa sobre la capacidad de la mezcla para resistir esfuerzos de tracción en el plano diametral de la probeta.





Se preparan 6 muestras para cada uno de los diseños de mezcla propuestos en este TOG, las cuales están dentro del rango establecido por la norma mexicana (M-MMP-4-05-052/21, 2021) que indica un diámetro de 6 pulgadas (150 mm) y un espesor 4 pulgadas (100 mm). Las temperaturas utilizadas en este ensayo fueron 3 las cuales son las mínimas para la ejecución de este, las cuales fueron; 5 °C, 15 °C y 25 °C. Se ensayan ambos grupos de especímenes a la misma temperatura y velocidad de carga utilizando la máquina.

Tabla 21.- Resistencia conservada. Fuente: Elaboración Propia.

EVALUACIÓN AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD: TSR	
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	90.5%
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	83.7%
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	88.2%
RAP CON MEZCLA EN FRÍO	80.5%





4.3.2. Evaluación a la deformación permanente: Rueda cargada de Hamburgo

Uno de los modos de falla más comunes para los pavimentos asfálticos es la deformación permanente. Esto conduce no solo a otros problemas, como baches y disgregación, sino que también disminuye sustancialmente la seguridad vial y aumenta los costos de mantenimiento. La resistencia a la deformación permanente del asfalto depende principalmente de los agregados, la emulsión o el asfalto, así como el contenido de vacíos de aire de la mezcla. Los agregados pétreos son el principal componente de las mezclas asfálticas, representando más del 90% del peso. La estructura formada por los agregados dentro de la mezcla depende en gran medida de la distribución del tamaño, la forma y la textura de los agregados. Manipular las características de los agregados minerales suele ser considerada la forma más económica y conveniente de mejorar la mezcla asfáltica.

Según la norma mexicana (M-MMP-4-05-053/21, 2021), la rueda cargada de Hamburgo es un equipo de laboratorio usado para medir la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad de mezclas asfálticas. La prueba es un indicador de la susceptibilidad a la falla prematura de mezclas asfálticas en caliente debida a una estructura granular débil, rigidez inadecuada de asfalto, daño por humedad y falta de adherencia entre el agregado y el asfalto. Los resultados de rueda cargada de Hamburgo están influenciados por la calidad del agregado, el aglomerante, rigidez, duración del envejecimiento a corto plazo, fuente de aglomerante, tratamientos antidesprendimiento y temperatura de compactación.

El dispositivo funciona moviendo un par de ruedas de acero recíprocas a través de la superficie de muestras (cilíndricas o losas/cubículos) sumergidas en agua caliente, generalmente a 50 °C. El dispositivo es capaz de probar un par de especímenes simultáneamente, y los especímenes se compactan a 7 ± 1 por ciento de vacíos de aire. Las ruedas de acero tienen un diámetro de 203 mm (8 pulgadas), un ancho de 47 mm (1,85 pulgadas) y son capaces de generar 53 ± 2 pasadas por minuto. Cada rueda de acero pesa 158 libras. La longitud típica de las losas es de 320 mm (12,6 pulgadas) de largo por 260 mm (10,2 pulgadas) de ancho, el espesor varía de 40 mm (1,6 pulgadas) a 80 mm (3,2 pulgadas) y las dimensiones de las muestras cilíndricas son de 150 mm (6 pulgadas) de diámetro y 62 mm (2,5 pulgadas) de altura.





Los transformadores diferenciales variables lineales miden la profundidad de la rodadura o la deformación en 11 puntos a lo largo de cada muestra con una precisión de 0,01 mm. El dispositivo finaliza automáticamente la prueba cuando se alcanza el número preestablecido de pasadas de rueda o una profundidad de surcos de 20 mm (0,8 pulgadas), lo que ocurra primero. La duración de la prueba (considerando 20.000 pases) es de aproximadamente siete horas, incluyendo un tiempo de espera inicial de 30 minutos. Sin embargo, en algunas pruebas los especímenes fallan antes de tiempo y los tiempos de prueba son más cortos.

Tabla 22.- Determinación del ensayo de rueda de Hamburgo. Fuente: Elaboración Propia.

EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE: RUEDA CARGADA DE HAMBURGO		
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE		5.93
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO		8.50
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE		6.55
RAP CON MEZCLA EN FRÍO		9.44

PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	N. CICLOS	DEFORMACIÓN (MM)
RUEDA 1	20,000	6.65
RUEDA 2	20,000	5.21
PROMEDIO		5.93
ESPECIFICACIÓN	20,000	10 MÁX.

PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	N. CICLOS	DEFORMACIÓN (MM)
RUEDA 1	20,000	8.1
RUEDA 2	20,000	8.9
PROMEDIO		8.50
ESPECIFICACIÓN	20,000	10 MÁX.

RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	N. CICLOS	DEFORMACIÓN (MM)
RUEDA 1	20,000	6.9
RUEDA 2	20,000	6.2
PROMEDIO		6.55
ESPECIFICACIÓN	20,000	10 MÁX.

RAP CON MEZCLA EN FRÍO	N. CICLOS	DEFORMACIÓN (MM)
RUEDA 1	20,000	11.48
RUEDA 2	20,000	7.39
PROMEDIO		9.44
ESPECIFICACIÓN	20,000	10 MÁX.





En el presente TOG se analizaron cuatro mezclas de pavimento asfáltico flexible. Dos de estas mezclas se caracterizan por la incorporación del 30% de asfalto reciclado en sus diseños, tanto en la modalidad de pavimento en caliente como en frío. Los parámetros evaluados fueron el contenido óptimo de aglutinante, el peso específico teórico, vacíos, vacíos en el agregado mineral, estabilidad, flujo y volumen ocupado de asfalto. Además, se realizaron pruebas complementarias de deformación permanente mediante el método de la Rueda Cargada de Hamburgo y la Evaluación del Daño Inducido por Humedad, con el fin de evaluar la durabilidad y desempeño de cada mezcla bajo diferentes condiciones de carga y humedad.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Contenido óptimo de aglutinante : Las mezclas oscilaron entre 5.90% y 6.60%, cumpliendo con los parámetros normativos.
- Peso específico teórico : Los valores estuvieron entre 2256.00 T/m³ y 2368.00 T/m³.
- Vacíos (%) : Todas las mezclas se mantuvieron dentro del rango normativo de 3% a 5%, lo cual es crucial para la durabilidad y resistencia del pavimento.
- Vacíos en el agregado mineral (VAM) : Los valores obtenidos superaron el mínimo de 13%, asegurando una permeabilidad adecuada.
- Estabilidad (kg) : Las mezclas lograron resistencias superiores a los 860 kg mínimos exigidos, lo que garantiza su capacidad estructural.
- Flujo (mm) : Se obtuvieron valores dentro del rango normativo de 2 a 3.5 mm, asegurando una deformación controlada bajo cargas de tráfico.
- Volumen ocupado de asfalto (V.OCUP. ASF) : Las mezclas cumplieron con los requerimientos normativos, con valores entre 65% y 75%.

Evaluación de Deformación Permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo :

- Pavimento asfáltico en caliente: 5,93 mm
- Pavimento asfáltico en frío: 8,50 mm
- RAP con mezcla en caliente: 6,55 mm
- RAP con mezcla en frío: 9,44 mm





Los resultados muestran que todas las mezclas presentan una deformación dentro de los límites aceptables, garantizando su resistencia frente a la formación de surcos bajo cargas repetidas.

Evaluación del Daño Inducido por Humedad (TSR) :

- Pavimento asfáltico en caliente: 90,5%
- Pavimento asfáltico en frío: 89,6%
- RAP con mezcla en caliente: 90,5%
- RAP con mezcla en frío: 90,5%

Estos resultados indican una alta resistencia al daño por humedad, lo que asegura la capacidad de las mezclas para mantener su integridad estructural en condiciones adversas de exposición a la humedad.

El análisis de las mezclas de pavimento asfáltico, tanto convencionales como aquellas con incorporación de RAP, demuestra que cumplen con las especificaciones establecidas en la normativa mexicana vigente. Las características evaluadas aseguran que las mezclas ofrecen un desempeño óptimo, tanto en términos de durabilidad como de resistencia bajo las cargas esperadas y condiciones ambientales.

En cuanto a las pruebas de deformación permanente y de resistencia al daño por humedad, los resultados han sido satisfactorios, lo que respalda la viabilidad de su uso en proyectos de pavimentación. En particular, la incorporación de RAP en las mezclas representa una solución técnica y ambientalmente sostenible, ya que permite la reutilización de materiales sin comprometer la calidad o la vida útil del pavimento.

El apartado de Anexos de las páginas 268 a 271 incluye una memoria fotográfica detallada de los ensayos realizados y de los procesos ejecutados en cada una de las pruebas, lo que complementa y valida los resultados obtenidos en el análisis.





CAPÍTULO V: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA Y LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL RAP

En el presente capítulo se lleva a cabo un análisis del ciclo de vida (ACV), una metodología avanzada de evaluación de impacto ambiental que se encarga de cuantificar de manera rigurosa las repercusiones de un sistema específico a lo largo de su ciclo de vida proyectado, así como su contribución al concepto de economía circular. El enfoque óptimo para cualquier ACV radica en abarcar la totalidad de los procesos asociados con el producto en cuestión, desde su origen en la extracción del material, conocido como la fase de "cuna", hasta su destino final, referido como la fase de "tumba". Para la realización de este análisis, se empleó el software SIMAPRO, enfocando el cálculo en determinadas etapas del ciclo de vida del pavimento asfáltico reciclado.

Sostenibilidad y Economía Circular (EC) son dos conceptos que en los últimos años han estado profundamente ligados entre sí. La industria de la ingeniería en vías terrestres ha ido adaptando gradualmente prácticas que se consideran tanto circulares como sostenibles. Sin embargo, no todas estas prácticas consideran completamente la evaluación ambiental y las implicaciones de las mezclas asfálticas; lo que a su vez conduce a enfoques dudosamente circulares y sostenibles.

Se desarrolló un marco e indicador combinado de evaluación de la circularidad y sostenibilidad ambiental para las mezclas asfálticas con asfalto recuperado; utilizando la metodología del índice de circularidad de materiales y el marco de evaluación del ciclo de vida. Los resultados de este capítulo destacan que las autoridades nacionales de caminos en México y en el mundo aún enfrentan una gran cantidad de desafíos para la implementación y comunicación de la EC, junto con la falta de conocimiento e incentivos. Implementan principios de EC como el reciclaje y el mantenimiento preventivo, pero no utilizan métricas para evaluar su desempeño. Al utilizar el indicador y los marcos propuestos, se podrían elaborar recomendaciones circulares y sostenibles junto con un mapa de desarrollo de conocimientos para las partes interesadas involucradas.





El asfalto es el material de elección para la construcción de carreteras, debido a su conducción cómoda y segura, su relación calidad-precio, la velocidad de instalación, la flexibilidad en la construcción, el rendimiento y el mantenimiento combinados con una excelente durabilidad. El asfalto tiene otro atributo clave, ya que puede reutilizarse al 100% sin degradar su funcionalidad y actualmente es el material de construcción más reutilizado del mundo.

Muchos otros materiales de construcción pueden reclamar reciclabilidad, pero esto a menudo implica la degradación, por ejemplo, como agregado de grado inferior. Evidentemente, esto también se puede hacer con asfalto, como última opción. En los últimos años, la gestión de activos viales ha pasado de la construcción nueva al mantenimiento, lo que ha llevado a un enfoque de cambio esencial para la optimización de los recursos. Como se explicará en este TOG, el sector del asfalto ya ha alcanzado excelentes cifras de reutilización y reciclaje y existe un historial probado del desempeño satisfactorio de las carreteras que contienen este material. Sin embargo, hay margen para ampliar aún más la reutilización y el reciclaje para garantizar que este recurso y estos materiales se valoren por completo y que el carbono incorporado en ellos no se desperdicie.



5.1. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se configura como una herramienta versátil destinada a investigar el aspecto ambiental de productos, servicios, procesos o actividades. Su enfoque se centra en la identificación y cuantificación de los flujos de entrada y salida relacionados utilizados por el sistema, así como en la entrega de su salida funcional, considerando una perspectiva integral del ciclo de vida (Baumann, H. y Tillman, AM, 2004). Este abordaje integral abarca todos los procesos asociados con un producto, desde su fase de "extracción de materia prima" hasta su "eliminación final".

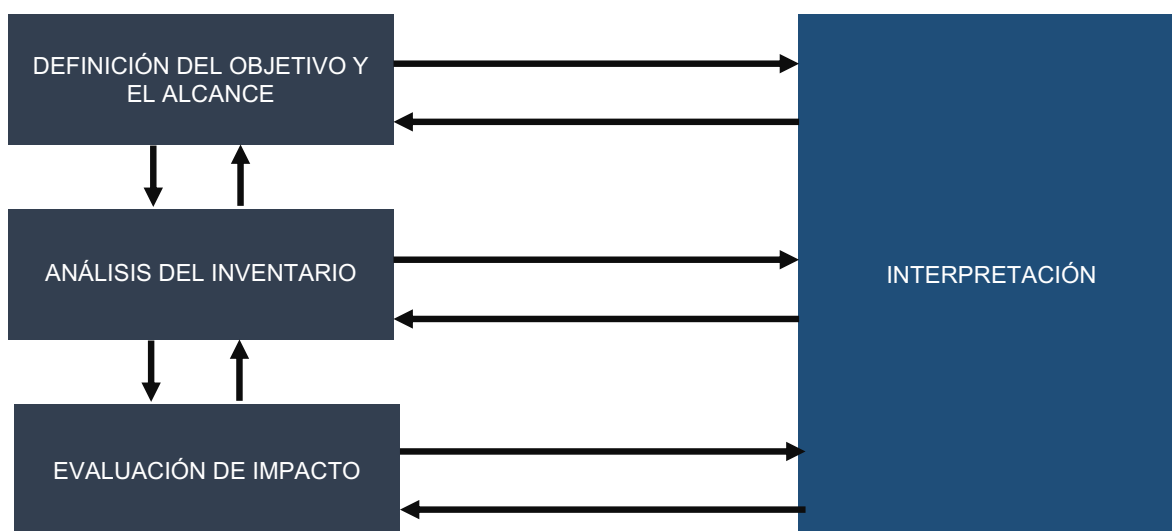


Figura.- 6 Fases de un ACV. Fuente: ISO 14040:2006

En las postrimerías de la década de 1990 y los inicios de la década de 2000, la Organización Internacional de Normalización (ISO) emitió la serie ISO 14040 sobre ACV, compuesta por el marco general (ISO 14040, 1997), la definición de objetivos y alcance y el inventario (ISO 14041, 1998) la evaluación de impacto (ISO 14042, 2000) y la interpretación (ISO 14043, 2000). Estas normativas fueron sustituidas posteriormente, en 2006, por la (ISO 14040, 2006), titulada "Gestión ambiental – Evaluación del ciclo de vida – Principios y marco", y la (ISO 14044, 2006), denominada "Gestión ambiental – Evaluación del ciclo de vida – Requisitos y directrices". Cabe destacar que, a pesar de esta actualización, los requisitos y el contenido técnico no experimentaron modificaciones sustanciales, conforme se evidencia en la representación gráfica de la Figura 6.



El ciclo de vida de una carretera se desglosa en diversas etapas que abarcan la extracción de materias primas, el procesamiento de los materiales de construcción, la construcción propiamente dicha, la fase operativa, el mantenimiento, la demolición, el reciclaje y el tratamiento de residuos. La Figura 7 proporciona una representación visual de los procesos contemplados para este Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El transporte de materiales, así como los equipos y maquinaria empleados en la construcción y mantenimiento, están intrínsecamente vinculados a cada unidad de proceso dentro del sistema vial. Cabe destacar que cada proceso unitario se fundamenta en consideraciones específicas de diseño, producción y aplicación del pavimento.

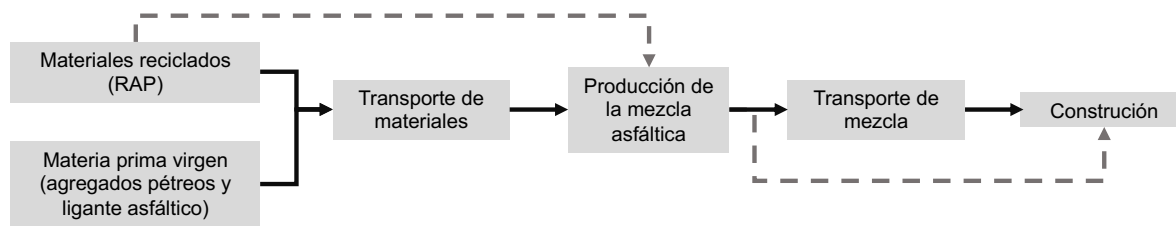


Figura.- 7 Procesos del Análisis de Ciclo de Vida del RAP. Fuente: Elaboración Propia.

Para los propósitos de este TOG, se ha focalizado el desarrollo del marco del ACV en las fases de extracción de materiales, producción y aplicación de la mezcla. Estas etapas han sido seleccionadas con el objetivo de proporcionar un análisis, permitiendo así una evaluación integral del impacto ambiental asociado con la infraestructura vial en cuestión.

Los materiales empleados en la construcción de carreteras asfaltadas abarcan el betún, los áridos y los aditivos. No se han incluido en el inventario ni modelado los procesos relacionados con la extracción de petróleo crudo, su transporte a una refinería y la obtención de betún mediante la destilación fraccionada de petróleo crudo durante el desarrollo del marco de este estudio.





5.1.1. Definición de objetivo y alcance

En el próximo apartado de este capítulo, se abordará la primera etapa del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la cual consiste en la definición de los objetivos y el alcance del estudio, siguiendo las directrices establecidas por las normas ISO 14040 y 14044. En este contexto, se presentará el modelo de estudio que establece el marco metodológico al cual deben ajustarse las fases subsiguientes del ACV.

Objetivo

El objetivo de este ACV consiste en evaluar y contrastar el impacto ambiental de cuatro mezclas de pavimento asfáltico flexible. Dos de estas mezclas se caracterizan por la incorporación del 30% de asfalto reciclado (RAP) en sus diseños, tanto en la modalidad de pavimento en caliente como en frío. Este análisis se llevará a cabo en comparación con dos mezclas tradicionales de pavimento, considerando tanto el diseño en caliente como en frío. El enfoque metodológico adoptado para este análisis será el de ciclo de vida, permitiendo así una evaluación y sistemática de los impactos ambientales asociados con estas distintas formulaciones de pavimento.

Función

Suministrar una superficie de rodamiento regular, segura y duradera constituye la función primordial, con la capacidad inherente de distribuir las cargas eficientemente a las capas de base y subbase, aspectos que quedan fuera del alcance del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) realizado. Este propósito es crucial para cumplir con los estándares de calidad necesarios, asegurando la resistencia adecuada para soportar las cargas generadas por el tránsito vehicular, garantizando que los vehículos circulen de manera segura, sin experimentar inconvenientes tales como baches o pérdida de adherencia, incluso en condiciones climáticas extraordinarias, con el fin de prevenir situaciones que puedan dar lugar a daños o representar riesgos.



Unidad Funcional

La Unidad Funcional (UF), que se empleará como referencia para la comparación de los impactos ambientales derivados del diseño, producción y aplicación de las cuatro mezclas de pavimento flexible, se define como una extensión de 1 kilómetro de longitud por 3.5 metros de ancho y un espesor de 6.5 centímetros. Esta unidad se caracteriza por su linealidad, sin la inclusión de incorporaciones, salidas o curvas, con el propósito de establecer un marco homogéneo que facilite una evaluación precisa y comparativa de los diferentes aspectos ambientales asociados con los distintos diseños de pavimento flexible.

5.1.2. Descripción y límites de los sistemas

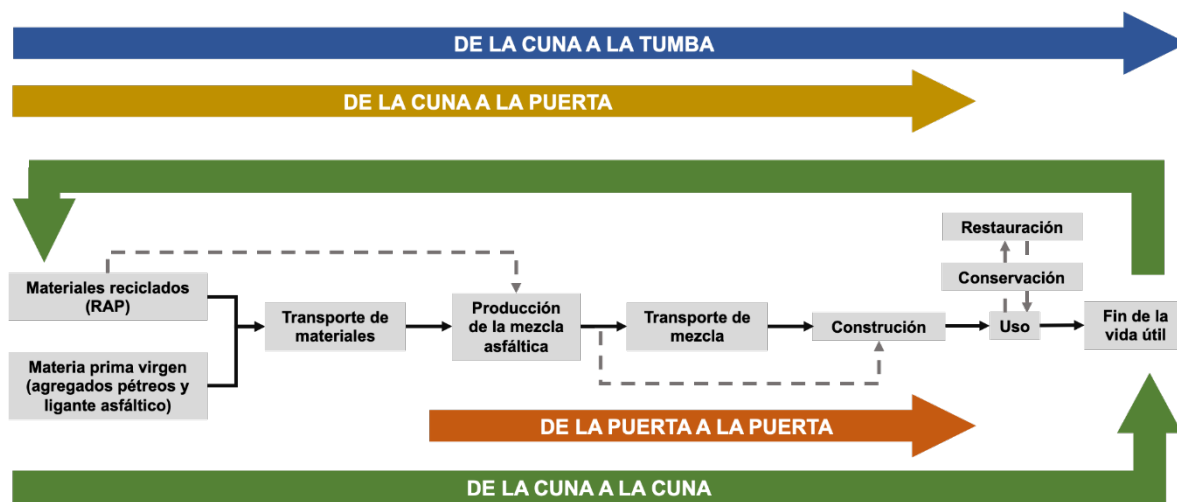


Figura.- 8 Límites del sistema. Fuente: Elaboración Propia.

El ACV permite evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo energético a lo largo de toda la vida útil de las mezclas asfálticas. Este resumen profundiza en la metodología empleada para analizar mezclas que incorporan RAP, destacando sus beneficios ambientales y el enfoque aplicado en el cálculo de emisiones. No es una tarea genérica. Requiere una adaptación a cada proyecto específico. El estudio presentado enfatiza la necesidad de contar con datos fidedignos provenientes de fuentes confiables o mediciones directas. Esto garantiza la exactitud de los resultados y permite una comparación precisa entre diferentes escenarios.





La inclusión de RAP en la producción de mezclas asfálticas se traduce en una disminución considerable de las emisiones de CO₂ equivalente. Este beneficio se debe principalmente a la menor cantidad de áridos vírgenes y asfalto necesarios en la mezcla. Al aprovechar materiales ya existentes, se reduce la demanda de extracción y procesamiento de nuevos recursos, disminuyendo así el impacto ambiental. Si bien el uso de RAP presenta un balance positivo en cuanto a la reducción de emisiones, es importante considerar todos los aspectos del proceso. El estudio reconoce un ligero aumento en las emisiones asociadas a la planta de asfalto. Este incremento se debe a la mayor energía requerida para calentar el RAP y lograr una mezcla homogénea. La metodología empleada considera este factor para presentar una evaluación completa del ciclo de vida.

Las figuras 8 y 9 presentan los límites de los sistemas utilizados en este análisis, los cuales están divididos en cinco etapas principales: materiales, transporte de materiales, producción de la mezcla asfáltica, transporte de la mezcla y, por último, construcción. La metodología desarrollada se basa en datos de entrada específicos para cada mezcla analizada. Considera las proporciones de agregados naturales, triturados y RAP presentes en la fórmula de trabajo. Para cada tipo de material, se calculan las emisiones asociadas a su ciclo de vida completo, incluyendo la extracción, procesamiento, transporte y manejo.

El estudio no se limita a las emisiones generadas en la planta de asfalto. Se realiza un análisis de las emisiones asociadas al asfalto, abarcando desde la extracción del crudo hasta su llegada a la planta. Se consideran datos promedio del mercado europeo, teniendo en cuenta las emisiones generadas durante la extracción, transporte, refinado, almacenamiento y manipulación del crudo. Adicionalmente, se incluyen las emisiones derivadas de los aditivos o modificadores asfálticos empleados en la mezcla.





La metodología no solo analiza las emisiones asociadas a la producción de la mezcla asfáltica con RAP, sino que también considera todas las etapas de implementación en la carretera. Esto incluye:

- Preparación de la superficie existente: Se evalúan las emisiones generadas por equipos como fresadoras y barredoras utilizadas para preparar la base para la nueva capa asfáltica.
- Transporte de la mezcla: Se calculan las emisiones por kilómetro de los vehículos utilizados para transportar la mezcla desde la planta hasta el sitio de aplicación.
- Aplicación y compactación: Se consideran las emisiones de los equipos utilizados para extender y compactar la mezcla asfáltica, garantizando una superficie uniforme y duradera.

El transporte de materiales y maquinaria a lo largo de todo el proceso de la construcción es una actividad importante con un impacto ambiental significativo. La metodología desarrollada aborda de manera consolidada este aspecto, considerando las distancias recorridas por cada medio de transporte y la cantidad total de pavimento fabricado y extendido.

El RAP proviene del fresado de capas asfálticas deterioradas. Su reutilización en nuevas mezclas asfálticas representa una práctica sostenible que reduce la demanda de recursos naturales. La metodología empleada en este estudio evalúa el impacto ambiental del RAP considerando únicamente las emisiones asociadas a su tratamiento y manejo posterior al fresado. No se incluyen las emisiones asociadas a su extracción y procesamiento inicial, ya que estas ya se contabilizaron en su momento.



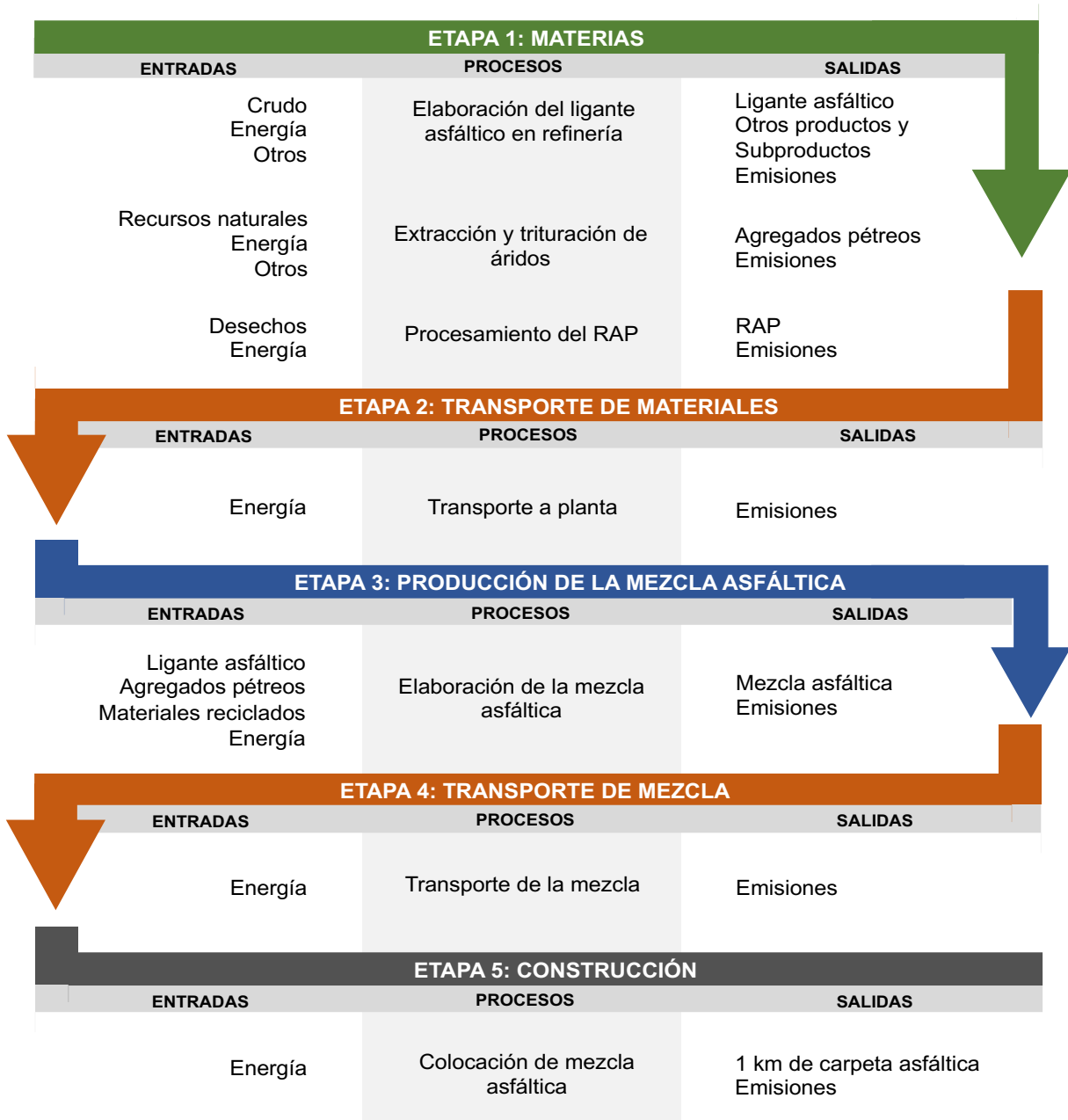


Figura.- 9 Descripción de los límites del sistema para el ACV. Fuente: Elaboración Propia.





Metodología de evaluación de impacto seleccionada

Este estudio se ha desarrollado mediante la metodología de impacto ReCiPe 2016 v1.07, la cual abarca un total de 21 categorías de impacto, 18 puntos medios y 3 puntos finales, junto con factores de caracterización representativos a escala global. A pesar de que todos los modelos de caracterización reflejan nuestra comprensión incompleta e imperfecta de las relaciones estudiadas, ReCiPe atenúa este problema al agrupar diversas fuentes de incertidumbre y decisiones en tres perspectivas: individualista, jerárquica e igualitaria. Cada una de estas perspectivas implica elecciones específicas en términos del período temporal de análisis, la adaptación del ser humano a problemas ambientales futuros, entre otros aspectos, los cuales se traducen en diferentes factores de ponderación y, en ocasiones, de caracterización.

Categorías de impacto seleccionadas

La selección de las categorías de impacto representa un elemento crucial en el marco del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), dado que es imperativo que estas se alineen con los objetivos del estudio con el fin de permitir una comparación y visualización apropiadas de los impactos ambientales asociados a los productos o servicios bajo escrutinio.

Se ha optado por abordar el análisis y la discusión de todas las 18 categorías de impacto proporcionadas por el método ReCiPe, tal como se detallan en la Tabla 23





CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD
Calentamiento global	kg CO2 eq
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq
Formación de ozono, Salud humana	kg NOx eq
Formación de partículas finas.	kg PM2.5 eq
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres	kg NOx eq
Acidificación terrestre	kg SO2 eq
Eutrofización de agua dulce	kg P eq
Eutrofización marina	kg N eq
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DCB
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB
Uso del suelo	m2a crop eq
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq
Consumo de agua	m3

Tabla 23.- Categorías de impacto ReCiPe. Fuente: Elaboración Propia.

Software

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se llevó a cabo utilizando el software Simapro v.9.4.0.2, una herramienta que posibilita a los usuarios la generación de modelos detallados sobre las complejas interacciones entre un producto o sistema y su entorno, en concordancia con las normativas ISO 14040 y 14044. Simapro incorpora diversas bases de datos con información transparente y de alta calidad, así como la capacidad de utilizar bases de datos personalizadas por el usuario. Durante la fase de Inventario del Ciclo de Vida (LCI) de esta investigación, se empleó una combinación de procesos diseñados específicamente y aquellos integrados en la base de datos Ecoinvent v3.

Desarrollado hace 30 años por PRé, Simapro ha mantenido su enfoque original de convertir la sostenibilidad en un concepto respaldado por datos, consolidándose como el software líder en ACV con una reputación que abarca más de 25 años y se extiende por más de 80 países. Sus capacidades incluyen la modelación y análisis sistemático y transparente de ciclos de vida complejos, la medición del impacto ambiental de productos o servicios a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida, y la identificación de puntos críticos en cada eslabón de la cadena de suministro, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final.





5.1.3. Análisis de Inventario

En esta sección, se aborda la segunda fase del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), conocida como el análisis de inventario. Se proporciona una descripción de la metodología de recopilación de datos y las fuentes utilizadas, se presenta una exposición de los sistemas examinados junto con las hipótesis adoptadas, y se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el inventario.

El análisis del inventario proporciona un desglose completo de las entradas y salidas, refiriéndose a todos los recursos utilizados y todos los productos generados durante las diferentes etapas del ciclo de vida vinculadas a los procesos. A continuación, las tablas 24, 25, 26 y 27 exponen y detallan las cinco etapas principales del proceso: extracción de materiales, transporte de materiales, producción de mezcla, transporte de mezcla y construcción. Esto se lleva a cabo considerando los cuatro escenarios y las cuatro combinaciones de mezclas diferentes.

Se detalla la cantidad de diferentes materiales utilizados en la mezcla, incluyendo bitumen asfáltico, emulsión asfáltica, grava, arena, sello, filler y agua. También se menciona la cantidad de energía consumida en la trituración y homogeneización de los materiales. Se especifica la cantidad de transporte necesario para los materiales y el bitumen asfáltico, tanto en términos de kilómetros como de tipo de vehículo utilizado.

Asimismo, se cuantifica el transporte de materiales y bitumen asfáltico, especificando la distancia recorrida y el tipo de vehículos empleados. Se incluyen detalles sobre la producción de la mezcla asfáltica, el tiempo de operación de la planta de asfalto y el uso de maquinaria pesada, así como el transporte de la mezcla asfáltica hasta el sitio de construcción. Además, se describe la maquinaria y materiales utilizados en la aplicación del pavimento en el sitio de construcción.

Es relevante destacar que el 95% de los materiales utilizados provienen de la orografía aledaña al tramo de autopista en cuestión, siendo mayormente recursos naturales extraídos y transformados por la intervención humana, pertenecientes a la tecnósfera. Para asegurar la





precisión del análisis, se ha considerado el peso específico o densidad de cada material (medido en Kg/m³) y su cantidad (medido en m³). Este análisis es fundamental para comprender el impacto ambiental y económico de los procesos, y para desarrollar estrategias que optimicen el uso de recursos en la construcción.

Para el análisis de inventario, se utilizaron diversas fuentes de información que garantizan la precisión del estudio. Las principales fuentes empleadas incluyen:

Bases de Datos Especializadas en ACV:

- Ecoinvent: Esta base de datos es reconocida por su exhaustividad y fiabilidad a nivel mundial. Proporciona información detallada sobre el ciclo de vida de numerosos productos y procesos, permitiendo una evaluación precisa de las entradas y salidas.

Normas y Guías Metodológicas:

- ISO 14040 y 14044: Estas normas internacionales establecen los principios y el marco metodológico para llevar a cabo un ACV. Aseguran que el análisis se realice de acuerdo con estándares reconocidos y que los resultados sean comparables y consistentes.

Datos Primarios:

- Datos de Campo: Información obtenida directamente de las operaciones industriales o procesos productivos específicos. Esto incluye datos sobre el consumo de energía, emisiones, y uso de materiales, recopilados a través de observaciones directas y mediciones en el sitio de producción.
- Encuestas y Entrevistas: Datos recopilados mediante consultas directas con expertos, operadores, y otros actores clave en el proceso productivo. Estas entrevistas y encuestas proporcionan información adicional y contexto sobre los procesos y prácticas en uso, complementando los datos obtenidos de fuentes secundarias.

Estas fuentes proporcionan una base sólida para el análisis de inventario, garantizando una evaluación integral y precisa de los recursos y productos involucrados en las distintas etapas del ciclo de vida.





Tabla 24.- Inventario de Entradas y Salidas: Pavimento asfáltico con mezcla en caliente. Fuente: Elaboración Propia.

PAVIMENTO ASFÁLTICO CON MEZCLA EN CALIENTE			
ENTRADAS			
EXTRACCIÓN DE MATERIALES			
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD POR UF	
BITUMEN ASFÁLTICO	Kg	36,064.00	
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00	
GRAVA	Kg	208,720.40	
ARENA	Kg	260,900.50	
SELLO	Kg	52,180.10	
FILLER	Kg	5,635.00	
AGUA	Lt	3,831.80	
TRITURACIÓN Y HOMOGENEIZACIÓN	Kg	527,436.00	
TRANSPORTE DE MATERIALES			
BITUMEN ASFÁLTICO	Kg	36,064.00	
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	527,436.00	
TRANSPORTE MATERIALES (AGREGADOS)	Tkm	5,274.36	
TRANSPORTE BITUMEN ASFÁLTICO	Tkm	360.64	
PRODUCCIÓN DE MEZCLA			
BITUMEN ASFÁLTICO	Kg	36,064.00	
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	527,436.00	
PLANTA DE ASFALTO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE. MARCA ADM MODELO SPL	h	5.12	
AGUA	Lt	3,831.80	
CARGADOR FRONTAL MARCA CATERPILLAR MODELO 950	h	0.09	
CAMIÓN VOLTEO DE 7 M3 CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO 2008 DE 210 HP	h	0.42	
TRANSPORTE DE MEZCLA			
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	Kg	563,500.00	
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00	
TRANSPORTE DE MEZCLA EN CALIENTE	Tkm	5,635.00	
TRANSPORTE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	42.35	
TRANSPORTE PAVIMENTADORA DE ASFALTO BLAW KNOX PF-180 DE 95 H.P. ANCHO DE 3.00	Tkm	105.00	
TRANSPORTE PETROLIZADORA MARCA SEAMAN GUNNISON CAPACIDAD DE 6,000 LTS. CON	Tkm	95.80	
TRANSPORTE COMPACTADOR VIBRATORIO DE ASFALTO CB-534D DE 130 HP PESO DE OPE	Tkm	101.80	
TRANSPORTE COMPACTADOR DE NEUMÁTICOS CP 533 DYNAPAC DE 145 H.P. Y ANCHO DE	Tkm	94.50	
TRANSPORTE CAMION VOLTEO DE 7 M3 DE CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO	Tkm	85.00	
TRANSPORTE BARREDORA AUTOPROPULSADA MARCA LAYMOR MODELO 8-C, CON POTEN	Tkm	25.50	
CONSTRUCCIÓN			
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	Kg	563,500.00	
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00	
PAVIMENTADORA DE ASFALTO BLAW KNOX PF-180 DE 95 H.P. ANCHO DE 3.00 MTS Y VELOCI	h	4.21	
PETROLIZADORA MARCA SEAMAN GUNNISON CAPACIDAD DE 6,000 LTS. CON DOSIFICADOR	h	0.11	
COMPACTADOR VIBRATORIO DE ASFALTO CB-534D DE 130 HP PESO DE OPERACION 10.38C	h	1.17	
COMPACTADOR DE NEUMATICOS CP 533 DYNAPAC DE 145 H.P. Y ANCHO DE RODADO DE 2.	h	1.52	
CAMION VOLTEO DE 7 M3 DE CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO 2008 DE 210 HF	h	0.13	
BARREDORA AUTOPROPULSADA MARCA LAYMOR MODELO 8-C, CON POTENCIA DE 87.3 KW	h	0.24	
SALIDAS			
EXTRACCIÓN DE MATERIALES			
BITUMEN ASFÁLTICO	Kg	36,064.00	
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00	
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	527,436.00	
TRANSPORTE DE MATERIALES			
TRANSPORTE MATERIALES	Tkm	5,274.36	
TRANSPORTE BITUMEN ASFÁLTICO	Tkm	360.64	
PRODUCCIÓN DE MEZCLA			
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	Kg	563,500.00	
TRANSPORTE DE MEZCLA			
TRANSPORTE DE MEZCLA EN CALIENTE	Tkm	5,635.00	
TRANSPORTE DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	84.7	
CONSTRUCCIÓN			
CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN	UF	1.00	





Tabla 25.- Inventario de Entradas y Salidas: Pavimento asfáltico con mezcla en frío. Fuente: Elaboración Propia.

PAVIMENTO ASFÁLTICO CON MEZCLA EN FRÍO			
ENTRADAS			
EXTRACCIÓN DE MATERIALES			
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD POR UF	
EMULSIÓN ASFÁLTICO	Kg	41,426.00	
GRAVA	Kg	208,269.60	
ARENA	Kg	260,337.00	
SELLO	Kg	52,067.40	
FILLER	Kg	5,635.00	
AGUA	Lt	3,831.80	
TRITURACIÓN Y HOMOGENEIZACIÓN	Kg	526,309.00	
TRANSPORTE DE MATERIALES			
EMULSIÓN ASFÁLTICO	Kg	41,426.00	
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	526,309.00	
TRANSPORTE MATERIALES (AGREGADOS)	Tkm	5,263.09	
TRANSPORTE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	414.26	
PRODUCCIÓN DE MEZCLA			
EMULSIÓN ASFÁLTICO	Kg	37,191.00	
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	526,309.00	
PLANTA DE ASFALTO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO. MARCA SEAMAN GUNNISON EP3I	h	5.87	
AGUA	Lt	3,831.80	
CARGADOR FRONTAL MARCA CATERPILLAR MODELO 950	h	0.09	
CAMIÓN VOLTEO DE 7 M3 CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO 2008 DE 210 HP	h	0.42	
TRANSPORTE DE MEZCLA			
MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	Kg	563,500.00	
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00	
TRANSPORTE DE MEZCLA EN FRÍO	Tkm	11,270.00	
TRANSPORTE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	84.70	
TRANSPORTE PAVIMENTADORA DE ASFALTO BLAW KNOX PF-180 DE 95 H.P. ANCHO DE 3.00	Tkm	105.00	
TRANSPORTE PETROLIZADORA MARCA SEAMAN GUNNISON CAPACIDAD DE 6,000 LTS. CON	Tkm	95.80	
TRANSPORTE COMPACTADOR VIBRATORIO DE ASFALTO CB-534D DE 130 HP PESO DE OPE	Tkm	101.80	
TRANSPORTE COMPACTADOR DE NEUMÁTICOS CP 533 DYNAPAC DE 145 H.P. Y ANCHO DE	Tkm	94.50	
TRANSPORTE CAMION VOLTEO DE 7 M3 DE CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO	Tkm	85.00	
TRANSPORTE BARREDORA AUTOPROPULSADA MARCA LAYMOR MODELO 8-C, CON POTEN	Tkm	25.50	
CONSTRUCCIÓN			
MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	Kg	563,500.00	
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235	
PAVIMENTADORA DE ASFALTO BLAW KNOX PF-180 DE 95 H.P. ANCHO DE 3.00 MTS Y VELOCI	h	4.21	
PETROLIZADORA MARCA SEAMAN GUNNISON CAPACIDAD DE 6,000 LTS. CON DOSIFICADOR	h	0.11	
COMPACTADOR VIBRATORIO DE ASFALTO CB-534D DE 130 HP PESO DE OPERACION 10.38C	h	1.17	
COMPACTADOR DE NEUMATICOS CP 533 DYNAPAC DE 145 H.P. Y ANCHO DE RODADO DE 2.	h	1.52	
CAMION VOLTEO DE 7 M3 DE CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO 2008 DE 210 HF	h	0.13	
BARREDORA AUTOPROPULSADA MARCA LAYMOR MODELO 8-C, CON POTENCIA DE 87.3 KW	h	0.24	
SALIDAS			
EXTRACCIÓN DE MATERIALES			
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	41,426.00	
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	526,309.00	
TRANSPORTE DE MATERIALES			
TRANSPORTE MATERIALES	Tkm	5,263.09	
TRANSPORTE BITUMEN ASFÁLTICO	Tkm	414.26	
PRODUCCIÓN DE MEZCLA			
MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	Kg	563,500.00	
TRANSPORTE DE MEZCLA			
TRANSPORTE DE MEZCLA EN FRÍO	Tkm	11,270.00	
TRANSPORTE DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	84.70	
CONSTRUCCIÓN			
CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN	UF	1.00	





Tabla 26.- Inventario de Entradas y Salidas: RAP con mezcla en caliente. Fuente: Elaboración Propia.

RAP CON MEZCLA EN CALIENTE		
ENTRADAS		
EXTRACCIÓN DE MATERIALES		
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD POR UF
BITUMEN ASFÁLTICO	Kg	33,246.50
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00
RAP	Kg	169,050.00
GRAVA	Kg	216,896.79
ARENA	Kg	103,114.87
SELLO	Kg	35,556.85
FILLER	Kg	5,635.00
AGUA	Lt	4,226.25
TRITURACIÓN Y HOMOGENEIZACIÓN	Kg	361,203.50
TRANSPORTE DE MATERIALES		
BITUMEN ASFÁLTICO	Kg	33,246.50
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	530,253.50
TRANSPORTE MATERIALES (AGREGADOS)	Tkm	5,302.54
TRANSPORTE BITUMEN ASFÁLTICO	Tkm	332.47
PRODUCCIÓN DE MEZCLA		
BITUMEN ASFÁLTICO	Kg	33,246.50
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	361,203.50
RAP	Kg	169,050.00
PLANTA DE ASFALTO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE. MARCA ADM MODELO SPL	h	5.12
AGUA	Lt	4,226.25
CARGADOR FRONTAL MARCA CATERPILLAR MODELO 950	h	0.09
CAMIÓN VOLTEO DE 7 M3 CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO 2008 DE 210 HP	h	0.42
TRANSPORTE DE MEZCLA		
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	Kg	563,500.00
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00
TRANSPORTE DE RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	Tkm	5,635.00
TRANSPORTE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	42.35
TRANSPORTE PAVIMENTADORA DE ASFALTO BLAW KNOX PF-180 DE 95 H.P. ANCHO DE 3.00	Tkm	105.00
TRANSPORTE PETROLIZADORA MARCA SEAMAN GUNNISON CAPACIDAD DE 6,000 LTS. CON	Tkm	95.80
TRANSPORTE COMPACTADOR VIBRATORIO DE ASFALTO CB-534D DE 130 HP PESO DE OPE	Tkm	101.80
TRANSPORTE COMPACTADOR DE NEUMÁTICOS CP 533 DYNAPAC DE 145 H.P. Y ANCHO DE	Tkm	94.50
TRANSPORTE CAMION VOLTEO DE 7 M3 DE CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO	Tkm	85.00
TRANSPORTE BARREDORA AUTOPROPULSADA MARCA LAYMOR MODELO 8-C, CON POTEN	Tkm	25.50
CONSTRUCCIÓN		
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	Kg	563,500
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235
PAVIMENTADORA DE ASFALTO BLAW KNOX PF-180 DE 95 H.P. ANCHO DE 3.00 MTS Y VELOCI	h	4.21
PETROLIZADORA MARCA SEAMAN GUNNISON CAPACIDAD DE 6,000 LTS. CON DOSIFICADOR	h	0.11
COMPACTADOR VIBRATORIO DE ASFALTO CB-534D DE 130 HP PESO DE OPERACION 10.38C	h	1.17
COMPACTADOR DE NEUMATICOS CP 533 DYNAPAC DE 145 H.P. Y ANCHO DE RODADO DE 2.	h	1.52
CAMION VOLTEO DE 7 M3 DE CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO 2008 DE 210 HF	h	0.13
BARREDORA AUTOPROPULSADA MARCA LAYMOR MODELO 8-C, CON POTENCIA DE 87.3 KW	h	0.24
SALIDAS		
EXTRACCIÓN DE MATERIALES		
BITUMEN ASFÁLTICO	Kg	33,246.50
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	361,203.50
RAP	Kg	169,050.00
TRANSPORTE DE MATERIALES		
TRANSPORTE MATERIALES	Tkm	5,302.54
TRANSPORTE BITUMEN ASFÁLTICO	Tkm	332.47
PRODUCCIÓN DE MEZCLA		
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	Kg	563,500.00
TRANSPORTE DE MEZCLA		
TRANSPORTE DE RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	Tkm	5,635.00
TRANSPORTE DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	42.35
CONSTRUCCIÓN		
CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN	UF	1.00





Tabla 27.- Inventario de Entradas y Salidas: RAP con mezcla en frío. Fuente: Elaboración Propia.

RAP CON MEZCLA EN FRÍO		
ENTRADAS		
EXTRACCIÓN DE MATERIALES		
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD POR UF
EMULSIÓN ASFÁLTICO	Kg	38,608.50
RAP	Kg	169,050.00
GRAVA	Kg	216,209.32
ARENA	Kg	102,788.04
SELLO	Kg	35,444.15
FILLER	Kg	5,635.00
AGUA	Lt	411.44
TRITURACIÓN Y HOMOGENEIZACIÓN	Kg	360,076.50
TRANSPORTE DE MATERIALES		
EMULSIÓN ASFÁLTICO	Kg	38,608.50
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	529,126.50
TRANSPORTE MATERIALES (AGREGADOS)	Tkm	5,291.27
TRANSPORTE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	386.09
PRODUCCIÓN DE MEZCLA		
EMULSIÓN ASFÁLTICO	Kg	34,373.50
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	360,076.50
RAP	Kg	169,050.00
PLANTA DE ASFALTO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO. MARCA SEAMAN GUNNISON EP3I	h	5.87
AGUA	Lt	411.44
CARGADOR FRONTAL MARCA CATERPILLAR MODELO 950	h	0.09
CAMIÓN VOLTEO DE 7 M3 CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO 2008 DE 210 HP	h	0.42
TRANSPORTE DE MEZCLA		
RAP CON MEZCLA EN FRÍO	Kg	563,500.00
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235.00
TRANSPORTE RAP CON MEZCLA EN FRÍO	Tkm	11,270.00
TRANSPORTE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	84.70
TRANSPORTE PAVIMENTADORA DE ASFALTO BLAW KNOX PF-180 DE 95 H.P. ANCHO DE 3.00	Tkm	105.00
TRANSPORTE PETROLIZADORA MARCA SEAMAN GUNNISON CAPACIDAD DE 6,000 LTS. CON	Tkm	95.80
TRANSPORTE COMPACTADOR VIBRATORIO DE ASFALTO CB-534D DE 130 HP PESO DE OPE	Tkm	101.80
TRANSPORTE COMPACTADOR DE NEUMÁTICOS CP 533 DYNAPAC DE 145 H.P. Y ANCHO DE	Tkm	94.50
TRANSPORTE CAMION VOLTEO DE 7 M3 DE CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO	Tkm	85.00
TRANSPORTE BARREDORA AUTOPROPULSADA MARCA LAYMOR MODELO 8-C, CON POTEN	Tkm	25.50
CONSTRUCCIÓN		
RAP CON MEZCLA EN FRÍO	Kg	563,500.00
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Kg	4,235
PAVIMENTADORA DE ASFALTO BLAW KNOX PF-180 DE 95 H.P. ANCHO DE 3.00 MTS Y VELOCI	h	4.21
PETROLIZADORA MARCA SEAMAN GUNNISON CAPACIDAD DE 6,000 LTS. CON DOSIFICADOR	h	0.11
COMPACTADOR VIBRATORIO DE ASFALTO CB-534D DE 130 HP PESO DE OPERACION 10.38C	h	1.17
COMPACTADOR DE NEUMATICOS CP 533 DYNAPAC DE 145 H.P. Y ANCHO DE RODADO DE 2.	h	1.52
CAMION VOLTEO DE 7 M3 DE CAPACIDAD MARCA MERCEDES BENZ MODELO 2008 DE 210 HF	h	0.13
BARREDORA AUTOPROPULSADA MARCA LAYMOR MODELO 8-C, CON POTENCIA DE 87.3 KW	h	0.24
SALIDAS		
EXTRACCIÓN DE MATERIALES		
EMULSIÓN ASFÁLTICO	Kg	38,608.50
MATERIALES (AGREGADOS)	Kg	360,076.50
RAP	Kg	169,050.00
TRANSPORTE DE MATERIALES		
TRANSPORTE MATERIALES	Tkm	529,126.50
TRANSPORTE BITUMEN ASFÁLTICO	Tkm	5,291.27
PRODUCCIÓN DE MEZCLA		
RAP CON MEZCLA EN FRÍO	Kg	563,500.00
TRANSPORTE DE MEZCLA		
TRANSPORTE RAP CON MEZCLA EN FRÍO	Tkm	11,270.00
TRANSPORTE DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	Tkm	84.70
CONSTRUCCIÓN		
CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN	UF	1.00





5.1.4. Resultados: Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida

La metodología desarrollada para el ACV de mezclas asfálticas con RAP permite una evaluación precisa y adaptable a diferentes proyectos. El estudio demuestra que el uso de RAP contribuye significativamente a la reducción de emisiones de CO₂ equivalente, posicionándose como una alternativa sostenible para la construcción de carreteras. Al minimizar el consumo de recursos vírgenes y aprovechar materiales ya existentes.

- **Desglose por etapas:** Se descomponen los resultados del ACV por etapas del ciclo de vida, permitiendo identificar las fases con mayor impacto ambiental.
- **Análisis individualizado por categoría de impacto:** Se realiza una evaluación específica para cada categoría de impacto (cambio climático, agotamiento de recursos, etc.), destacando las etapas y escenarios más relevantes.
- **Vinculación con la Unidad Funcional:** Todos los resultados se presentan en relación con la UF, facilitando la comparación entre escenarios y la interpretación de los impactos.

Resultados:

- **Contribuciones por etapas:** Se identifican las etapas del ciclo de vida que generan la mayor parte del impacto ambiental para cada categoría de impacto.
- **Análisis por categoría de impacto:** Se detallan los resultados para cada categoría, incluyendo:
 - **Cambio climático:** Se analizan las emisiones de gases de efecto invernadero en cada etapa y escenario, destacando las estrategias para su reducción.
 - **Agotamiento de recursos:** Se evalúa el consumo de recursos naturales (agua, áridos, etc.) en las diferentes etapas, con énfasis en la búsqueda de alternativas sostenibles.
 - **Contaminación atmosférica:** Se examinan las emisiones de contaminantes atmosféricos en cada etapa, proponiendo medidas para su control y mitigación.





- Impactos sobre la salud humana: Se evalúan los riesgos para la salud humana asociados a las diferentes etapas del ciclo de vida, planteando estrategias de prevención.
- Impactos sobre el ecosistema: Se analiza el impacto sobre la biodiversidad y los ecosistemas en cada etapa, sugiriendo medidas de protección y recuperación.
- Comparación entre escenarios: Se comparan los resultados del ACV para cada escenario, considerando las variables y estrategias implementadas.

Interpretación:

- Etapas y escenarios con mayor impacto: Se identifican las etapas y escenarios que generan los mayores impactos ambientales en cada categoría, enfocándose en las oportunidades de mejora.
- Etapas y escenarios con menor impacto: Se resaltan las etapas y escenarios con menor impacto ambiental, destacando las prácticas y estrategias responsables.
- Conclusiones generales: Se sintetizan los hallazgos del análisis, extrayendo conclusiones relevantes para la toma de decisiones y la mejora ambiental del proyecto base.

Presentación de resultados:

- Gráficos y tablas: Se utilizan gráficos y tablas para visualizar de manera clara y concisa los resultados del ACV, facilitando la comprensión y el análisis.
- Vinculación con la Unidad Funcional: Todos los gráficos y tablas se presentan en relación con la UF, permitiendo una interpretación precisa de los impactos por kilómetro de carretera.



Pavimento asfáltico en caliente

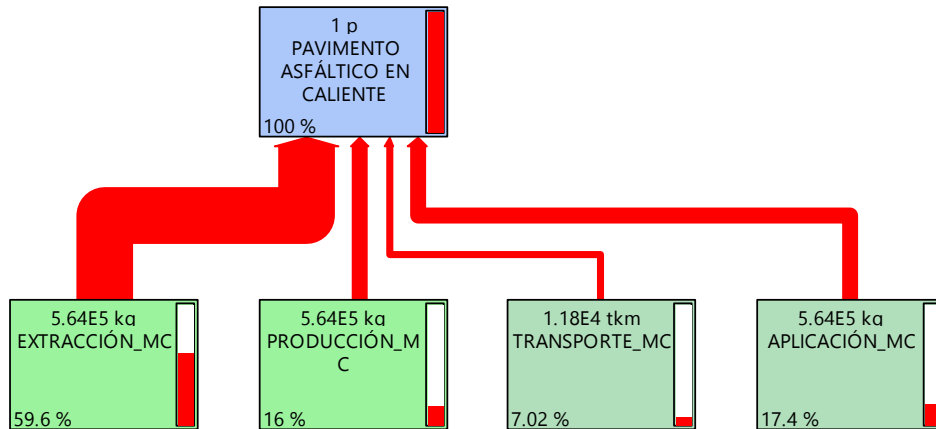
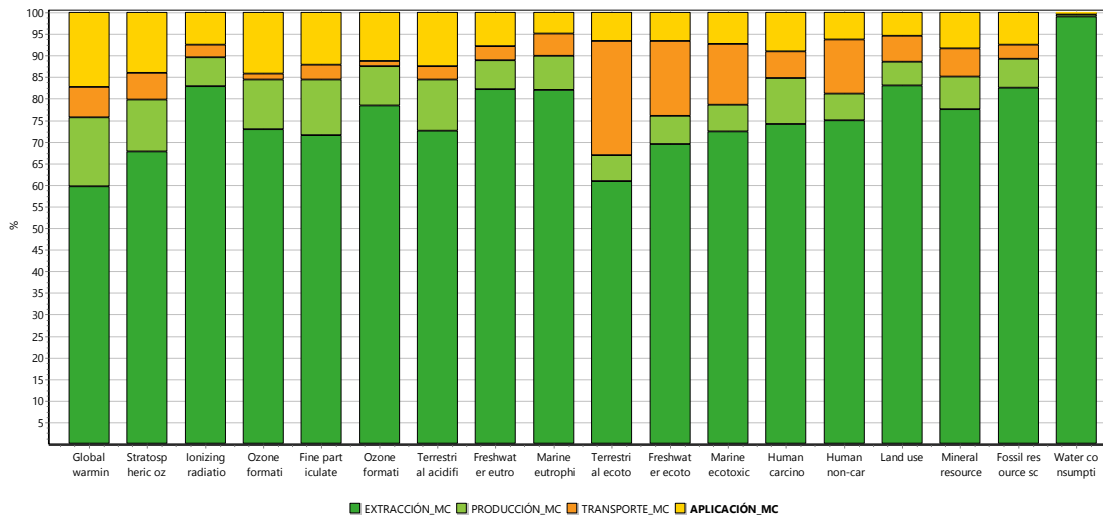


Figura.- 10 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en caliente. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



Gráfica.- 1 Contribución por etapas: Pavimento asfáltico en caliente. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.





Pavimento asfáltico en frío

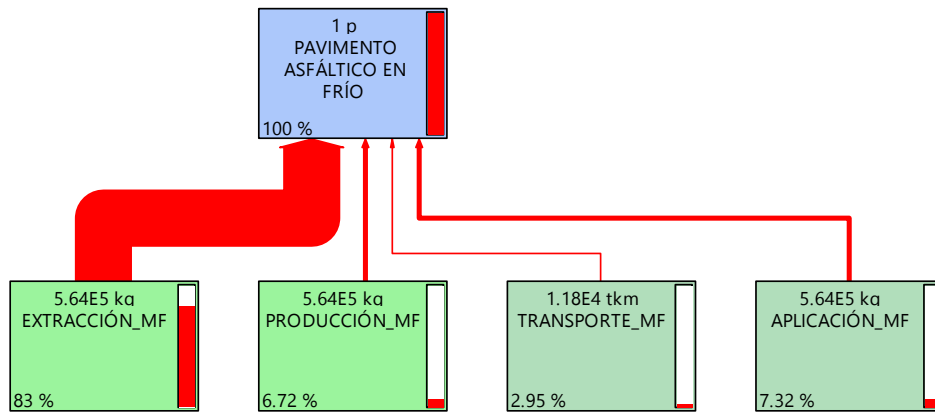
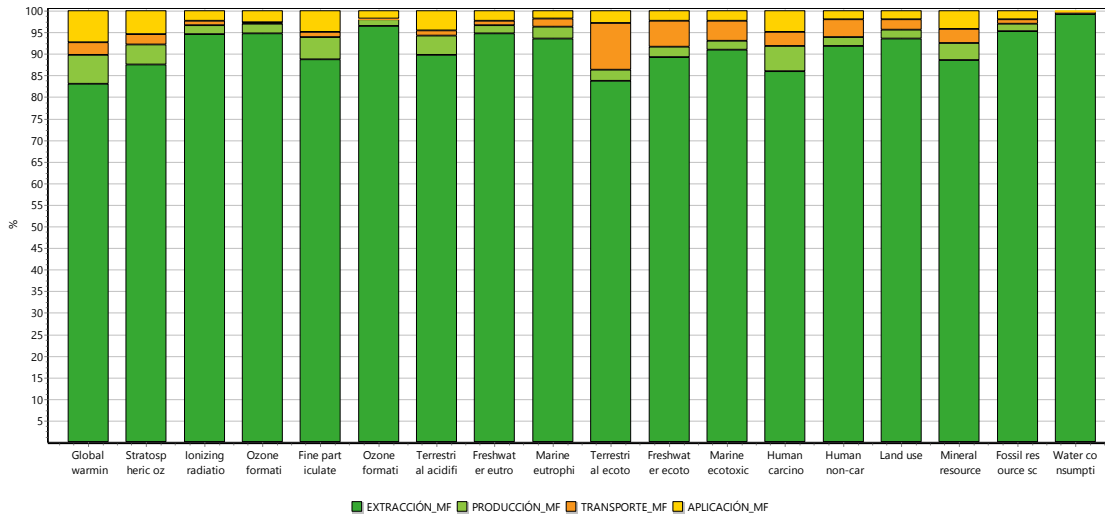


Figura.- 11 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en frío. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



Gráfica.- 2 Contribución por etapas: Pavimento asfáltico en frío. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



RAP con mezcla en caliente

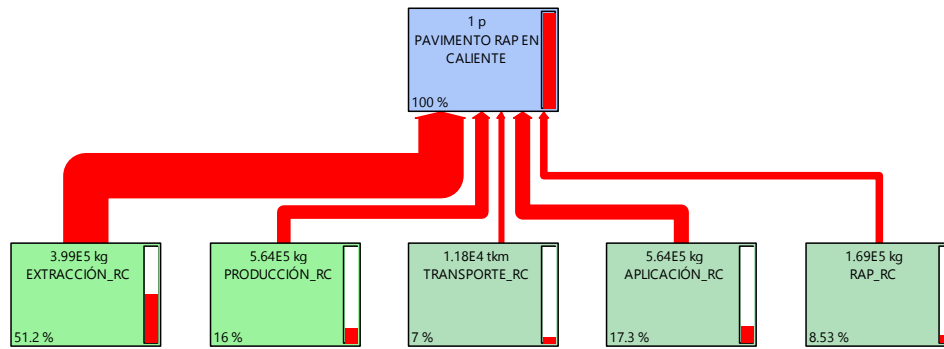
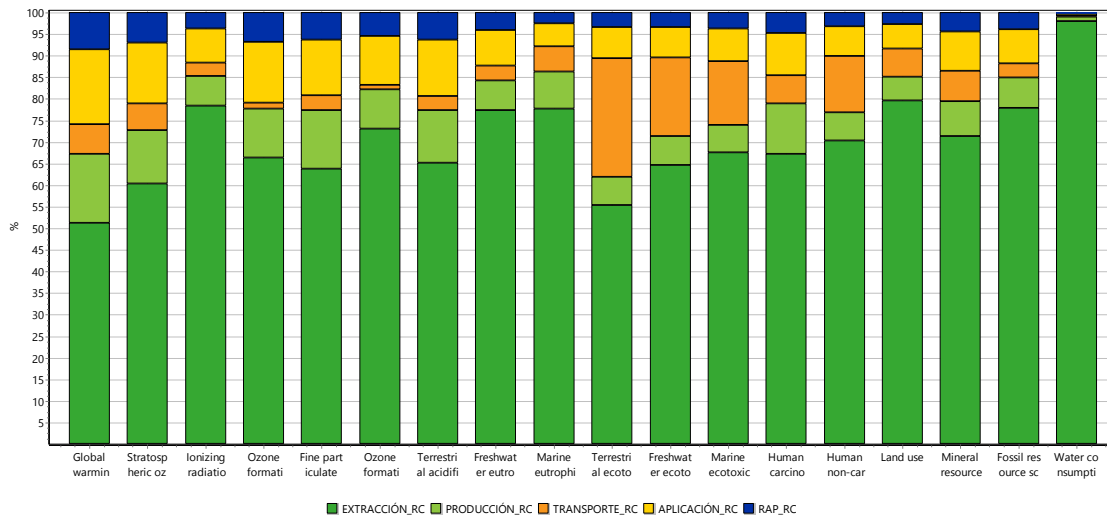


Figura.- 12 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en caliente. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



Gráfica.- 3 Contribución por etapas: RAP con mezcla en caliente. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



RAP con mezcla en frío

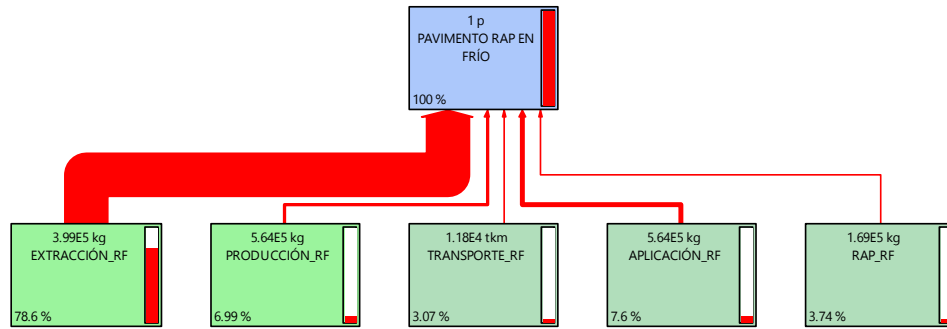
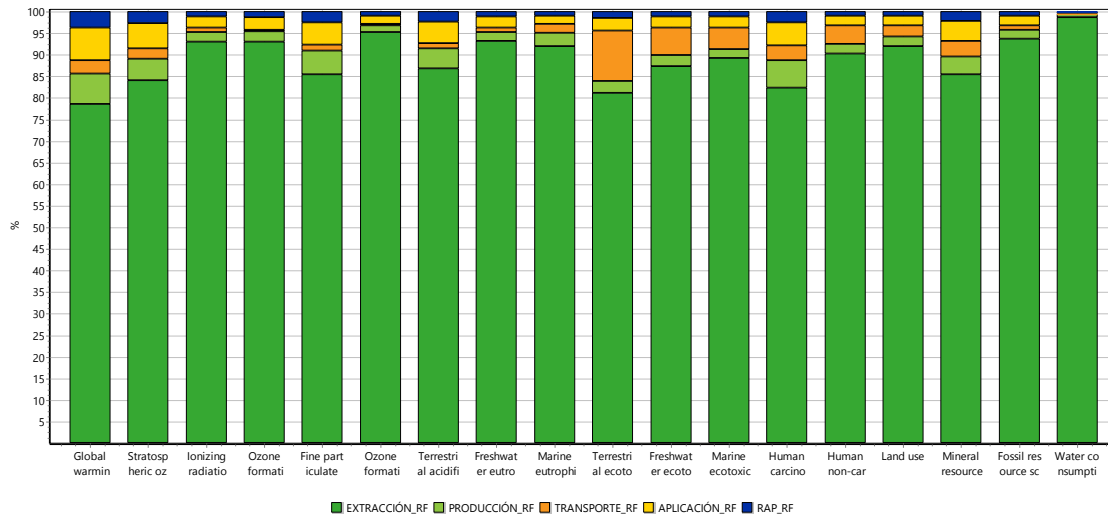


Figura.- 13 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en frío. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



Gráfica.- 4 Contribución por etapas: RAP con mezcla en frío. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

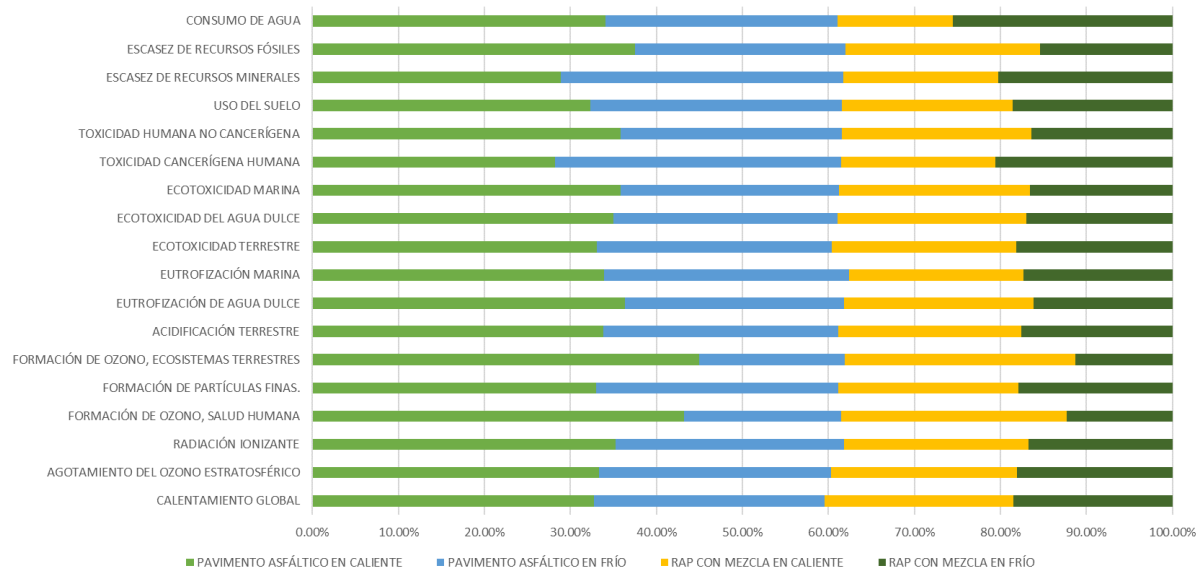




Tabla 28.- Impacto total por pavimento y por categoría de impacto. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

ETAPA/ PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	22,108.31	18,091.40	14,844.04	12,488.49
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	0.0247	0.0200	0.0160	0.0134
RADIACIÓN IONIZANTE	5,167.72	3,879.61	3,141.62	2,455.20
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	381.11	160.73	231.13	108.70
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	46.76	39.88	29.60	25.43
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRE	566.21	212.86	337.77	142.47
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	114.54	92.56	72.24	59.50
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	7.80	5.48	4.74	3.46
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1026	0.0861	0.0614	0.0524
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	73,221.29	60,332.59	47,425.97	40,163.97
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	43.80	32.57	27.43	21.28
ECOTOXICIDAD MARINA	759,943.67	539,628.35	472,170.22	351,180.06
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	21,774.74	25,700.53	13,852.28	15,943.48
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	710,971.37	510,707.04	436,646.13	326,080.33
USO DEL SUELO	1,063.47	961.64	650.89	611.72
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	59.60	67.84	37.21	41.76
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	24,583.38	16,012.29	14,829.63	10,112.33
CONSUMO DE AGUA	694.61	550.66	274.69	520.56

ETAPA/ PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	32.74%	26.79%	21.98%	18.49%
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	33.35%	26.97%	21.63%	18.06%
RADIACIÓN IONIZANTE	35.29%	26.49%	21.45%	16.77%
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	43.23%	18.23%	26.21%	12.33%
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	33.01%	28.15%	20.89%	17.95%
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRE	44.96%	16.90%	26.82%	11.31%
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	33.80%	27.32%	21.32%	17.56%
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	36.32%	25.51%	22.05%	16.12%
EUTROFIZACIÓN MARINA	33.92%	28.46%	20.29%	17.32%
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	33.11%	27.28%	21.45%	18.16%
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	35.02%	26.04%	21.93%	17.01%
ECOTOXICIDAD MARINA	35.80%	25.42%	22.24%	16.54%
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	28.18%	33.26%	17.93%	20.63%
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	35.83%	25.74%	22.00%	16.43%
USO DEL SUELO	32.35%	29.25%	19.80%	18.61%
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	28.87%	32.87%	18.03%	20.23%
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	37.51%	24.43%	22.63%	15.43%
CONSUMO DE AGUA	34.04%	26.99%	13.46%	25.51%





5.1.5. Interpretación y discusión de resultados

Esta sección se dedica a un análisis de los resultados obtenidos de la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) para cada escenario del estudio. Se examinan en detalle las contribuciones de cada etapa del ciclo de vida a los impactos ambientales, con una interpretación individualizada para cada categoría de impacto. Se resaltan las etapas y escenarios que generan los mayores y menores impactos, considerando siempre la Unidad Funcional (UF) definida: un tramo de carretera de 1 kilómetro de longitud y 3,5 metros de ancho y un espesor de 6.5 centímetros.

Las unidades son diversas y representan diferentes tipos de impactos ambientales, como emisiones de gases de efecto invernadero, agotamiento de la capa de ozono, formación de ozono, acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, toxicidad humana, uso de recursos y consumo de agua.

A continuación, procederemos a analizar los resultados teniendo en cuenta algunas consideraciones:

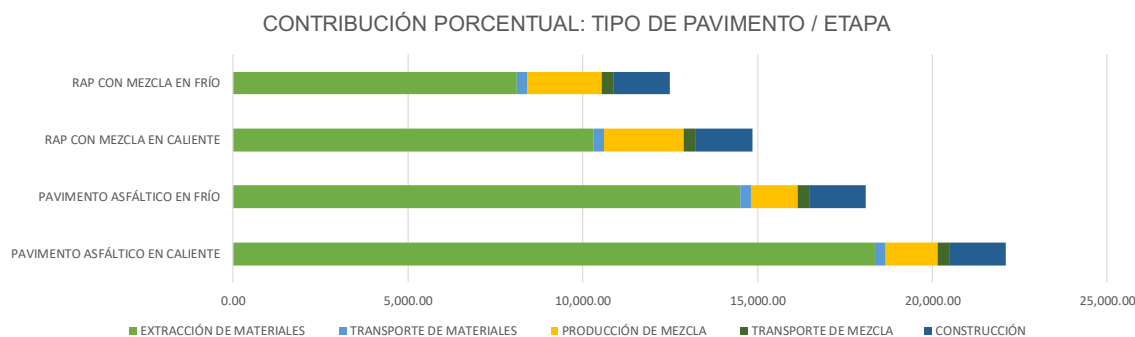
- **Impacto Ambiental Comparativo:** Compararemos los impactos ambientales de los diferentes tipos de pavimentos. Esto nos permitirá identificar cuáles tienen un menor impacto en cada categoría.
- **Unidades Comparativas:** Dado que las unidades de medida varían para diferentes tipos de impacto, debemos considerar estas diferencias al interpretar los resultados.
- **Interpretación Relativa:** En lugar de analizar los valores absolutos, nos centraremos en las diferencias relativas entre los diferentes tipos de pavimentos. Esto nos dará una idea más clara de cómo difieren en términos de impacto ambiental.





CALENTAMIENTO GLOBAL				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	18,352.77	14,507.74	10,298.33	8,110.58
TRANSPORTE DE MATERIALES	312.90	312.90	312.90	312.90
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1,485.00	1,317.19	2,279.24	2,111.43
TRANSPORTE DE MEZCLA	338.97	338.97	338.97	338.97
CONSTRUCCIÓN	1,618.67	1,614.60	1,614.60	1,614.60
TOTAL	22,108.31	18,091.40	14,844.04	12,488.49
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	82%	67%	56%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	83.01%	80.19%	69.38%	64.94%
TRANSPORTE DE MATERIALES	1.42%	1.73%	2.11%	2.51%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	6.72%	7.28%	15.35%	16.91%
TRANSPORTE DE MEZCLA	1.53%	1.87%	2.28%	2.71%
CONSTRUCCIÓN	7.32%	8.92%	10.88%	12.93%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

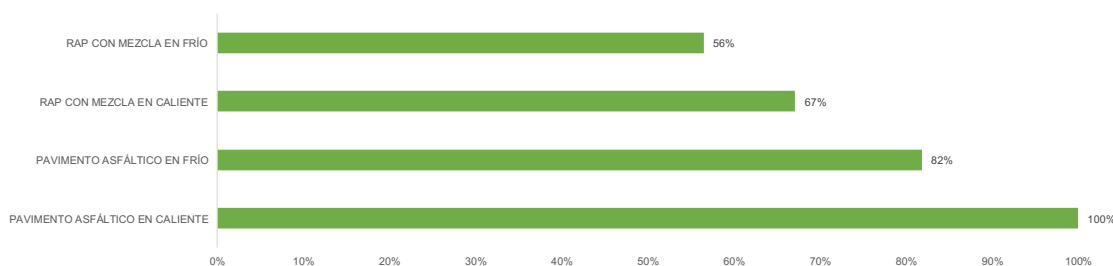


Figura.- 14 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría de calentamiento global. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Es la etapa con mayor impacto en todas las categorías de pavimento. El pavimento asfáltico en caliente emite 18,352.77 kg CO₂ eq, representando el 83.01% del total de su impacto. El RAP con mezcla en frío tiene la menor emisión en esta etapa con 8,110.58 kg CO₂ eq, que es el 64.94% del total de su impacto.





Transporte de Materiales: Representa una pequeña proporción del impacto total, variando entre 1.42% y 2.51% del impacto total en cada tipo de pavimento. Las emisiones son uniformes en esta etapa con 312.90 kg CO₂ eq para cada tipo.

Producción de Mezcla: Este proceso tiene un impacto variable entre los tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío tiene el mayor impacto en producción con 2,111.43 kg CO₂ eq, representando el 16.91% del total. En contraste, el pavimento asfáltico en caliente tiene el menor impacto con 1,485.00 kg CO₂ eq (6.72% del total).

Transporte de Mezcla: Similar al transporte de materiales, representa una pequeña fracción del impacto total, con emisiones de 338.97 kg CO₂ eq en cada tipo de pavimento, variando entre 1.53% y 2.71% del impacto total.

Construcción: La etapa de construcción tiene un impacto considerable, con el RAP con mezcla en frío mostrando el mayor impacto con 1,614.60 kg CO₂ eq (12.93% del total). El pavimento asfáltico en caliente tiene el menor impacto en construcción con 1,618.67 kg CO₂ eq (7.32% del total).

Comparación General: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto total con 22,108.31 kg CO₂ eq. El pavimento RAP con mezcla en frío presenta el menor impacto total con 12,488.49 kg CO₂ eq. En términos porcentuales, el pavimento asfáltico en caliente representa el 100% del impacto total comparado, mientras que el RAP con mezcla en frío muestra un 56% del impacto del pavimento asfáltico en caliente.

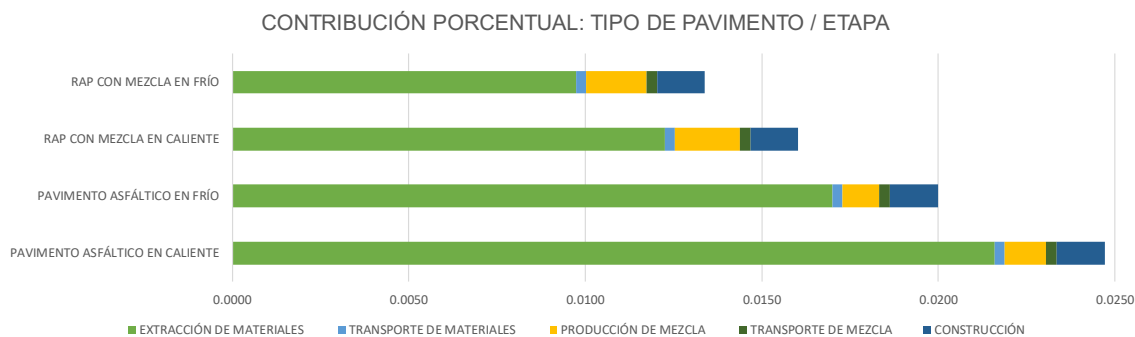
Conclusión: El análisis indica que el tipo de pavimento tiene un impacto significativo en las emisiones de CO₂ equivalente. El pavimento RAP con mezcla en frío se destaca como la opción más eficiente en términos de menor impacto ambiental total, especialmente debido a sus menores emisiones en la extracción de materiales y producción de mezcla. Esto sugiere que la adopción de RAP con mezcla en frío podría ser una estrategia efectiva para mitigar el impacto ambiental en la construcción de pavimentos.





AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRICO				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	0.0216	0.0170	0.0123	0.0097
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.0012	0.0010	0.0018	0.0017
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
CONSTRUCCIÓN	0.0014	0.0013	0.0013	0.0013
TOTAL	0.02	0.02	0.02	0.01
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	81%	65%	54%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	87.42%	85.12%	76.48%	72.81%
TRANSPORTE DE MATERIALES	1.14%	1.41%	1.76%	2.11%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	4.73%	5.19%	11.43%	12.71%
TRANSPORTE DE MEZCLA	1.24%	1.53%	1.91%	2.29%
CONSTRUCCIÓN	5.47%	6.75%	8.41%	10.08%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

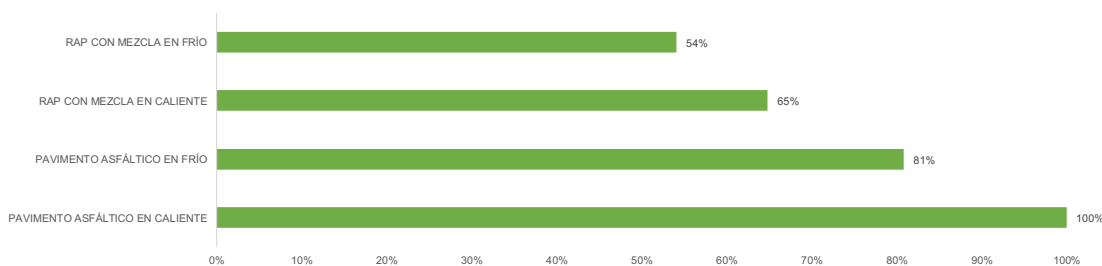


Figura.- 15 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría de agotamiento del ozono estratosférico. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción significativa en el agotamiento del ozono estratosférico al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío en comparación con el pavimento asfáltico en caliente. El RAP con mezcla en frío tiene la contribución más baja en esta etapa, con una reducción del 54.9% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





Transporte de Materiales: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen con un porcentaje similar al impacto total.

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene una mayor contribución en comparación con los pavimentos asfálticos, tanto en caliente como en frío. El RAP con mezcla en caliente tiene la contribución más alta en esta etapa, con un aumento del 36% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.

Transporte de Mezcla: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen con un porcentaje similar al impacto total.

Construcción: Se observa que el RAP con mezcla en frío tiene la mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 10.08% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.

Comparaciones Porcentuales

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: -19%
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: -35%
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: -46%
- RAP con Mezcla en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: -33%

En general, el pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío muestra la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 54.9% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	361.06	141.65	205.92	84.45
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.49	0.49	0.49	0.49
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	8.51	7.55	13.68	12.72
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.53	0.53	0.53	0.53
CONSTRUCCIÓN	10.52	10.51	10.51	10.51
TOTAL	381.11	160.73	231.13	108.70
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	42%	61%	29%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	94.74%	88.13%	89.09%	77.69%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.13%	0.30%	0.21%	0.45%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.23%	4.70%	5.92%	11.70%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.14%	0.33%	0.23%	0.49%
CONSTRUCCIÓN	2.76%	6.54%	4.55%	9.67%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

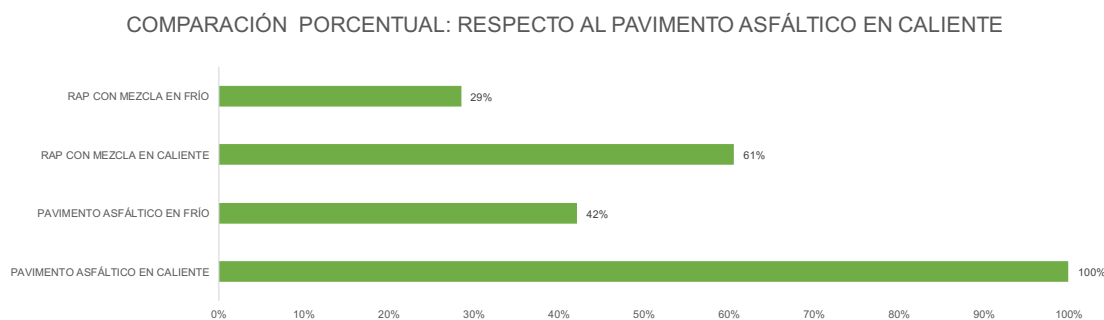
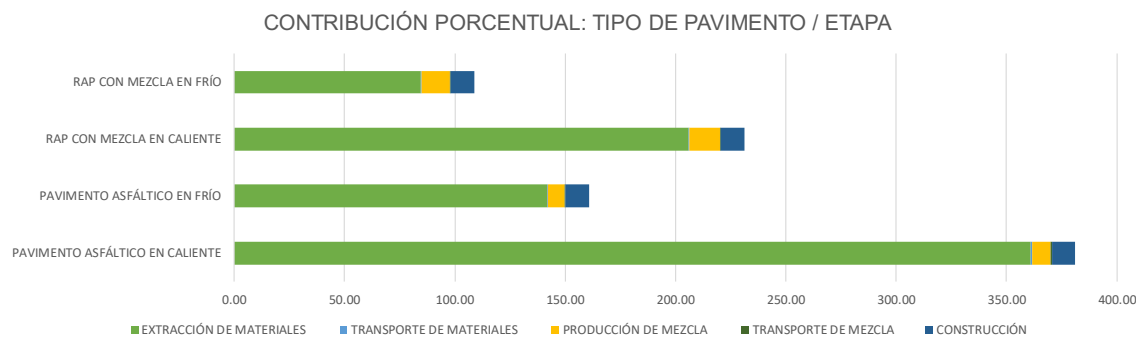


Figura.- 16 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría de formación de ozono, Salud humana. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

La extracción de materiales es la etapa con mayor impacto en términos de emisiones de NOx eq para todos los tipos de pavimento, destacándose significativamente en comparación con otras etapas. Los resultados son los siguientes:

- Pavimento Asfáltico en Caliente: 361.06 kg NOx eq, representando el 94.74% del total de emisiones para este tipo de pavimento.
- Pavimento Asfáltico en Frío: 141.65 kg NOx eq, que constituye el 88.13% del total.





- RAP con Mezcla en Caliente: 205.92 kg NOx eq, equivalentes al 89.09% del total.
- RAP con Mezcla en Frío: 84.45 kg NOx eq, con el 77.69% del total.

El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en la extracción de materiales, lo que refleja una mayor demanda de recursos o procesos más intensivos en NOx. En contraste, el RAP con mezcla en frío presenta las menores emisiones en esta etapa, lo que sugiere una opción más sostenible en términos de extracción de materiales.

Transporte de Materiales: El transporte de materiales tiene un impacto relativamente bajo en comparación con otras etapas del proceso: Todos los Tipos de Pavimento: 0.49 kg NOx eq, lo que representa entre el 0.13% y el 0.45% del impacto total.

Este bajo impacto indica que el transporte de materiales es menos relevante en términos de contribución a las emisiones totales de NOx en comparación con las etapas de extracción y producción.

Producción de Mezcla: La producción de mezcla muestra variaciones significativas en el impacto ambiental dependiendo del tipo de pavimento:

- Pavimento Asfáltico en Caliente: 8.51 kg NOx eq, representando el 2.23% del total.
- Pavimento Asfáltico en Frío: 7.55 kg NOx eq, que equivale al 4.70% del total.
- RAP con Mezcla en Caliente: 13.68 kg NOx eq, que representa el 5.92% del total.
- RAP con Mezcla en Frío: 12.72 kg NOx eq, correspondiente al 11.70% del total.

Las emisiones durante la producción de mezcla son notablemente más altas en los pavimentos RAP, especialmente en el RAP con mezcla en frío, lo que indica que estos procesos pueden ser más intensivos en NOx.

Transporte de Mezcla: El transporte de mezcla tiene un impacto uniforme entre las categorías de pavimento: Todos los Tipos de Pavimento: 0.53 kg NOx eq, representando entre el 0.14% y el 0.49% del total. Al igual que el transporte de materiales, el transporte de mezcla





contribuye mínimamente al impacto total de NO_x, reflejando que esta etapa es de menor relevancia en el contexto de las emisiones globales.

Construcción: La etapa de construcción también contribuye de manera significativa al impacto ambiental:

- Pavimento Asfáltico en Caliente: 10.52 kg NO_x eq, que equivale al 2.76% del total.
- Pavimento Asfáltico en Frío: 10.51 kg NO_x eq, representando el 6.54% del total.
- RAP con Mezcla en Caliente: 10.51 kg NO_x eq, que constituye el 4.55% del total.
- RAP con Mezcla en Frío: 10.51 kg NO_x eq, correspondiente al 9.67% del total.

El impacto en la construcción es relativamente similar entre los tipos de pavimento, aunque el RAP con mezcla en frío muestra una mayor proporción del impacto en esta etapa.

Comparación General:

- Pavimento Asfáltico en Caliente: 381.11 kg NO_x eq, representando el 100% del impacto total.
- Pavimento Asfáltico en Frío: 160.73 kg NO_x eq, que equivale al 42% del total.
- RAP con Mezcla en Caliente: 231.13 kg NO_x eq, que constituye el 61% del total.
- RAP con Mezcla en Frío: 108.70 kg NO_x eq, representando el 29% del total.

El pavimento asfáltico en caliente presenta el mayor impacto global en términos de emisiones de NO_x, mientras que el RAP con mezcla en frío muestra el menor impacto total. Esta reducción en el impacto global se debe principalmente a sus menores emisiones en la extracción de materiales y en la producción de mezcla.

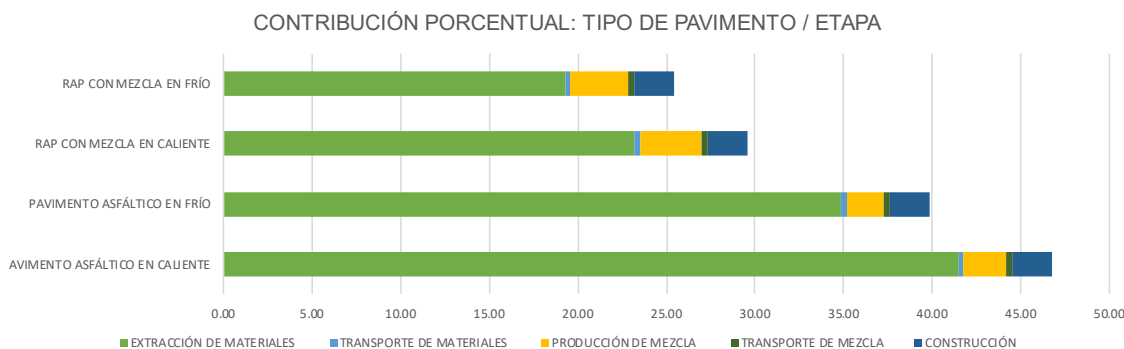
Conclusión: Estos hallazgos sugieren que la elección de pavimentos con menor impacto ambiental, especialmente en las etapas de extracción y producción, puede ser una estrategia efectiva para reducir las emisiones de NO_x en la construcción de pavimentos. La adopción de prácticas más sostenibles en estas etapas podría contribuir significativamente a la reducción del impacto ambiental global de los proyectos de pavimentación.





FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	41.46	34.85	23.18	19.29
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.30	0.30	0.30	0.30
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.39	2.12	3.51	3.24
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.32	0.32	0.32	0.32
CONSTRUCCIÓN	2.29	2.28	2.28	2.28
TOTAL	46.76	39.88	29.60	25.43
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	85%	63%	54%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	88.65%	87.40%	78.32%	75.83%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.64%	0.75%	1.01%	1.18%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	5.11%	5.32%	11.87%	12.75%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.69%	0.81%	1.09%	1.27%
CONSTRUCCIÓN	4.90%	5.72%	7.71%	8.97%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

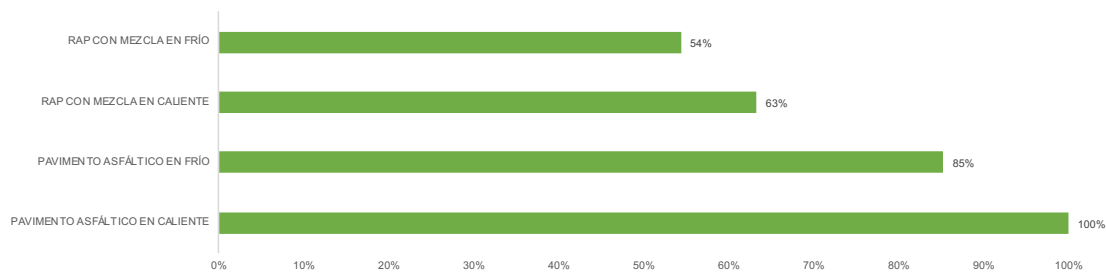


Figura.- 17 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría de formación de partículas finas. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: La etapa que contribuye en mayor medida a la formación de partículas finas en todos los tipos de pavimento:

- Pavimento Asfáltico en Caliente: 41.46 kg PM2.5 eq, representando el 88.65% del impacto total.
- Pavimento Asfáltico en Frío: 34.85 kg PM2.5 eq, que constituye el 87.40% del total.





- RAP con Mezcla en Caliente: 23.18 kg PM2.5 eq, equivalente al 78.32% del total.
- RAP con Mezcla en Frío: 19.29 kg PM2.5 eq, con el 75.83% del total.

El pavimento asfáltico en caliente presenta el mayor impacto en la extracción de materiales, lo que indica que esta etapa tiene un efecto considerable en la formación de partículas finas. El RAP con mezcla en frío muestra una reducción en el impacto en esta etapa, sugiriendo una menor generación de partículas durante la extracción.

Transporte de Materiales: El impacto del transporte de materiales es relativamente bajo en comparación con otras etapas, representando entre el 0.64% y el 1.18% del total. A pesar de ser una etapa esencial, el transporte de materiales contribuye de manera mínima a la formación de partículas finas en comparación con la extracción de materiales.

Producción de Mezcla: La producción de mezcla también contribuye significativamente al impacto en términos de formación de partículas finas:

- Pavimento Asfáltico en Caliente: 2.39 kg PM2.5 eq, que equivale al 5.11% del total.
- Pavimento Asfáltico en Frío: 2.12 kg PM2.5 eq, representando el 5.32% del total.
- RAP con Mezcla en Caliente: 3.51 kg PM2.5 eq, correspondiente al 11.87% del total.
- RAP con Mezcla en Frío: 3.24 kg PM2.5 eq, que constituye el 12.75% del total.

El impacto en la producción de mezcla es más alto en los pavimentos RAP, especialmente en el RAP con mezcla en frío, indicando un mayor potencial para la formación de partículas finas durante esta etapa.

Transporte de Mezcla: Esta etapa muestra una contribución modesta al total de formación de partículas finas, similar al transporte de materiales.

Construcción: La etapa de construcción también tiene una contribución notable: 2.29 kg PM2.5 eq para el asfáltico en caliente y 2.28 kg PM2.5 eq para los otros tipos de pavimento, que representan entre el 4.90% y el 8.97% del total.





La etapa de construcción, aunque significativa, tiene un impacto menor en comparación con la extracción de materiales y la producción de mezcla.

Comparación General:

- Pavimento Asfáltico en Caliente: 46.76 kg PM2.5 eq (100% del impacto total).
- Pavimento Asfáltico en Frío: 39.88 kg PM2.5 eq (85% del total).
- RAP con Mezcla en Caliente: 29.60 kg PM2.5 eq (63% del total).
- RAP con Mezcla en Frío: 25.43 kg PM2.5 eq (54% del total).

El pavimento asfáltico en caliente muestra el mayor impacto global en términos de formación de partículas finas, mientras que el RAP con mezcla en frío presenta el menor impacto total, principalmente debido a sus menores emisiones en la extracción de materiales y en la producción de mezcla.

Construcción: La contribución de la construcción es similar entre los diferentes tipos de pavimento, con porcentajes que van desde el 4.90% al 8.97%. El RAP con mezcla en frío tiene la mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 36% respecto al pavimento asfáltico en caliente.





FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRESTRES				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	545.82	193.45	312.13	117.81
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.51	0.51	0.51	0.51
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	8.64	7.66	13.89	12.91
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.56	0.56	0.56	0.56
CONSTRUCCIÓN	10.68	10.67	10.67	10.67
TOTAL	566.21	212.86	337.77	142.47
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	38%	60%	25%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	96.40%	90.88%	92.41%	82.69%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.09%	0.24%	0.15%	0.36%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.53%	3.60%	4.11%	9.06%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.10%	0.26%	0.16%	0.39%
CONSTRUCCIÓN	1.89%	5.01%	3.16%	7.49%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

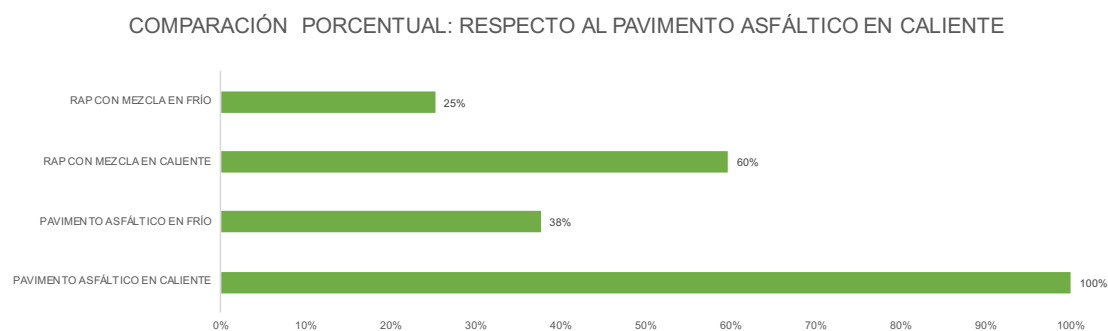
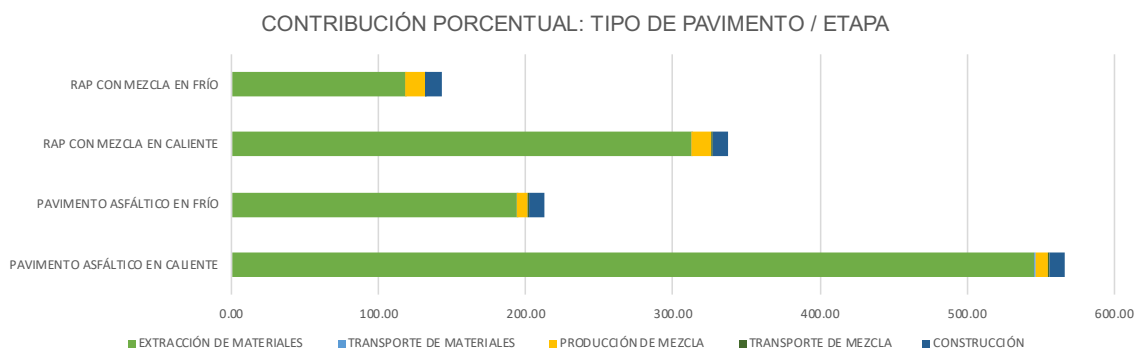


Figura.- 18 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría formación de ozono, ecosistemas terrestres. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: El pavimento asfáltico en caliente contribuye significativamente a la formación de ozono y afecta a los ecosistemas terrestres en la etapa de extracción de materiales, representando casi el 45% del impacto total. Sin embargo, el pavimento asfáltico en frío y el RAP con mezcla en caliente y en frío muestran una reducción considerable en





comparación con el pavimento asfáltico en caliente, con disminuciones del 65%, 43%, y 74%, respectivamente.

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 40% y 33%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

Construcción: El RAP con mezcla en frío muestra la mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 33% respecto al pavimento asfáltico en caliente.

Comparaciones Porcentuales:

Pavimento Asfáltico en Caliente: Total: 566.21 kg NOx eq

Pavimento Asfáltico en Frío: Total: 212.86 kg NOx eq. Diferencia respecto al Pavimento Asfáltico en Caliente: 353.35 kg NOx eq menos (una reducción del 62.37%)

RAP con Mezcla en Caliente: Total: 337.77 kg NOx eq. Diferencia respecto al Pavimento Asfáltico en Caliente: 228.44 kg NOx eq menos (una reducción del 40.33%)

RAP con Mezcla en Frío: Total: 142.47 kg NOx eq. Diferencia respecto al Pavimento Asfáltico en Caliente: 423.74 kg NOx eq menos (una reducción del 74.86%)

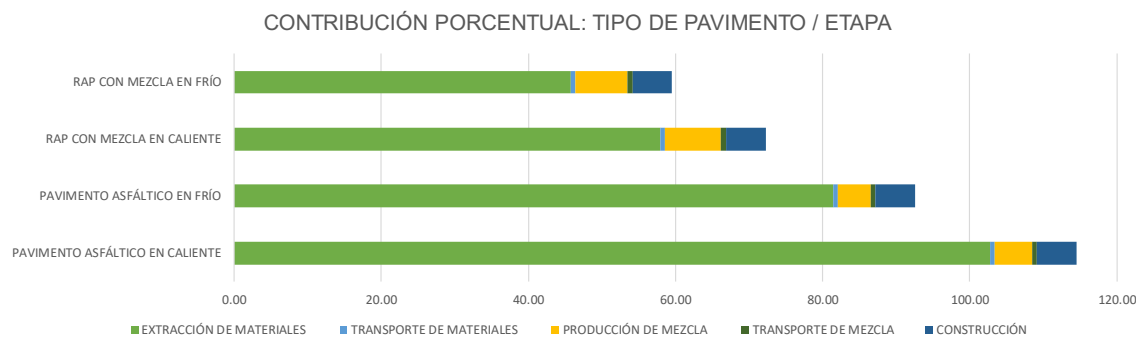
El pavimento asfáltico en caliente muestra el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 75% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





ACIDIFICACIÓN TERRESTRE				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	102.80	81.40	57.88	45.71
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.65	0.65	0.65	0.65
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	5.01	4.45	7.65	7.08
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.71	0.71	0.71	0.71
CONSTRUCCIÓN	5.37	5.35	5.35	5.35
TOTAL	114.54	92.56	72.24	59.50
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	81%	63%	52%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	89.75%	87.94%	80.12%	76.82%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.57%	0.71%	0.90%	1.10%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	4.38%	4.81%	10.59%	11.90%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.62%	0.76%	0.98%	1.19%
CONSTRUCCIÓN	4.68%	5.78%	7.41%	9.00%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

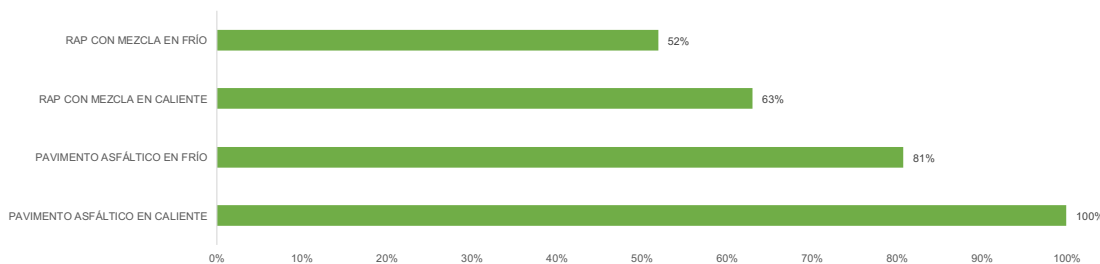


Figura.- 19 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría acidificación terrestre.
Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción en las emisiones al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP en comparación con el pavimento asfáltico en caliente, con porcentajes del 19% y 37% menos, respectivamente. El RAP con mezcla en frío muestra la contribución más baja en esta etapa, representando un 48% menos respecto al pavimento asfáltico en caliente.





- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 1.81% menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 9.63% menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 12.93% menos

Transporte de Materiales: Todos los tipos de pavimento tienen contribuciones similares en esta etapa, con porcentajes bajos en comparación con otras etapas.

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 0.14% más
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 0.33% más
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 0.53% más

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 37% y 36%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

Transporte de Mezcla: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar.

Construcción: El RAP con mezcla en frío muestra la mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 9% respecto al pavimento asfáltico en caliente.

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 1.10% menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 2.73% menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 4.32% menos

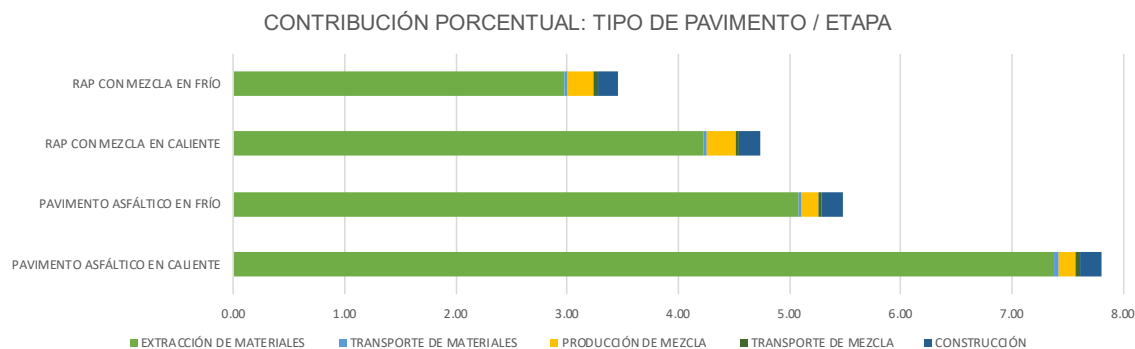
El pavimento asfáltico en caliente muestra el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 48% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	7.38	5.08	4.22	2.97
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.04	0.04	0.04	0.04
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.16	0.14	0.25	0.23
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.04	0.04	0.04	0.04
CONSTRUCCIÓN	0.19	0.19	0.19	0.19
TOTAL	7.80	5.48	4.74	3.46
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	70%	61%	44%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	94.61%	92.66%	89.19%	85.73%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.47%	0.67%	0.78%	1.07%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.01%	2.54%	5.25%	6.66%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.51%	0.73%	0.84%	1.15%
CONSTRUCCIÓN	2.39%	3.40%	3.93%	5.38%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

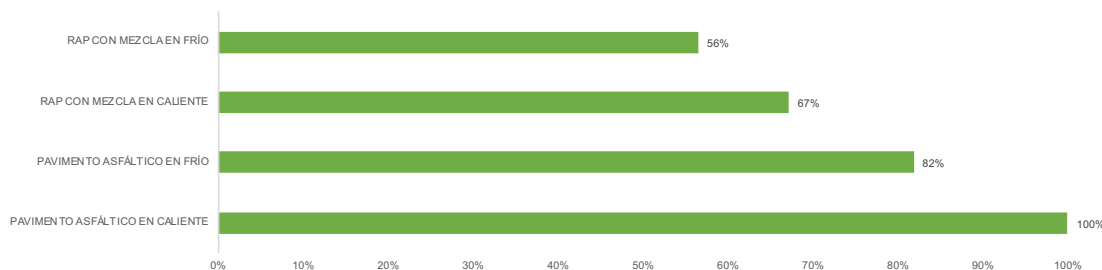


Figura.- 20 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría eutrofización de agua dulce. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción significativa en las emisiones al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP en comparación con el pavimento asfáltico en caliente, con porcentajes del 30% y 39% menos, respectivamente. El RAP con mezcla en frío muestra la contribución más baja en esta etapa, con una reducción del 56% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 2.30 kg P eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 3.16 kg P eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 4.41 kg P eq menos

Transporte de Materiales: Todos los tipos de pavimento tienen contribuciones similares en esta etapa, aunque el RAP con mezcla en frío muestra una ligera mayor contribución.

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 39% y 37%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 0.02 kg P eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 0.09 kg P eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 0.07 kg P eq menos

Transporte de Mezcla: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar.

Construcción: El RAP con mezcla en frío muestra una mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 5.38% respecto al pavimento asfáltico en caliente.

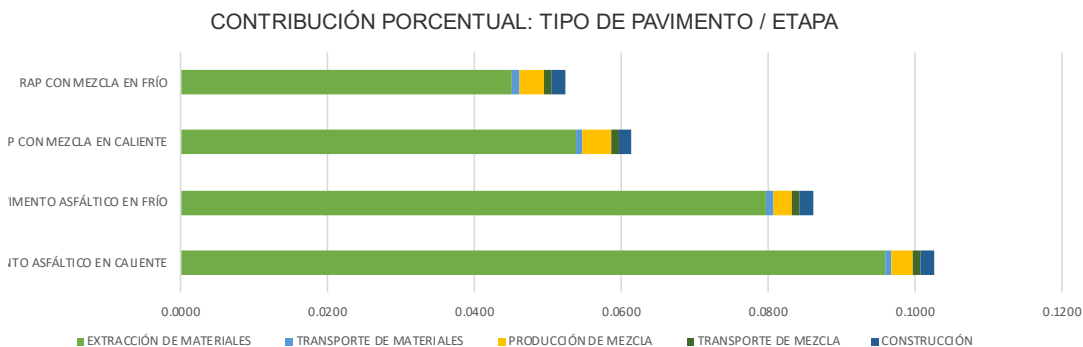
Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 56% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





EUTROFIZACIÓN MARINA				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	0.0959	0.0798	0.0538	0.0451
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.0029	0.0026	0.0038	0.0035
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
CONSTRUCCIÓN	0.0019	0.0018	0.0018	0.0018
TOTAL	0.10	0.09	0.06	0.05
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	84%	60%	51%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	93.44%	92.61%	87.64%	86.15%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.91%	1.08%	1.52%	1.78%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.85%	3.01%	6.22%	6.66%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.99%	1.18%	1.65%	1.93%
CONSTRUCCIÓN	1.81%	2.12%	2.97%	3.48%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

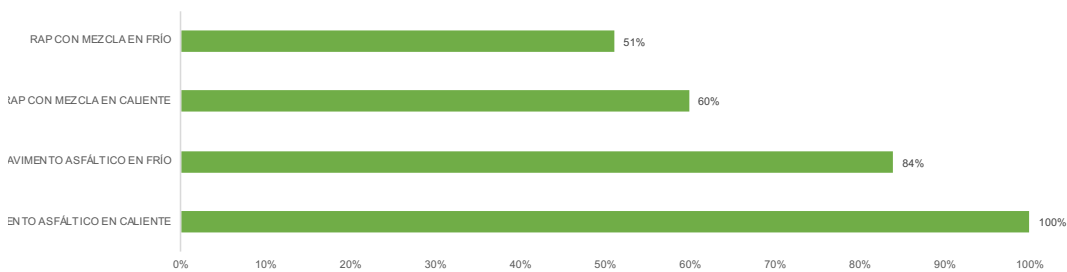


Figura.- 21 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría eutrofización marina. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.





Extracción de Materiales: Se observa una reducción en las emisiones al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP en comparación con el pavimento asfáltico en caliente, con reducciones del 40% y 49%, respectivamente. El RAP con mezcla en frío muestra la contribución más baja en esta etapa, con una reducción del 49% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 0.0161 kg N eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 0.0421 kg N eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 0.0508 kg N eq menos

Transporte de Materiales: Todos los tipos de pavimento tienen contribuciones similares en esta etapa.

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 40% y 39%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

Transporte de Mezcla: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar.

Construcción: El RAP con mezcla en frío muestra una mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 3.48% respecto al pavimento asfáltico en caliente.

Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 49% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.



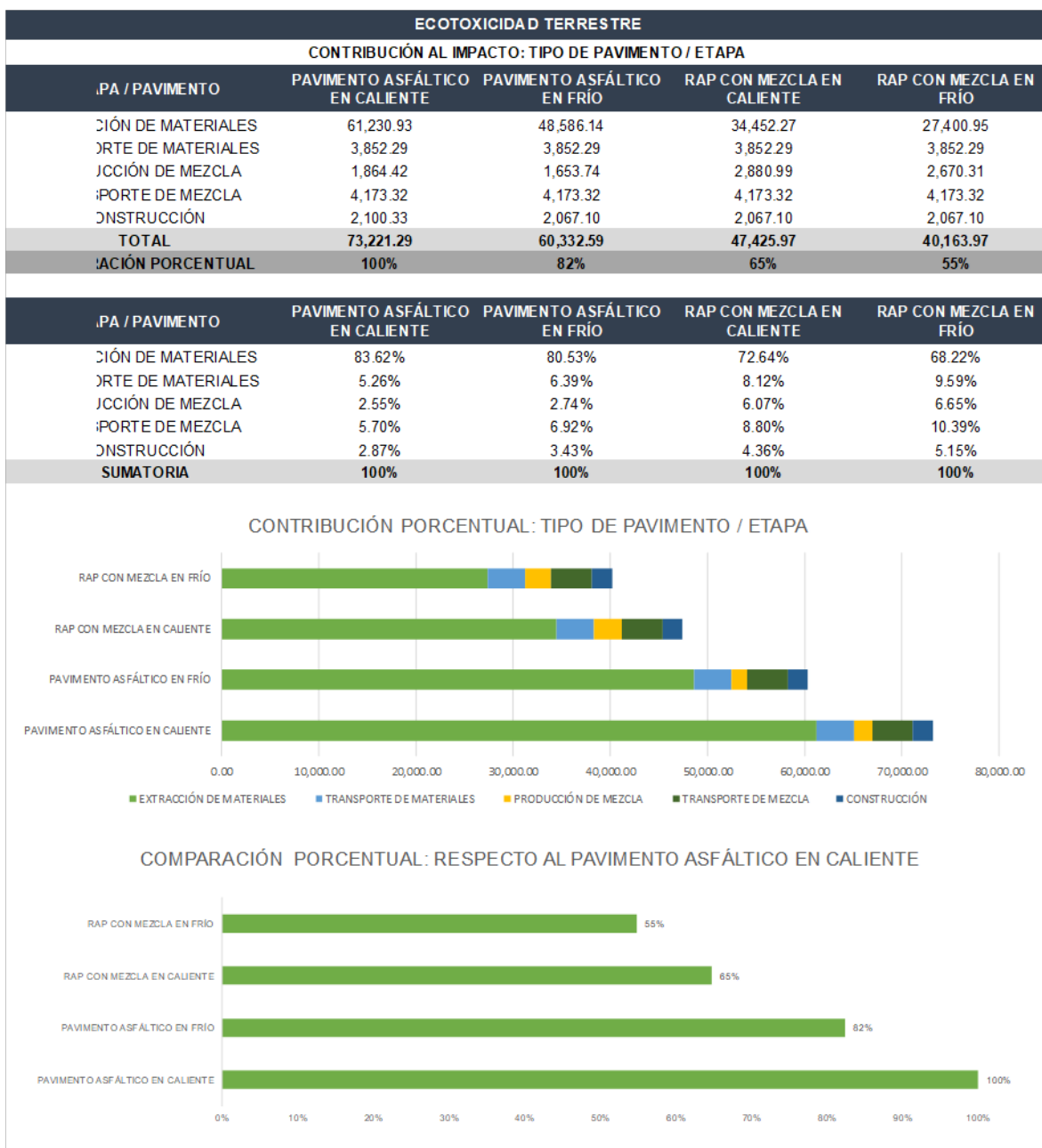


Figura.- 22 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría ecotoxicidad terrestre. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción en las emisiones de ecotoxicidad terrestre al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío en comparación con el pavimento asfáltico en caliente. El RAP con mezcla en frío muestra la contribución más baja en esta etapa, con una reducción del 45% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 12,644.79 kg 1,4-DCB menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 26,778.66 kg 1,4-DCB menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 33,830.98 kg 1,4-DCB menos

Transporte de Materiales y de Mezcla: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar.

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 35% y 33%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 210.68 kg 1,4-DCB menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 1,016.57 kg 1,4-DCB menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 806.89 kg 1,4-DCB menos

Construcción: El RAP con mezcla en frío muestra una mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 5.15% respecto al pavimento asfáltico en caliente.

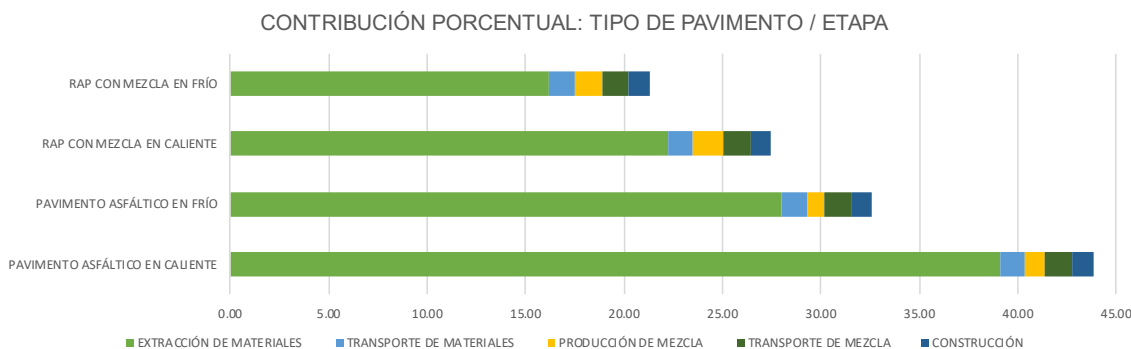
Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 45% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	39.10	27.98	22.22	16.18
TRANSPORTE DE MATERIALES	1.28	1.28	1.28	1.28
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.99	0.88	1.50	1.39
TRANSPORTE DE MEZCLA	1.39	1.39	1.39	1.39
CONSTRUCCIÓN	1.04	1.03	1.03	1.03
TOTAL	43.80	32.57	27.43	21.28
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	74%	63%	49%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	89.26%	85.91%	81.02%	76.06%
TRANSPORTE DE MATERIALES	2.93%	3.94%	4.68%	6.03%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.27%	2.71%	5.48%	6.53%
TRANSPORTE DE MEZCLA	3.17%	4.27%	5.07%	6.53%
CONSTRUCCIÓN	2.37%	3.17%	3.76%	4.85%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

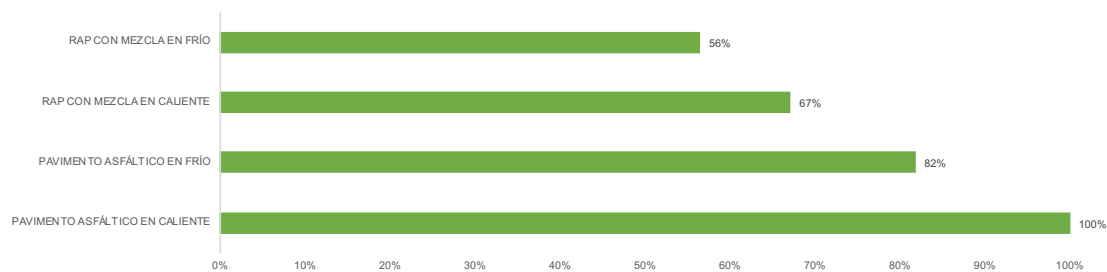


Figura.- 23 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría ecotoxicidad del agua dulce. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción en las emisiones de ecotoxicidad del agua dulce al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío en comparación con el pavimento asfáltico en caliente. El RAP con mezcla en frío muestra la contribución más baja en esta etapa, con una reducción del 51% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





Transporte de Materiales: Todos los tipos de pavimento tienen contribuciones similares en esta etapa.

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 37% y 35%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

Transporte de Mezcla: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar.

Construcción: El RAP con mezcla en frío muestra una mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 4.85% respecto al pavimento asfáltico en caliente.

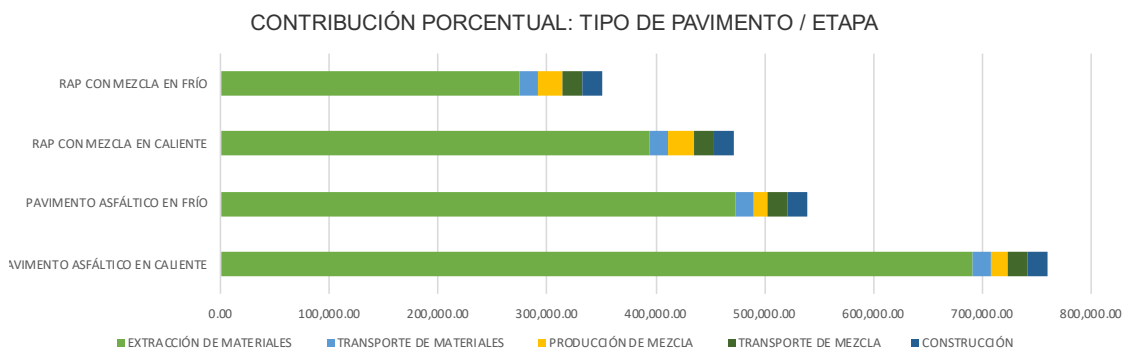
Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 51% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





ECOTOXICIDAD MARINA				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	690,976.82	472,440.99	394,300.40	275,043.92
TRANSPORTE DE MATERIALES	16,985.72	16,985.72	16,985.72	16,985.72
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	15,342.27	13,608.59	24,291.04	22,557.37
TRANSPORTE DE MEZCLA	18,401.19	18,401.19	18,401.19	18,401.19
CONSTRUCCIÓN	18,237.68	18,191.86	18,191.86	18,191.86
TOTAL	759,943.68	539,628.35	472,170.22	351,180.06
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	71%	62%	46%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	90.92%	87.55%	83.51%	78.32%
TRANSPORTE DE MATERIALES	2.24%	3.15%	3.60%	4.84%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.02%	2.52%	5.14%	6.42%
TRANSPORTE DE MEZCLA	2.42%	3.41%	3.90%	5.24%
CONSTRUCCIÓN	2.40%	3.37%	3.85%	5.18%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

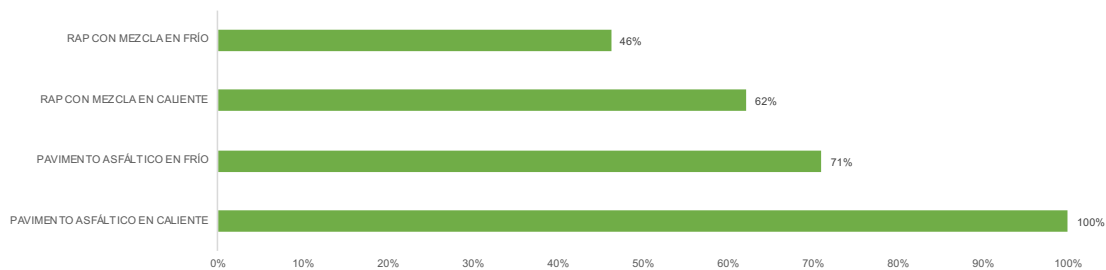


Figura.- 24 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría ecotoxicidad marina. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción en las emisiones de ecotoxicidad marina al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío en comparación con el pavimento asfáltico en caliente. El RAP con mezcla en frío muestra la contribución más baja en esta etapa, con una reducción del 54% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 218,535.83 kg N eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 415,933.90 kg N eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 415,932.90 kg N eq menos

Transporte de Materiales y Transporte de Mezcla: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en estas etapas. Todos contribuyen de manera similar.

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 38% y 35%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 1,733.68 kg N eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 9,050.77 kg N eq menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 5,784.10 kg N eq menos

Construcción: El RAP con mezcla en frío muestra una mayor contribución en esta etapa, con un aumento del 5.18% respecto al pavimento asfáltico en caliente.

Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 54% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.



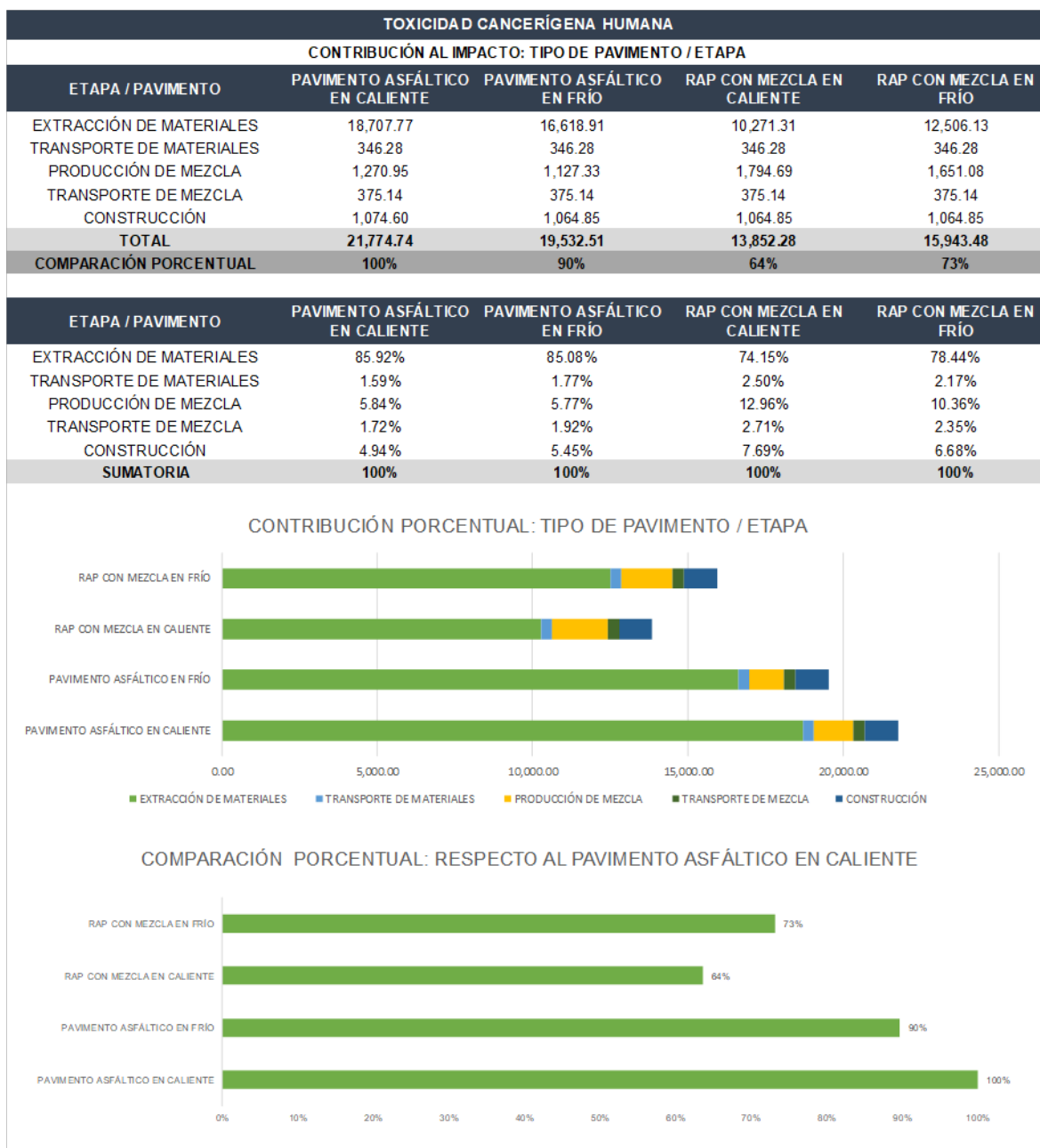


Figura.- 25 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría toxicidad cancerígena humana. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción en las emisiones de toxicidad cancerígena humana al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío en comparación con el pavimento asfáltico en caliente. El RAP con mezcla en caliente y en frío muestra la contribución más baja en esta etapa, con una reducción del 10% y 36%, respectivamente, en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





Transporte de Materiales: Todos los tipos de pavimento tienen contribuciones similares en esta etapa.

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 10% y 36%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

Transporte de Mezcla: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar.

Construcción: El pavimento asfáltico en caliente y en frío muestra contribuciones similares en esta etapa.

Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 36% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.



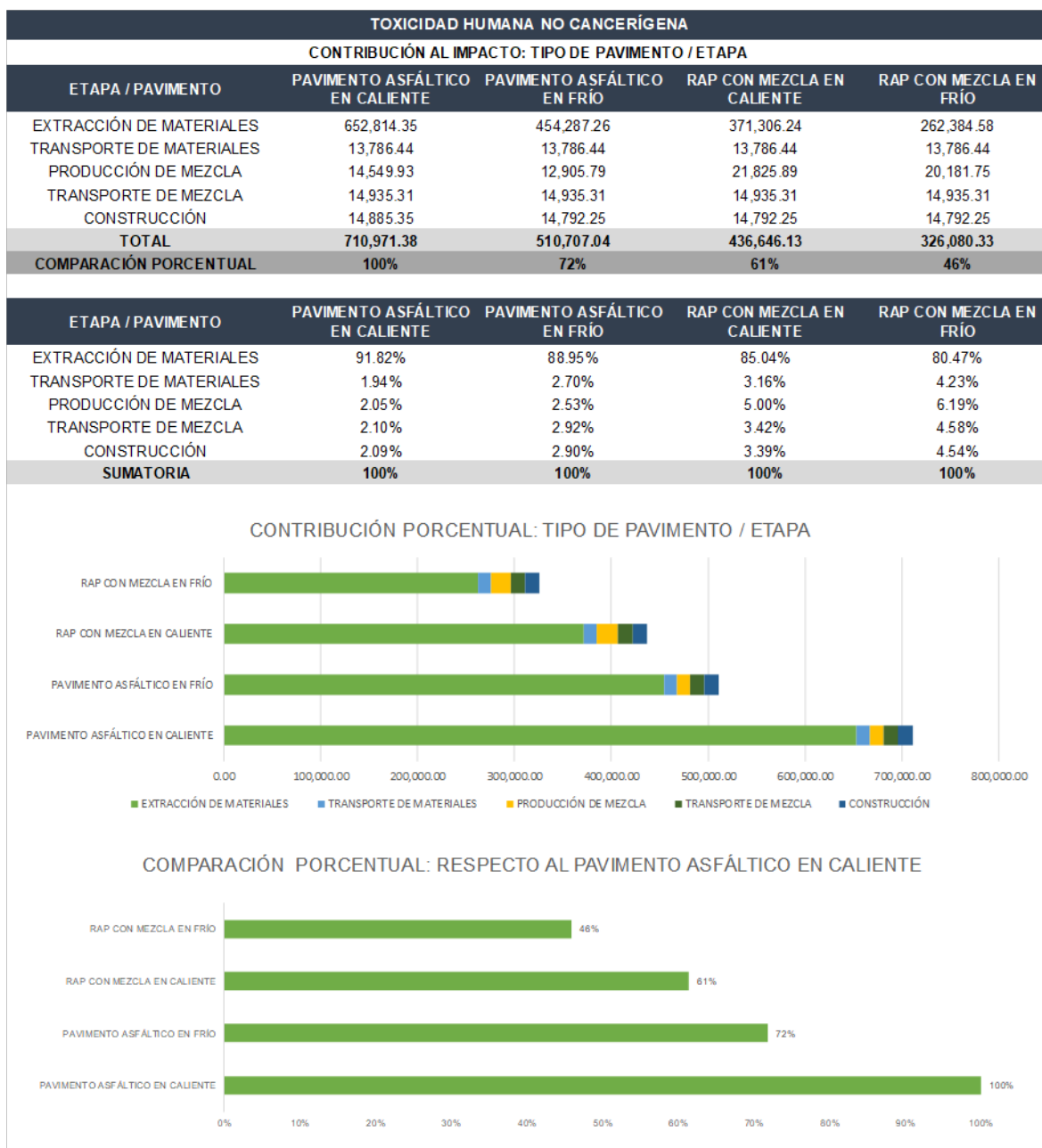


Figura.- 26 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría toxicidad humana no cancerígena. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción en las emisiones de toxicidad humana no cancerígena al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío en comparación con el pavimento asfáltico en caliente. El RAP con mezcla en caliente y en frío muestra la contribución más baja en esta etapa, con reducciones del 28% y 39%, respectivamente, en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 198,527.09 kg 1,4-DCB menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 291,507.11 kg 1,4-DCB menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 390,429.77 kg 1,4-DCB menos

Producción de Mezcla: Se observa que el RAP con mezcla en caliente y en frío tiene contribuciones mayores en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 28% y 39%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente.

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 1,644.14 kg 1,4-DCB menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 7,276.96 kg 1,4-DCB menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 6,368.18 kg 1,4-DCB menos

Transporte de Mezcla y Transporte de Materiales: No hay diferencias significativas entre los tipos de pavimento en estas etapas. Todos contribuyen de manera similar.

Construcción: El pavimento asfáltico en caliente y en frío muestra contribuciones similares en esta etapa.

Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 39% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.



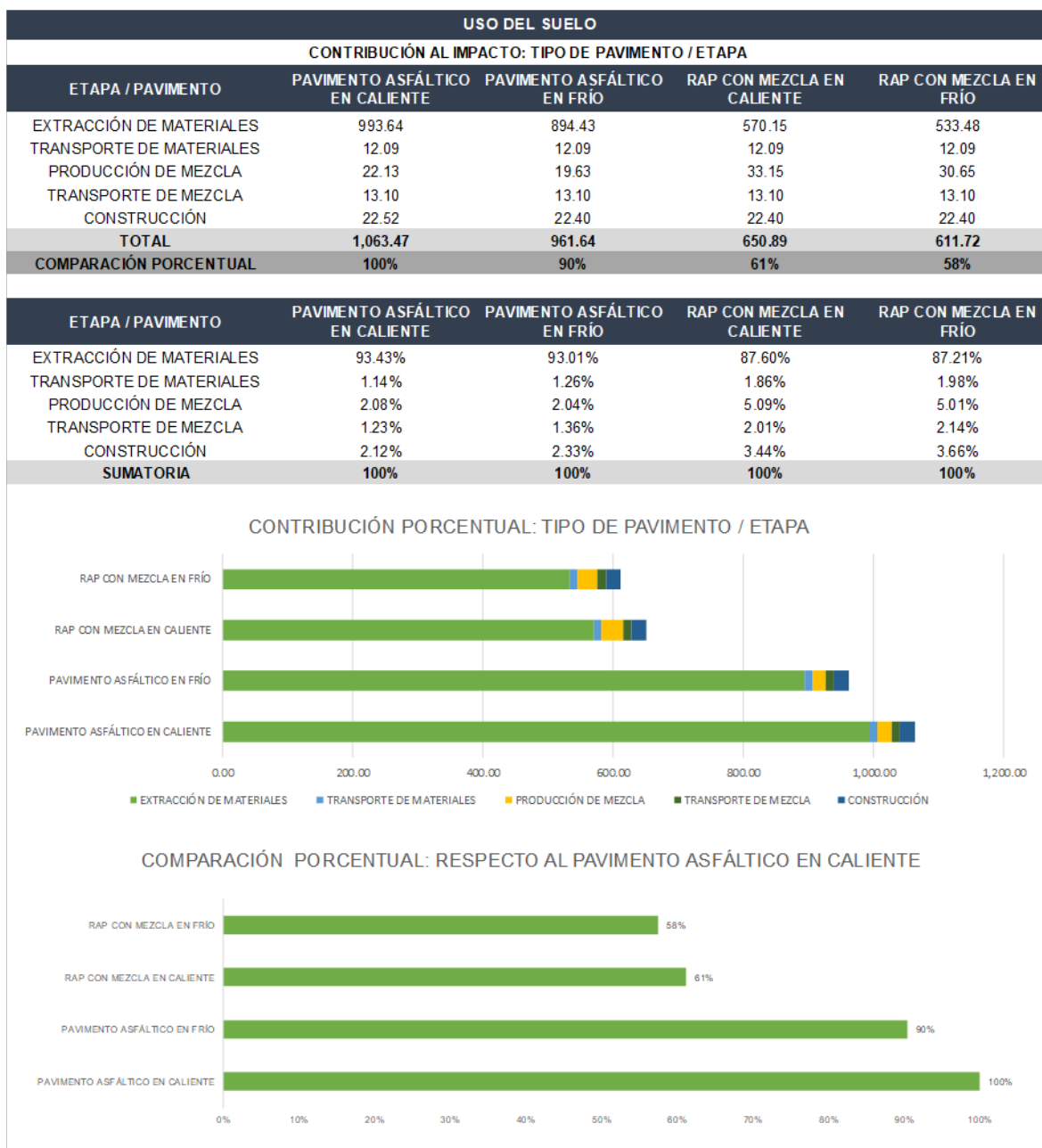


Figura.- 27 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría uso del suelo.
Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una reducción en la extracción de materiales al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío en comparación con el pavimento asfáltico en caliente. El pavimento asfáltico en caliente tiene la mayor contribución en esta etapa, representando más del 87% del impacto total, seguido por el RAP con mezcla en frío, que muestra una reducción del 42% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





Transporte de Materiales: Todos los tipos de pavimento tienen contribuciones similares en esta etapa, representando alrededor del 1-2% del impacto total.

Producción de Mezcla: El RAP con mezcla en caliente y en frío muestra una contribución mayor en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 39% y 36%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente. Esto sugiere que la producción de mezcla es una etapa crítica en términos de impacto en el uso del suelo.

Transporte de Mezcla: No se observan diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar alrededor del 1-2% del impacto total.

Construcción: El pavimento asfáltico en caliente y en frío muestra contribuciones similares en esta etapa, alrededor del 2-3% del impacto total.

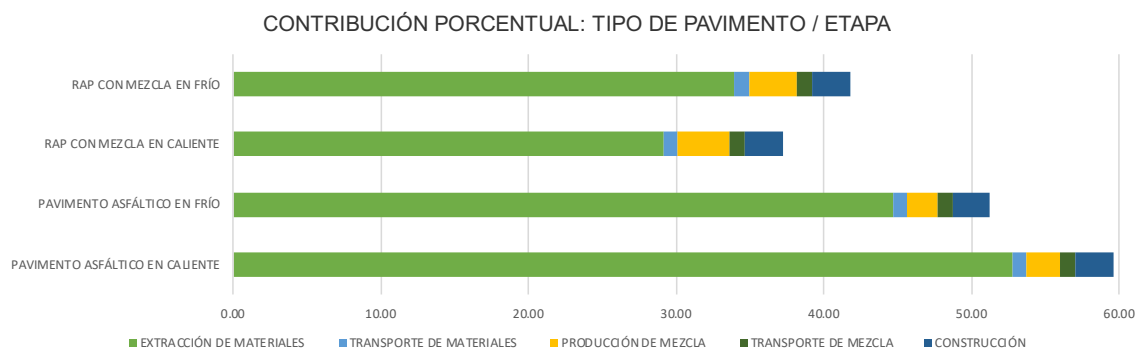
Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 42% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	52.77	44.71	29.16	33.97
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.95	0.95	0.95	0.95
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.29	2.03	3.54	3.28
TRANSPORTE DE MEZCLA	1.02	1.02	1.02	1.02
CONSTRUCCIÓN	2.57	2.54	2.54	2.54
TOTAL	59.60	51.25	37.21	41.76
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	86%	62%	70%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	88.54%	87.23%	78.36%	81.34%
TRANSPORTE DE MATERIALES	1.59%	1.84%	2.54%	2.26%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	3.85%	3.97%	9.52%	7.86%
TRANSPORTE DE MEZCLA	1.72%	2.00%	2.75%	2.45%
CONSTRUCCIÓN	4.31%	4.96%	6.83%	6.08%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

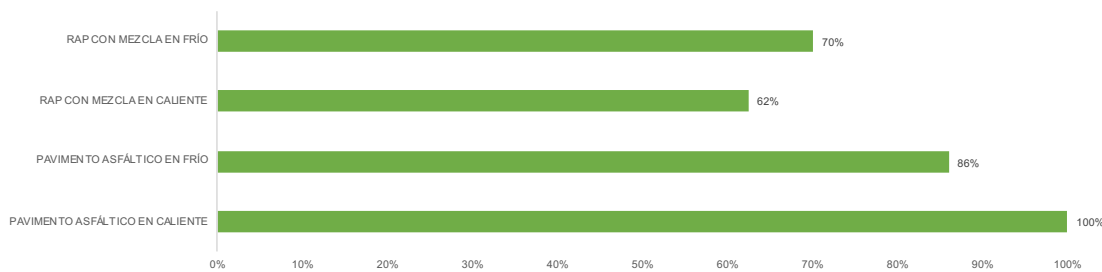


Figura.- 28 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría escasez de recursos minerales. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: Se observa una tendencia hacia una reducción en la extracción de materiales al emplear pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío en comparación con el pavimento asfáltico en caliente. El pavimento asfáltico en caliente tiene la mayor contribución en esta etapa, siendo el RAP con mezcla en caliente el que muestra la reducción más significativa, con un 14% menos que el pavimento asfáltico en caliente.





Transporte de Materiales: Todos los tipos de pavimento tienen contribuciones similares en esta etapa, representando alrededor del 2% del impacto total.

Producción de Mezcla: El RAP con mezcla en caliente y en frío muestra una contribución mayor en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 39% y 28%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente. Esto sugiere que la producción de mezcla es una etapa crítica en términos de impacto en la escasez de recursos minerales.

Transporte de Mezcla: No se observan diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar alrededor del 2.5% del impacto total.

Construcción: Tanto el pavimento asfáltico en caliente como en frío muestran contribuciones similares en esta etapa, alrededor del 5% del impacto total.

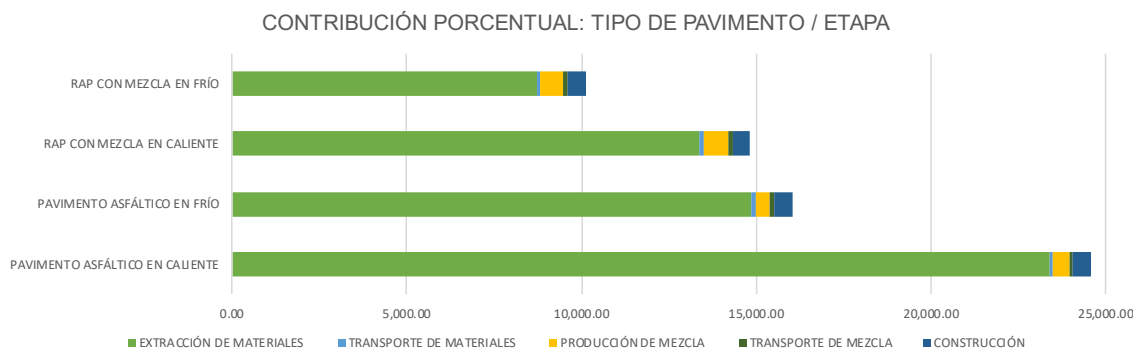
Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 38% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	23,379.89	14,862.33	13,372.16	8,707.21
TRANSPORTE DE MATERIALES	105.75	105.75	105.75	105.75
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	463.30	410.95	718.46	666.11
TRANSPORTE DE MEZCLA	114.56	114.56	114.56	114.56
CONSTRUCCIÓN	519.89	518.71	518.71	518.71
TOTAL	24,583.38	16,012.29	14,829.63	10,112.33
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	65%	60%	41%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	95.10%	92.82%	90.17%	86.10%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.43%	0.66%	0.71%	1.05%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.88%	2.57%	4.84%	6.59%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.47%	0.72%	0.77%	1.13%
CONSTRUCCIÓN	2.11%	3.24%	3.50%	5.13%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

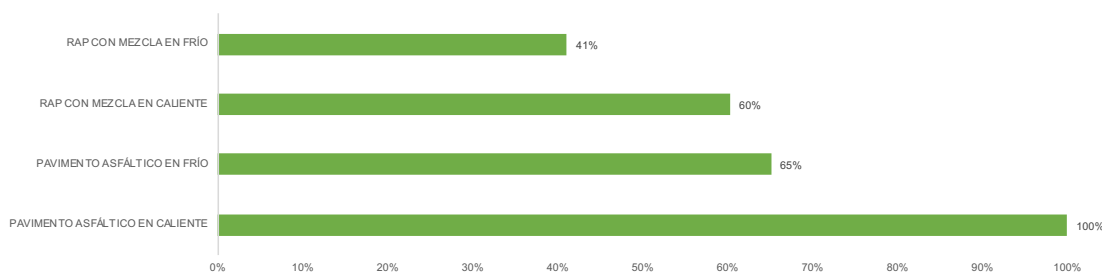


Figura.- 28 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría escasez de recursos fósiles. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: El pavimento asfáltico en caliente representa la mayor contribución en la extracción de materiales, con un porcentaje cercano al 95% del impacto total. Sin embargo, se observa una reducción significativa al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío, con disminuciones del 8%, 10%, y 14%, respectivamente, en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





Transporte de Materiales: El transporte de materiales tiene contribuciones mínimas y similares entre los tipos de pavimento, representando menos del 1.5% del impacto total en todas las opciones.

Producción de Mezcla: El RAP con mezcla en caliente y en frío muestra una contribución mayor en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 40% y 37%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente, en la producción de mezcla.

Transporte de Mezcla: Al igual que en el transporte de materiales, no se observan diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar, representando menos del 1% del impacto total.

Construcción: El pavimento asfáltico en caliente y en frío muestra contribuciones similares en esta etapa, alrededor del 2-3% del impacto total.

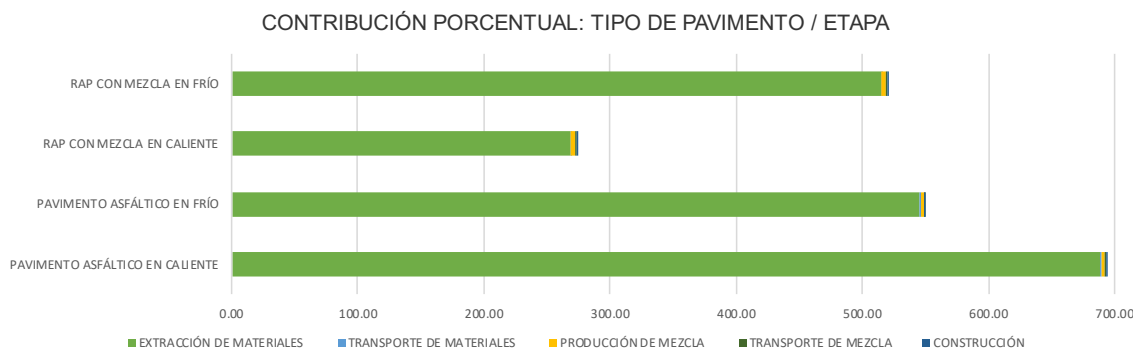
Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 59% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





CONSUMO DE AGUA				
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA				
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	689.03	545.44	268.51	514.69
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.67	0.67	0.67	0.67
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.83	2.51	3.48	3.16
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.73	0.73	0.73	0.73
CONSTRUCCIÓN	1.34	1.31	1.31	1.31
TOTAL	694.61	550.66	274.69	520.56
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	79%	40%	75%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	99.20%	99.05%	97.75%	98.87%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.10%	0.12%	0.24%	0.13%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.41%	0.46%	1.27%	0.61%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.10%	0.13%	0.26%	0.14%
CONSTRUCCIÓN	0.19%	0.24%	0.48%	0.25%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%



COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE

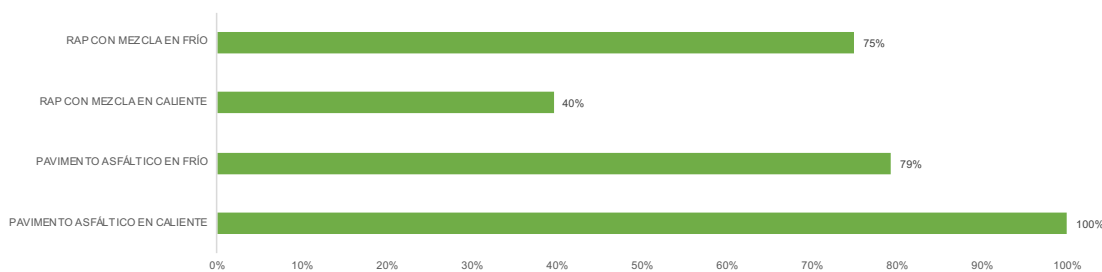


Figura.- 29 Contribución por etapas y tabulación porcentual al impacto total en la categoría consumo de agua.
Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Extracción de Materiales: El pavimento asfáltico en caliente representa la mayor parte del consumo de agua en la etapa de extracción de materiales, con más del 97% del impacto total. Sin embargo, se observa una reducción significativa al utilizar pavimento asfáltico en frío y RAP con mezcla en caliente y en frío, con disminuciones del 21%, 60%, y 25%, respectivamente, en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 143.59 m³ menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 420.52 m³ menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 174.34 m³ menos

Transporte de Materiales: Las diferencias entre los tipos de pavimento en cuanto al consumo de agua en el transporte de materiales son mínimas, representando menos del 0.3% del impacto total en todas las opciones.

Producción de Mezcla: El RAP con mezcla en caliente y en frío muestra una contribución mayor en comparación con los pavimentos asfálticos, con aumentos del 60% y 5%, respectivamente, respecto al pavimento asfáltico en caliente, en la producción de mezcla.

Transporte de Mezcla: Al igual que en la producción de mezcla, no se observan diferencias significativas entre los tipos de pavimento en esta etapa. Todos contribuyen de manera similar, representando menos del 0.3% del impacto total.

- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. Pavimento Asfáltico en Frío: 0.32 m³ menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Caliente: 0.65 m³ menos
- Pavimento Asfáltico en Caliente vs. RAP con Mezcla en Frío: 0.67 m³ menos

Construcción: El pavimento asfáltico en caliente y en frío muestra contribuciones similares en esta etapa, alrededor del 0.2-0.5% del impacto total.

Comparaciones Porcentuales: El pavimento asfáltico en caliente tiene el mayor impacto en todas las etapas en comparación con los otros tipos de pavimento. El RAP con mezcla en frío presenta la mayor reducción en el impacto total, con una disminución del 60% en comparación con el pavimento asfáltico en caliente.





5.1.6. Análisis de sensibilidad

Como se ha discutido en la sección anterior, diversos parámetros utilizados en la modelación de sistemas presentan cierto grado de incertidumbre, especialmente en lo que respecta a la elección de hipótesis, así como a los módulos de datos genéricos y los modelos de evaluación de impacto (y daños) empleados. Los resultados obtenidos están intrínsecamente ligados a estos parámetros, y la incertidumbre asociada se refleja en las conclusiones extraídas.

Con el propósito de evaluar la robustez de ciertos parámetros, se llevaron a cabo análisis de sensibilidad, durante los cuales los valores de los parámetros inciertos se modificaron por valores diferentes, aunque considerados probables. La variabilidad de los resultados revela la importancia de los parámetros modificados, así como el rango dentro del cual es más probable que se sitúen los resultados más consistentes y válidos.

Se realizaron análisis de sensibilidad con respecto a las distancias de transporte y el diseño de mezcla. Según el análisis de sensibilidad, el cambio en las distancias de transporte afecta en gran medida al consumo de energía del sistema. El asfalto se compone de casi un 95% en peso de árido, lo que significa que el lugar de la cantera de árido y la planta de asfalto no deberían estar muy lejos el uno del otro. De lo contrario, existe una alta posibilidad de que el transporte de materiales termine en lo más alto de la cadena de energía y emisiones de GEI.

Distancia de Transporte de Material

Las distancias de transporte de materiales desde el lugar de suministro hasta el sitio de construcción, así como de las mezclas, maquinaria y equipo desde el lugar de suministro hasta el sitio, se han estipulado en 20 km, un valor considerado una estimación razonable del promedio de las diversas distancias de transporte. No obstante, con el fin de validar de manera apropiada esta suposición, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad. En este sentido se han modificado las distancias a 40, 60, 80 y 100 kilómetros respectivamente, los resultados y la discusión se presentan a continuación:



Pavimento asfáltico en caliente – 40 kms

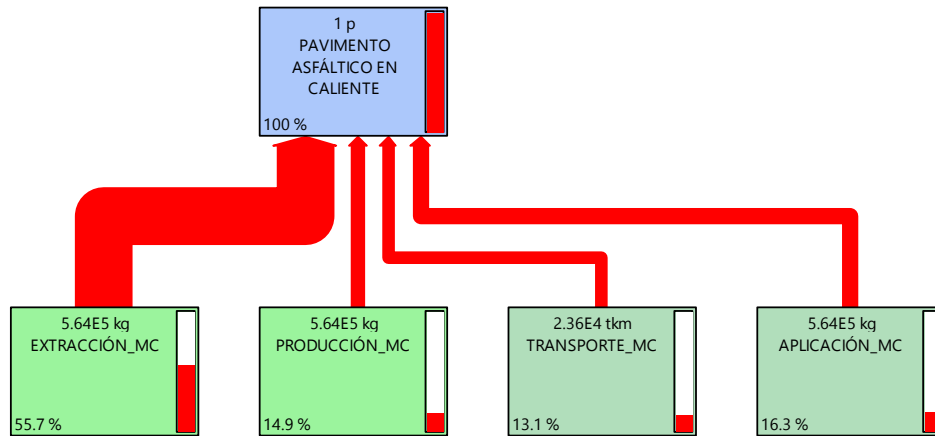


Figura.- 30 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en caliente – 40 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Pavimento asfáltico en frío – 40 kms

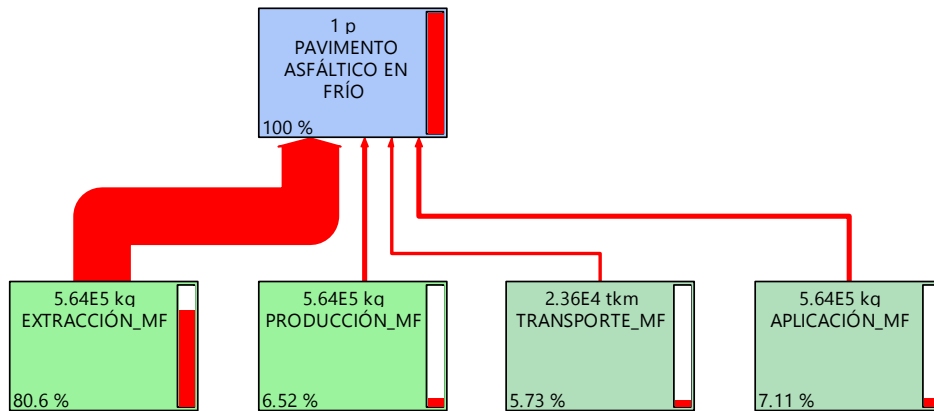


Figura.- 31 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en frío – 40 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

RAP con mezcla en caliente– 40 kms

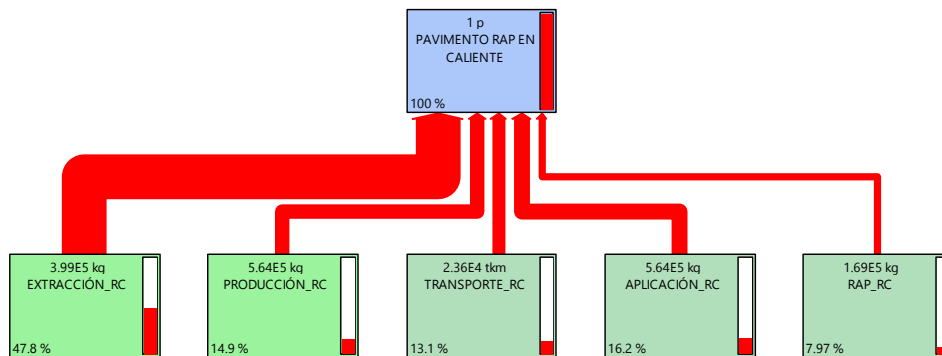


Figura.- 32 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en caliente – 40 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.





RAP con mezcla en frío – 40 kms

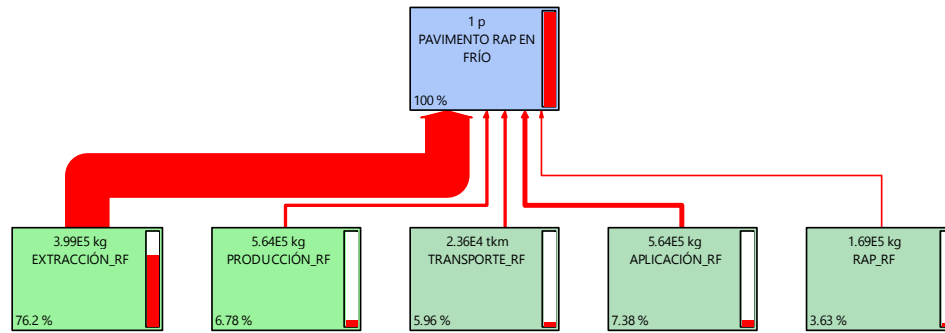
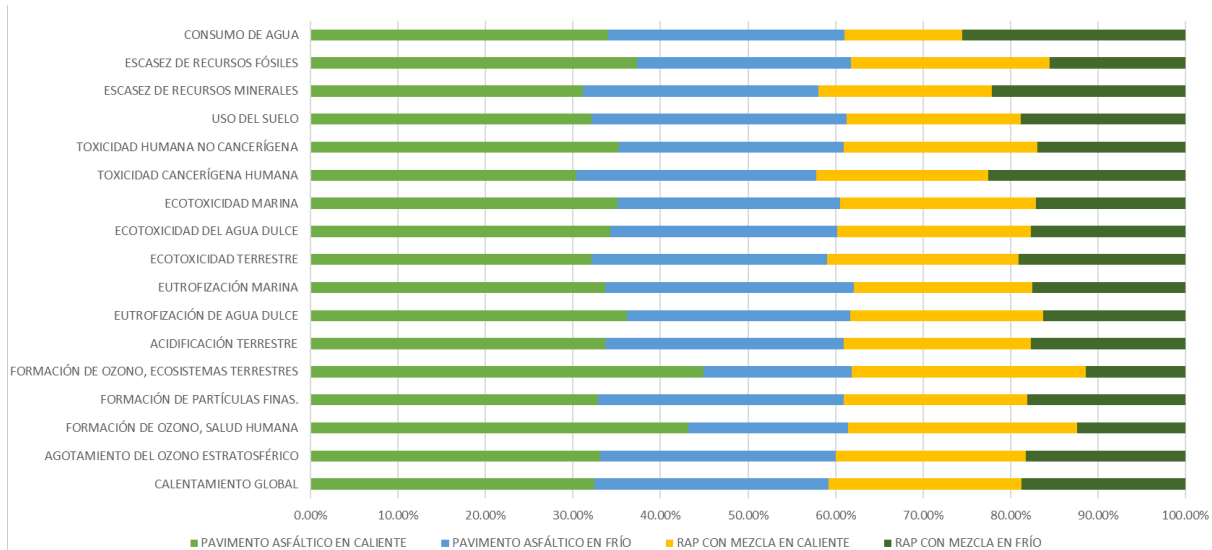


Figura.- 33 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en frío – 40 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

ETAPA/ PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	22,760.17	18,743.27	15,495.91	13,140.36
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRICC	0.0253	0.0206	0.0166	0.0140
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	382.13	161.75	232.15	109.72
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	47.39	40.50	30.22	26.06
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRE	567.28	213.93	338.84	143.54
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	115.90	93.92	73.60	60.86
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	7.88	5.56	4.81	3.54
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1046	0.0881	0.0634	0.0544
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	81,246.90	68,358.20	55,451.58	48,189.58
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	46.48	35.25	30.11	23.95
ECOTOXICIDAD MARINA	795,330.59	575,015.26	507,557.13	386,566.97
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	22,496.17	20,253.93	14,573.70	16,664.90
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	739,693.12	539,428.79	465,367.88	354,802.08
USO DEL SUELO	1,088.65	986.83	676.07	636.90
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	61.57	53.22	39.18	43.73
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	24,803.68	16,232.59	15,049.93	10,332.63
CONSUMO DE AGUA	696.01	552.06	276.09	521.96

Tabla 29.- Impacto total por pavimento y por categoría de impacto – 40 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.





Pavimento asfáltico en caliente – 60 kms

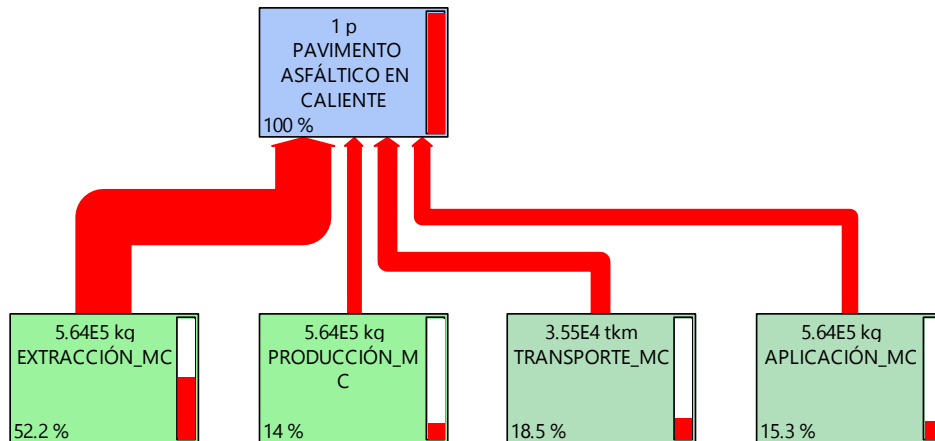


Figura.- 34 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en caliente – 60 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Pavimento asfáltico en frío – 60 kms

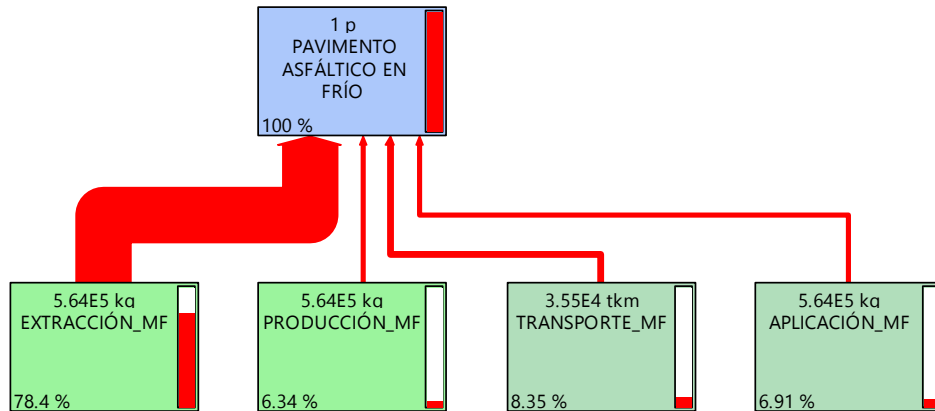


Figura.- 35 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en frío – 60 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

RAP con mezcla en caliente– 60 kms

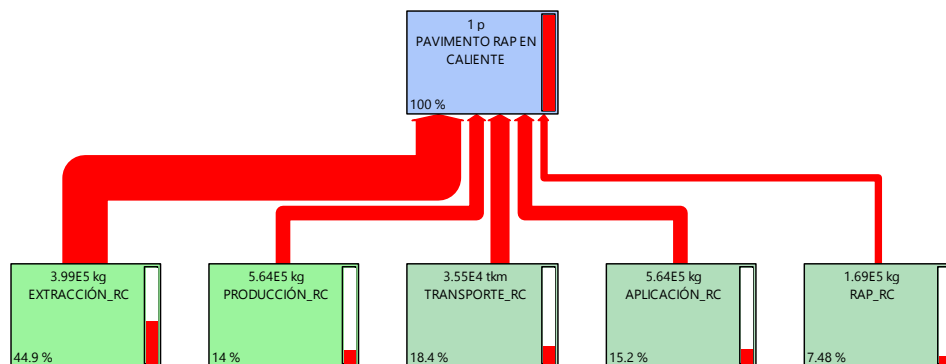


Figura.- 36 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en caliente – 60 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.





RAP con mezcla en frío – 60 kms

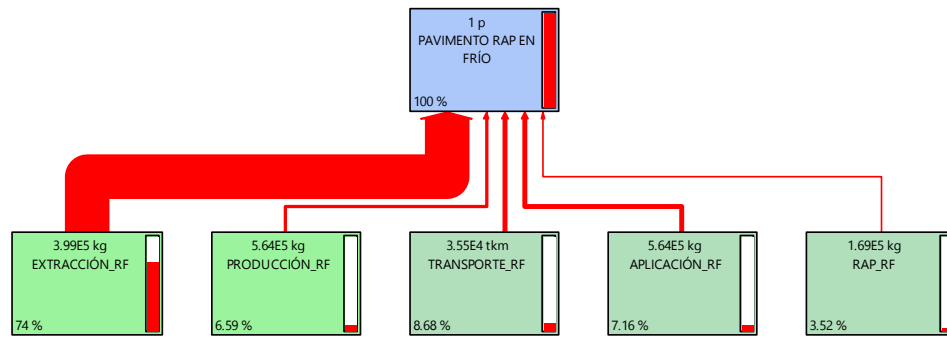
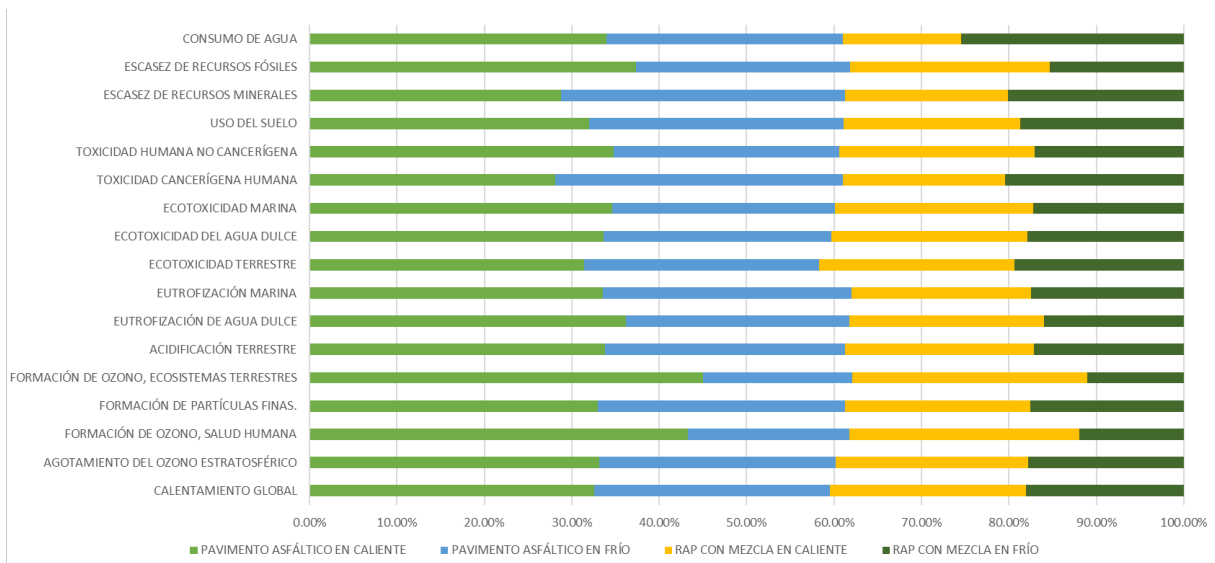


Figura.- 37 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en frío – 60 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

ETAPA/ PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	23,412.04	19,395.14	16,147.78	12,997.98
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRICC	0.0259	0.0212	0.0172	0.0139
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	383.15	162.77	233.17	105.57
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	48.01	41.13	30.85	25.56
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRI	568.35	215.00	339.91	139.36
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	117.26	95.28	74.96	59.59
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	7.95	5.63	4.89	3.52
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1065	0.0900	0.0653	0.0554
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	89,272.51	76,383.80	63,477.19	55,198.62
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	49.15	37.92	32.78	26.12
ECOTOXICIDAD MARINA	830,717.50	610,402.18	542,944.04	413,005.10
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	23,217.59	27,143.37	15,295.12	16,862.57
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	768,414.87	568,150.54	494,089.63	376,247.86
USO DEL SUELO	1,113.84	1,012.01	701.26	651.06
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	63.54	71.78	41.15	44.45
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	25,023.99	16,452.90	15,270.24	10,297.78
CONSUMO DE AGUA	697.41	553.46	277.49	522.71

Tabla 30.- Impacto total por pavimento y por categoría de impacto – 60 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



Pavimento asfáltico en caliente – 80 kms

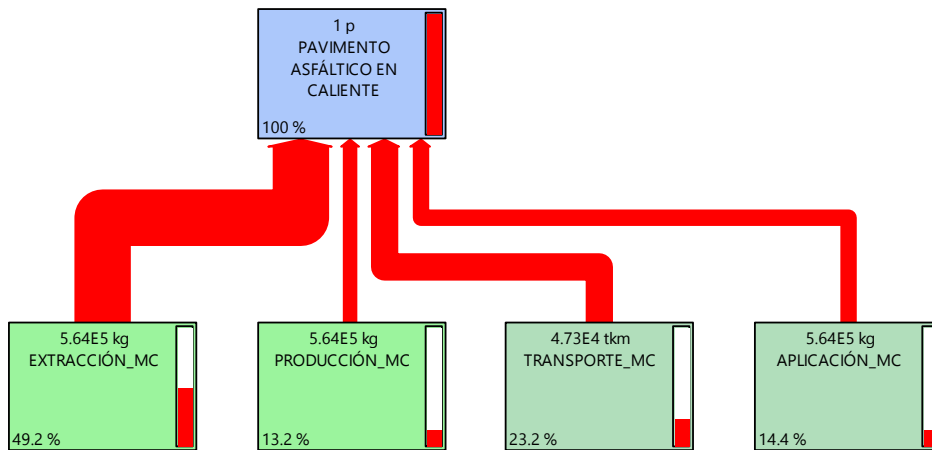


Figura.- 38 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en caliente – 80 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Pavimento asfáltico en frío – 80 kms

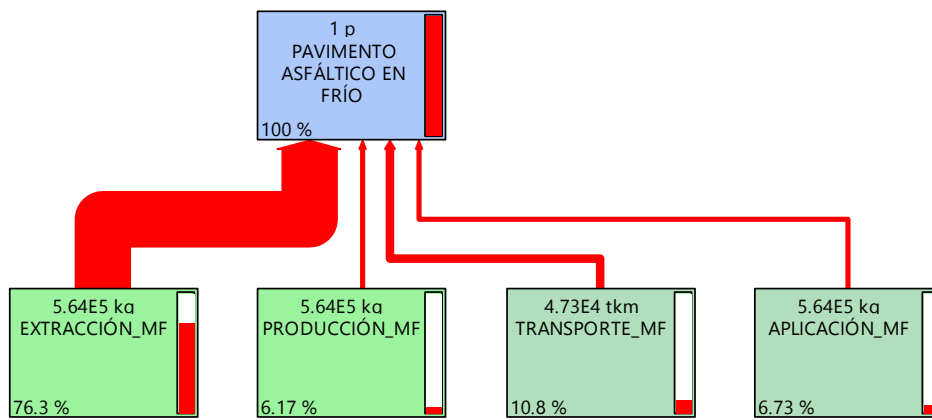


Figura.- 39 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en frío – 80 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

RAP con mezcla en caliente– 80 kms

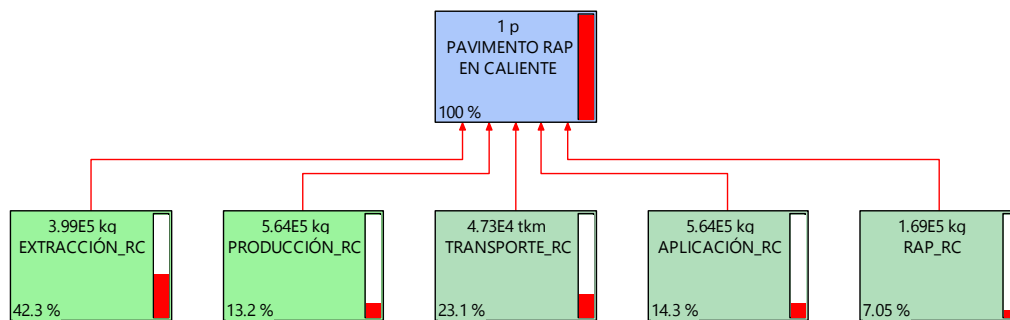


Figura.- 40 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en caliente – 80 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



RAP con mezcla en frío – 80 kms

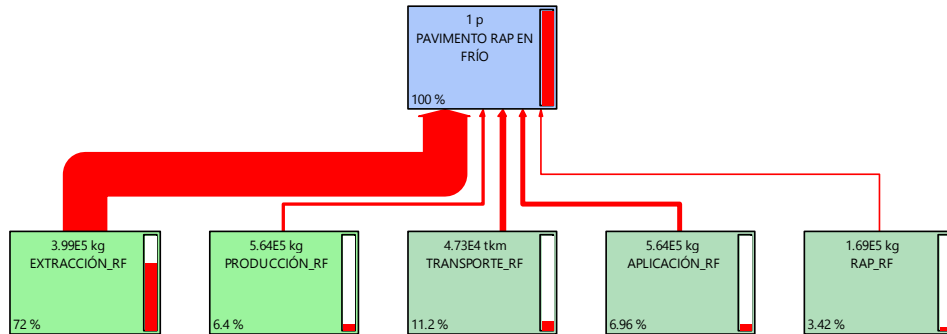
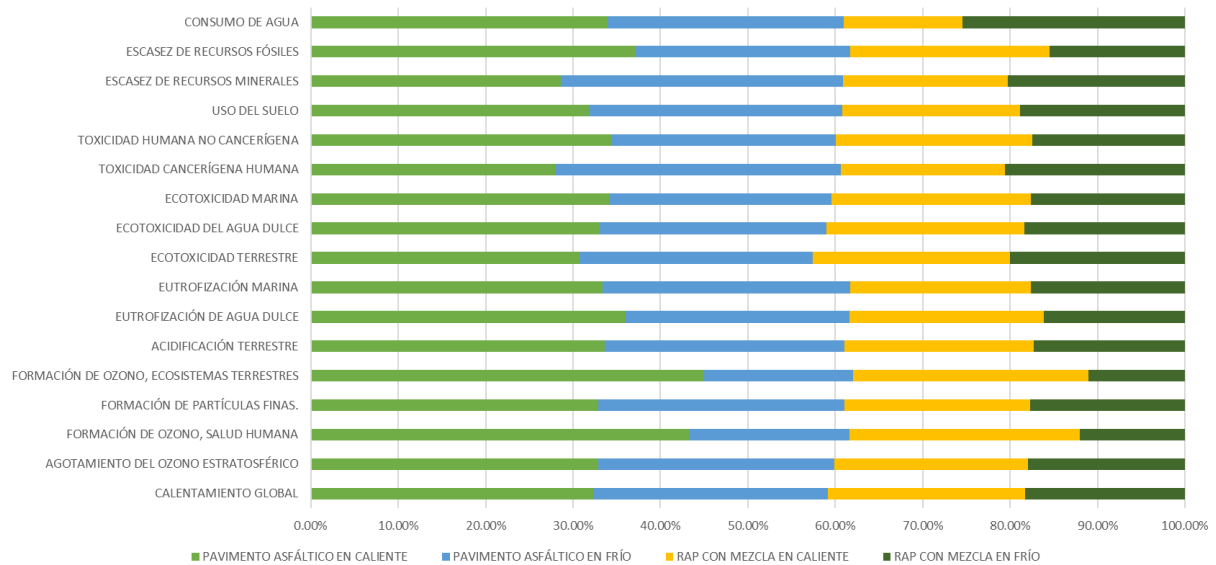


Figura.- 41 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en frío – 80 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

ETAPA/ PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	24,063.91	20,047.01	16,799.65	13,649.85
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	0.0265	0.0218	0.0178	0.0145
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	384.17	163.79	234.19	106.59
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	48.63	41.75	31.47	26.18
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRE	569.42	216.08	340.98	140.44
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	118.62	96.64	76.32	60.95
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	8.03	5.71	4.97	3.60
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1085	0.0920	0.0673	0.0574
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	97,298.11	84,409.41	71,502.80	63,224.22
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	51.82	40.59	35.45	28.79
ECOTOXICIDAD MARINA	866,104.41	645,789.09	578,330.95	448,392.01
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	23,939.01	27,864.79	16,016.54	17,583.99
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	797,136.62	596,872.28	522,811.37	404,969.61
USO DEL SUELO	1,139.02	1,037.20	726.44	676.25
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	65.51	73.75	43.12	46.42
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	25,244.29	16,673.20	15,490.54	10,518.08
CONSUMO DE AGUA	698.80	554.86	278.89	524.11

Tabla 31.- Impacto total por pavimento y por categoría de impacto – 80 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.



Pavimento asfáltico en caliente – 100 kms

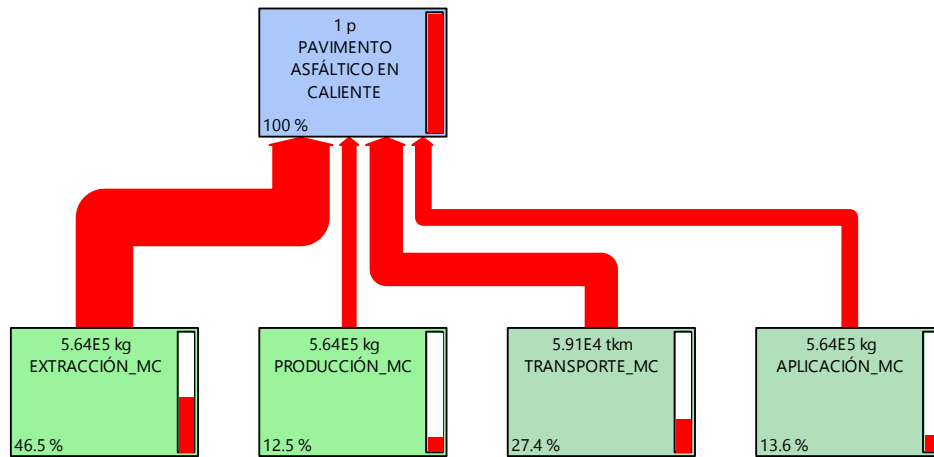


Figura.- 42 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en caliente – 100 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

Pavimento asfáltico en frío – 100 kms

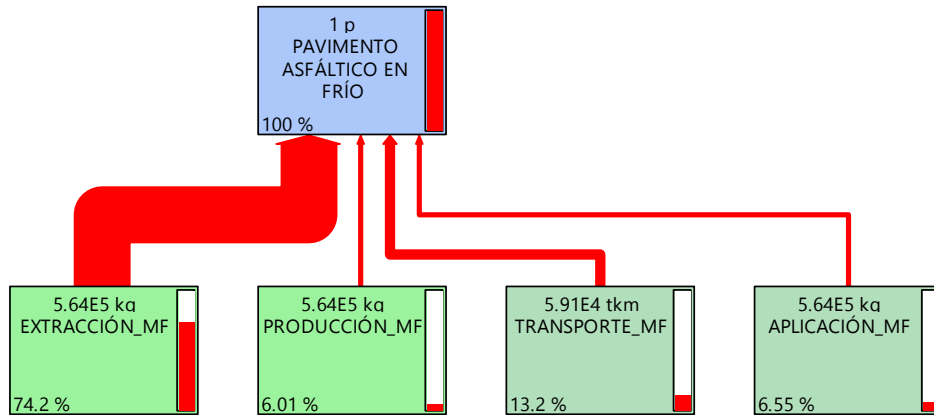


Figura.- 43 Diagrama de contribución: Pavimento asfáltico en frío – 100 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

RAP con mezcla en caliente– 100 kms

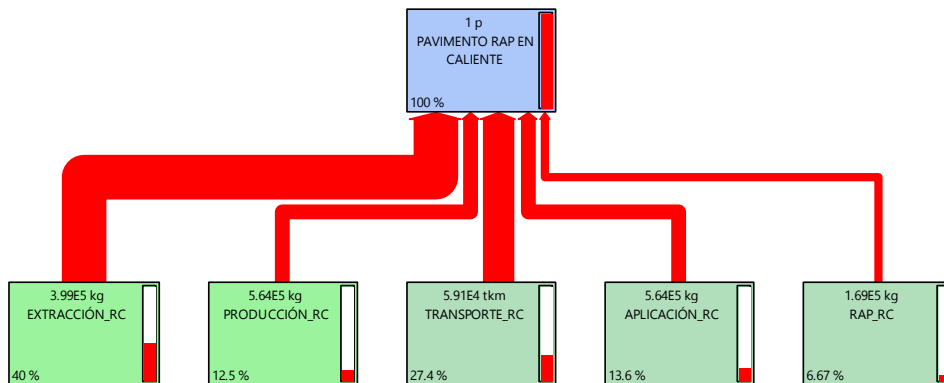


Figura.- 44 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en caliente – 100 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.





RAP con mezcla en frío – 100 kms

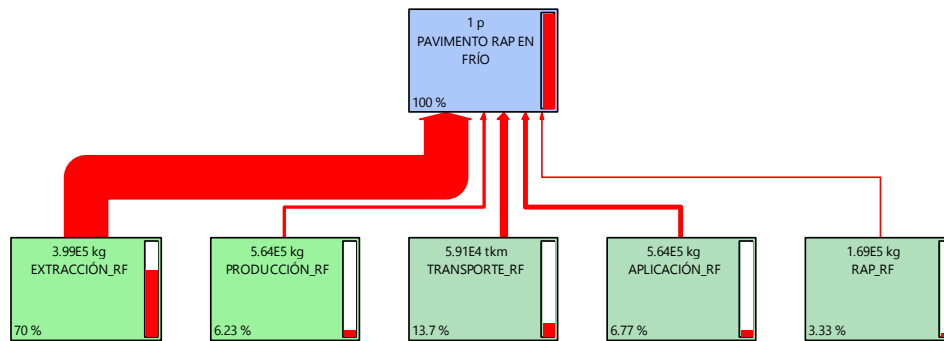
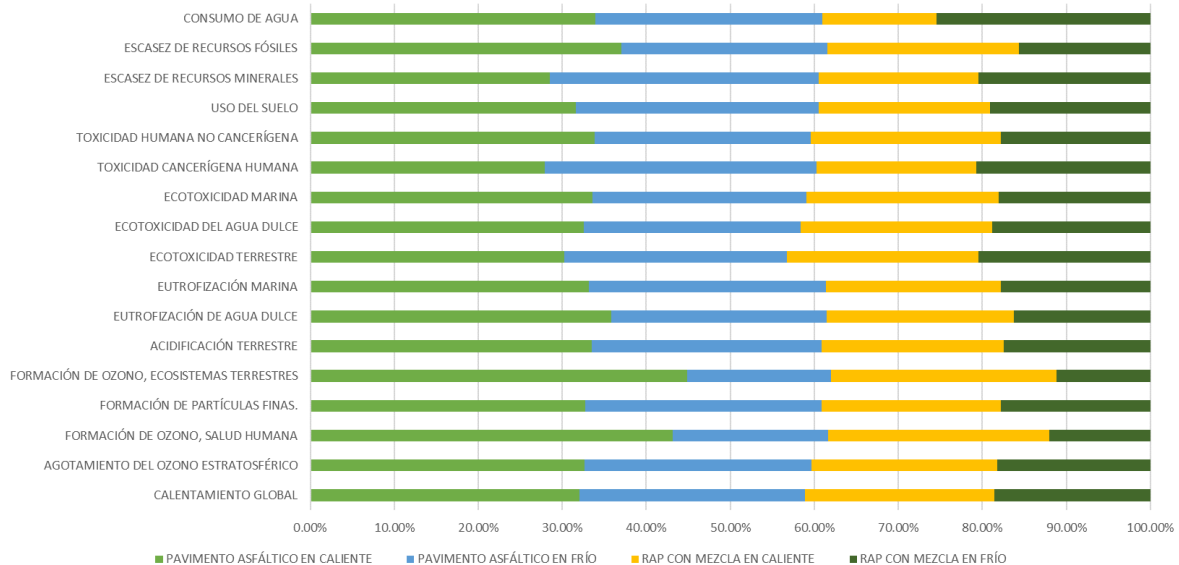


Figura.- 45 Diagrama de contribución: RAP con mezcla en frío – 100 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	24,715.78	20,698.88	17,451.51	14,301.72
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRICO	0.0271	0.0223	0.0184	0.0151
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	385.19	164.81	235.21	107.61
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	49.26	42.37	32.09	26.80
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRE	570.49	217.15	342.05	141.51
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	119.98	98.00	77.68	62.31
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	8.11	5.79	5.04	3.68
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1104	0.0939	0.0692	0.0593
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	105,323.72	92,435.02	79,528.40	71,249.83
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	54.50	43.27	38.13	31.47
ECOTOXICIDAD MARINA	901,491.32	681,176.00	613,717.86	483,778.92
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	24,660.43	28,586.21	16,737.97	18,305.41
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	825,858.37	625,594.03	551,533.12	433,691.36
USO DEL SUELO	1,164.21	1,062.38	751.62	701.43
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	67.48	75.72	45.09	48.39
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	25,464.59	16,893.50	15,710.84	10,738.38
CONSUMO DE AGUA	700.20	556.25	280.29	525.51

Tabla 32.- Impacto total por pavimento y por categoría de impacto – 100 km. Fuente: SIMAPRO elaboración Propia.





En los anexos correspondientes a las páginas 252 a la 267 se presenta un análisis de los impactos del ciclo de vida, con un enfoque en la evaluación detallada y específica de la sensibilidad asociada a las distancias de transporte de materiales y equipos. El análisis abarca el traslado de materiales de construcción desde los sitios de suministro hasta el sitio de obra, así como el transporte de mezclas, maquinaria y equipo requeridos para la ejecución del proyecto. En el escenario base, se desarrolló una distancia de 20 km como referencia, bajo la premisa de que este valor representa una estimación razonable del promedio de las distancias de transporte que suelen observarse en proyectos de infraestructura. Este cálculo se basó en datos recopilados de proyectos anteriores y de estudios técnicos, considerando que 20 km es una distancia estándar que permite equilibrar la accesibilidad a recursos y la viabilidad económica del transporte.

No obstante, con el fin de validar de manera rigurosa esta estimación y de explorar la posibilidad de que existan variaciones en los impactos ambientales y económicos del proyecto en función de distancias de transporte más extensas, se realizó un análisis de sensibilidad. Este análisis tuvo como objetivo fundamental comprender cómo el aumento de la distancia entre el sitio de suministro de los materiales y el sitio de construcción afectaría los resultados del ciclo de vida, tanto en términos de impacto ambiental como de costos operativos.

En este sentido, el estudio introdujo una serie de variaciones en la distancia de transporte, considerando escenarios de 40, 60, 80 y hasta 100 kilómetros. Para cada uno de estos escenarios, se recalcularon los indicadores clave del análisis de ciclo de vida, tales como las emisiones de CO₂, el consumo de energía no renovable, la huella de carbono y otros parámetros críticos asociados con el transporte de materiales y equipos pesados. Estos resultados fueron contrastados con el escenario base de 20 km, con el fin de identificar la magnitud del impacto que ocasionaría el aumento en la distancia de transporte.

El análisis reveló que, a medida que la distancia de transporte aumenta, se produce un incremento sustancial en los impactos del ciclo de vida. En concreto, para distancias de 40 km, el aumento en los impactos totales es moderado, pero empieza a ser significativamente más pronunciado para distancias de 60, 80 y 100 kilómetros. Esto se debe a que el transporte de materiales y equipos a mayores distancias requiere de un mayor consumo de combustibles





fósiles, lo que, a su vez, incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂, y aumenta el consumo de energía no renovable. . Además, las distancias más largas implican mayores costes de operación, dado que el tiempo y el desgaste de los vehículos de transporte se incrementan proporcionalmente.

En cuanto a los resultados específicos, se observará que para distancias de 40 km, el impacto total del ciclo de vida aumentó en aproximadamente un 7%, en comparación con el escenario base de 20 km. Para distancias de 60 km, el aumento fue más notorio, alcanzando un 9%. A 80 km, el incremento fue del 10,5%, mientras que para el escenario más extremo, con una distancia de 100 km, el aumento total en los impactos llegó al 12%. Estos resultados confirman que la distancia de transporte es un factor determinante en el impacto ambiental y en la eficiencia operativa de los proyectos de construcción, especialmente cuando se trata de grandes volúmenes de materiales y maquinaria pesada.

Este incremento en el impacto total puede parecer relativamente pequeño en términos porcentuales; Sin embargo, es significativo cuando se traduce en las emisiones adicionales y el consumo energético extra que representa. En grandes proyectos de infraestructura, estos incrementos pueden acumularse y generar un impacto considerable, afectando tanto los costos económicos del proyecto como su sostenibilidad ambiental.

El análisis de sensibilidad realizado demuestra claramente que el aumento de las distancias de transporte de materiales y equipos puede tener un efecto directo y significativo sobre los resultados del análisis del ciclo de vida de un proyecto de construcción. Las distancias mayores generan un incremento notable en las emisiones de CO₂, en el consumo de energía y, en general, en los costos operativos asociados con el transporte. De acuerdo con los resultados obtenidos, el impacto total aumenta entre un 7% y un 12% cuando las distancias de transporte varían de 20 km a 100 km.





5.2. ECONOMÍA CIRCULAR DEL RAP

La economía circular es un enfoque holístico que considera todo el ciclo de producción: desde la extracción de materias primas pasando por el diseño, producción y distribución de un producto hasta su fase de uso más larga posible y el reciclaje. No se trata solo de extender la vida útil del producto, sino también de un menor consumo de energía y la logística más eficiente posible con rutas de transporte cortas. Esto debería contribuir a la seguridad de las materias primas y la menor huella ecológica posible. Una estrategia de preservación del pavimento o gestión de activos que involucre tratamientos superficiales simples, oportunos y rentables para conservar la integridad del asfalto antes de posteriores reparaciones o reconstrucciones más costosas tiene sentido desde el punto de vista económico.

Mediante el uso de estas técnicas de conservación, es posible extender significativamente la vida útil de la superficie de la carretera y hacer que las capas estructurales inferiores sean prácticamente perpetuas. Sin embargo, aún hoy en día, numerosas administraciones priorizan la financiación de nuevas construcciones antes que el mantenimiento del patrimonio viario existente, lo que en la mayoría de los casos conlleva en el tiempo un mayor impacto ambiental y por ende elevados costos de reconstrucción.

Cuando estas operaciones preventivas y reparadoras ya no son efectivas, el asfalto llega al final de su vida útil y está listo para ser recuperado de la carretera.

Este material recuperado (en general) no es adecuado para usarse de inmediato, ya que requiere un procesamiento intermedio (por ejemplo, trituración, tamizado, etc.).

Cuando el asfalto se recicla, normalmente se usa como agregado en otros productos de construcción. Incluyendo agregados para balasto de ferrocarril, pero más generalmente como agregados para mezclas no ligadas, como subbases y materiales de relleno para obras de ingeniería civil o como mezclas no ligadas. Cuando se usa asfalto reciclado en otros materiales, naturalmente habrá límites de calidad y requisitos en las especificaciones para el material de destino, particularmente en relación con el contenido de betún retenido. El asfalto





reciclado puede incluso usarse como agregado para el concreto, pero claramente esto no explota el valor inherente del contenido de aglutinante.

Además, como más del 85% de la carretera en México está pavimentada con asfalto, la industria del asfalto tiene el potencial de convertirse en una herramienta clave para las autoridades viales y los gobiernos para alcanzar los objetivos de la nueva Economía Circular Plan de Acción, tales como:

- Aumentar el contenido reutilizado y reciclado en los productos, garantizando al mismo tiempo su rendimiento y seguridad
- Permitir la refabricación y alta calidad reciclaje
- Reducir las huellas de carbono y ambientales
- Restringir el uso único y contrarrestar la obsolescencia prematura
- Mejorar la durabilidad del producto, la reutilización, actualizabilidad y reparabilidad, abordando la presencia de productos químicos peligrosos en productos, y aumentando su energía y eficiencia de recursos





5.2.1. Degradación del pavimento asfáltico a lo largo de su ciclo de vida

Las carreteras se diseñan con el entendimiento de que, con el tiempo, cierta deformación acumulada, desgaste o daño en las distintas capas de asfalto, en particular la capa superficial, es inevitable debido al tránsito vehicular y a las condiciones ambientales. Por lo tanto, será necesario corregir periódicamente estos defectos en la superficie para la seguridad de los usuarios de la vía.

Además, las carreteras están sujetas a los ataques del medio ambiente de los rayos UV, oxígeno, calor y frío. En particular, el agua puede tener graves efectos dañinos. La infiltración de agua puede acelerar rápidamente tal daño. Los efectos del agua se pueden experimentar en todos los niveles de la estructura del pavimento. Los suelos húmedos y los materiales granulares sobresaturados tienen muy poca capacidad de carga. Las variaciones en el contenido de humedad de la base pueden ocasionar que se hinchen y se encojan según la temporada.

Todo esto puede provocar grietas y fallas en el límite de las capas. Por lo tanto, es esencial garantizar que haya un drenaje adecuado y que este también se mantenga, ya que, en última instancia, la falta de drenaje de los cimientos puede provocar la pérdida de soporte de toda la estructura de la carretera.

Si el agua penetra en los materiales aglutinados, entre capas, juntas o a través de grietas, esto puede resultar en la eliminación del agente aglutinante del agregado y la degradación a un material granular efectivamente no aglomerado. Si no se controla, esto puede resultar en la desintegración total del pavimento.

El betún envejece lentamente con el tiempo e implica una combinación de compuestos químicos y físicos complejos procesos que incluyen la "evaporación" de los componentes aceitosos más livianos, que en conjunto conducen al progresivo endurecimiento del ligante. A medida que se vuelve más duro y quebradizo, tiene menos adhesión al agregado y por lo tanto también es más susceptible al daño, reduciendo su capacidad para recuperarse o resistir las tensiones normales. El nivel del endurecimiento varía según el tipo de mezcla (por





ejemplo, el asfalto poroso envejece más rápidamente que el asfalto denso) y la posición en el asfalto (en lo profundo del pavimento o en la superficie, expuesto a la luz solar directa/calor o condiciones más suaves).

Las capas superficiales pueden sufrir pérdida de resistencia al deslizamiento a través de la acción pulidora del tráfico y el cierre de textura superficial. La deformación de todas las capas de un pavimento tendrá que ser corregida. También es importante mantener la integridad de la superficie para evitar que el agua penetre en las capas inferiores.

Las capas estructurales del pavimento generalmente están diseñadas para durar de 30 a 40 años. Su estado debe evaluarse con regularidad y debe anticiparse algún tipo de conservación rutinaria o reconstrucción a medida que se acercan al final de su vida útil de diseño.

Los pavimentos asfálticos tienen una flexibilidad y adaptabilidad adicional en el diseño y la construcción, de modo que pueden ser simplemente superpuestos (y/o ensanchados) para aumentar la resistencia y, por lo tanto, la capacidad de tráfico (tanto en volumen como en carga). Esto puede influir en la estrategia de construcción con miras a prolongar la vida útil y mejorar el rendimiento cuando haya más recursos disponibles.

Siguiendo esta jerarquía, la estrategia más sostenible para las carreteras asfaltadas es simplemente prolongar su vida útil, preservando el asfalto el mayor tiempo posible en la carretera, reduciendo así la necesidad de eliminarlo. Tiene sentido desde el punto de vista económico una estrategia de preservación del pavimento o gestión de activos que implique tratamientos superficiales simples, oportunos y rentables para conservar la integridad del asfalto antes de reparaciones o reconstrucciones posteriores más costosas.

Para el caso de la mezcla asfáltica, y como se describirá en apartados siguientes, a lo largo de las últimas décadas se ha desarrollado una amplia gama de técnicas para prevenir su daño o repararlo cuando este ocurre.

Mediante la implementación de técnicas avanzadas y estratégicas, se puede lograr una extensión considerable de la vida útil de la superficie de las carreteras, convirtiendo las capas



estructurales inferiores en elementos prácticamente perennes. Sin embargo, en la actualidad, se observa una tendencia preocupante en la que múltiples administraciones públicas priorizan la asignación de recursos financieros para la creación de nuevas infraestructuras, en lugar de enfocarse en el mantenimiento y la conservación de los activos viales ya existentes.

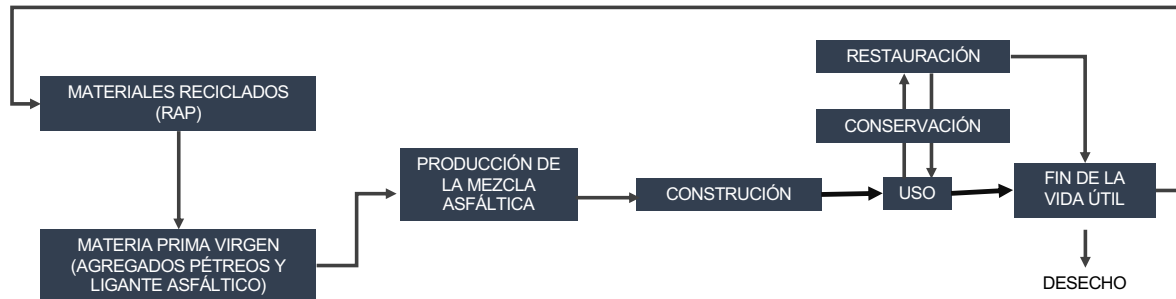


Figura.- 46 Análisis del ciclo de vida de un pavimento asfáltico, incluyendo la etapa de reciclado. Fuente: Elaboración Propia.

Este enfoque, en la mayoría de los casos, resulta en un incremento a largo plazo tanto en el impacto ambiental como en los costos asociados a la reconstrucción. Llega un punto en el que las operaciones preventivas y de reparación ya no aportan beneficios palpables, indicando que el asfalto ha llegado al final de su vida útil. En ese momento, se encuentra listo para ser extraído de la carretera y recuperado para su posterior procesamiento, tal y como se ilustra en la Figura 47.

Es imperativo recalcar la importancia de una gestión adecuada y estratégica de los recursos viales, que no solo contempla la creación de nuevas infraestructuras, sino que también valora y prioriza el mantenimiento y la conservación de las existentes. Esto se traduce en una mayor eficiencia en el uso de los recursos, una reducción significativa del impacto ambiental y una optimización de los costos asociados a largo plazo.



5.2.2. Estrategias preventivas destinadas a prolongar la duración operativa

La estrategia más sostenible para las carreteras es simplemente prolongar su vida útil, conservando el asfalto el mayor tiempo posible en la carretera, reduciendo así la necesidad de eliminar o reciclar. Una estrategia de conservación del pavimento o gestión de activos que involucre tratamientos superficiales simples, oportunos y rentables para conservar la integridad del asfalto antes de posteriores reparaciones o reconstrucciones más costosas tiene sentido desde el punto de vista económico. Si una carretera está correctamente diseñada, construida y conservada y dura el doble de tiempo, entonces se ha conservado el 100% de los materiales vírgenes que se habrían utilizado para reconstruirla; esto respalda el elemento "reducir" en la jerarquía del reciclaje.

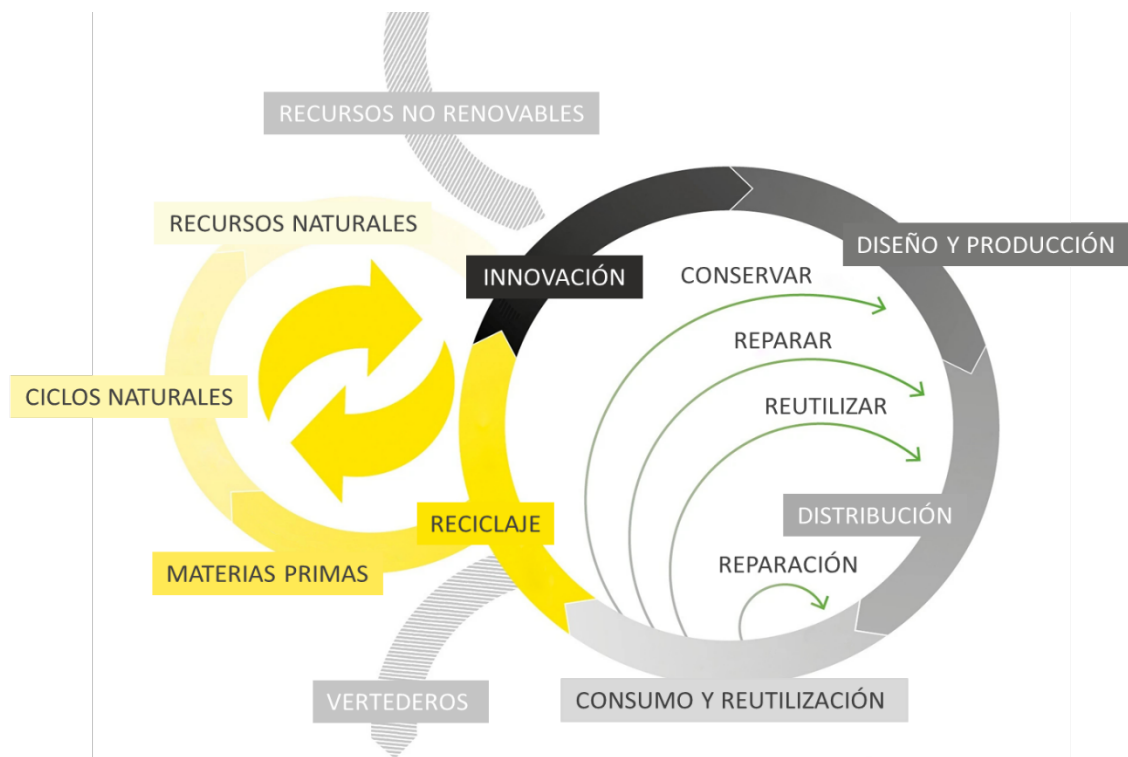


Figura.- 47 Medidas preventivas dentro del contexto de economía circular. Fuente: Elaboración Propia.

Conservar, reparar, reutilizar, reciclar: todos estos son aspectos de la economía circular. En ella, los productos y materiales permanecen en circulación el mayor tiempo posible. Como resultado, se utilizan menos materias primas y se producen menos residuos, tal y como se observa en la Figura 48.





Los tratamientos conservantes se aplican generalmente en la capa superficial o capa de rodadura para potenciar rentabilidad y reducir la necesidad de ajustar niveles de, por ejemplo, sumideros, drenaje y servicios públicos cubiertas de inspección, bordillos y barreras de choque.

Independientemente de la eficacia de los tratamientos preventivos y mantenimiento planificado, todos los pavimentos asfálticos tienen una vida finita y será necesario considerar un programa de renovación estructural progresiva para prolongar la vida útil de la carretera a largo plazo. Esto puede incluir obras de ensanchamiento o drenaje, reconstrucción parcial y engrosamiento según sea necesario para aumentar el tráfico y/o demandas climáticas. También es posible adaptar y mejorar el rendimiento de la parte superior existente capas a través de un cuidadoso diseño de la mezcla para cumplir con los requisitos cambiantes del pavimento, y para lo cual la gama de procesos de reciclaje de asfalto también puede contribuir.

Sin embargo, en algunos casos, los pavimentos de asfalto grueso pueden alcanzar un estado de equilibrio estructural más allá del que ya no se observa que se deterioren; estos se conocen como pavimentos “perpetuos” o “de larga duración”. En este caso, el único mantenimiento o la mejora del rendimiento requerida estará en las capas superiores de la superficie.





5.2.3. Técnicas de reparación del pavimento asfáltico

Cuando se produce un daño en un pavimento asfáltico, se dispone de una serie de posibles tratamientos de reparación (para todo tipo de materiales de pavimento), dependiendo de la naturaleza, tamaño y profundidad del defecto, así como del presupuesto del propietario/operador de la vía. Estos se pueden aplicar como tratamientos correctivos o preventivos, pero los principios de su aplicación son los mismos.

Los baches suelen ser áreas "pequeñas" (dimensión máxima <30 cm) y/o defectos poco profundos (profundidad <10 cm) en la superficie de una carretera, pero si no se tratan, se expandirán tanto en área como en profundidad, a menudo combinándose con otros defectos cercanos para volverse más como 'trincheras'. Su característica clave es que son áreas dañadas de las cuales el tráfico y/o el agua han perdido o removido el material existente, o donde la estructura subyacente se ha derrumbado.

A veces, por una cuestión de seguridad de los usuarios de la carretera, los baches se rellenan temporalmente hasta que se pueda aplicar un tratamiento permanente eficaz. Estas reparaciones temporales se llevan a cabo utilizando mezclas asfálticas que han sido especialmente diseñadas para trabajar durante largos períodos de tiempo para facilitar su aplicación y compactación al perfil.

La reparación permanente de los baches se debe realizar como un parche. La intención de parchear es restaurar permanentemente la estabilidad y la calidad de conducción del pavimento. El parcheo incluye la reparación de áreas discretas de pavimento defectuoso, pero no de longitudes continuas o anchos completos. Esto implica romper el material alrededor del bache, por lo general un mínimo de 15 cm más allá del borde del bache o donde se encuentra material defectuoso y hasta una profundidad tal que el material de abajo aún esté en buen estado. El área excavada debe tener bordes rectos cortados con sierra. Todo el material roto o excavado debe retirarse del área y el orificio restante debe barrerse y secarse. Todas las superficies del área excavada (incluidas las caras nuevas de la capa intermedia) deben impregnarse con un betún caliente o emulsiones bituminosas para garantizar una unión total entre los materiales nuevos y los existentes.





5.2.4. RAP: Como nuevo

El requisito fundamental para producir materiales asfálticos que incluyan RAP y reciclar las propias carreteras mediante cualquiera de las técnicas mencionadas es que el material/carretera resultante tenga las mismas o mejores propiedades en comparación con la mezcla asfáltica y las carreteras existentes. El RAP puede continuar contribuyendo a la economía circular en la parte superior de la jerarquía de residuos, antes de ser " residuo".

Es muy poco probable que los agregados en RAP se vean significativamente afectados por el envejecimiento durante el uso y el reprocesamiento para su reutilización, y habiendo sido previamente utilizados satisfactoriamente en una carretera, es más que probable que sigan siendo satisfactorios después de ser reutilizados.

En general, el uso de del reciclaje de pavimento asfáltico o RAP en nuevas mezclas asfálticas tiene potencial para reducir los impactos ambientales, en comparación con mezclas bituminosas similares fabricados únicamente con agregados pétreos vírgenes.

Sin embargo, la industria debe tener mucho cuidado para asegurarse de que al hacerlo no distorsionen negativamente todas las ventajas ambientales teóricas.

Tradicionalmente, eran necesarias temperaturas de fabricación más altas para una mezcla eficaz del betún nuevo y envejecido. Este problema, que afecta especialmente a las mezclas con alto contenido de RAP, se minimiza hoy en día mediante la reducción de la humedad, el uso de plantas de asfalto energéticamente eficientes, el uso de agentes de “reciclaje” de asfalto y/o la utilización de tecnologías de asfalto de baja temperatura.

Cuando se utilizan agentes de reciclaje, se consideran los impactos ambientales incorporados. La caracterización adecuada del material, el diseño de la mezcla y la ejecución se implementan cuando se usa RAP.





Desde el punto de vista de la evaluación de la sostenibilidad, todo lo relacionado con la durabilidad de los materiales puede tener un impacto significativo. Cuando se utiliza un proceso y un diseño de mezcla apropiados, no hay diferencia entre la durabilidad de las mezclas con y sin RAP.

Se puede conseguir un uso más eficiente de los recursos a partir de operaciones de molienda selectiva y clasificando los RAP según la naturaleza del árido y el tipo y cantidad de betún.

Se cuida que el asfalto ganado en obra no contenga materiales contaminantes que puedan poner en riesgo la Seguridad y Salud y/o la futura reciclabilidad de la nueva mezcla. Ejemplos de este problema son el alquitrán, el asbesto o algunos materiales secundarios que contienen compuestos peligrosos.

El asfalto recuperado se puede utilizar para producir mezclas calientes, templadas y frías. La selección de la mejor opción para una determinada fuente de RAP debe ser realizada cuidadosamente por un tecnólogo de asfalto, con el objetivo de optimizar la eficiencia y los resultados de la producción.

Las distancias de acarreo reducidas pueden tener un efecto positivo notable en el ACV de las nuevas mezclas, debido al ahorro en las emisiones de los vehículos de transporte. La mejora de la sostenibilidad se puede lograr minimizando las distancias de transporte.

Las consideraciones anteriores conducen, en muchas ocasiones, a la necesidad de técnicas avanzadas de caracterización de materiales, diseño de mezclas y ejecución, lo que puede provocar reducciones en la productividad de las plantas de asfalto y requerir inversiones adicionales. Este es un gran esfuerzo que el sector del asfalto inició hace ya décadas y que hoy en día es más importante que nunca, debido a las políticas ambientales actuales.





5.2.5. Economía circular a través del reciclaje de otros materiales de desecho

Si bien la fuerte política de México sobre Economía Circular puede facilitar el uso de asfalto recuperado para la construcción y el mantenimiento de nuevas carreteras, también puede impulsar una serie de iniciativas destinadas a introducir una amplia gama de diferentes subproductos y materiales de desecho de otros sectores en asfalto. En este sentido, la European Asphalt Pavement Association (EAPA) viene advirtiendo en los últimos años, sobre las consecuencias negativas que algunos de estos productos pueden producir en el asfalto, especialmente en términos de calidad/durabilidad, impacto ambiental, salud y seguridad de los trabajadores/operadores.

El uso de algunos materiales de desecho y subproductos en el asfalto podría incluso poner en peligro su reutilización y reciclabilidad al final de su vida útil. Por tanto, y aunque parezca paradójico, el uso de este tipo de materiales podría contradecir los principios de la economía circular, ya que haría necesario el vertido en vertedero de un material que, de lo contrario, sería reutilizado al 100% y/o reciclado varias veces.

Por estas razones, los subproductos o materiales derivados de desechos que se ofrecen a la industria del asfalto solo deben incorporarse al asfalto si se puede demostrar a través de un proceso de Evaluación de Riesgos, que ahora y en el futuro, no habrá desventajas con respecto a la salud, y seguridad, impacto ambiental, reutilización al final de su vida útil, valor por dinero, rendimiento técnico y competitividad de las soluciones asfálticas.





5.2.6. Diferentes interpretaciones en diferentes países europeos

La interpretación general que se aplica al asfalto en la mayoría de los países europeos es que el propietario (es decir, Administración de Carreteras, Agencia Pública, Ministerio, Municipio, etc.) tiene la intención de retirar el material de una carretera determinada antes de una nueva construcción/ operación de mantenimiento, pero sin tener ningún propósito o intención específica para su uso posterior.

Por lo tanto, se aplica automáticamente la definición dada por la Directiva de Residuos y el material se clasifica como “residuo”. Aunque entonces, el contratista normalmente se convierte en el nuevo propietario, la clasificación no cambia automáticamente.

Dicha clasificación implica la aplicación de un régimen de residuos, lo que puede dificultar el uso del asfalto regenerado en la fabricación y mantenimiento de carreteras o en otras aplicaciones de la ingeniería civil. Además, el manejo de este material se vuelve más complejo, por ejemplo, debido a aumentos en la frecuencia de las pruebas o limitaciones en la capacidad máxima de almacenamiento, tiempo de almacenamiento, aplicaciones, etc. Esto normalmente resulta en una menor eficiencia y mayores costos. En otras palabras, estas regulaciones pueden ser en sí mismas una barrera para la economía circular en la ingeniería de pavimentación.

En algunos países, como España, la única alternativa es utilizar el material extraído directamente en el mismo camino mediante la implementación de técnicas de reutilización y/o reciclaje in situ. Con este enfoque, solo el material excedente, que no se usa inmediatamente y, por lo tanto, debe ser transportado, debe manejarse como desecho.





Por otro lado, la clasificación de residuos es reversible en algunos otros países europeos, que han establecido recientemente (o están en proceso de establecer) mecanismos legales para cambiar la clasificación del asfalto ganado en obra, de “residuo” a “producto” o “subproducto”. En estos casos, el cambio de estatus legal generalmente ocurre cuando el asfalto ganado en el sitio se procesa en asfalto recuperado (es decir, a través de limpieza, trituración, tamizado, etc.) y siempre que se cumplan una serie de criterios de “fin de desperdicio”.

Desafortunadamente, estos criterios pueden variar significativamente de un país a otro, dependiendo de las regulaciones nacionales específicas. Además, dado que se trata de un tema candente relacionado con las prioridades europeas, la mayoría de las Administraciones nacionales de toda Europa están desarrollando actualmente nuevos documentos legales, lo que hace que el marco legal europeo actual sea extraordinariamente complejo y esté en constante revisión.

En países como Alemania, los criterios de fin de residuos pueden incluso variar significativamente dentro del país, dependiendo de las Administraciones Nacionales, Regionales o Municipales que lleven a cabo el proyecto. Así, se puede encontrar que, mientras que para algunas de estas Administraciones el proceso de molienda es suficiente para llegar al estado de fin de residuo, otras incluso cobran a contratistas y plantas asfálticas por el almacenamiento de “residuos”.

En Alemania, ya se están realizando una amplia gama de pruebas, como contenido de aglomerante, anillo y bola o composición de agregados para optimizar el contenido de RAP en la nueva mezcla. Sin embargo, esta extensa evaluación no es suficiente para declarar el material como no residuo por parte de un gran número de Administraciones, siendo necesario que además de las operaciones de procesado (triturado, tamizado, etc.) el asfalto ganado en obra sea analizado con una frecuencia mucho mayor (cada 500 toneladas) que cualquier otra materia prima, lo que puede aumentar significativamente los costos.





El problema en México es que no tenemos una política clara, siendo necesario asumir posibles interpretaciones de los documentos existentes, que pueden cambiar según la situación. Las empresas argumentan que el asfalto ganado en el sitio puede cumplir con los estándares de agregados, por lo que tan pronto como se fresa y se carga en la vía, se puede considerar como un "producto" (como un producto de mezcla de agregados). Sin embargo, cuando una planta de asfalto utiliza este material como “componente de asfalto”, el estado del material cambia nuevamente, lo que puede generar nuevos problemas. Además, existen determinadas aplicaciones, como obras de servicios públicos (p. ej., tendido de tuberías o cables a lo largo de las aceras de calles urbanas), que requieren la extracción de asfalto que normalmente no se evalúa. Por lo tanto, esto debe ser considerado como un residuo peligroso.





CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN ECONÓMICA

De acuerdo con el Artículo 185 del Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas (RLOPSRM, 2023), el concepto de "precio unitario" constituye un elemento fundamental en la estructuración y ejecución de proyectos de construcción. Este término se refiere al monto total de remuneración o pago que el contratista recibe por cada unidad de concepto completada y ejecutada conforme a las especificaciones del proyecto, las normas de calidad establecidas y las regulaciones aplicables.

El precio unitario se compone de una serie de elementos que reflejan los diversos costos y consideraciones involucradas en la ejecución de un trabajo específico. Estos elementos incluyen:

6.1. COSTOS DIRECTOS

Los costos directos constituyen la inversión realizada por el contratista en los recursos necesarios para llevar a cabo el trabajo de acuerdo con las especificaciones del proyecto. Esto abarca los materiales, la mano de obra y la maquinaria necesaria. Los materiales comprenden tanto los permanentes, que se integran al trabajo final, como los temporales, utilizados de manera auxiliar durante la ejecución. El costo directo por mano de obra contempla los salarios del personal directamente involucrado en la ejecución del trabajo hasta el nivel de primer mando, excluyendo al personal técnico y administrativo, cuyos costos se consideran indirectos. Por último, el costo directo por maquinaria o equipo de construcción se deriva del uso adecuado de las máquinas necesarias para el trabajo, conforme a las normas de calidad y especificaciones establecidas.

6.2. SOBRECOSTOS

Los sobrecostos incluyen una serie de aspectos adicionales que complementan los costos directos. Estos engloban gastos indirectos tanto de la oficina central como del área de trabajo en el campo, los intereses generados por el financiamiento de la obra, la utilidad esperada por parte del contratista y los cargos adicionales que la parte contratante pueda solicitar. Los costos indirectos comprenden los gastos generales necesarios para la realización de los





trabajos, como administración, dirección técnica, supervisión y construcción de instalaciones generales. Por su parte, el financiamiento se refiere a los intereses derivados de la inversión de recursos propios o adquiridos por el contratista para cumplir con el programa de ejecución de los trabajos. La utilidad, por otro lado, representa el beneficio económico que obtiene el contratista por la ejecución del trabajo, establecido por el mismo contratista. Los cargos adicionales, finalmente, son aquellos gastos que el contratista debe asumir debido a obligaciones extras convenidas después de considerar la utilidad del precio unitario.

6.3. ANÁLISIS Y DESARROLLO

Para llevar a cabo el análisis económico en los diversos escenarios que implican las 4 diferentes mezclas de pavimento asfáltico, se ha empleado el Tabulador de Costos Directos para la Construcción, Modernización y Conservación de Obras de Infraestructura Vial, publicado por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) en el año 2024, así como el Catálogo de Costos Directos de Carreteras 2024 de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC).

Estos tabuladores ((SICT, 2024); CMIC, 2024), actualizados anualmente, sirven como referencia para estimar los costos estándar asociados con la construcción, modernización y conservación de carreteras. Su principal objetivo es facilitar la elaboración de presupuestos de referencia para obras de infraestructura vial y determinar los pagos por asignación directa.

A continuación, se describen los pasos seguidos para llevar a cabo el análisis de precios unitarios:

- Selección del tabulador: Se ha optado por utilizar los tabuladores correspondientes al año 2024, considerándolos como la fuente más actualizada disponible para los costos de referencia.
- Identificación de partidas: Se han identificado las partidas específicas relacionadas con las actividades necesarias para la construcción, modernización y conservación de carreteras dentro de los tabuladores.





- Obtención de costos unitarios: Se han extraído los costos unitarios asociados con cada partida de los tabuladores seleccionados.
- Cálculo de costos totales: Se han calculado los costos totales para cada escenario considerado, multiplicando los costos unitarios por las cantidades de obra requeridas.

Es importante señalar que los costos obtenidos en las siguientes tablas son estimaciones y pueden variar debido a diversos factores, como las condiciones del terreno, la ubicación del proyecto, los precios de los materiales y la disponibilidad de mano de obra. Estas variaciones deben ser consideradas durante el análisis y la planificación del proyecto.

Tabla 33.- Análisis de precios unitarios, pavimento asfáltico en caliente. Fuente: Elaboración Propia.

DESCRIPCIÓN		UNIDAD		
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE, P.U.O.T		M3		
I. MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Cemento asfáltico PG 76-22	kg	64.00000	\$ 14.65	\$ 937.60
Material pétreo de banco granulometría densa	m ³	1.40000	\$ 341.33	\$ 477.86
Emulsión catiónica rompimiento rápido ECR-65	l	3.90000	\$ 13.67	\$ 53.31
Malla de plástica de seguridad color naranja de 30 m de largo x 1.	m	0.30000	\$ 27.60	\$ 8.28
Cinta de advertencia "Precaución", de 91.4 m, clave BAN-PRE-300	m	0.30000	\$ 0.51	\$ 0.15
Trafitambo fabricado en polietileno, color anaranjado, altura 100 c	pza	0.00050	\$ 1,765.34	\$ 0.88
Cono de protección color naranja de 91 cm de altura, modelo C-91	pza	0.00050	\$ 627.30	\$ 0.31
SUBTOTAL:				\$ 1,478.40
II. MANO DE OBRA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Cuadrilla (Ayudante + Cabo de Oficiales)	jor	0.00648	\$ 3,022.94	\$ 19.60
SUBTOTAL:				\$ 19.60
III. EQUIPO Y HERRAMIENTA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Planta de asfalto Barber Greene DM-50 de 191 hp. No incluye gen	hr	0.14385	\$ 3,022.94	\$ 434.84
Cargador de Ruedas Caterpillar 950H, de 197 H.P., capacidad de c	hr	0.02273	\$ 1,862.49	\$ 42.33
Camión de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 7m3 de170 hp	hr	0.09091	\$ 832.37	\$ 75.67
Pavimentadora de Asfalto de ruedas Caterpillar AP500E, de 142 H.	hr	0.07692	\$ 1,988.15	\$ 152.93
Tanque nodriza Seaman Gunnison 2550-SR	hr	0.25000	\$ 86.13	\$ 21.53
Compactador de asfalto Caterpillar CB434C de 80 hp, 2 tambores	hr	0.10527	\$ 785.25	\$ 82.66
Compactador de neumaticos Dynapac CP221 de 99 hp y 21.000 tor	hr	0.10526	\$ 770.36	\$ 81.09
SUBTOTAL:				\$ 891.05
TOTAL COSTO DIRECTO:				\$ 2,389.06





Tabla 34.- Análisis de precios unitarios, pavimento asfáltico en frío. Fuente: Elaboración Propia.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD			
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO, P.U.O.T	M3			
I. MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Emulsión catiónica rompimiento medio ECM-65	l	61.00000	\$ 13.11	\$ 799.71
Emulsión catiónica rompimiento rápido ECR-65	l	3.90000	\$ 13.67	\$ 53.31
Material pétreo de banco granulometría densa	m ³	1.40000	\$ 341.33	\$ 477.86
Malla de plástica de seguridad color naranja de 30 m de largo x 1.	m	0.30000	\$ 27.60	\$ 8.28
Cinta de advertencia "Precaución", de 91.4 m, clave BAN-PRE-300	m	0.30000	\$ 0.51	\$ 0.15
Trafitambo fabricado en polietileno, color anaranjado, altura 100 c	pza	0.00050	\$ 1,765.34	\$ 0.88
Cono de protección color naranja de 91 cm de altura, modelo C-91	pza	0.00050	\$ 627.30	\$ 0.31
			SUBTOTAL:	\$ 1,340.51
II. MANO DE OBRA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Cuadrilla (Ayudante + Cabo de Oficiales)	jor	0.00648	\$ 3,022.94	\$ 19.60
			SUBTOTAL:	\$ 19.60
III. EQUIPO Y HERRAMIENTA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Compactador de neumaticos Dynapac CP221 de 99 hp y 21.000 tor	hr	0.08130	\$ 770.36	\$ 62.63
Planta de asfalto Barber Greene DM-50 de 191 hp. No incluye gen	hr	0.12500	\$ 3,022.94	\$ 377.87
Cargador de Ruedas Caterpillar 950H, de 197 H.P., capacidad de c	hr	0.01786	\$ 1,862.49	\$ 33.26
Tanque nodriza Seaman Gunnison 2550-SR	hr	0.25000	\$ 86.13	\$ 21.53
Camión de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 7m3 de170 hp	hr	0.07143	\$ 832.37	\$ 59.46
Pavimentadora de Asfalto de ruedas Caterpillar AP500E, de 142 H.	hr	0.06060	\$ 1,988.15	\$ 120.49
Compactador de asfalto Caterpillar CB434C de 80 hp, 2 tambores	hr	0.08130	\$ 785.25	\$ 63.84
			SUBTOTAL:	\$ 739.08
			TOTAL COSTO DIRECTO:	\$ 2,099.20





Tabla 35.- Análisis de precios unitarios, RAP con mezcla en caliente. Fuente: Elaboración Propia.

DESCRIPCIÓN		UNIDAD		
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE, P.U.O.T		M3		
I. MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Cinta de advertencia "Precaución", de 91.4 m, clave BAN-PRE-300	m	0.30000	\$ 0.51	\$ 0.15
Malla de plástica de seguridad color naranja de 30 m de largo x 1.	m	0.30000	\$ 27.60	\$ 8.28
Trafitambo fabricado en polietileno, color anaranjado, altura 100 c	pza	0.00050	\$ 1,765.34	\$ 0.88
Cemento asfáltico PG 76-22	kg	59.00000	\$ 14.65	\$ 864.35
Emulsión catiónica rompimiento rápido ECR-65	l	3.90000	\$ 13.67	\$ 53.31
Material pétreo de banco granulometría densa	m ³	0.99000	\$ 341.33	\$ 337.92
Cono de protección color naranja de 91 cm de altura, modelo C-91	pza	0.00050	\$ 627.30	\$ 0.31
			SUBTOTAL:	\$ 1,265.21
II. MANO DE OBRA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Cuadrilla (Ayudante + Cabo de Oficiales)	jor	0.05001	\$ 517.53	\$ 25.88
			SUBTOTAL:	\$ 25.88
III. EQUIPO Y HERRAMIENTA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Camión de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 7m3 de170 hp	hr	0.02778	\$ 832.37	\$ 23.12
Compactador de suelos de tambor liso vibratorio Caterpillar CS533	hr	0.02778	\$ 895.00	\$ 24.86
Barredora remolcable de 1.83m marca Seaman-Gunnison	hr	0.05556	\$ 870.83	\$ 48.38
Pavimentadora de Asfalto de ruedas Caterpillar AP500E, de 142 H.	hr	0.07692	\$ 1,988.15	\$ 152.93
Perfiladora de Pavimento Caterpillar PM102, de 209 H.P. ancho de	hr	0.01425	\$ 4,567.71	\$ 65.09
Tanque nodriza Seaman Gunnison 2550-SR	hr	0.25000	\$ 86.13	\$ 21.53
Recicladora de Pavimento en Caliente AR2000 incluye: Prec	hr	0.06689	\$ 6,498.98	\$ 434.71
			SUBTOTAL:	\$ 770.62
			TOTAL COSTO DIRECTO:	\$ 2,061.71





Tabla 36.- Análisis de precios unitarios, RAP con mezcla en frío. Fuente: Elaboración Propia.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD			
RAP CON MEZCLA EN FRÍO, P.U.O.T	M3			
I. MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Malla de plástica de seguridad color naranja de 30 m de largo x 1.	m	0.30000	\$ 27.60	\$ 8.28
Cinta de advertencia "Precaución", de 91.4 m, clave BAN-PRE-300	m	0.30000	\$ 0.51	\$ 0.15
Trafitambo fabricado en polietileno, color anaranjado, altura 100 c	pza	0.00050	\$ 1,765.34	\$ 0.88
Cono de protección color naranja de 91 cm de altura, modelo C-91	pza	0.00050	\$ 627.30	\$ 0.31
Emulsión catiónica rompimiento medio ECM-65	l	66.00000	\$ 13.11	\$ 865.26
Material pétreo de banco granulometría densa	m³	0.99000	\$ 341.33	\$ 337.92
Emulsión catiónica rompimiento rápido ECR-65	l	3.90000	\$ 13.67	\$ 53.31
			SUBTOTAL:	\$ 1,266.12
II. MANO DE OBRA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Cuadrilla (Ayudante + Cabo de Oficiales)	jor	0.05001	\$ 517.53	\$ 25.88
			SUBTOTAL:	\$ 25.88
III. EQUIPO Y HERRAMIENTA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
Barredora remolcable de 1.83m marca Seaman-Gunnison	hr	0.05556	\$ 870.83	\$ 48.38
Mezcladora giratoria de caminos CATERPILLAR Mod. RM500B, 548	hr	0.07900	\$ 6,546.52	\$ 517.18
Perfiladora de Pavimento Caterpillar PM102, de 209 H.P. ancho de	hr	0.01425	\$4,567.71	\$ 65.09
Camión de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 7m3 de170 hp	hr	0.02500	\$ 832.37	\$ 20.81
Compactador de suelos de tambor liso vibratorio Caterpillar CS533	hr	0.02500	\$ 895.00	\$ 22.38
Pavimentadora de Asfalto de ruedas Caterpillar AP500E, de 142 H.	hr	0.06060	\$ 1,988.15	\$ 120.49
Tanque nodriza Seaman Gunnison 2550-SR	hr	0.25000	\$ 86.13	\$ 21.53
Compactador de neumaticos Dynapac CP221 de 99 hp y 21.000 tor	hr	0.02500	\$ 770.36	\$ 19.26
			SUBTOTAL:	\$ 835.11
			TOTAL COSTO DIRECTO:	\$ 2,127.11

Tabla 37.- Presupuesto por unidad funcional. Fuente: Elaboración Propia.

ESCENARIO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE, P.U.O.T	m³	\$ 2,389.06	245	\$ 585,319.07
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO, P.U.O.T	m³	\$ 2,099.20	245	\$ 514,303.22
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE, P.U.O.T	m³	\$ 2,061.70	245	\$ 505,117.31
RAP CON MEZCLA EN FRÍO, P.U.O.T	m³	\$ 2,127.11	245	\$ 521,140.90

Se ha llevado a cabo un análisis de precios unitarios de una sección longitudinal de un tramo de carretera, cubriendo una longitud de un kilómetro, con un ancho de 3.5 metros y un espesor de 6.5 centímetros. Con base en esta información, se han obtenido los siguientes resultados para la comparación e impacto de los 4 escenarios con las mezclas de pavimento asfáltico, tal como se muestra en la Tabla 37.





Al comparar los diferentes escenarios de pavimentación, se observa que el pavimento asfáltico en caliente tiene un costo de \$585,319.07, siendo el que mayor impacto generaría. En contraste, el pavimento asfáltico en frío presenta un costo de \$514,303.22, lo que representa un 87.92% del costo del pavimento asfáltico en caliente, con un ahorro de \$71,015.85. Por otro lado, el RAP con mezcla en caliente tiene un costo de \$505,117.31, equivalente al 86.35% del costo del pavimento asfáltico en caliente, lo que representa un ahorro de \$80,201.76. Asimismo, el RAP con mezcla en frío tiene un costo de \$521,140.90, siendo un 89.11% del costo del pavimento asfáltico en caliente, lo que implica un ahorro de \$64,178.17 en comparación con este último.

Esta comparación muestra que tanto el pavimento asfáltico en frío como el RAP con mezcla en caliente y el RAP con mezcla en frío ofrecen alternativas más económicas en comparación con el pavimento asfáltico en caliente, con ahorros de \$71,015.85, \$80,201.76 y \$64,178.17 respectivamente.

Tabla 38.- Impacto en los costos por partida. Fuente: Elaboración Propia.

	MATERIALES	MANO DE OBRA	EQUIPO Y HERRAMIENTA
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE, P.U.O.T	\$ 362,209.06	\$ 4,802.00	\$ 218,308.01
PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO, P.U.O.T	\$ 328,426.01	\$ 4,802.00	\$ 181,075.21
RAP CON MEZCLA EN CALIENTE, P.U.O.T	\$ 309,976.21	\$ 6,340.60	\$ 188,800.50
RAP CON MEZCLA EN FRÍO, P.U.O.T	\$ 310,199.16	\$ 6,340.60	\$ 204,601.14





6.4. RESUMEN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el caso del Pavimento Asfáltico en Caliente y tal y como se observa en la Tabla 38, los costos se distribuyen de la siguiente manera: materiales por \$362,209.06, mano de obra por \$4,802.00, y equipo y herramientas por \$218,308.01. Para el Pavimento Asfáltico en Frío, los costos se dividen en: materiales por \$328,426.01, mano de obra por \$4,802.00, y equipo y herramientas por \$181,075.21. En cuanto al RAP con Mezcla en Caliente, los costos comprenden: materiales por \$309,976.21, mano de obra por \$6,340.60, y equipo y herramientas por \$188,800.50. Finalmente, para el RAP con Mezcla en Frío, los costos se desglosan en: materiales por \$310,199.16, mano de obra por \$6,340.60, y equipo y herramientas por \$204,601.14.

Ahora, considerando porcentajes e impacto de ahorro por partida en comparación con la opción más costosa (Pavimento Asfáltico en Caliente), podemos observar:

Pavimento Asfáltico en Frío:

- Materiales: 90.71% (Ahorro de 9.29%) equivalente a \$33,783.05 pesos mexicanos
- Mano de obra: 100% (Ahorro de 0%)
- Equipo y herramienta: 82.91% (Ahorro de 17.09%) uivalente a \$37,232.80 pesos mexicanos

RAP con Mezcla en Caliente:

- Materiales: 85.52% (Ahorro de 14.48%) equivalente a \$52,232.85 pesos mexicanos
- Mano de obra: 131.85% (Costo adicional de 31.85%) equivalente \$1,538.60 a pesos mexicanos
- Equipo y herramienta: 86.46% (Ahorro de 13.54%) equivalente a \$29,507.51 pesos mexicanos

RAP con Mezcla en Frío:

- Materiales: 85.54% (Ahorro de 14.46%) equivalente a \$52,009.90 pesos mexicanos
- Mano de obra: 131.85% (Costo adicional de 31.85%) equivalente a \$1,538.60 pesos mexicanos





- Equipo y herramienta: 93.68% (Ahorro de 6.32%) equivalente a \$13,706.87 pesos mexicanos

Este análisis comparativo entre cuatro mezclas distintas nos permite destacar la posibilidad de alcanzar un ahorro sustancial en materiales, lo cual se traduce en un beneficio económico significativo. Aunque se identificó un incremento en los costos asociados al alquiler del equipo necesario para la pavimentación, es importante subrayar que este análisis se realizó considerando únicamente un tramo de un kilómetro de vialidad. En proyectos de mayor envergadura, es probable que se evidencien mayores eficiencias en el rendimiento de la maquinaria, generando así una utilidad más notable para la empresa.

Adicionalmente, el uso de materiales reciclados conlleva importantes ventajas en términos de sostenibilidad para las carreteras. El asfalto reciclado al 30% contribuye a frenar el agotamiento de los recursos naturales, mientras 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. Además, el procedimiento constructivo asociado al reciclaje implica menores interrupciones de tráfico, mayor seguridad y menos molestias para los usuarios en comparación con los métodos convencionales.

La implementación de rehabilitaciones utilizando materiales reciclados representa un ahorro sustancial, el cual puede ser reinvertido en la conservación, rehabilitación y desarrollo de nuevas carreteras en el país. Este enfoque no solo resulta beneficioso desde una perspectiva económica, sino que también contribuye de manera significativa a la sostenibilidad ambiental y al mejoramiento de la infraestructura vial a largo plazo.





6.4.1. Análisis de Retorno de Inversión: Perfiladora de Pavimento en Frío Caterpillar PM102

Introducción

En el contexto de la creciente demanda por soluciones sostenibles y eficientes en la construcción de infraestructura vial, y en consideración a los resultados obtenidos de las encuestas realizadas a la industria de la construcción en el país, la adquisición de la perfiladora de pavimento en frío Caterpillar PM102 se presenta como una inversión estratégica significativa. Esta maquinaria está destinada a optimizar los procesos vinculados con el reciclaje y la reutilización del pavimento asfáltico, alineándose con las tendencias actuales en la mejora de la sostenibilidad y la eficiencia operativa en el sector de la construcción.

Este apartado presenta un análisis de Retorno de Inversión (ROI) para la adquisición de una Perfiladora de Pavimento en Frío Caterpillar PM102. El análisis considera los costos iniciales, los costos operativos, la producción por hora y el tiempo de recuperación de la inversión. Se estima la cantidad total de pavimento asfáltico que se necesita fresar para recuperar la inversión inicial.

Objetivos del Análisis

El análisis de ROI tiene como objetivos principales:

- **Determinar la Rentabilidad de la Inversión:** Evaluar la relación entre la inversión en la perfiladora Caterpillar PM102 y los beneficios económicos derivados de su uso en proyectos de pavimento asfáltico reciclado. Este análisis permitirá calcular el retorno esperado sobre la inversión y justificar la adquisición en términos financieros.
- **Optimizar el Proceso de Reciclaje:** Analizar cómo la PM102 puede mejorar la eficiencia y efectividad del proceso de reciclaje de pavimento asfáltico, reduciendo costos operativos y aumentando la calidad del material reciclado.
- **Evaluar el Impacto Ambiental Positivo:** Considerar el impacto ambiental de la utilización de la perfiladora en el contexto del reciclaje de pavimento asfáltico,





promoviendo prácticas más sostenibles y contribuyendo a la reducción de residuos y la conservación de recursos.

Importancia de la Perfiladora de Pavimento en Frío Caterpillar PM102 para el Reciclaje de Pavimento Asfáltico

La perfiladora Caterpillar PM102 ofrece características que la hacen particularmente adecuada para el reciclaje de pavimento asfáltico:

- **Eficiencia en la Remoción de Pavimento:** La PM102 está diseñada para realizar un fresado preciso y eficiente, facilitando la remoción del pavimento existente para su reciclaje. Esto permite una preparación adecuada del material para su reutilización en nuevas mezclas asfálticas.
- **Reducción de Costos Operativos:** Al utilizar la perfiladora PM102, se pueden reducir significativamente los costos asociados con la remoción y procesamiento del pavimento asfáltico, lo que contribuye a una mayor rentabilidad en proyectos de rehabilitación de carreteras.
- **Mejora en la Calidad del Material Reciclado:** La tecnología avanzada de la PM102 asegura un fresado uniforme y de alta calidad, lo que mejora la calidad del pavimento asfáltico reciclado y garantiza una mejor adhesión y durabilidad en las nuevas capas de pavimento.

Metodología del Análisis

El análisis de ROI se llevará a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- **Recopilación de Datos Financieros:** Se recopilarán datos sobre los costos de adquisición, operación y mantenimiento de la perfiladora PM102, así como los costos asociados con el reciclaje de pavimento asfáltico.
- **Evaluación de Beneficios Económicos:** Se analizarán los beneficios económicos derivados de la reducción de costos operativos y la mejora en la calidad del material





reciclado. Esto incluirá la estimación de ahorros en costos y la evaluación del incremento en la eficiencia del proceso.

Costo total de la inversión:

- Costo de la máquina: \$11,497,496.48

Costos operativos por hora:

- Costo por hora: \$4,567.71

Producción por hora:

- Ancho de corte: 1 metro
- Velocidad de operación: 27 metros por minuto

Conversión de velocidad de operación a metros por hora:

- $27 \text{ m/min} * 60 \text{ min/hora} = 1620 \text{ m/hora}$
- $1 \text{ metro (ancho de corte)} * 1620 \text{ metros/hora} = 1620 \text{ m}^2/\text{hora}$

Suponiendo una profundidad de corte promedio de 10 cm:

- $1620 \text{ m}^2/\text{hora} * 0.10 \text{ m/m}^2 = 162 \text{ m}^3/\text{hora}$

Tiempo de recuperación de la inversión:

Tiempo de recuperación de la inversión (TR) = Costo total de la inversión (C) / Costos operativos por hora

- $TR = \$11,497,496.48 / \$4,567.71 = 2517.12 \text{ horas}$

Cantidad total de pavimento asfáltico a fresar:

Cantidad total de pavimento asfáltico (Q) = Producción por hora * Tiempo de recuperación de la inversión

- $Q = 162 \text{ m}^3/\text{hora} * 2517.12 \text{ horas} = 408,800.96 \text{ m}$





Resultados

El análisis realizado para la recuperación de la inversión en la adquisición de la Perfiladora de Pavimento en Frío Caterpillar PM102 ha demostrado que se requeriría fresar un total de 408,800.96 m³ de pavimento asfáltico para alcanzar el retorno de la inversión inicial. Con un tiempo estimado de operación de 4 horas diarias, el periodo de recuperación de la inversión sería de aproximadamente 2 años y 5 meses, equivalente a 629 días laborables. Este resultado refleja la viabilidad económica de la máquina, destacando su capacidad para contribuir al reciclaje de pavimento asfáltico, lo cual también se alinea con las crecientes demandas por sostenibilidad en la industria de la construcción. Además de los beneficios financieros, la implementación de este equipo apoya la eficiencia operativa y la reducción de costos a largo plazo, fortaleciendo el enfoque de economía circular en el sector de la infraestructura vial.

Nota: Este análisis se basa en los datos proporcionados. La cantidad real de pavimento asfáltico que se necesita fresar y el tiempo de recuperación de la inversión pueden variar según las circunstancias específicas.

Tabla 39.- Análisis de costo horario. Fuente: Elaboración Propia.

PERFILADORA DE PAVIMENTO EN FRÍO CATERPILLAR PM102, DE 209 H.P. ANCHO DE CORTE 1 M, VELOCIDAD DE OPERACIÓN					
Costo de la máquina (Cm) =	\$	11,497,496.48			
Valor de las llantas (Pn) =	\$	-			
Valor de las piezas especiales (Pa) =	\$	-			
Valor de la máquina (Vm) =	\$	11,497,496.48			
Horas efectivas al año (Hea) =	\$	1,200.00			
Vida Económica (V)=	\$	5.00			
Tasa de Seguro (s)=	\$	3.00			
% de Mantenimiento (Ko)=	\$	80.00			
% de Rescate (r)=	\$	20.00			
Tasa de Interés (i)=	\$	16.00			
Vr = Vm * r =	\$	2,299,499.30			
Ve = V * Hea =	\$	6,000.00			
			CARGOS FIJOS		
			a) Depreciación: $D = (Vm - Vr) / Ve$		\$1,533.00
			b) Inversión: $Im = (Vm + Vr) * i / 2 * Hea$		\$919.80
			c) Seguros: $Sm = (Vm + Vr) * s / 2 * Hea$		\$172.46
			d) Mantenimiento: $Mn = Ko * D$		\$1,226.40
			TOTAL DE CARGOS FIJOS:		\$3,851.66
CONSUMOS					
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo		Importe
Diesel	l	23.73	\$20.46		\$485.52
Aceite lubricante para motor SAE 25V l		0.6286	\$129.14		\$81.18
			TOTAL DE CONSUMO:		\$566.69
OPERACION					
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo		Importe
Operador de primera para equipos m jor		0.15625	\$955.89		\$149.36
			TOTAL DE OPERACION:		\$149.36
			TOTAL DE COSTO HORARIO:		\$4,567.71





CAPÍTULO VII: PERCEPCIÓN Y ADOPCIÓN

Las infraestructuras viales representan activos fundamentales para la sociedad, ya que no solo aseguran la movilidad, sino que también impulsan el crecimiento económico. Para garantizar su sostenibilidad, es crucial que estas infraestructuras exhiban un rendimiento de alta calidad a largo plazo, prioricen la seguridad de los conductores, minimicen su impacto ambiental y estén abiertas a futuros avances, como la incorporación de nuevos materiales o métodos de construcción.

El concepto de desarrollo sostenible ha sido objeto de debate durante muchos años, especialmente en vista del acelerado ritmo del cambio climático, lo que ha llevado a acuerdos entre los países miembros de las Naciones Unidas (ONU) en los últimos años. Una forma de avanzar en el desarrollo sostenible es implementar soluciones sostenibles en diversas industrias. El asfalto, compuesto principalmente por agregados pétreos y betún, este último derivado principalmente del petróleo crudo, ha sido tradicionalmente utilizado en la pavimentación de carreteras. Sin embargo, investigaciones previas han demostrado que el asfalto reciclado, conocido como pavimento asfáltico recuperado (RAP), puede ser reutilizado y reciclado.

En una sociedad que enfrenta los desafíos del cambio climático y está cada vez más preocupada por el medio ambiente, la promoción de soluciones que reduzcan el consumo de energía, las emisiones de carbono y fomenten la conservación de materiales ha impulsado el uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en la industria de la pavimentación.

Además, en la actualidad, la conciencia sobre la importancia de abordar el cambio climático y proteger el medio ambiente ha llevado a una mayor atención hacia soluciones que promuevan la sostenibilidad en todas las facetas de la vida moderna. En este contexto, el uso de pavimento asfáltico reciclado en la industria de la pavimentación ha ganado relevancia como una práctica que no solo reduce la huella de carbono y el consumo de recursos naturales, sino que también ofrece beneficios económicos y operativos significativos.





7.1. PERCEPCIÓN

Este informe representa una parte esencial del TOG para proporcionar información valiosa y actual sobre la percepción y adopción del pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción en México. Para lograr este objetivo, se llevaron a cabo dos variantes de encuestas dirigidas a dos sectores específicos.

La primera encuesta se dirigió al sector de docentes, laboratoristas y expertos con el propósito de recopilar información y opiniones detalladas sobre el uso y la efectividad del RAP. El enfoque de esta encuesta fue comprender el nivel de conocimiento de estos profesionales sobre esta tecnología, así como sus percepciones acerca de sus ventajas, desafíos y aplicaciones en proyectos de infraestructura vial. Los datos recopilados en esta fase ayudarán a identificar áreas de interés y posibles mejoras en el desarrollo e implementación del pavimento asfáltico reciclado, lo que contribuirá al avance de prácticas sostenibles y eficientes en la construcción y mantenimiento de carreteras. Esta encuesta fue realizada con la participación de 25 encuestados, todos ellos especialistas altamente cualificados en el diseño, producción del RAP.

La segunda encuesta se centró en el sector de contratistas e industria de la construcción, con el objetivo de investigar su percepción y experiencia en relación con el pavimento asfáltico reciclado. El objetivo principal fue recopilar datos sobre el nivel de familiaridad, uso y satisfacción con respecto a esta tecnología de pavimentación sostenible. Además, se buscó identificar los desafíos percibidos, las barreras para la adopción y las oportunidades de mejora en la implementación del pavimento asfáltico reciclado en proyectos de infraestructura vial. Los resultados obtenidos en esta etapa se utilizarán para informar y orientar iniciativas futuras destinadas a promover prácticas más sostenibles y eficientes en la construcción de carreteras. La encuesta se llevó a cabo con la participación de 30 encuestados, todos ellos expertos en el diseño, producción, aplicación y mantenimiento del pavimento asfáltico reciclado.



7.1.1. Encuesta I: Docentes, laboratoristas y expertos



Encuesta: Percepción y la adopción del
pavimento asfáltico reciclado (RAP).



Bienvenid@

Este cuestionario obedece a un proyecto de investigación que realiza el Ing. Rios Alcaraz Jose como parte del programa de Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables del ITESO. La investigación busca evaluar y contrastar el potencial sustentable, estructural, económico y funcional del reciclaje del pavimento asfáltico en relación con las mezclas tradicionales de pavimento asfáltico en caliente y en frío para carreteras de alto tránsito.

Si tienes alguna duda o comentario acerca del cuestionario o del proyecto de investigación, puedes escribir al correo jrios.alcaraz@iteso.mx.

¡Gracias, tu participación es muy valiosa!

EVALUACIÓN SUSTENTABLE DEL PAVIMENTO
ASFÁLTICO RECICLADO EN CARRETERAS DE ALTO
TRÁNSITO



Aviso de Privacidad y Ética del Uso de Datos

No se utilizará tu nombre como parte del estudio. El acceso a la información obtenida en el cuestionario será exclusivo para el investigador, con fines académicos, de investigación y de divulgación del conocimiento, únicamente se analizará los resultados obtenidos. Tú información personal de identificación no podrá ser transferida, usada o vendida para fines comerciales ni tampoco será publicada en el informe de resultados ni difundida por cualquier otro medio. Tus datos personales serán guardados y protegidos durante y posterior al trabajo de investigación.





Gracias por participar en nuestra encuesta. Sus respuestas son valiosas para comprender mejor la percepción y la adopción del pavimento asfáltico reciclado. Por favor, responda con sinceridad y de acuerdo con su experiencia.

INFORMACIÓN DEMOGRÁFICA:

¿Cuál es su edad?

- Menor de 18 años
- 18-24 años
- 25-34 años
- 35-44 años
- 45-54 años
- 55-64 años
- 65 años o más

¿Cuál es su nivel educativo?

- Educación primaria
- Educación secundaria
- Educación técnica o profesional
- Educación universitaria
- Posgrado

EXPERIENCIA CON PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO:

¿Está familiarizado/a con el concepto de pavimento asfáltico reciclado?

- Sí
- No

Si ha escuchado sobre el pavimento asfáltico reciclado, ¿podría describir brevemente lo que entiende por este término?

¿Ha tenido alguna experiencia profesional con la utilización de pavimento asfáltico reciclado?

- Sí
- No

Si ha tenido experiencia, ¿en qué contexto ha sido esta utilización? (Seleccione todas las opciones que correspondan)

- Autopistas
- Carreteras
- Calles
- Caminos vecinales
- Estacionamientos
- Otros (especifique):

¿En qué capa estructural ha implementado el RAP?

- Capa de sub-base
- Capa de base
- Capa de rodadura

¿En qué porcentaje?

- Menos del 25%
- Entre el 25% y el 50%
- Entre el 50% y el 75%

PERCEPCIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO:

En una escala del 1 al 3, donde 1 es "Totalmente en desacuerdo" y 3 es "Totalmente de acuerdo", ¿qué tan favorable ve usted la idea de utilizar pavimento asfáltico reciclado en proyectos de construcción vial?

¿Cuáles, en su opinión, son los beneficios más significativos del uso de pavimento asfáltico reciclado? (Seleccione hasta tres opciones)

- Sostenibilidad ambiental
- Reducción de costos
- Durabilidad
- Menor dependencia de materias primas
- Otro (especifique)

EXPERIENCIA ESPECIALIZADA:



¿Cómo se determina la proporción óptima de agregados reciclados en la mezcla asfáltica para garantizar un rendimiento adecuado?

¿Qué porcentaje de RAP se puede usar en una mezcla asfáltica? ¿Existen límites?

¿Qué impacto tiene el RAP en las propiedades de la mezcla asfáltica? (Seleccione hasta tres opciones)

- Aumenta la resistencia a la fatiga
- Reduce la susceptibilidad a la deformación
- Afecta la textura superficial
- Altera las propiedades reológicas
- Otro (especifique)

En su experiencia, ¿cómo afecta la inclusión de material reciclado a la resistencia a la fatiga y a la deformación permanente del pavimento?

¿Cuáles son las propiedades clave que deben evaluarse en el pavimento asfáltico reciclado desde el punto de vista del laboratorio? ¿Cómo difieren de las del asfalto convencional?

En el proceso de diseño de mezclas asfálticas recicladas, ¿cuáles son los factores clave que se deben tener en cuenta para garantizar un pavimento de alta calidad y durabilidad? (Seleccione hasta tres opciones)

- Contenido óptimo de RAP
- Selección de aditivos y mejoradores de calidad
- Control de calidad en la fuente del RAP
- Optimización de los procesos de mezclado
- Evaluación de la durabilidad
- Otro (especifique)

¿Cuál es el papel de la investigación y desarrollo en la mejora continua de las tecnologías de pavimento asfáltico reciclado?

Desde su experiencia en el laboratorio, ¿cómo ha sido el rendimiento del pavimento asfáltico reciclado en comparación con el asfalto convencional en condiciones reales de tráfico y clima?

- Favorable
- Mixto
- No Favorable

DESAFÍOS Y PREOCUPACIONES:

¿Cuáles cree que son los mayores desafíos o preocupaciones asociados con la implementación de pavimento asfáltico reciclado? (Seleccione hasta tres opciones)

- Calidad y durabilidad
- Resistencia a condiciones climáticas
- Percepción pública
- Disponibilidad de tecnologías y materiales
- Falta de investigación
- Falta de especialistas
- Otro (especifique)

En su opinión, ¿cómo puede fomentarse una mayor adopción y conciencia del pavimento asfáltico reciclado entre los profesionales de la construcción y la comunidad en general? (Seleccione hasta tres opciones)

- Incentivos fiscales.
- Subsidios para equipos de reciclaje.
- Cuotas obligatorias de uso.
- Programas de capacitación.
- Políticas de investigación y desarrollo
- Otro (especifique).



¿Cómo perciben los usuarios finales, como conductores y autoridades locales, la diferencia entre el pavimento asfáltico reciclado y el asfalto convencional? ¿Ha habido alguna retroalimentación notable?

Basado en su experiencia, ¿cuáles serían sus recomendaciones para aquellos que consideran el uso de pavimento asfáltico reciclado en proyectos futuros? ¿Y cómo ve el futuro de esta práctica en la ingeniería de carreteras?

CONCLUSIÓN:

¿Tiene algún comentario adicional o sugerencias que le gustaría compartir?

¡Gracias por su tiempo y participación! Sus respuestas son fundamentales para nuestro análisis.

7.1.2. Encuesta II: Contratistas e industria de la construcción



Encuesta: Percepción y la adopción del
pavimento asfáltico reciclado (RAP).



Bienvenid@

Este cuestionario obedece a un proyecto de investigación que realiza el Ing. Rios Alcaraz Jose como parte del programa de Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables del ITESO. La investigación busca evaluar y contrastar el potencial sustentable, estructural, económico y funcional del reciclaje del pavimento asfáltico en relación con las mezclas tradicionales de pavimento asfáltico en caliente y en frío para carreteras de alto tránsito.

Si tienes alguna duda o comentario acerca del cuestionario o del proyecto de investigación, puedes escribir al correo jrios.alcaraz@iteso.mx.

¡Gracias, tu participación es muy valiosa!

EVALUACIÓN SUSTENTABLE DEL PAVIMENTO
ASFÁLTICO RECICLADO EN CARRETERAS DE ALTO
TRÁNSITO



Aviso de Privacidad y Ética del Uso de Datos

No se utilizará tu nombre como parte del estudio. El acceso a la información obtenida en el cuestionario será exclusivo para el investigador, con fines académicos, de investigación y de divulgación del conocimiento, únicamente se analizará los resultados obtenidos. Tú información personal de identificación no podrá ser transferida, usada o vendida para fines comerciales ni tampoco será publicada en el informe de resultados ni difundida por cualquier otro medio. Tus datos personales serán guardados y protegidos durante y posterior al trabajo de investigación.





Gracias por participar en nuestra encuesta. Sus respuestas son valiosas para comprender mejor la percepción y la adopción del pavimento asfáltico reciclado. Por favor, responda con sinceridad y de acuerdo con su experiencia.

INFORMACIÓN DEMOGRÁFICA:

¿Cuál es su edad?

- Menor de 18 años
- 18-24 años
- 25-34 años
- 35-44 años
- 45-54 años
- 55-64 años
- 65 años o más

¿Cuál es su nivel educativo?

- Educación primaria
- Educación secundaria
- Educación técnica o profesional
- Educación universitaria
- Posgrado

INFORMACIÓN GENERAL:

Nombre del contratista:

¿Cuántos años lleva trabajando como contratista de carreteras?

- 1 a 5
- 6 a 10
- 11 a 15
- Mas

¿En qué región opera principalmente su empresa?

¿Está familiarizado/a con el concepto de pavimento asfáltico reciclado?

- Sí
- No

Si ha escuchado sobre el pavimento asfáltico reciclado, ¿podría describir brevemente lo que entiende por este término?

EXPERIENCIA CON RAP:

¿Ha tenido alguna experiencia profesional con la utilización de pavimento asfáltico reciclado?

- Sí
- No

¿Con qué frecuencia utiliza RAP en sus proyectos?

- Nunca
- Frecuentemente
- Siempre

¿Cuántos proyectos ha completado utilizando Recycled Asphalt Pavement (RAP) hasta la fecha?

- 1 a 5
- 6 a 10
- 11 a 15
- Mas

¿En qué tipos de proyectos ha utilizado RAP? (Seleccione todas las opciones que correspondan)

- Autopistas
- Carreteras
- Calles
- Caminos vecinales
- Estacionamientos
- Otros (especifique):

¿En qué capa estructural ha implementado el RAP?

- Capa de sub-base
- Capa de base
- Capa de rodadura

¿En qué porcentaje?

- Menos del 25%
- Entre el 25% y el 50%
- Entre el 50% y el 75%



¿Cuáles son las principales ventajas de usar RAP en sus proyectos? (Seleccione todas las opciones que correspondan)

- Reduce costos
- Mejora la sostenibilidad
- Aumenta la vida útil del pavimento
- Reduce la huella de carbono
- Mejora la resistencia al agrietamiento
- Otros (especifique)

¿Cuáles son las principales desventajas de usar RAP en sus proyectos? (Seleccione hasta tres opciones)

- Dificultad para obtener mezclas consistentes
- Menor calidad del pavimento
- Mayor tiempo de construcción
- Dificultad para compactar el material
- Mayor riesgo de segregación
- Otros (especifique)

¿En qué aspectos considera que el RAP podría mejorar? (Seleccione hasta tres opciones)

- Disponibilidad del material
- Consistencia de las mezclas
- Calidad del material
- Especificaciones técnicas
- Guías de diseño
- Otros (especifique):

ESPECIFICACIONES Y DISEÑO:

¿Qué métodos de diseño utiliza para incorporar RAP en sus proyectos?

- Método Marshall
- Método Superpave
- Protocolo AMAAC
- Método AASHTO
- Otro (especifique)

¿Qué especificaciones técnicas utiliza para el RAP en sus proyectos?

¿Ha encontrado alguna dificultad al trabajar con las especificaciones o los métodos de diseño actuales para RAP?

- Si
- No

Si respondió "Sí", ¿de qué tipo de dificultades se trata? (Describa brevemente)

COSTOS Y SUSTENTABILIDAD:

¿En general, ha encontrado que el uso de RAP reduce los costos de sus proyectos?

- Si
- No

¿En qué medida considera que el RAP contribuye a la sostenibilidad de sus proyectos?

- Mucho
- Poco
- Nada

¿Qué medidas o incentivos considera que podrían fomentar el uso de RAP en la construcción de carreteras? (Seleccione hasta tres opciones)

- Incentivos fiscales.
- Subsidios para equipos de reciclaje.
- Cuotas obligatorias de uso.
- Programas de capacitación.
- Políticas de investigación y desarrollo
- Otro (especifique).



MONITOREO Y MANTENIMIENTO:

¿Cómo realiza el monitoreo y mantenimiento del pavimento con RAP?

¿Ha notado alguna diferencia en los requerimientos de mantenimiento en comparación con asfalto convencional?

- Si
- No

EVALUACIÓN DE SATISFACCIÓN:

En una escala del 1 al 5, ¿qué tan satisfecho está generalmente con el rendimiento del RAP en sus proyectos?

¿Recomendaría el uso de RAP en pavimentación a otros contratistas?

- Si
- No

CONCLUSIÓN:

¿Hay algún comentario adicional que le gustaría compartir sobre su experiencia con el uso de RAP en proyectos de pavimentación?

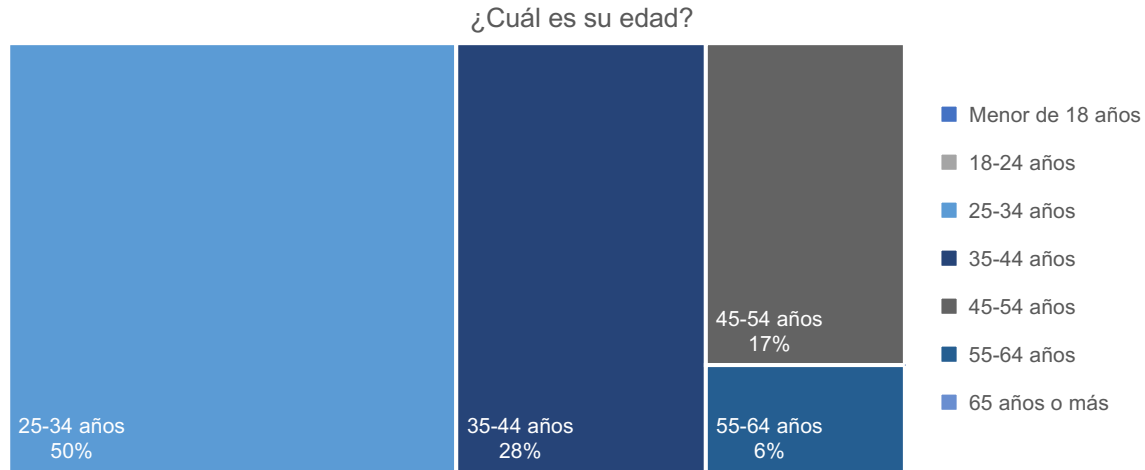
¡Gracias por su tiempo y participación! Sus respuestas son fundamentales para nuestro análisis.



7.2. INFORME DE RESULTADOS

7.2.1. Encuesta I: Docentes, laboratoristas y expertos

Información demográfica



Gráfica.- 5 Edad de la muestra. Fuente: Elaboración Propia.

La mayoría de los docentes, laboratoristas y expertos encuestados sobre la percepción y adopción del pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción en México se encuentran en el rango de edad de 25 a 34 años, representando el 50%. Le siguen en menor proporción los encuestados de 35 a 44 años, con un 28%, y luego los de 45 a 54 años, con un 17%. Por último, los encuestados de 55 a 64 años representan el 6%, mientras que no hubo participantes menores de 18 años ni mayores de 65 años en esta encuesta. Este hecho permite inferir que la aceptación y la implementación del RAP están siendo impulsada por una generación de profesionales de la construcción relativamente joven.

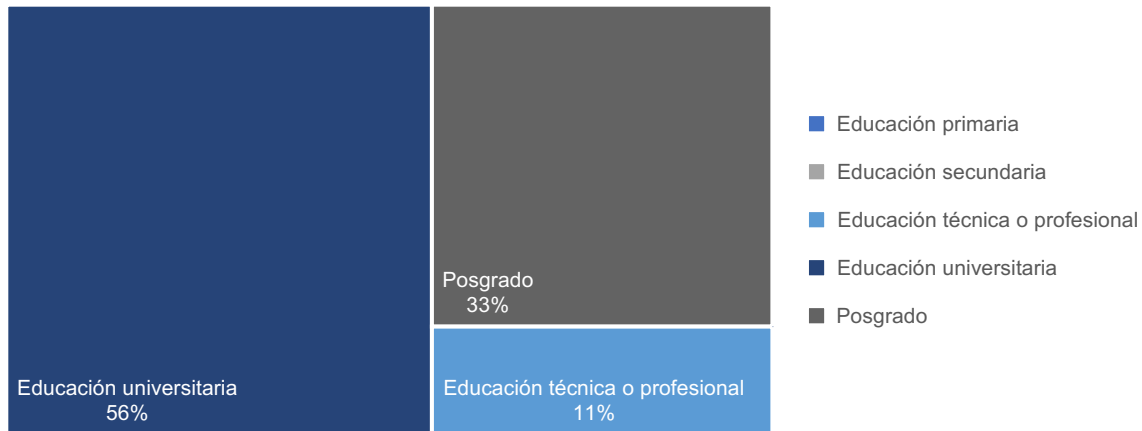
Comentarios adicionales:

- Es importante destacar que la edad no es el único factor que determina la percepción y adopción del RAP.
- Otros factores, como la experiencia, la formación y el acceso a la información, también pueden influir en la decisión de utilizar RAP en un proyecto.





¿Cuál es su nivel educativo?



Gráfica.- 6 Nivel educativo. Fuente: Elaboración Propia.

Podemos deducir que la mayoría de los encuestados tienen un nivel educativo universitario, representando el 56% de los participantes. Le siguen aquellos con posgrado, que constituyen el 33% de los encuestados. Los encuestados con educación técnica o profesional representan el 11% del total, mientras que no hubo participantes con nivel de educación primaria ni secundaria en esta encuesta. La alta incidencia de estudios universitarios entre los encuestados (56%) evidencia que la aceptación y el uso del RAP están siendo liderados por profesionales de la construcción con un alto nivel de formación.

Experiencia con pavimento asfáltico reciclado

¿Ha tenido alguna experiencia profesional con la utilización de pavimento asfáltico reciclado?

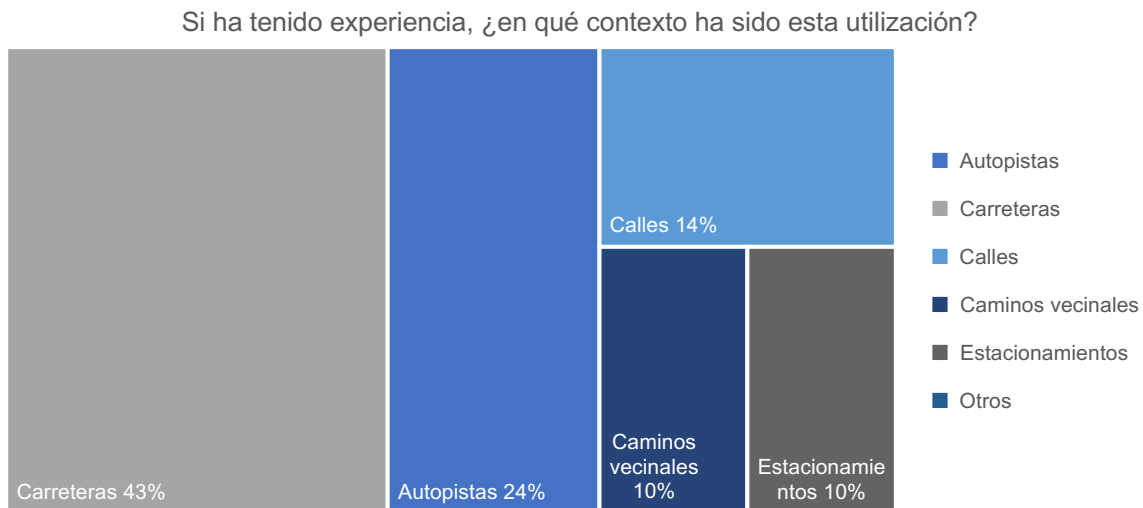


Gráfica.- 7 Experiencia profesional con pavimento asfáltico reciclado. Fuente: Elaboración Propia.





Se observa que el 100% de los encuestados ha tenido alguna experiencia profesional con la utilización de pavimento asfáltico reciclado. Lo que indica que todos los participantes tienen experiencia directa o indirecta con esta tecnología en el contexto de su trabajo en la industria de la construcción en México.



Gráfica.- 8 Uso de RAP en proyectos. Fuente: Elaboración Propia.

Los encuestados han utilizado pavimento asfáltico reciclado en varios tipos de proyectos. En detalle, el 43% de los encuestados ha utilizado RAP en proyectos de carreteras, seguido por un 24% que lo ha utilizado en autopistas. Esto es consistente con las prácticas comunes en la industria de la construcción, ya que las carreteras y autopistas son las que tienen mayor volumen de tráfico y requieren de un pavimento más resistente. Además, se registró un 14% de utilización en calles y un 10% tanto en caminos vecinales como en estacionamientos. No se obtuvieron respuestas para otros tipos de proyectos.

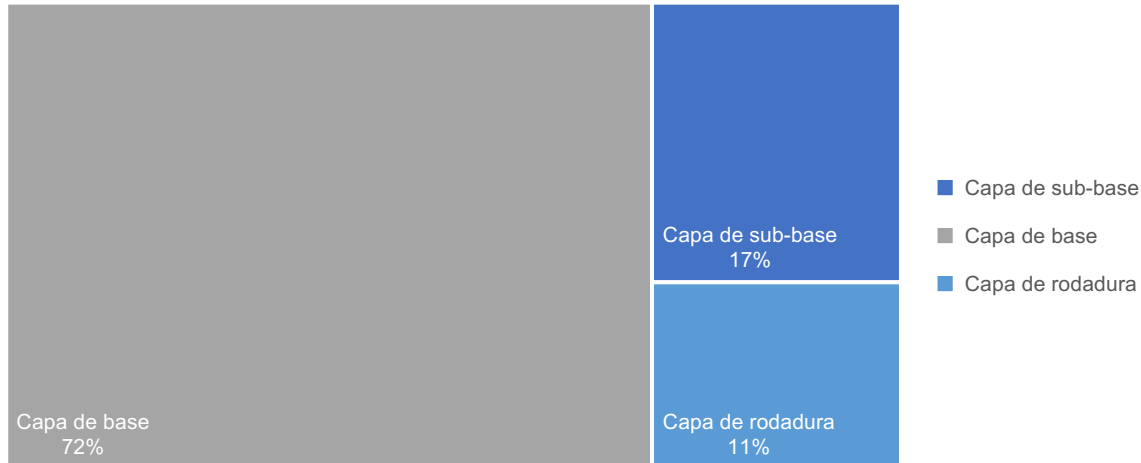
Comentarios adicionales:

- Es importante destacar que el uso del RAP en diferentes tipos de proyectos dependerá de las especificaciones técnicas y de las condiciones del proyecto.
- Es recomendable consultar con un ingeniero especialista en pavimentos para determinar si el RAP es una opción viable para un proyecto específico.





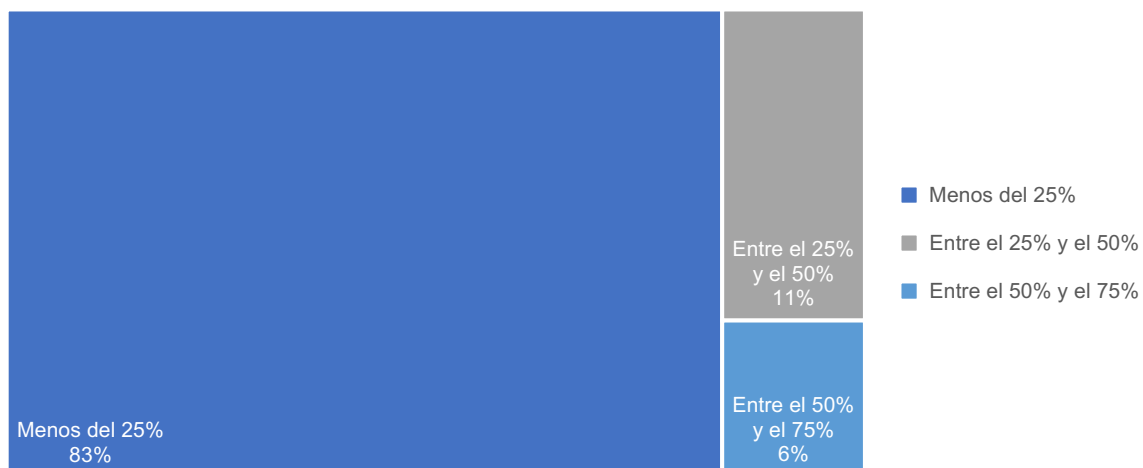
¿En qué capa estructural ha implementado el RAP?



Gráfica.- 9 Implementación de RAP en capas estructurales. Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de la encuesta revelan que la capa de base es el estrato estructural donde se ha implementado el RAP con mayor frecuencia, alcanzando un 72%. Este dato coincide con las prácticas usuales en la industria de la construcción, ya que la capa de base es una capa estructural que no está sujeta a las mismas exigencias de resistencia y durabilidad que la capa de rodadura. En menor medida, se ha utilizado el RAP en la capa de sub-base, con un 17%. Esto se debe a que la capa de sub-base es un estrato menos crítico que la capa de base, y el uso de RAP puede ofrecer beneficios económicos y ambientales. El uso de RAP en la capa de rodadura es menos común, con un 11%. Esto se explica por el hecho de que la capa de rodadura está sujeta a un mayor desgaste y tráfico, y el RAP podría no tener las mismas propiedades de rendimiento que el asfalto nuevo.

¿En qué porcentaje?



Gráfica.- 10 Porcentaje de Implementación. Fuente: Elaboración Propia.





La encuesta revela que la gran mayoría de los encuestados, el 83%, utilizaron RAP en un porcentaje menor al 25%. Esto sugiere que, en la mayoría de los casos, el RAP se ha utilizado como parte de una mezcla con una proporción relativamente baja de material reciclado. Por otro lado, el 11% de los encuestados indicaron haber utilizado RAP en un rango entre el 25% y el 50%, lo que sugiere un uso moderado de este material reciclado en sus proyectos de pavimentación. Un pequeño porcentaje, el 6%, reportó haber utilizado RAP en un rango entre el 50% y el 75%. Esto indica que solo algunos encuestados han adoptado un enfoque más agresivo hacia el uso de RAP, posiblemente buscando maximizar los beneficios ambientales y económicos de esta tecnología. En general, estos resultados sugieren que si bien la mayoría de los encuestados están utilizando RAP en sus proyectos de pavimentación, la proporción de material reciclado en la mezcla sigue siendo relativamente baja en la mayoría de los casos. Esto señala que la utilización del RAP aún es relativamente baja en la industria de la construcción en México.

Percepción del pavimento asfáltico reciclado

En una escala del 1 al 3, donde 1 es "Totalmente en desacuerdo" y 3 es "Totalmente de acuerdo", ¿qué tan favorable ve usted la idea de utilizar pavimento asfáltico reciclado en proyectos de construcción vial?



Gráfica.- 11 Percepción de utilizar RAP en proyectos de construcción vial (1-3). Fuente: Elaboración Propia.

La gran mayoría de los encuestados (94%) está totalmente de acuerdo con la idea de utilizar pavimento asfáltico reciclado en proyectos de construcción vial. Estos resultados reflejan una fuerte aceptación y apoyo hacia el uso de pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción vial en México. La alta proporción de respuestas "Totalmente de acuerdo" sugiere que los encuestados consideran esta práctica como beneficiosa y efectiva en términos



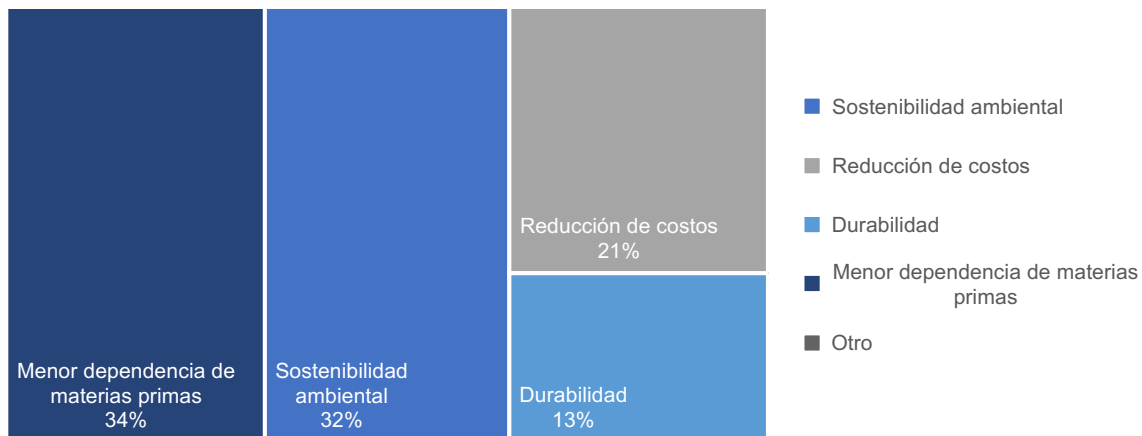


de sostenibilidad, eficiencia y calidad en la construcción de carreteras. Esto indica que existe una alta percepción favorable hacia el RAP en la industria de la construcción en México.

Comentarios adicionales:

- Es importante destacar que la percepción favorable hacia el RAP no es el único factor que determina su adopción en la industria de la construcción.
- Otros factores, como el costo, la disponibilidad y las especificaciones técnicas, también pueden influir en la decisión de utilizar RAP en un proyecto.

¿Cuáles, en su opinión, son los beneficios más significativos del uso de pavimento asfáltico reciclado?



Gráfica.- 12 Beneficios significativos del uso de pavimento asfáltico reciclado. Fuente: Elaboración Propia.

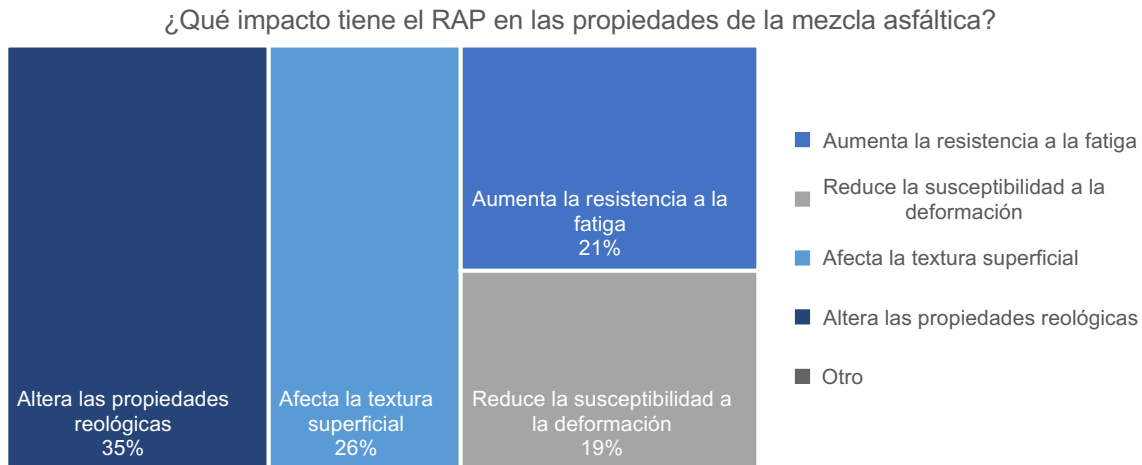
La mayoría de los encuestados, un 34%, considera que el beneficio más significativo es la menor dependencia de materias primas. Esta percepción refleja una preocupación por la reducción de la extracción de recursos naturales y una preferencia por prácticas de construcción más sostenibles y ecoamigables. Además, el 32% de los encuestados identifica la sostenibilidad ambiental como uno de los beneficios más importantes del uso de pavimento asfáltico reciclado. Esto denota una fuerte conciencia ambiental y un compromiso con la protección del medio ambiente en la industria de la construcción. Un 21% de los encuestados menciona la reducción de costos como un beneficio significativo. Lo que sugiere que algunos profesionales de la construcción consideran que el pavimento asfáltico reciclado puede ofrecer ventajas económicas importantes en términos de eficiencia y ahorro de recursos. En cuanto a la durabilidad, un 13% de los encuestados la menciona como un beneficio relevante.





Esto sugiere que algunos expertos consideran que el pavimento asfáltico reciclado puede ofrecer un rendimiento y una vida útil satisfactorios en comparación con los materiales convencionales. Los principales beneficios del RAP son ambientales y económicos, la mayoría de los encuestados considera que el RAP es una alternativa viable al asfalto nuevo.

Experiencia especializada



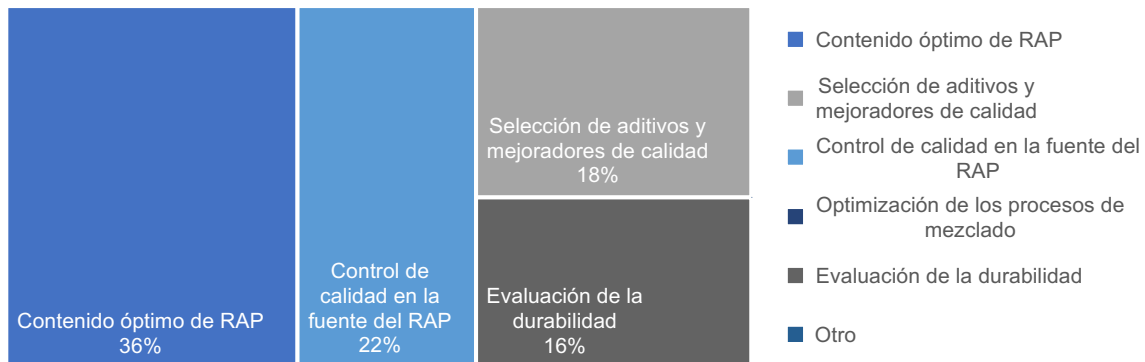
Gráfica.- 13 Impacto del RAP en propiedades de la mezcla asfáltica. Fuente: Elaboración Propia.

Un significativo 35% de los encuestados indica que el RAP altera las propiedades reológicas de la mezcla asfáltica. Esto sugiere que hay un reconocimiento generalizado de que la inclusión de RAP puede influir en la viscosidad, la fluidez y otras características mecánicas del asfalto reciclado, lo que afecta su comportamiento durante la colocación y el servicio. Además, un 26% de los encuestados menciona que el RAP afecta la textura superficial de la mezcla asfáltica. Esto sugiere que algunos expertos consideran que la inclusión de RAP puede tener un impacto en la rugosidad y la uniformidad de la superficie del pavimento, lo que puede afectar la seguridad y el rendimiento del mismo. En cuanto a otros aspectos, un 21% de los encuestados señala que el RAP aumenta la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica, mientras que un 19% indica que reduce la susceptibilidad a la deformación. Estas respuestas sugieren que algunos expertos perciben beneficios en términos de resistencia estructural y durabilidad al utilizar RAP en la mezcla asfáltica.





En el proceso de diseño de mezclas asfálticas recicladas, ¿cuáles son los factores clave que se deben tener en cuenta para garantizar un pavimento de alta calidad y durabilidad?



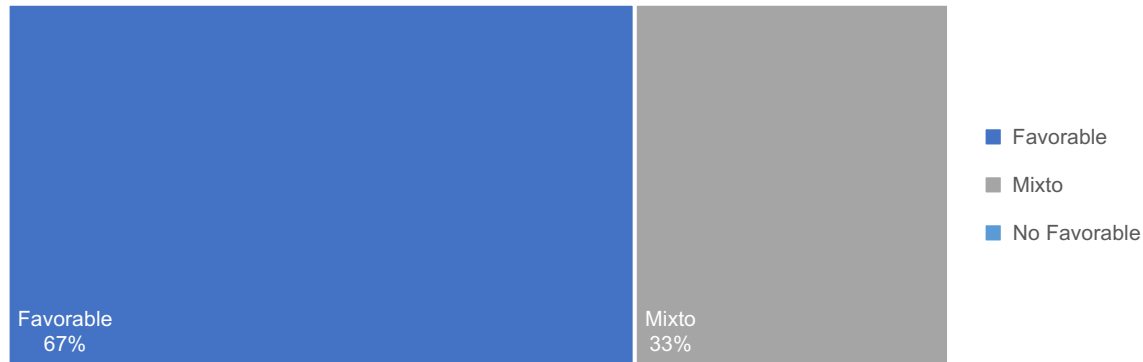
Gráfica.- 14 Factores clave en el diseño de mezclas asfálticas recicladas para alta calidad y durabilidad.
Fuente: Elaboración Propia.

El 36% de los encuestados indica que el contenido óptimo de RAP es un factor crucial a tener en cuenta, destacando la importancia de determinar la cantidad adecuada de RAP a incorporar en la mezcla para lograr un alto rendimiento de la mezcla, así como un equilibrio óptimo entre sostenibilidad, rendimiento y durabilidad. Además, un 22% de los encuestados menciona el control de calidad en la fuente del RAP como un factor clave. Esto resalta la necesidad de garantizar la calidad y la consistencia del material reciclado desde su origen, lo que puede influir significativamente en las propiedades y el rendimiento del pavimento. El 18% de los encuestados señala la selección de aditivos y mejoradores de calidad como otro factor importante, lo que refleja que algunos expertos consideran que la incorporación de aditivos específicos puede mejorar las propiedades de la mezcla y contribuir a la durabilidad del pavimento. Por último, un 16% de los encuestados destaca la evaluación de la durabilidad como un factor clave en el diseño de mezclas asfálticas recicladas, lo que destaca la importancia de realizar pruebas y análisis para asegurar que el pavimento tenga una vida útil adecuada y cumpla con los requisitos de rendimiento a largo plazo.





Desde su experiencia en el laboratorio, ¿cómo ha sido el rendimiento del pavimento asfáltico reciclado en comparación con el asfalto convencional en condiciones reales de tráfico y clima?



Gráfica.- 15 Rendimiento del pavimento asfáltico reciclado vs los pavimentos convencionales en condiciones reales. Fuente: Elaboración Propia.

La mayoría de los encuestados, un 67%, informa un rendimiento favorable del pavimento asfáltico reciclado en comparación con el asfalto convencional en condiciones reales de tráfico y clima. Lo que sugiere una percepción generalizada de que el pavimento asfáltico reciclado es capaz de cumplir con los estándares de calidad y desempeño esperados en diferentes entornos y situaciones de uso. Por otro lado, un 33% de los encuestados reporta un rendimiento mixto, lo que indica que algunos expertos han experimentado resultados variables al comparar el pavimento asfáltico reciclado con el asfalto convencional. Esto puede sugerir que existen ciertas condiciones o factores específicos que pueden influir en el rendimiento del pavimento asfáltico reciclado, y que pueden requerir una atención especial durante el diseño y la implementación de proyectos. En general, estos resultados indican que la mayoría de los encuestados perciben al pavimento asfáltico reciclado como una opción viable y efectiva en la construcción de carreteras en México, aunque también señalan la importancia de considerar diversos factores para garantizar su rendimiento óptimo en diferentes contextos y condiciones.

Comentarios adicionales:

- El RAP tiene un buen rendimiento en comparación con el asfalto convencional en condiciones reales de tráfico y clima.
- Es importante considerar las condiciones específicas del proyecto al seleccionar el material más adecuado para la construcción de la carretera.





Desafíos y preocupaciones

¿Cuáles cree que son los mayores desafíos o preocupaciones asociados con la implementación de pavimento asfáltico reciclado?



Gráfica.- 16 Desafíos y preocupaciones en la implementación de RAP. Fuente: Elaboración Propia.

El mayor desafío identificado por los encuestados es la falta de especialistas, con un significativo 28% de las respuestas. Esto indica una preocupación generalizada por la escasez de profesionales capacitados y con experiencia en el diseño, la construcción y el mantenimiento de pavimentos asfálticos reciclados, lo que puede limitar la adopción y el éxito de esta tecnología. Otro desafío destacado es la calidad y durabilidad del pavimento asfáltico reciclado, con un 23% de las respuestas. Esto sugiere que algunos expertos tienen preocupaciones sobre la capacidad del RAP para cumplir con los estándares de calidad y resistencia esperados en proyectos de construcción vial. La resistencia a condiciones climáticas, la disponibilidad de tecnologías y materiales, y la percepción pública también son citadas como preocupaciones significativas, aunque en menor medida. Esto sugiere que los encuestados reconocen la importancia de abordar estos aspectos para garantizar el éxito y la aceptación del pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción en México. En resumen, este análisis resalta una serie de desafíos y preocupaciones que deben ser considerados al implementar pavimento asfáltico reciclado, destacando la importancia de abordar estas cuestiones de manera integral para promover una adopción exitosa y sostenible de esta tecnología en la industria de la construcción en México.

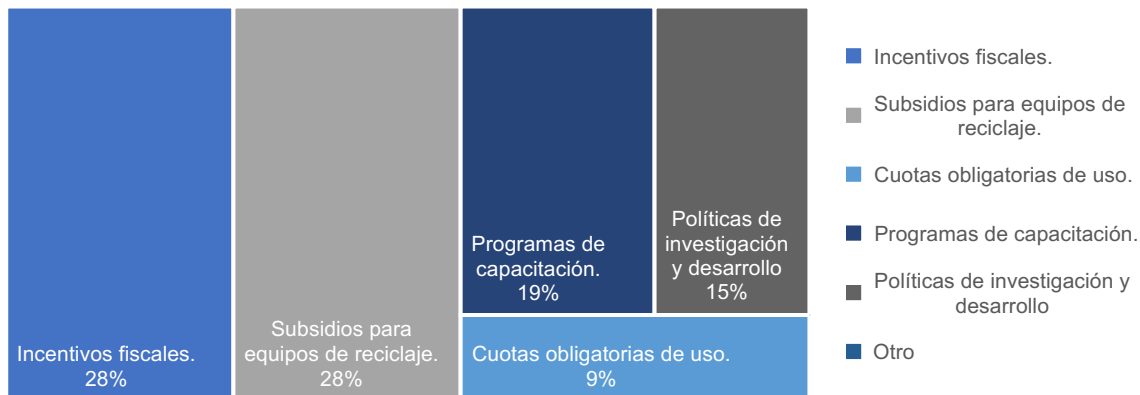




Recomendaciones:

- Se recomienda desarrollar programas de capacitación para formar especialistas en el diseño, construcción y evaluación del pavimento asfáltico reciclado.
- Se recomienda desarrollar especificaciones y guías técnicas para el uso del RAP en diferentes tipos de proyectos.
- Se recomienda promover el uso del RAP a través de campañas de concienciación y formación.
- Se recomienda consultar con un ingeniero especialista en pavimentos para determinar si el RAP es una opción viable para un proyecto específico.

En su opinión, ¿cómo puede fomentarse una mayor adopción y conciencia del pavimento asfáltico reciclado entre los profesionales de la construcción y la comunidad en general?



Gráfica.- 17 Fomento de la adopción y conciencia del RAP en la industria. Fuente: Elaboración Propia.

El uso de incentivos fiscales y subsidios para equipos de reciclaje se destacan como las principales medidas sugeridas, ambas con un 28% de las respuestas. Esto sugiere que los encuestados consideran que los beneficios económicos y financieros podrían ser un factor importante para incentivar la adopción del pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción. Los programas de capacitación también son identificados como una estrategia importante, con un 19% de las respuestas. Esto revela que los encuestados reconocen la importancia de educar y capacitar a los profesionales de la construcción sobre las ventajas y técnicas de aplicación del pavimento asfáltico reciclado. Las políticas de investigación y desarrollo también son mencionadas, con un 15% de las respuestas.





Esto sugiere que los encuestados consideran que es crucial impulsar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y prácticas relacionadas con el pavimento asfáltico reciclado para mejorar su eficiencia y sostenibilidad. Se requiere un enfoque multifacético para fomentar la adopción del pavimento asfáltico reciclado. Es necesario combinar incentivos económicos, programas de capacitación y políticas públicas para lograr un cambio significativo.

Nota:

- La información proporcionada en este análisis se basa en los resultados de la encuesta y no debe ser interpretada como una recomendación o asesoramiento profesional.





Resumen y análisis de resultados

Información Demográfica:

La encuesta revela que la mayoría de los encuestados son jóvenes profesionales de entre 25 y 34 años, lo que sugiere que la adopción del pavimento asfáltico reciclado está siendo impulsada por una generación relativamente joven en la industria de la construcción en México. Además, se destaca que la mayoría de los participantes poseen educación universitaria, lo que evidencia que la aceptación y el uso del RAP están siendo liderados por profesionales altamente formados.

Experiencia con RAP:

Todos los encuestados tienen experiencia con la utilización de RAP en proyectos de construcción vial. La mayoría ha utilizado RAP en proyectos de carreteras y autopistas, lo que refleja las prácticas comunes en la industria de la construcción.

Percepción del RAP:

La encuesta revela una alta aceptación del RAP entre los encuestados, con el 94% totalmente de acuerdo con su uso en proyectos de construcción vial. Los beneficios más significativos percibidos incluyen una menor dependencia de materias primas, la sostenibilidad ambiental y la reducción de costos.

Experiencia Especializada:

Se observa una comprensión generalizada entre los encuestados sobre cómo el RAP afecta las propiedades reológicas y la textura superficial de la mezcla asfáltica. Además, se reconocen beneficios en términos de resistencia estructural y durabilidad.

Desafíos y Preocupaciones:

Los principales desafíos identificados incluyen la falta de especialistas y preocupaciones sobre la calidad y durabilidad del RAP. También se mencionan preocupaciones sobre la resistencia a condiciones climáticas, la disponibilidad de tecnologías y materiales, y la percepción pública.





Recomendaciones:

Se sugiere desarrollar programas de capacitación, especificaciones y guías técnicas, así como promover el uso del RAP a través de campañas de concienciación. Además, se recomienda consultar con ingenieros especialistas en pavimentos para determinar la viabilidad del RAP en proyectos específicos.

Conclusiones:

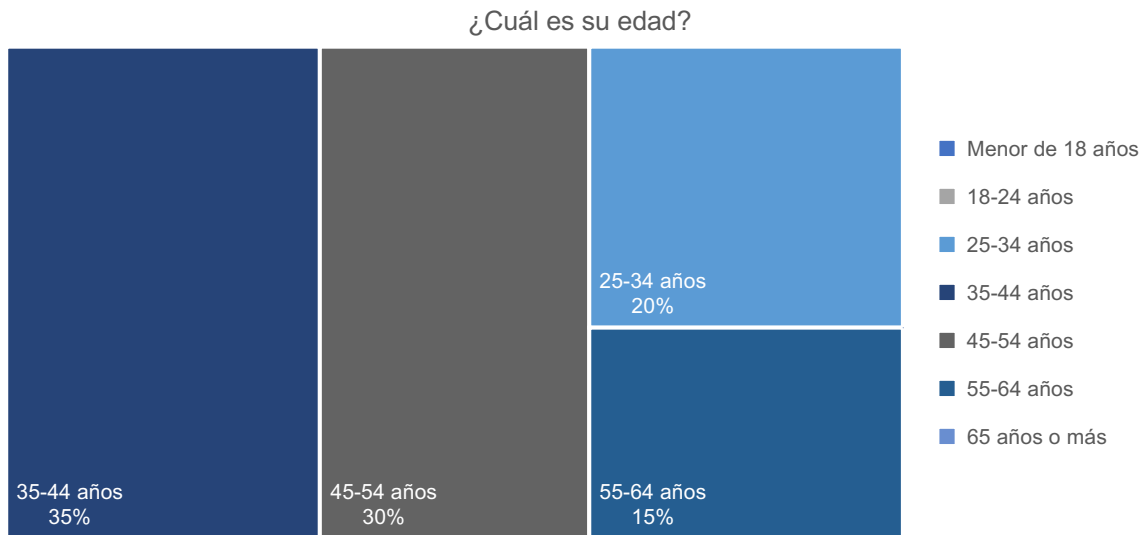
La encuesta destaca la necesidad de abordar desafíos y preocupaciones para promover una adopción exitosa y sostenible del RAP en la industria de la construcción en México. Se enfatiza la importancia de un enfoque multifacético que combine incentivos económicos, programas de capacitación y políticas de investigación y desarrollo para impulsar el uso del RAP.

Los resultados muestran una tendencia positiva hacia el uso del RAP, respaldada por una comprensión generalizada de sus beneficios ambientales, económicos y técnicos. Sin embargo, también se identifican desafíos significativos, como la falta de especialistas y preocupaciones sobre la calidad y durabilidad del RAP, que requieren atención. En general, estos hallazgos subrayan la necesidad de continuar fomentando la investigación, la capacitación y el desarrollo de políticas para impulsar una adopción más amplia y efectiva del pavimento asfáltico reciclado en México, con miras a promover la sostenibilidad y la eficiencia en la industria de la construcción vial.



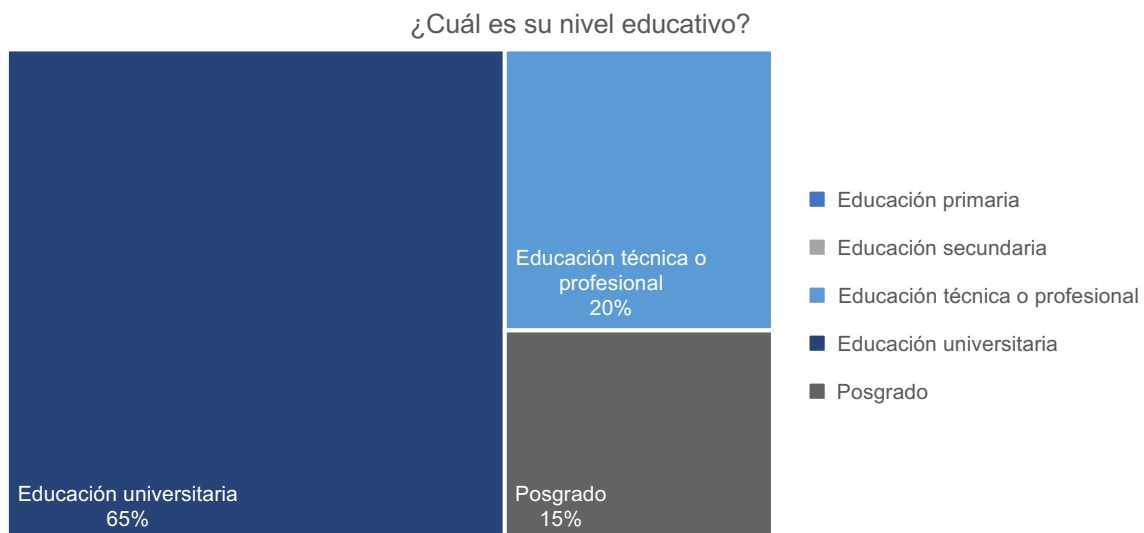


7.2.2. Encuesta II: Contratistas e industria de la construcción Información demográfica



Gráfica.- 18 Edad de la muestra. Fuente: Elaboración Propia.

El grupo más numeroso se encuentra en el rango de edad de 35 a 44 años, representando el 35% de los encuestados. Le siguen de cerca aquellos de 45 a 54 años, constituyendo el 30%. El siguiente grupo más grande corresponde a los encuestados de 55 a 64 años, representando el 15%. Por otro lado, los encuestados de 25 a 34 años conforman el 20% de la muestra. No se registraron encuestados menores de 18 años ni mayores de 65 años en esta encuesta. Lo que sugiere una diversidad generacional entre los contratistas e industria de la construcción encuestados, aunque la mayoría se concentra en los grupos de edad de 35 a 54 años.



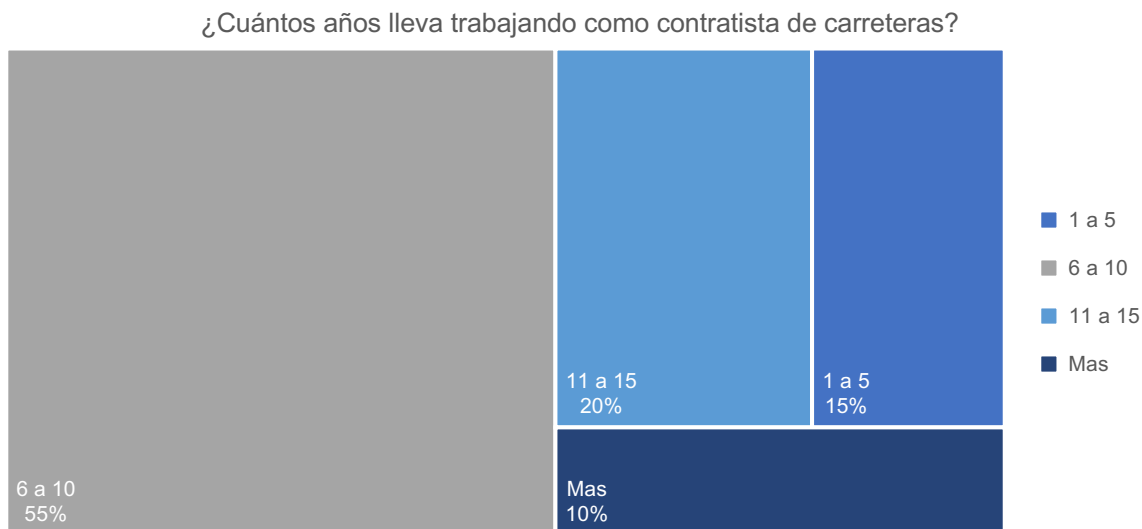
Gráfica.- 19 Nivel educativo. Fuente: Elaboración Propia.





Los resultados sugieren una predominancia de encuestados con educación universitaria, representando el 65% de la muestra. El siguiente grupo más numeroso corresponde a aquellos con educación técnica o profesional, con el 20%. Los encuestados con posgrado representan el 15% de la muestra. No se registraron encuestados con educación primaria ni secundaria en esta encuesta. Este análisis sugiere que la mayoría de los contratistas e industria de la construcción encuestados poseen un nivel educativo universitario, lo que indica un alto grado de formación académica en este grupo y posiblemente una mayor especialización en temas relacionados con la construcción y la ingeniería.

Información general



Gráfica.- 20 Años como contratista de carreteras. Fuente: Elaboración Propia.

La mayoría de los encuestados han estado trabajando como contratistas de carreteras durante un período de 6 a 10 años, representando el 55% de la muestra. Aproximadamente el 20% de los encuestados han estado trabajando en esta área entre 11 y 15 años, seguido por un 15% que lleva de 1 a 5 años en la industria. El 10% restante ha estado trabajando como contratista de carreteras durante más de 15 años. La encuesta fue respondida principalmente por contratistas de carreteras con experiencia, lo que indica que sus opiniones sobre el pavimento asfáltico reciclado son valiosas. La diversidad de experiencia en la muestra proporciona una perspectiva completa sobre la percepción y adopción del pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción en México.





Experiencia con RAP

¿Ha tenido alguna experiencia profesional con la utilización de pavimento asfáltico reciclado?



Gráfica.- 21 Experiencia profesional con pavimento asfáltico reciclado

Los resultados muestran que el 100% de los encuestados ha tenido alguna experiencia profesional con la utilización de pavimento asfáltico reciclado. Esta respuesta indica que todos los encuestados han tenido algún tipo de involucramiento o trabajo práctico relacionado con el pavimento asfáltico reciclado en sus actividades profesionales dentro de la industria de la construcción en México.

¿Con qué frecuencia utiliza RAP en sus proyectos?



Gráfica.- 22 Frecuencia de uso de RAP en proyectos. Fuente: Elaboración Propia.





Todos los encuestados utilizan RAP frecuentemente en sus proyectos, no se reportó que ningún contratista nunca use RAP, tampoco se reportó que ningún contratista use RAP siempre. El RAP es un material ampliamente utilizado en la industria de la construcción en México su uso frecuente indica que los contratistas lo consideran una opción viable y valiosa para la construcción y conservación de carreteras.

¿Cuántos proyectos ha completado utilizando Recycled Asphalt Pavement (RAP) hasta la fecha?



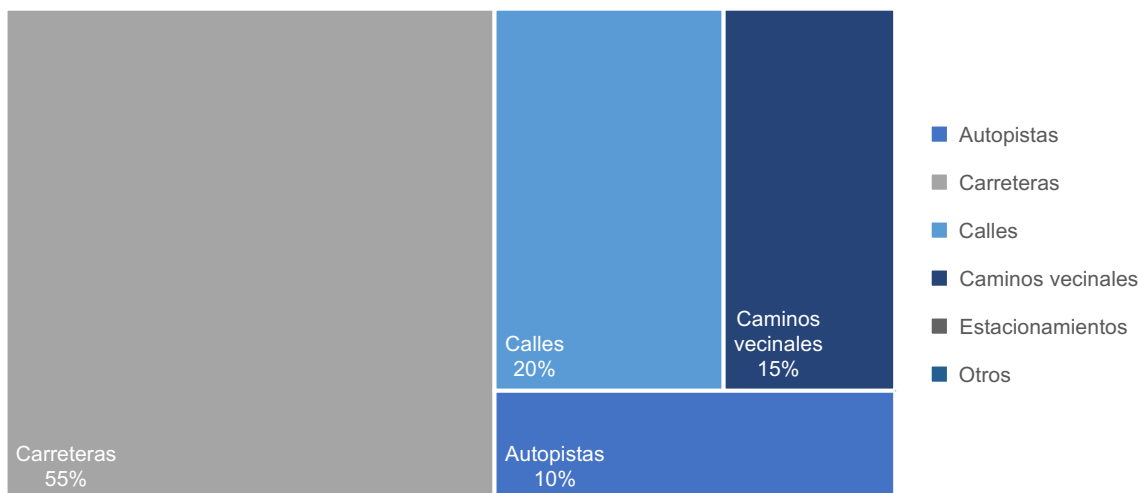
Gráfica.- 23 Proyectos ejecutados con RAP hasta la fecha. Fuente: Elaboración Propia.

El 85% de los encuestados ha completado entre 1 y 5 proyectos utilizando RAP hasta la fecha. Además, el 10% de los encuestados ha completado entre 6 y 10 proyectos con RAP, mientras que el 5% ha completado entre 11 y 15 proyectos. No se registraron encuestados que hayan completado más de 15 proyectos utilizando RAP. Estos resultados indican que la mayoría de los contratistas e industria de la construcción encuestados tienen experiencia en la utilización de RAP en un número moderado de proyectos, lo que sugiere una adopción generalizada pero aún no extensiva de esta tecnología en la industria de la construcción en México, por lo que la adopción del RAP está en curso y que aún hay espacio para un mayor crecimiento en la industria.





¿En qué tipos de proyectos ha utilizado RAP?



Gráfica.- 24 Aplicaciones de RAP en proyectos. Fuente: Elaboración Propia.

El RAP se utiliza principalmente en carreteras (55%) y caminos vecinales (15%), también se utiliza en calles (20%) y autopistas (10%), no se ha utilizado en estacionamientos ni en otros tipos de proyectos. El RAP se utiliza en una variedad de proyectos de construcción de carreteras, lo que indica su versatilidad como material, su uso predominante en carreteras y caminos vecinales sugiere que es una opción viable para proyectos de bajo volumen de tráfico.

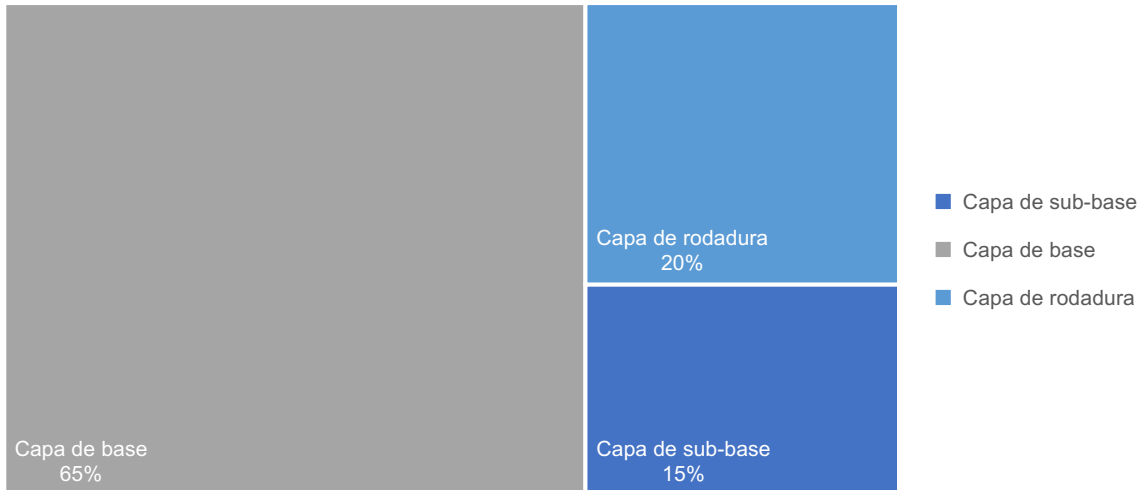
Recomendaciones:

- Se pueden realizar análisis adicionales para explorar las características específicas de los proyectos en los que se ha utilizado RAP.
- Se pueden realizar estudios de seguimiento para evaluar el desempeño del RAP en diferentes tipos de proyectos.





¿En qué capa estructural ha implementado el RAP?



Gráfica.- 25 Implementación de RAP en capas estructurales. Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados revelan que el 15% de los encuestados han optado por la implementación de RAP en la capa de sub-base, mientras que el 65% ha utilizado este material en la capa de base. Este alto porcentaje en la adopción de la tecnología en la capa de base sugiere una tendencia marcada hacia su uso en esta estructura. Por otro lado, solo el 20% de los encuestados ha incorporado RAP en la capa de rodadura. Esto evidencia una preferencia limitada por parte de los participantes en cuanto a su aplicación en esta última capa. Estos hallazgos reflejan una amplia aceptación del RAP como material para la construcción de bases de pavimento, lo que posiblemente se relaciona con sus propiedades y beneficios para mejorar la resistencia y durabilidad de la carretera. Sin embargo, su uso no parece ser tan extendido en la construcción y conservación de la capa de rodadura.

¿En qué porcentaje?



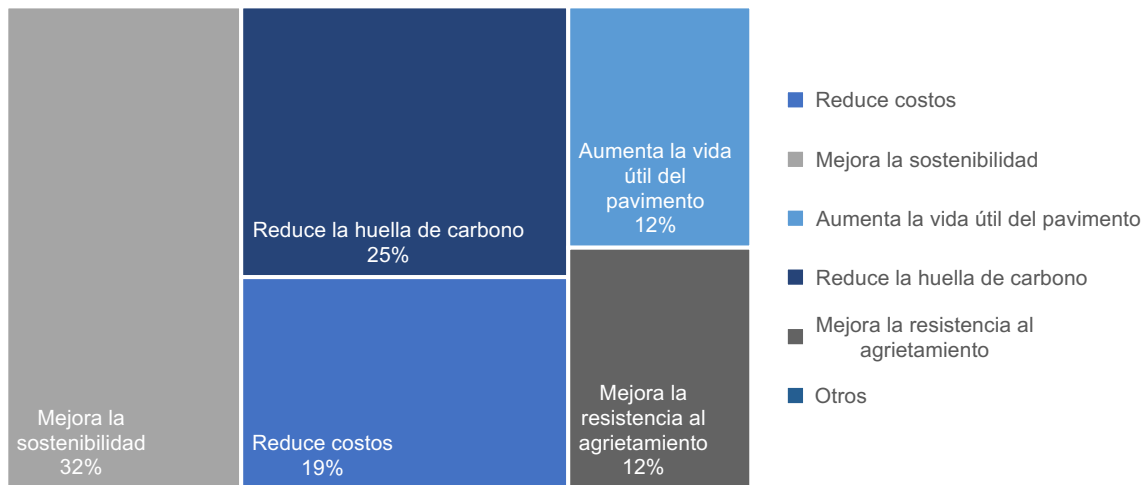
Gráfica.- 26 Porcentaje de Implementación. Fuente: Elaboración Propia.





Los hallazgos de la encuesta destacan una adopción aún limitada del pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción en México. De hecho, el 90% de los encuestados revela que emplea RAP en menos del 25% de sus proyectos. Mientras tanto, solo el 10% utiliza este material en un rango que oscila entre el 25% y el 50% de sus obras. Sorprendentemente, ningún participante indica utilizar RAP en un porcentaje que va del 50% al 75% de sus proyectos. Estos resultados subrayan que la mayoría de los contratistas y empresas de construcción en México aún no han integrado plenamente el pavimento asfáltico reciclado en sus prácticas. Aunque existe un pequeño segmento que lo emplea en una proporción un poco más sustancial, es evidente que el potencial completo del RAP no se está aprovechando en la industria. Es crucial explorar y abordar las razones detrás de esta baja adopción para promover una mayor utilización del RAP y sus beneficios ambientales y económicos en el sector de la construcción en México.

¿Cuáles son las principales ventajas de usar RAP en sus proyectos?



Gráfica.- 27 Ventajas de RAP en Proyectos. Fuente: Elaboración Propia.

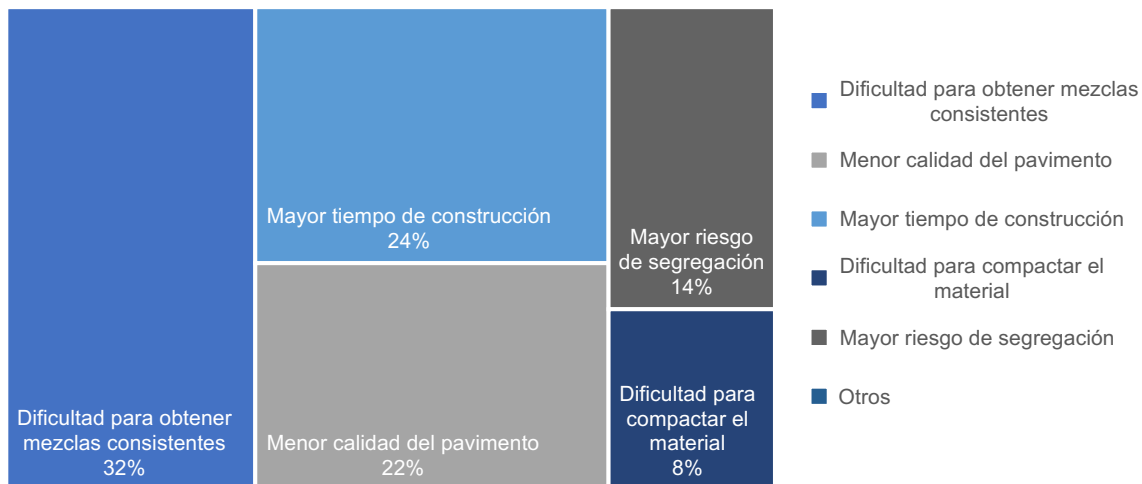
La encuesta revela que el 32% de los encuestados identifican la mejora de la sostenibilidad como la principal ventaja del pavimento asfáltico reciclado (RAP). Esta percepción se fundamenta en la capacidad del RAP para reducir la dependencia de materiales vírgenes, como agregados y asfalto, lo que conlleva a una disminución significativa del impacto ambiental asociado con la construcción de carreteras. Al mismo tiempo, el 25% de los encuestados considera que la reducción de la huella de carbono es un beneficio crucial, ya





que el uso del RAP contribuye a la disminución de las emisiones de CO₂ vinculadas a la producción de materiales vírgenes. Además, el 19% de los encuestados destaca la reducción de costos como una ventaja importante del RAP. Esta perspectiva se basa en el hecho de que el RAP puede ofrecer una alternativa más económica al asfalto virgen, especialmente cuando se utiliza a nivel local, lo que puede generar ahorros significativos en los presupuestos de construcción. Asimismo, el 12% de los encuestados reconocen que el RAP puede aumentar la vida útil del pavimento al mejorar su resistencia al agrietamiento y la fatiga, lo que implica una disminución en los gastos de mantenimiento a largo plazo. El empleo del pavimento asfáltico reciclado, tal como se evidencia en algunos de los resultados obtenidos en este TOG ofrece una serie de ventajas ambientales y económicas para la industria de la construcción. La encuesta subraya que, para los contratistas en México, la mejora de la sostenibilidad y la reducción de la huella de carbono son los beneficios más relevantes del RAP. No obstante, también se valora su capacidad para reducir costos y prolongar la vida útil del pavimento, lo que resalta su potencial como una opción rentable y ecoamigable en el sector de la construcción de carreteras.

¿Cuáles son las principales desventajas de usar RAP en sus proyectos?



Gráfica.- 28 Desventajas de RAP en Proyectos. Fuente: Elaboración Propia.

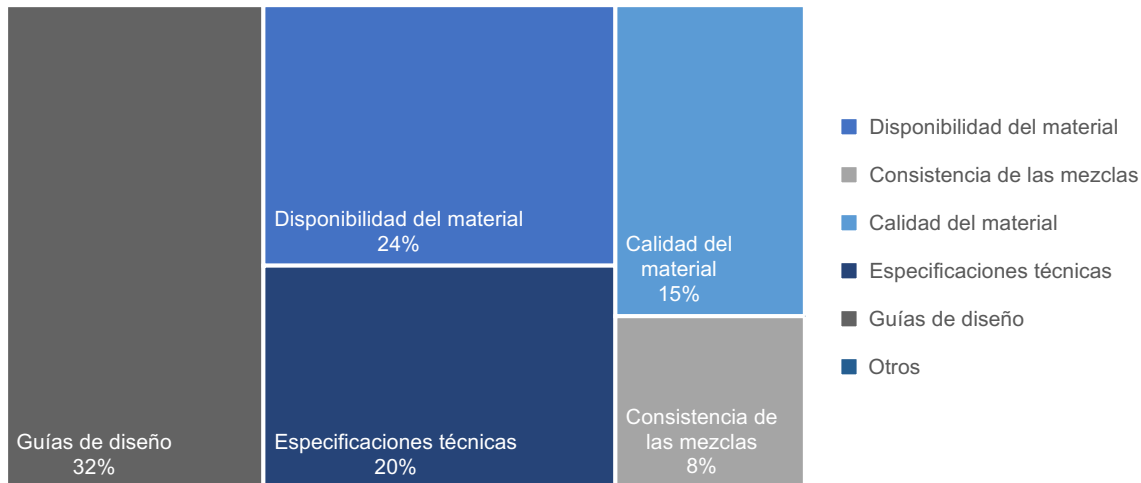
Los resultados indican que para el 32% de los encuestados, la dificultad para obtener mezclas consistentes representa una de las principales desventajas del uso de pavimento asfáltico reciclado. Esta dificultad puede afectar la calidad del pavimento, lo que podría tener implicaciones en su durabilidad y rendimiento a largo plazo. Además, el 22% de los





encuestados señala que el uso de RAP puede resultar en una menor calidad del pavimento, lo que también podría influir en su durabilidad y rendimiento a largo plazo. Asimismo, el 24% de los encuestados reporta que el uso de RAP puede aumentar el tiempo de construcción de los proyectos, lo que puede afectar los plazos de entrega y los costos asociados. Otro aspecto señalado es la dificultad para compactar el material, mencionada por el 8% de los encuestados, lo que puede afectar la calidad y uniformidad del pavimento. Además, el 14% de los encuestados indica que el uso de RAP puede aumentar el riesgo de segregación del material durante la construcción, lo que podría conducir a problemas de calidad en el pavimento. Cabe destacar que no se registraron respuestas en la categoría "Otros". Estos resultados ponen de manifiesto que, aunque el pavimento asfáltico reciclado ofrece ventajas significativas, como la reducción de costos y la mejora de la sostenibilidad, también presenta desafíos importantes que deben abordarse para una adopción más amplia y efectiva de esta tecnología en la industria de la construcción en México.

¿En qué aspectos considera que el RAP podría mejorar?



Gráfica.- 29 Áreas de mejora percibidas para RAP. Fuente: Elaboración Propia.

El 24% de los participantes de la encuesta identifican que la disponibilidad del material es un aspecto susceptible de mejora en relación con el pavimento asfáltico reciclado, lo que sugiere inquietudes en torno a la accesibilidad y la oferta del mismo. Respecto a la consistencia de las mezclas, solo el 8% de los encuestados la menciona como un área de mejora para el RAP, indicando así una percepción relativamente menor de este problema en comparación con otros aspectos. En cuanto a la calidad del material, el 15% de los



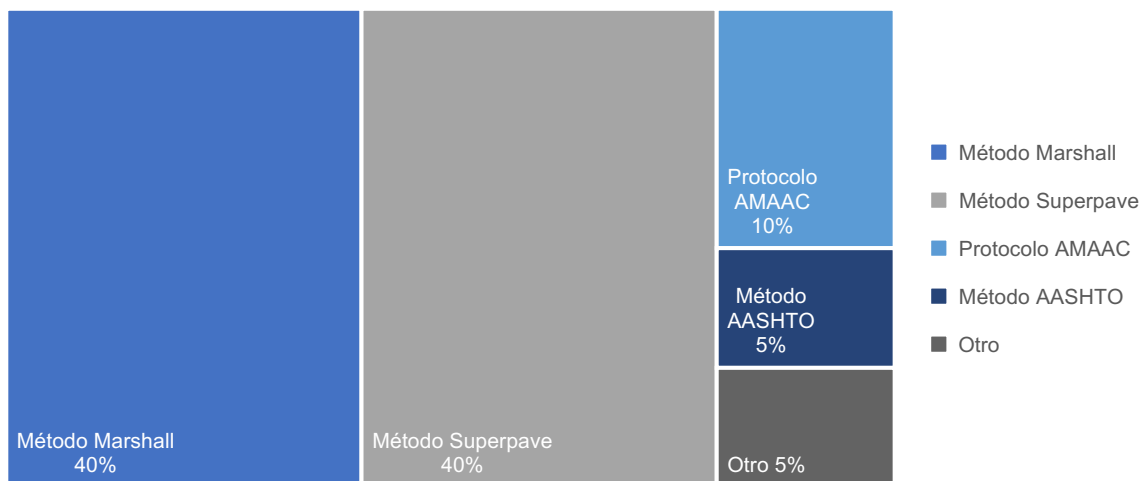


encuestados destaca que es un aspecto que podría mejorarse en relación con el RAP, revelando preocupaciones sobre la calidad del material reciclado utilizado en los proyectos. Respecto a las especificaciones técnicas, el 20% de los encuestados señala que podrían mejorarse en relación con el RAP, lo que sugiere una necesidad de estándares claros y consistentes para el uso de este material en la construcción de carreteras. Por otro lado, el 32% de los encuestados resalta que las guías de diseño podrían mejorar en relación con el RAP, lo que indica una demanda de orientación y mejores prácticas para la implementación de esta tecnología. Cabe destacar que no se registraron respuestas en la categoría "Otros".

Se identifican algunas áreas de mejora para aumentar la adopción del pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción. Entre estas áreas se encuentran la necesidad de mejores guías de diseño, especificaciones técnicas más flexibles y una mayor disponibilidad del material. Además, es fundamental mejorar la calidad del material reciclado y la consistencia de las mezclas.

Especificaciones y diseño

¿Qué métodos de diseño utiliza para incorporar RAP en sus proyectos?



Gráfica.- 30 Métodos de diseño para Incorporar RAP. Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados revelan una división equitativa entre el uso de dos métodos principales de diseño, el Método Marshall y el Método Superpave, con un 40% de los encuestados empleando cada uno. Esto sugiere que ambos métodos son ampliamente aceptados y





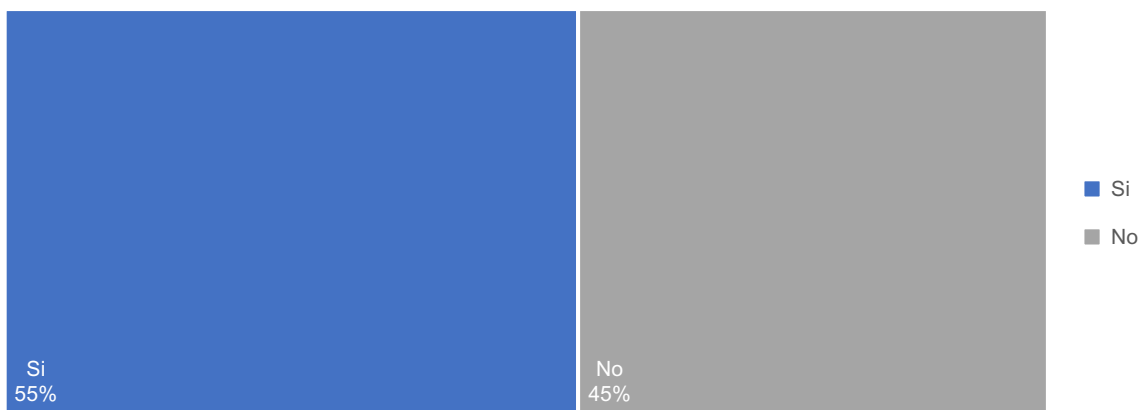
utilizados en la industria de la construcción mexicana para la incorporación de pavimento asfáltico reciclado en proyectos. La adopción del Protocolo AMAAC por parte del 10% de los encuestados indica una cierta preferencia por este enfoque, que puede estar relacionado con requisitos específicos del sector o normativas locales. Sin embargo, el bajo uso del Método AASHTO (5%) sugiere que este enfoque puede ser menos común o relevante en el contexto de la construcción de pavimentos asfálticos reciclados en México.

En general, estos resultados destacan la diversidad de métodos de diseño utilizados para incorporar RAP en proyectos de construcción en México. Esto subraya la importancia de la flexibilidad y la adaptabilidad en la implementación de tecnologías de pavimentación reciclada, así como la necesidad de una comprensión sólida de los diferentes enfoques disponibles para garantizar la eficacia y la calidad en la construcción de pavimentos asfálticos reciclados en el país.

Recomendaciones:

- Es importante elegir el método de diseño adecuado en función del tipo de proyecto, las características del RAP disponible y las especificaciones solicitadas.

¿Ha encontrado alguna dificultad al trabajar con las especificaciones o los métodos de diseño actuales para RAP?



Gráfica.- 31 Dificultades con especificaciones y métodos de diseño para RAP. Fuente: Elaboración Propia.





El hecho de que más de la mitad de los encuestados (55%) haya experimentado dificultades al trabajar con especificaciones o métodos de diseño actuales para el RAP indica que existen desafíos significativos en la adopción y aplicación de esta tecnología en la industria de la construcción en México. Estas dificultades podrían estar relacionadas con una variedad de factores, como la falta de claridad en las normativas y estándares, la disponibilidad de tecnología adecuada, la capacitación del personal o la resistencia al cambio dentro de las empresas. Por otro lado, el 45% de los encuestados que no han encontrado dificultades pueden estar empleando prácticas o tecnologías más avanzadas, o podrían tener un nivel de experiencia y familiaridad con el RAP que les permite sortear los obstáculos de manera más efectiva.

En general, estos resultados sugieren la necesidad de abordar las dificultades identificadas y trabajar en la mejora de las especificaciones y métodos de diseño relacionados con el pavimento asfáltico reciclado en México. Esto podría implicar la revisión y actualización de normativas, la inversión en tecnología y capacitación, así como la promoción de mejores prácticas en la industria. La superación de estas dificultades podría conducir a una mayor adopción y utilización del RAP, lo que a su vez podría ofrecer beneficios económicos y ambientales significativos para la industria de la construcción en el país.

Costos y sustentabilidad

¿En general, ha encontrado que el uso de RAP reduce los costos de sus proyectos?



Gráfica.- 32 Reducción de Costos mediante el Uso de RAP. Fuente: Elaboración Propia.





La gran mayoría de los encuestados (75%) reportaron que el RAP ha conducido a una reducción en los costos de sus proyectos. Esto sugiere que existe una percepción generalizada dentro de la industria de la construcción en México de que el RAP ofrece beneficios económicos significativos, lo que puede incluir la reducción de costos de materiales y mano de obra, así como la optimización de los procesos de construcción y mantenimiento. El hecho de que el 25% de los encuestados no haya experimentado una reducción en los costos con el uso de RAP indica que existen casos en los que los beneficios económicos pueden no ser tan evidentes o directos. Esto podría estar relacionado con factores como la calidad del RAP utilizado, la infraestructura y equipos necesarios para su procesamiento e incorporación, así como la experiencia y capacitación del personal en su manejo.

En general, estos resultados sugieren que, aunque el uso de RAP tiende a ser percibido como una estrategia efectiva para reducir costos en proyectos de construcción, es importante considerar cuidadosamente las condiciones específicas de cada proyecto y asegurar una implementación adecuada para maximizar los beneficios económicos potenciales. Además, podrían ser necesarios esfuerzos adicionales en términos de investigación, desarrollo y divulgación para promover una comprensión más amplia y una adopción más generalizada del RAP en la industria de la construcción en México.

¿En qué medida considera que el RAP contribuye a la sostenibilidad de sus proyectos?



Gráfica.- 33 Contribución de RAP a la sostenibilidad del proyecto. Fuente: Elaboración Propia.

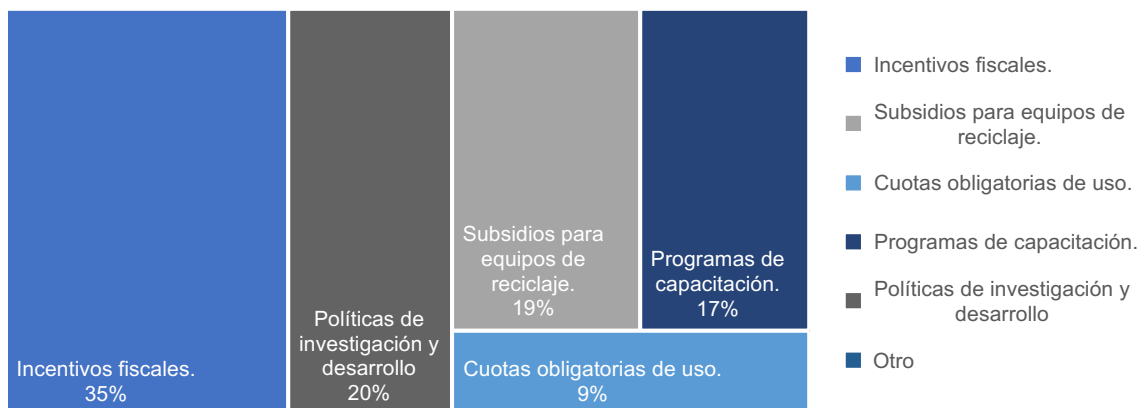




La abrumadora mayoría de los encuestados (85%) expresaron una fuerte creencia en que el RAP contribuye significativamente a la sostenibilidad de sus proyectos. Esto sugiere un reconocimiento generalizado dentro de la industria de la construcción en México de los beneficios ambientales y económicos asociados con el uso de materiales reciclados en pavimentación, como la conservación de recursos naturales, la reducción de residuos y la mitigación del impacto ambiental. El 10% de los encuestados que consideraron que el RAP contribuía poco a la sostenibilidad de sus proyectos podrían tener reservas sobre la efectividad del RAP en términos de calidad, durabilidad o desempeño, lo que podría afectar su percepción de su contribución a la sostenibilidad. Esto podría estar relacionado con desafíos específicos en la implementación o manejo del RAP en ciertos proyectos. El pequeño porcentaje (5%) de encuestados que opinaron que el RAP no contribuía en absoluto a la sostenibilidad de sus proyectos podría indicar una falta de comprensión sobre los beneficios ambientales y económicos del uso de materiales reciclados en la construcción de pavimentos, o bien, podría reflejar una experiencia limitada o negativa con el RAP en el pasado.

En conjunto, estos resultados resaltan la importancia y el reconocimiento generalizado del pavimento asfáltico reciclado como una opción sostenible en la industria de la construcción en México. Sin embargo, a pesar de los beneficios, la adopción del RAP aún es limitada, principalmente por la falta de conocimiento, las especificaciones técnicas y la disponibilidad de material.

¿Qué medidas o incentivos considera que podrían fomentar el uso de RAP en la construcción de carreteras?



Gráfica.- 34 Medidas o incentivos para promover el uso de RAP en carreteras. Fuente: Elaboración Propia.





Los resultados revelan una variedad de opiniones sobre las medidas e incentivos que podrían impulsar el uso de RAP en la construcción de carreteras en México. Los incentivos fiscales fueron identificados como la opción más popular, con el 35% de los encuestados respaldándolos. Esto sugiere que las empresas podrían verse incentivadas a adoptar prácticas más sostenibles si se les ofrecen beneficios fiscales como recompensa. La siguiente opción más respaldada fue la implementación de políticas de investigación y desarrollo (20%), lo que indica el reconocimiento de la importancia de la innovación y el avance tecnológico para promover el uso efectivo del RAP. Esto podría incluir fondos para investigaciones relacionadas con el desarrollo de mejores prácticas y tecnologías de reciclaje. Los programas de capacitación también fueron considerados importantes por el 17% de los encuestados, lo que subraya la necesidad de mejorar la comprensión y las habilidades relacionadas con el manejo y aplicación del RAP entre los profesionales de la industria. Los subsidios para equipos de reciclaje (19%) también fueron mencionados como una medida útil para reducir las barreras de entrada y fomentar la adopción de tecnologías de reciclaje de pavimentos. La cuota obligatoria de uso fue la opción menos respaldada (9%), lo que sugiere que las empresas podrían preferir incentivos positivos en lugar de regulaciones coercitivas para promover el uso de RAP.

En conjunto, estos resultados destacan la importancia de una combinación de medidas y políticas para fomentar el uso de RAP en la construcción de carreteras en México, con un énfasis en incentivos fiscales, investigación y desarrollo, capacitación y subsidios para equipos de reciclaje.





Monitoreo y mantenimiento

¿Ha notado alguna diferencia en los requerimientos de mantenimiento en comparación con asfalto convencional?



Gráfica.- 35 Diferencias en requerimientos de mantenimiento: RAP vs pavimento convencional. Fuente: Elaboración Propia.

El hecho de que el 85% de los encuestados no haya notado diferencias en los requerimientos de mantenimiento entre el RAP y el asfalto convencional sugiere que, en su mayoría, el RAP no está siendo percibido como un material que genere mayores demandas de mantenimiento en comparación con el asfalto convencional. Esto podría indicar que, en términos de mantenimiento es considerado comparable o incluso más favorable que el asfalto convencional por la mayoría de los participantes de la encuesta. Por otro lado, el 15% de los encuestados que sí notaron diferencias podrían estar experimentando desafíos o variaciones en el mantenimiento al trabajar con RAP. Estas diferencias podrían estar relacionadas con la durabilidad, resistencia o comportamiento del RAP en comparación con el asfalto convencional, así como con la necesidad de ajustar los procedimientos de mantenimiento para adaptarse a las características específicas del RAP.

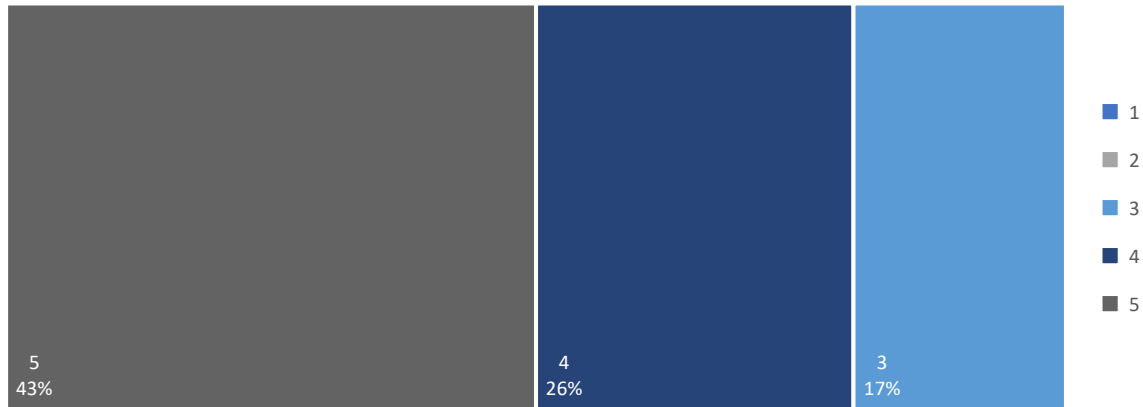
En general, estos resultados sugieren que, aunque la mayoría de los participantes no perciben diferencias significativas en los requerimientos de mantenimiento entre el RAP y el asfalto convencional, es importante seguir evaluando y monitoreando el desempeño del RAP en términos de mantenimiento para garantizar su efectividad a largo plazo y promover su adopción continua en la industria de la construcción en México.





Evaluación de satisfacción

En una escala del 1 al 5, ¿qué tan satisfecho está generalmente con el rendimiento del RAP en sus proyectos?



Gráfica.- 36 Nivel de satisfacción con el rendimiento de RAP en proyectos (1-5). Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados reflejan una alta satisfacción general con el rendimiento del pavimento asfáltico reciclado en los proyectos de los encuestados. La mayoría de los participantes (69%) calificaron su satisfacción con un 4 o un 5 en una escala del 1 al 5, lo que indica una percepción positiva y un alto nivel de satisfacción con el rendimiento del RAP. El hecho de que el 43% de los encuestados calificaran su satisfacción con un 5 sugiere que una proporción significativa de los participantes está extremadamente satisfecha con el rendimiento del RAP en sus proyectos. Esto podría reflejar una experiencia positiva con el RAP en términos de durabilidad, resistencia, costo-efectividad u otros factores relevantes para la construcción de carreteras. El 17% de los encuestados que calificaron su satisfacción con un 3 podrían tener una percepción más neutral o moderada sobre el rendimiento del RAP en sus proyectos. Esto podría indicar que algunos encuestados han experimentado desafíos o limitaciones con el RAP que afectan su satisfacción general, aunque no al nivel de insatisfacción.

En general, estos resultados sugieren que la mayoría de los contratistas e industria de la construcción en México están satisfechos con el rendimiento del pavimento asfáltico reciclado en sus proyectos. Sin embargo, es importante continuar evaluando y mejorando la implementación y prácticas relacionadas con el RAP para garantizar su efectividad continua y promover su adopción más amplia en la industria.





¿Recomendaría el uso de RAP en pavimentación a otros contratistas?



Gráfica.- 37 Recomendación del uso de RAP con otros contratistas. Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados revelan una fuerte aceptación y respaldo por parte de los contratistas e industria de la construcción en México hacia el uso del RAP en pavimentación. El hecho de que el 100% de los contratistas estén dispuestos a recomendar el uso de RAP a otros contratistas indica un alto grado de confianza en los beneficios y la efectividad del RAP en proyectos de pavimentación. La falta de respuestas negativas también sugiere que no se identificaron preocupaciones importantes o problemas significativos que disuadan a los contratistas de recomendar el uso de RAP a otros en la industria. Esto respalda la percepción general de que el RAP es una opción viable y efectiva para la pavimentación en México.





Resumen y análisis de resultados

La encuesta dirigida a contratistas e industria de la construcción en México reveló una amplia participación y una diversidad generacional y educativa entre los encuestados. La mayoría de los contratistas tienen entre 35 y 54 años y poseen educación universitaria. Además, la mayoría de los encuestados tienen experiencia significativa en el campo, con un enfoque particular en la construcción y conservación de carreteras.

Todos los encuestados tienen experiencia con el pavimento asfáltico reciclado y lo utilizan frecuentemente en sus proyectos, principalmente en carreteras y caminos vecinales. Se observa una tendencia hacia el uso del RAP en la capa de base en lugar de la capa de rodadura, lo que indica una preferencia por su uso en estructuras de menor carga y durabilidad.

Aunque la adopción del RAP es generalizada, aún existe un gran potencial de crecimiento, ya que la mayoría de los contratistas lo utilizan en menos del 25% de sus proyectos. Los beneficios ambientales y económicos del RAP son reconocidos, especialmente en términos de sostenibilidad y reducción de costos. Sin embargo, persisten desafíos significativos, como la dificultad para obtener mezclas consistentes, la menor calidad percibida del pavimento y el aumento del tiempo de construcción.

En cuanto a especificaciones y diseño, se observa una división equitativa entre el Método Marshall y el Método Superpave, aunque el Protocolo AMAAC también tiene cierta adopción. La falta de claridad en las especificaciones y métodos de diseño actuales representa un obstáculo para muchos contratistas.

Los incentivos fiscales, la investigación y desarrollo, la capacitación y los subsidios para equipos de reciclaje son medidas recomendadas para impulsar el uso del RAP. La satisfacción general con el rendimiento del RAP es alta, con una disposición universal para recomendar su uso a otros contratistas.





Diversidad y Experiencia: La diversidad generacional y educativa de los encuestados indica una representación amplia dentro de la industria de la construcción en México. La experiencia significativa de los contratistas sugiere que sus opiniones reflejan una comprensión profunda de los desafíos y oportunidades en el uso del RAP.

Adopción del RAP: Aunque el RAP es ampliamente utilizado, su adopción aún no es extensiva, con la mayoría de los contratistas utilizando el material en una proporción relativamente baja de sus proyectos. Esto sugiere un potencial significativo de crecimiento en el uso del RAP en la industria de la construcción mexicana.

Beneficios y Desafíos: Los contratistas reconocen los beneficios del RAP en términos de sostenibilidad y reducción de costos, pero también enfrentan desafíos significativos, como la consistencia de las mezclas y la calidad del pavimento. Abordar estos desafíos es crucial para una adopción más amplia y efectiva del RAP.

Medidas para Impulsar la Adopción: Se identifican varias medidas, como incentivos fiscales y programas de capacitación, que podrían promover el uso del RAP en la industria de la construcción. Estas medidas deben abordar los desafíos específicos identificados por los contratistas, como la falta de claridad en las especificaciones y métodos de diseño.

Satisfacción y Recomendación: La alta satisfacción general con el rendimiento del RAP y la disposición universal para recomendar su uso indican que el material es percibido como efectivo y confiable por la mayoría de los contratistas.

En conjunto, los resultados de la encuesta proporcionan una visión integral de la percepción y adopción del pavimento asfáltico reciclado en la industria de la construcción en México, destacando tanto los beneficios como los desafíos asociados con su uso y ofreciendo recomendaciones clave para impulsar su adopción continua y efectiva.





CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN FUTURA

La magnitud de los recursos utilizados y los residuos generados han colocado a la industria de la construcción en una posición en la que puede contribuir en gran medida a, o impedir considerablemente, el progreso de la sociedad hacia el desarrollo sostenible. El reciclaje en las carreteras es un medio importante mediante el cual la industria del asfalto podría desempeñar un papel en la construcción sostenible. La simple adopción de materiales reciclados no garantiza un resultado sostenible o “verde”, pero comúnmente se percibe como un medio para lograr ese fin. Las autoridades viales otorgan aprobación para su uso en carreteras en una lista cada vez mayor de materiales reciclados. Para cualquier intento de aplicación, es necesario estudiar tanto la especificación como las propiedades técnicas del material, para garantizar que la integridad física y estructural del pavimento no se vea comprometida como resultado del reciclaje.

Sustituir los agregados naturales con agregados reciclados en los pavimentos asfálticos reduce la presión de los vertederos y las demandas de las canteras, complementa otros esfuerzos de manejo de desechos sólidos y proporciona una sólida alternativa para los desechos que de otro modo estarían destinados a los vertederos.

Si bien varios factores influyen en el uso de RAP en pavimentos asfálticos, los dos factores principales son los ahorros económicos y los beneficios ambientales. RAP es una alternativa útil a los materiales vírgenes porque reduce el uso de agregados vírgenes y la cantidad de ligante asfáltico virgen requerido en la producción. El uso de RAP también conserva energía, reduce los costos de transporte necesarios para obtener agregado virgen de calidad y preserva los recursos. Además, el uso de RAP disminuye la cantidad de escombros de construcción que se colocan en los vertederos y no agota los recursos naturales no renovables como el agregado virgen y el aglutinante asfáltico. En última instancia, el reciclaje del asfalto crea un ciclo que optimiza el uso de los recursos naturales y sostiene la industria del pavimento asfáltico.





En cuanto a las metodologías de diseño de mezclas asfálticas utilizadas en nuestro país, la metodología Marshall presenta limitaciones en la evaluación precisa de las mezclas, ya que los datos obtenidos no permiten prever de manera exacta el comportamiento potencial de las mismas. Por lo tanto, se hace necesario adoptar de manera más frecuente la Metodología del Protocolo AMAAC, que, mediante pruebas de desempeño específicas, posibilita una caracterización más completa de las mezclas asfálticas.

El uso de material reciclado, betún y emulsiones asfálticas exige una atención especial al estudio de las variables inherentes a estos materiales. En el caso del RAP, a pesar de su considerable valor, presenta variabilidades en sus propiedades derivadas de su proceso de obtención, el cual debe ser homogéneo. Es crucial evitar la mezcla de diferentes lotes de RAP, ya que podrían tener características distintas.

Para facilitar el proceso de dosificación en la planta mezcladora, se recomienda dividir el RAP en al menos dos fracciones (RAP fino y RAP grueso). Además, la variable del envejecimiento de la película asfáltica presente en el RAP puede tener un impacto significativo en el desempeño de las mezclas recicladas.

Las plantas mezcladoras deben cumplir con ciertas características para garantizar el control de calidad necesario en la fabricación de las mezclas. Esto incluye al menos cuatro tolvas de almacenamiento para una clasificación más adecuada de los áridos, así como el requisito de ser controladas electrónicamente, con dosificación basada en el peso. Respecto a las emulsiones asfálticas, su uso es específico y depende del diseño individual, ya que su comportamiento varía ante cambios en los agregados pétreos, RAP, granulometría de diseño y componentes de la emulsión, como el asfalto base y el tipo de emulsificante.



8.1. HALLAZGOS Y RESULTADOS

¿Por qué no se usa de manera masiva el RAP?

- No hay suficiente oferta del RAP.
- Falta de normativa (especificaciones).
- Falta de voluntad política.
- Su uso implica costos similares de fabricación.
- Falta de infraestructura.

Se desarrolló un marco e indicador combinado de evaluación de la circularidad y sostenibilidad ambiental para las mezclas asfálticas con asfalto recuperado; utilizando la metodología del índice de circularidad de materiales y el marco de evaluación del ciclo de vida, como resultado la Figura 49, que nos muestra el diseño, proceso y producción idónea.

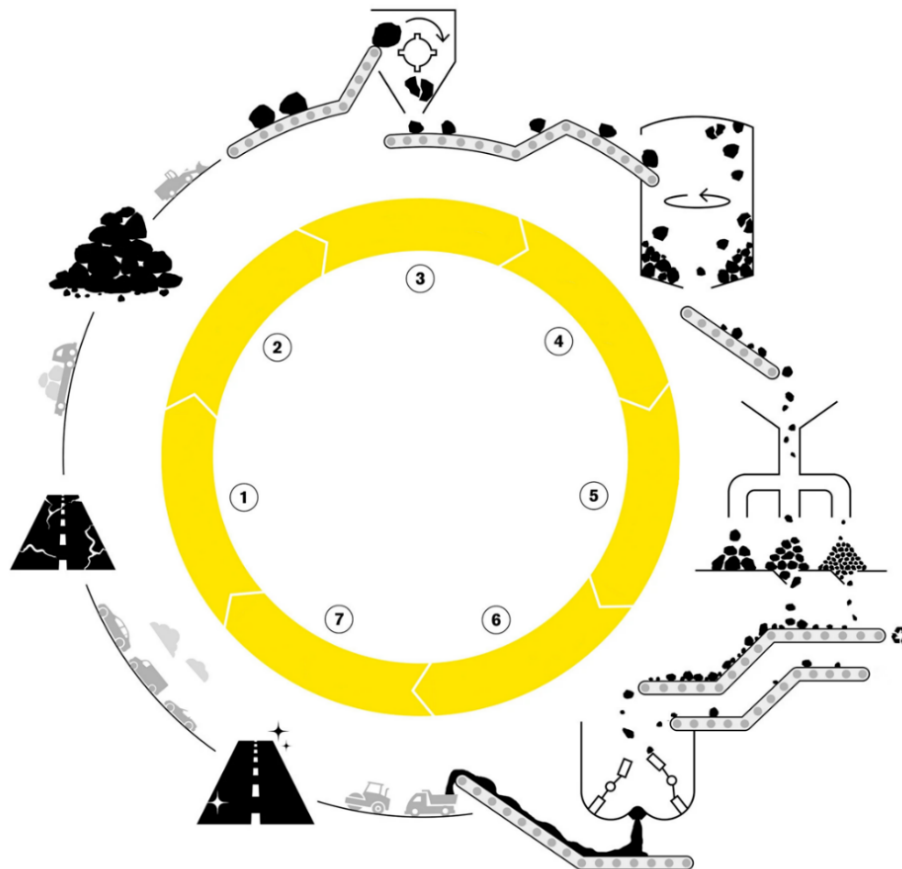


Figura.- 48 Etapas en la producción del RAP. Fuente: Elaboración Propia.



1. Extracción y transporte del material:

Métodos de extracción:

- Fresado: Se utiliza una máquina fresadora para remover capas superficiales del pavimento existente, controlando el espesor y la textura de la superficie.
- Demolición: Se emplea maquinaria pesada para romper el pavimento en fragmentos más grandes, adecuado para pavimentos gruesos o deteriorados.

Transporte:

- Camiones volquetes: El medio de transporte más común, asegurando un traslado rápido y eficiente del material extraído.
- Cintas transportadoras: Utilizadas en plantas de procesamiento cercanas al sitio de extracción, para un transporte continuo y de bajo costo.

2. Trituración y clasificación:

Trituración primaria: Rompe el material en trozos grandes, utilizando trituradoras de mandíbulas, giratorias o de impacto.

Trituración secundaria: Reduce los fragmentos a un tamaño uniforme y adecuado para la mezcla asfáltica, empleando trituradoras cónicas o de rodillos.

Clasificación granulométrica:

- Cribas vibratorias: Separan los áridos en diferentes fracciones de tamaño, según las especificaciones de la mezcla.
- Lavado con agua: Elimina impurezas y polvo del material, mejorando la calidad de los áridos.

3. Separación del asfalto:

Cribado en seco: El material se pasa por cribas con aberturas calibradas, permitiendo el paso de los áridos y reteniendo el asfalto adherido.

Lavado con agua: Se utiliza agua a presión para separar el asfalto de los áridos, aprovechando la diferencia de densidad entre ambos materiales.

Separación por aire comprimido: Se inyecta aire comprimido en el material, creando una corriente que arrastra los áridos y deja atrás el asfalto.





4. Incorporación de áridos vírgenes:

Tipos de áridos vírgenes:

- Agregados gruesos: Grava, macadam o piedra triturada, que aportan resistencia estructural a la mezcla.
- Agregados finos: Arena, limos o filler, que llenan los vacíos entre los áridos gruesos y mejoran la trabajabilidad de la mezcla.

Proporciones: La cantidad de áridos vírgenes depende del tipo de mezcla asfáltica deseada y la calidad del material reciclado. En general, se utiliza una mayor proporción de áridos vírgenes en mezclas de alto desempeño.

5. Dosificación de materiales:

Sistemas de dosificación:

- Dosificadores volumétricos: Miden el volumen de cada material con tolvas y compuertas.
- Dosificadores gravimétricos: Pesan cada material con precisión para garantizar la exacta proporción requerida.

Control de calidad: Se realizan pruebas constantes para verificar el cumplimiento de las especificaciones de la mezcla, asegurando la uniformidad y calidad del producto final.

6. Mezclado:

Tipos de mezcladoras:

- Mezcladoras de tambor: Mezclan los materiales mediante la rotación de un tambor cilíndrico.
- Mezcladoras continuas: Operan de forma continua, introduciendo los materiales dosificados y mezclándolos a medida que avanzan.

Temperatura de mezcla: La temperatura adecuada depende del tipo de asfalto y los áridos utilizados.





7. Transporte y colocación de la mezcla:

Transporte:

- Camiones termosifón: Conservan la mezcla caliente durante el transporte, evitando su solidificación prematura.
- Distancias cortas: Se pueden emplear extendedoras de asfalto autopropulsadas o dumpers con tolvas térmicas.

Colocación:

- Extendedoras de asfalto: Distribuyen la mezcla asfáltica sobre la superficie base preparada, con un espesor uniforme y controlado.
- Compactación: Se utilizan rodillos vibratorios para compactar la mezcla, eliminando aire y aumentando la densidad del material.

Cura: La mezcla asfáltica se deja enfriar y curar, adquiriendo las propiedades mecánicas deseadas para el servicio previsto. Este proceso puede durar desde horas hasta días, dependiendo de las condiciones climáticas.

Consideraciones adicionales:

- Aditivos: Se pueden incorporar aditivos a la mezcla para mejorar sus propiedades, como rejuvenecedores asfálticos para revitalizar el asfalto reciclado, modificadores de viscosidad para mejorar la trabajabilidad, o aditivos anti-ahuellamiento para reducir la deformación permanente.
- Control de calidad: Se realizan pruebas en diferentes etapas.





En México más del 90% de los pavimentos están constituidos con una capa asfáltica. La industria tiene un potencial de convertirse en una herramienta clave para los gobiernos y autoridades de carreteras para alcanzar los objetivos de la economía circular.

En la Figura 50, se destacan las oportunidades para mejorar la sostenibilidad del pavimento a lo largo de su ciclo de vida y teniendo el potencial de brindar enormes beneficios económicos, ambientales y sociales. A continuación, se enumeran solo algunos ejemplos de los beneficios de ser más sostenible, encontrados a la fecha con respecto a los tres pilares de la sostenibilidad.

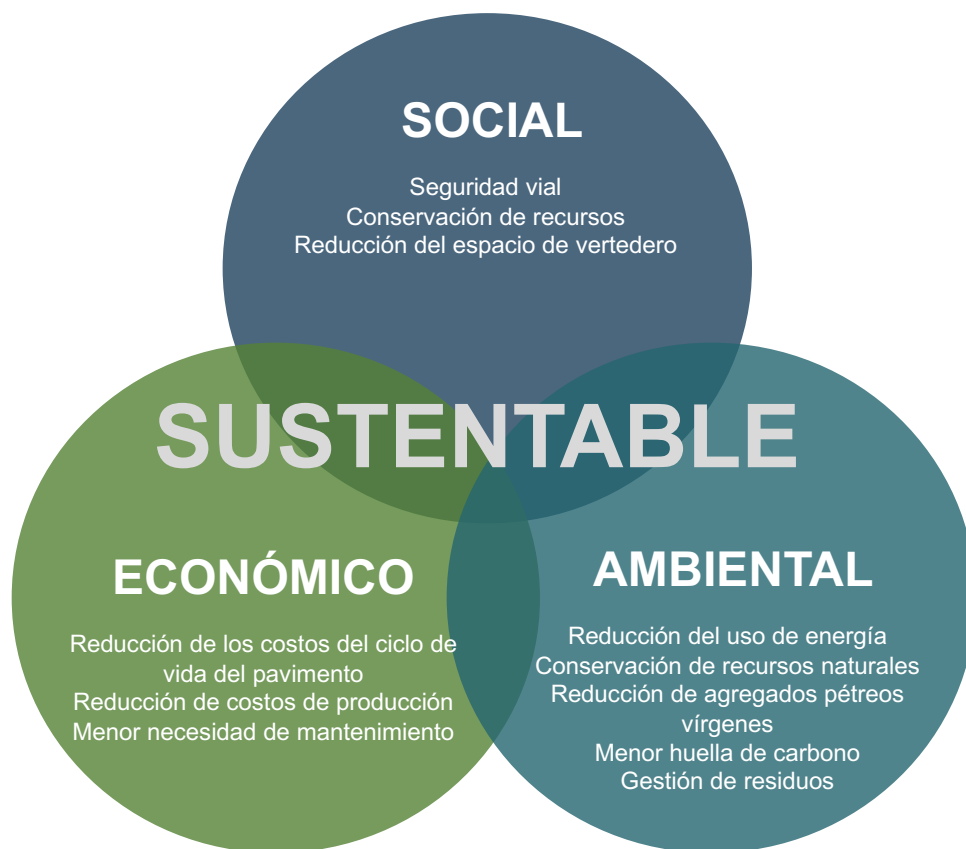


Figura.- 49 Sustentabilidad del pavimento asfáltico reciclado. Fuente: Elaboración Propia.

No se puede utilizar capas que hayan sufrido deformaciones permanentes o que contengan sustancias potencialmente peligrosas, como la destilación de productos carbonosos o el asbesto-amianto.





En cuanto a la utilización de materiales sobrantes y excedentes provenientes de otras mezclas, esta práctica puede ser aceptable siempre y cuando no comprometa la calidad del material y se utilice una envoltura adecuada para su manipulación y almacenamiento.

En el caso de contenido de residuos asfálticos (RA) superior al 20%, provenientes de microaglomerados en frío, mezclas bituminosas drenantes y discontinuas, se requiere un acopio separado y un análisis para determinar su posible reutilización en aplicaciones específicas.

Es fundamental que el material esté libre de residuos de construcción y demolición (RCD), y no presente signos de meteorización. Además, debe cumplir con las propiedades de dureza y calidad comparables a las exigidas para los áridos de aportación.





8.2. CONCLUSIONES

La presente investigación de evaluación de mezclas de pavimento asfáltico, tanto convencionales como aquellas que incluyen RAP, ha evidenciado que cumplen plenamente con las especificaciones técnicas establecidas por la normativa mexicana vigente. Los parámetros evaluados garantizan un rendimiento adecuado en términos de durabilidad y resistencia frente a las cargas previstas, así como en diversas condiciones ambientales.

El análisis realizado sobre las mezclas de pavimento asfáltico, tanto convencionales como aquellas que incluyen la incorporación de RAP, evidencia que estas cumplen cabalmente con las especificaciones técnicas establecidas por la normativa mexicana vigente. Los parámetros evaluados permiten concluir que dichas mezclas garantizan un desempeño adecuado, tanto en términos de durabilidad como en su resistencia frente a las cargas previstas y las diversas condiciones ambientales a las que podrían estar expuestas.

Los resultados obtenidos en las pruebas de deformación permanente y resistencia al daño por humedad han sido satisfactorios, validando la idoneidad de estas mezclas para su aplicación en proyectos de pavimentación. En particular, la inclusión de RAP en las mezclas no solo se presenta como una solución técnicamente viable, sino también como una opción ambientalmente responsable, al promover la reutilización de materiales previamente empleados sin comprometer la calidad ni la vida útil de las superficies pavimentadas.

La granulometría del RAP es crucial para el encaje inicial entre partículas y las propiedades volumétricas de las mezclas. No se garantiza que una energía de compactación específica siempre produzca las mismas propiedades volumétricas.

Utilizar material fresado como reemplazo del 30% del agregado fino tradicional en los diseños de pavimentos no solo aborda la acumulación excesiva de dicho material en los acopios, sino que también presenta beneficios significativos en términos ambientales. Este enfoque contribuye directamente a la reducción del impacto negativo en el entorno, como la alteración del paisaje, al tiempo que fomenta la optimización de los espacios para otros usos.





Además, al reducir la demanda de agregado pétreo convencional, se promueve una gestión más sostenible de los recursos naturales.

La degradación de la infraestructura vial está estrechamente relacionada con los riesgos climáticos, el tráfico y la composición de la estructura del pavimento en sí. La falta de mantenimiento acelera la evolución de las degradaciones, que en ocasiones puede imponer el uso de técnicas de rehabilitación costosa para restaurar las propiedades iniciales y el rendimiento. Por lo tanto, es importante mantener una red vial segura y con un buen servicio para los usuarios. Varias técnicas de mantenimiento existen en todo el mundo.

Si un pavimento es correctamente construido, mantenido y dura el doble de tiempo entonces el 100 de los materiales vírgenes que se habrían utilizado para reconstruirlo se han conservado. La industria del asfalto debe evitar el uso de productos, subproductos y materiales de desecho de otros sectores, que pueden poner en peligro el asfalto propiedades fundamentales, como su propia circularidad.

Las características de la estructura de la carretera indican que las capas inferiores (base, subbase, etc.) son capaces de absorber materiales en mayor cantidad. que las capas superiores. Sin embargo, para maximizar la proporción de materiales reciclados en suministros de construcción significa algo más que un rápido entierro de materiales de desecho, posiblemente materiales de mayor valor si se utilizan en otros lugares.

Las mezclas con RAP exhiben un comportamiento mecánico viscoelástico, pero también dependen en gran medida del nivel de tensión al que se someten, especialmente en las etapas iniciales tras su fabricación. Se considera que los ensayos triaxiales son una herramienta muy adecuada para caracterizar completamente este material. Si bien los ensayos simples, como el ITS, son útiles para un diseño preliminar, se recomienda una caracterización más detallada mediante ensayos triaxiales con distintos niveles de confinamiento.

El ACV se divide en etapas para identificar las que más contribuyen al impacto ambiental total de cada escenario. En la mayoría de las categorías de impacto y en todos los escenarios,





la etapa que más contribuye es la extracción de materias primas. Esto se debe a que la producción del aglutinante requiere la extracción y refinación de petróleo.

Según los resultados obtenidos en análisis de sensibilidad, el impacto total se incrementa entre un 7% y un 12% al considerar variaciones en las distancias de transporte que oscilan entre 20 km y 100 km. Este hallazgo subraya la importancia de optimizar las rutas de transporte y de considerar estrategias que minimicen la distancia recorrida para reducir tanto los costos como la huella ambiental de los proyectos de construcción. En consecuencia, es fundamental implementar medidas que favorezcan una planificación eficiente de la logística, contribuyendo así a la sostenibilidad y viabilidad económica de las obras en el sector de la construcción.

Si bien las propiedades físicas y reológicas del asfalto son esenciales para el diseño, la construcción y el comportamiento de la estructura, se recomienda realizar ensayos reológicos en el asfalto del material reciclado. Esto permitirá determinar qué tipo de asfalto permite aumentar el porcentaje de material reciclado en la estructura a desarrollar.

Mantener una baja variabilidad del RAP es crucial, ya que se trata de un material recuperado de un pavimento que ya ha cumplido su vida útil. Se recomienda implementar buenas prácticas de almacenamiento para obtener un material más homogéneo y reducir la dispersión en el comportamiento final de la mezcla.

El análisis revela una distribución equitativa entre el Método Marshall y el Método Superpave en términos de especificaciones y diseño, con cierta adopción del Protocolo AMAAC. Sin embargo, la falta de claridad en las especificaciones y métodos de diseño actuales representa un desafío significativo para muchos contratistas en la implementación del RAP.

Para fomentar el uso del RAP, se recomienda la implementación de incentivos fiscales, mayor inversión en investigación y desarrollo, programas de capacitación y subsidios para la adquisición de equipos de reciclaje. A pesar de estos desafíos, la satisfacción general con el rendimiento del RAP es alta, y existe una disposición generalizada entre los contratistas para





recomendar su uso a otros en la industria. Estas medidas podrían contribuir significativamente a la expansión y mejora continua del uso del RAP en proyectos de pavimentación, beneficiando tanto a la industria como al medio ambiente.

Finalmente, los beneficios que proporciona el uso del RAP en nuevas mezclas asfálticas o capas de pavimento deben medirse, cuantificarse, comprobarse y aplicarse. El uso de materiales reciclados, en lugar de vírgenes, tiene el “doble beneficio de sostenibilidad” de aliviar la presión sobre los vertederos y reducir la demanda de extracción. Este es un importante medio para encaminar la industria vial hacia la construcción sostenible.

En conclusión, se puede afirmar que la incorporación de un 30% de RAP en el diseño de mezclas asfálticas mejora positivamente las características de desempeño de dichas mezclas, siempre que se realice un uso racional y consciente del material reciclado. Este enfoque no solo alivia la presión sobre los vertederos, sino que también reduce la demanda de materiales vírgenes, guiando a la industria vial hacia prácticas más sostenibles.





8.3. RECOMENDACIONES

Considerando la inherente variabilidad y falta de homogeneización del RAP, es crucial realizar una caracterización exhaustiva del material. Esto permitirá estudiar y evaluar si sus propiedades cumplen con los estándares establecidos por las normas mexicanas, asegurando así su desempeño futuro y permitiendo ajustes oportunos para garantizar un funcionamiento óptimo a lo largo de su vida útil.

Destacando las directrices establecidas por el IMT y la SICT, es evidente la falta de información suficiente sobre las técnicas de reciclaje de pavimento asfáltico y temas relacionados en general. Por lo tanto, se sugiere la elaboración y aplicación de un manual específico para esta técnica, profundizando en esta área de vital importancia, dado que su implementación conlleva numerosos beneficios que pueden impulsar el desarrollo nacional.

Mantener la variabilidad del RAP en niveles bajos es esencial, ya que se trata de un material recuperado de pavimento que ha alcanzado el fin de su vida útil. Por tanto, es recomendable seguir buenas prácticas de almacenamiento para obtener un material más homogéneo y reducir la variabilidad en el comportamiento final de la mezcla en desarrollo.

Si bien las propiedades físicas y reológicas del asfalto son fundamentales para un diseño y construcción adecuados, así como para el comportamiento eficaz de la estructura y sus materiales constituyentes, se sugiere realizar ensayos reológicos en el asfalto reciclado. Esto ayudaría a determinar qué tipo de asfalto permite aumentar el porcentaje de material reciclado en la estructura en desarrollo.

Las distancias de transporte desempeñan un papel significativo en la generación de emisiones, particularmente durante las etapas de extracción de materiales, producción y construcción. Por lo tanto, se recomienda encarecidamente la adopción de prácticas ambientales responsables que limiten el transporte a distancias de entre 0 y 20 km. Esta medida puede resultar en una reducción de hasta un 42% en las emisiones derivadas del transporte de materiales, maquinaria y equipo.





Para lograr este objetivo, es fundamental ubicar las fuentes de extracción de materiales lo más cerca posible del lugar del proyecto. Además, se debe trabajar en mejorar las propiedades mecánicas de los materiales si es necesario y promover el uso de tecnologías más modernas que limiten las emisiones. Asimismo, se debe considerar la adquisición de maquinaria que funcione con combustibles menos contaminantes, como el gas y los biocombustibles. Estas acciones no solo contribuirán a reducir las emisiones, sino que también mejorarán la eficiencia ambiental de las operaciones de construcción.





8.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Prohibición de vertido del RAP (rellenos): Investigación sobre políticas y regulaciones que prohíban o restrinjan el vertido de RAP en vertederos o rellenos sanitarios. Examinar el impacto ambiental y económico de estas prohibiciones, así como evaluar alternativas sostenibles para la gestión del RAP, como su reutilización en nuevas obras viales o su reciclaje en otras aplicaciones.

Beneficios económicos a las empresas que lo utilicen: Investigación sobre incentivos financieros, subsidios o créditos fiscales que puedan otorgarse a las empresas que utilicen RAP en sus proyectos de pavimentación. Analizar el impacto de estos incentivos en los costos de construcción y mantenimiento de carreteras, así como en la competitividad de las empresas en el mercado.

Promover especificaciones técnicas: Estudio de las especificaciones técnicas necesarias para garantizar la calidad y durabilidad del pavimento asfáltico reciclado. Investigar prácticas de ingeniería y tecnologías innovadoras que mejoren el rendimiento del RAP, así como desarrollar estándares y normativas que promuevan su uso seguro y eficiente.

Disminución en pagos de impuestos a la empresa: Investigación sobre la viabilidad y el impacto de reducir los pagos de impuestos a las empresas que empleen RAP en sus proyectos de pavimentación. Analizar cómo estas medidas pueden incentivar la adopción de prácticas más sostenibles y promover el uso responsable de los recursos naturales.

Puntos adicionales en futuras licitaciones: Estudio de la inclusión de criterios relacionados con el uso de RAP en los procesos de licitación para proyectos de construcción y mantenimiento de carreteras. Investigar cómo la asignación de puntos adicionales a las empresas que utilicen RAP puede fomentar la innovación y la adopción de prácticas más sostenibles en la industria de la pavimentación.





Impuestos y/o multas sobre su vertido: Investigación sobre la implementación de impuestos o multas sobre el vertido de RAP en vertederos o rellenos sanitarios. Analizar cómo estas medidas pueden incentivar la reutilización y reciclaje del RAP, así como evaluar su efectividad en la reducción de residuos y la protección del medio ambiente.

Se sugiere además formalizar la elaboración de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) Social, con el propósito de permitir la toma de decisiones integrales. Esta práctica facilita la evaluación de escenarios de manera holística, promoviendo así el avance hacia una economía circular.

Asimismo, es imperativo proponer una línea de investigación destinada a desarrollar inventarios de impacto en el ciclo de vida. Este objetivo puede alcanzarse mediante la colaboración entre instituciones y empresas, respaldada por estudios de caso específicos relacionados con infraestructuras viales. Este enfoque facilitará la comprensión integral de los efectos ambientales, económicos y sociales asociados a la planificación, construcción y mantenimiento de carreteras, permitiendo así la implementación de estrategias más eficaces y sostenibles en el sector.

Evaluación de tramos de prueba.





ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AASHTO: Asociación Estadounidense de Funcionarios de Transporte y de Carreteras

ACV: Análisis del ciclo de vida

AMAAC: Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto rendimiento

ASTM: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales

CMA: Mezcla asfáltica en frío

CO₂: dióxido de carbono

EAPA: Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos

CE: Economía Circular

GEI: Efectos del Gas Invernadero

HMA: Mezcla asfáltica en caliente

IMT: Instituto Mexicano del Transporte

ITS: Índice de Resistencia a la Tracción

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PG: Grado de desempeño

RAP: Pavimento Asfáltico Recuperado

RCD: Residuos de construcción y demolición

SICT: Secretaría de Infraestructura, Comunicación y Transportes

TPDA: Tránsito promedio diario anual

TSR: Resistencia retenida a tensión indirecta

WMA: Mezcla asfáltica tibia





REFERENCIAS

- Le Bouteiller, É. (2010). *Emulsiones Asfálticas para Pavimentos Sostenibles*. Primera Conferencia Internacional sobre preservación de Pavimentos Departamento de Transporte la Preservación de California de Pavimentos Administración de la Federal.
- AASHTO. (2008). *Método estándar de prueba para contenido vacío no compactado de agregado fino (T 304-08)*. Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte.
- Abdelaziz, Mahrez & Karim, Mohamed. (2010). Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass. *Revista Internacional de Ciencias Físicas*, 5.
- ARRA. (2001). *Manual Básico de Reciclaje de Asfalto*. USA: Asociación de Recuperación y Reciclaje de Asfalto.
- Asphalt institute. (1989). *MS-14 Asphalt Cold Mix Manual*. USA: Asphalt institute.
- Asphalt Institute. (2020). *MS-22 Construction of Quality Asphalt Pavements*. Asphalt Institute; Tercera edición.
- ASTM D2726, S. (2021). *Método de prueba estándar para la gravedad específica aparente y la densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes*. ASTM Internacional.
- ASTM D6927, S. (2022). *Método de prueba estándar para estabilidad Marshall y flujo de mezclas asfálticas*. ASTM International.
- ASTM, S. (2022). *Método de prueba estándar para estabilidad Marshall y flujo de mezclas asfálticas*. ASTM International.
- ASTM, S. (2023). *Método de prueba estándar para la gravedad específica aparente y la densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes*. ASTM International.
- Austroroads. (2018). *Guide to pavement technology part 4E: Recycled materials*. <https://austroroads.com.au/publications/pavement/agpt04e>: Austroroads.
- Baumann, H. y Tillman, AM. (2004). *La guía del autoestopista sobre ACV*. Vol. 1. Federal Highway Administration. (Agosto de 2024). *Federal Highway Administration*. Obtenido de <https://highways.dot.gov>
- Fenerci, K., et al. (2023). The economic potentials of reclaimed asphalt pavements (RAP) in urban road infrastructure: a case study of Yalova city. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 205 - 218.
- IMT, SICT. (2001). *Impacto ambiental de proyectos carreteros. efectos por la construcción y conservación de superficies de rodadura: i pavimentos flexibles*. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- INEGI, I. (2022). *Red nacional de caminos (RNC) actualización 2022*. México: INEGI Informa.
- IPCC. (2021). *Cambio climático 2021: la base de la ciencia física*. Sexto informe de evaluación del IPCC.
- ISO 14040. (1997). *Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Principios y marco*. Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización.
- ISO 14040. (2006). *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización.





- ISO 14041. (1998). *Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Definición de objetivo y alcance e inventario de análisis*. Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización.
- ISO 14042. (2000). *Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Evaluación del impacto del ciclo de vida*. Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización.
- ISO 14043. (2000). *Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Interpretación del ciclo de vida*. Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización.
- ISO 14044. (2006). *Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Requisitos y directrices*. Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización.
- Japan Road Association. (2016). *Technical guidelines for asphalt recycling*. Japon: Japan Road Association.
- Jenkins. (2000). *Consideraciones de diseño de mezclas para mezclas bituminosas frías y semicalientes con énfasis en betún espumado*. Tesis doctoral, Universidad de Stellenbosch.
- M-MMP-4-04-003/18, I. (2018). *Densidades relativas y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México: IMT.
- M-MMP-4-04-004/16, I. (2016). *Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. México: IMT.
- M-MMP-4-04-005/08, I. (2008). *Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. México: IMT.
- M-MMP-4-04-006/02, I. (2002). *Desgaste mediante la prueba de Los Angeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. México: IMT.
- M-MMP-4-04-007/23, I. (2023). *Resistencia a la Degradación por Abrasión del Material Pétreo con la Máquina Micro-Deval*. México: IMT.
- M-MMP-4-04-008/03, I. (2003). *Intemperismo Acelerado de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. México: IMT.
- M-MMP-4-04-013/09, I. (2009). *Partículas Trituradas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. México: IMT.
- M-MMP-4-04-014/09, I. (2009). *Azul de Metileno de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. México: IMT.
- M-MMP-4-05-049/15, I. (2015). *Contenido de Cemento o Residuo Asfáltico Mediante Extracción por Centrifugado*. México: IMT.
- M-MMP-4-05-052/21, I. (2021). *Susceptibilidad de las Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad*. México: IMT.
- M-MMP-4-05-053/21, I. (2021). *Deformación Permanente por Rodera con Rueda Cargada de Hamburgo*. México: IMT.
- N-CMT-4-04/17, I. (2017). *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. México: IMT.
- N-CMT-4-05-004/18, I. (2018). *Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG)*. México: IMT.
- N-CMT-4-05-001/22, I. (2022). *Calidad de materiales asfálticos*. México: IMT.
- National Asphalt Pavement Association. (Agosto de 2024). *National Asphalt Pavement Association*. Obtenido de <https://www.asphaltpavement.org>
- NOAA, N. (2023). *Estado del clima*. National Centers for Environmental Information.
- Ontario Ministry of Transportation. (2019). *Sustainability and recycled materials in pavement construction*. Ontario: Ontario Ministry of Transportation.





- RLOPSRM. (2023). *Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas*. México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- SICT. (2024). *Tabulador a costo directo para la construcción, modernización y conservación de obras para infraestructura carretera*. Ciudad de México: SICT.
- SICT, S. (2022). *La importancia de conservar la infraestructura vial*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes: Prensa.
- USEPA. (2020). *Informe de evaluación de emisiones de plantas de mezcla asfáltica en caliente*. Agencia de protección ambiental de EE. UU.



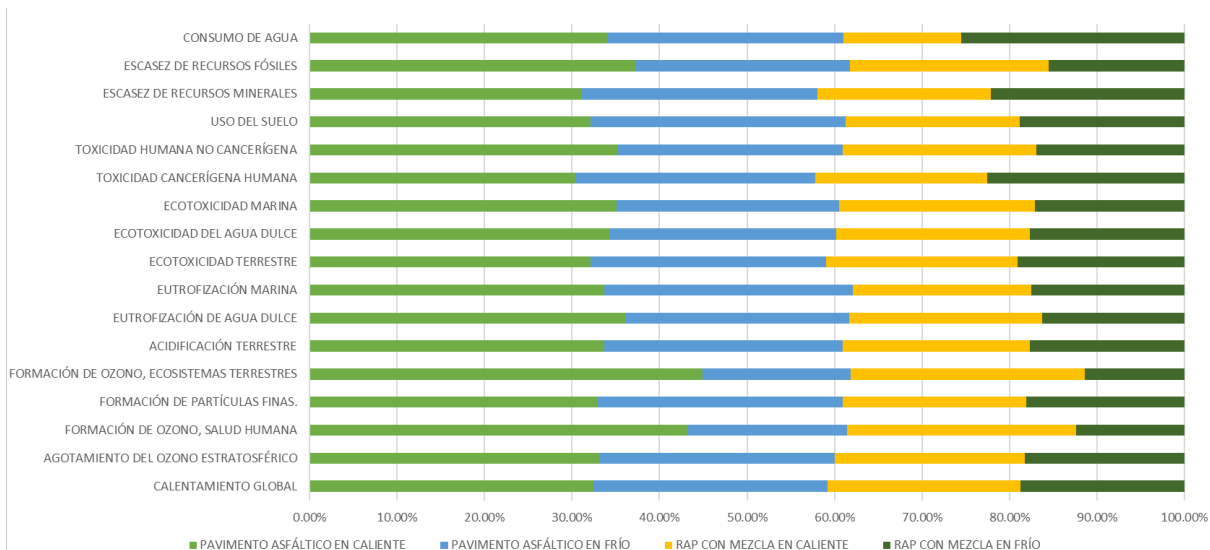


ANEXO

Resultados: Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	22,760.17	18,743.27	15,495.91	13,140.36
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	0.0253	0.0206	0.0166	0.0140
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	382.13	161.75	232.15	109.72
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	47.39	40.50	30.22	26.06
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRE	567.28	213.93	338.84	143.54
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	115.90	93.92	73.60	60.86
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	7.88	5.56	4.81	3.54
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1046	0.0881	0.0634	0.0544
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	81,246.90	68,358.20	55,451.58	48,189.58
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	46.48	35.25	30.11	23.95
ECOTOXICIDAD MARINA	795,330.59	575,015.26	507,557.13	386,566.97
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	22,496.17	20,253.93	14,573.70	16,664.90
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	739,693.12	539,428.79	465,367.88	354,802.08
USO DEL SUELO	1,088.65	986.83	676.07	636.90
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	61.57	53.22	39.18	43.73
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	24,803.68	16,232.59	15,049.93	10,332.63
CONSUMO DE AGUA	696.01	552.06	276.09	521.96

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	32.45%	26.72%	22.09%	18.73%
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	33.09%	26.91%	21.73%	18.27%
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	43.14%	18.26%	26.21%	12.39%
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	32.87%	28.09%	20.96%	18.07%
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRE	44.89%	16.93%	26.82%	11.36%
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	33.66%	27.28%	21.38%	17.68%
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	36.16%	25.50%	22.09%	16.25%
EUTROFIZACIÓN MARINA	33.70%	28.38%	20.41%	17.51%
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	32.08%	26.99%	21.90%	19.03%
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	34.23%	25.96%	22.17%	17.64%
ECOTOXICIDAD MARINA	35.12%	25.39%	22.41%	17.07%
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	30.40%	27.37%	19.70%	22.52%
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	35.24%	25.70%	22.17%	16.90%
USO DEL SUELO	32.13%	29.12%	19.95%	18.80%
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	31.14%	26.92%	19.82%	22.12%
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	37.34%	24.44%	22.66%	15.56%
CONSUMO DE AGUA	34.02%	26.98%	13.49%	25.51%





CALENTAMIENTO GLOBAL

CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	18,352.77	14,507.74	10,298.33	8,110.58
TRANSPORTE DE MATERIALES	625.79	625.79	625.79	625.79
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1,485.00	1,317.19	2,279.24	2,111.43
TRANSPORTE DE MEZCLA	677.94	677.94	677.94	677.94
CONSTRUCCIÓN	1,618.67	1,614.60	1,614.60	1,614.60
70,139.71	22,760.17	18,743.27	15,495.91	13,140.36
TOTAL / PORCENTAJE	32.45%	26.72%	22.09%	18.73%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	80.64%	77.40%	66.46%	61.72%
TRANSPORTE DE MATERIALES	2.75%	3.34%	4.04%	4.76%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	6.52%	7.03%	14.71%	16.07%
TRANSPORTE DE MEZCLA	2.98%	3.62%	4.37%	5.16%
CONSTRUCCIÓN	7.11%	8.61%	10.42%	12.29%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL

100%

-18%

-32%

-42%

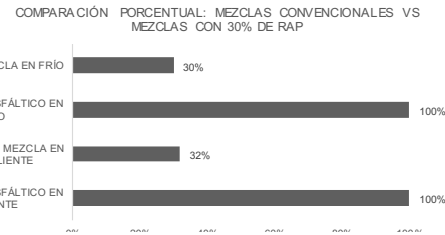
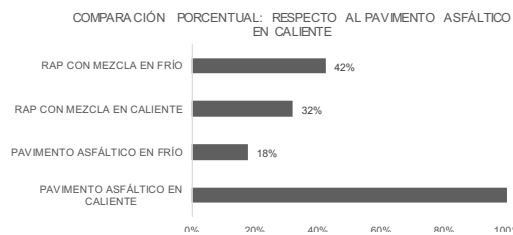
COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP

100%

100%

-32%

-30%



USO DEL SUELO

CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	993.64	894.43	570.15	533.48
TRANSPORTE DE MATERIALES	24.18	24.18	24.18	24.18
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	22.13	19.63	33.15	30.65
TRANSPORTE DE MEZCLA	26.19	26.19	26.19	26.19
CONSTRUCCIÓN	22.52	22.40	22.40	22.40
3,388.45	1,088.65	986.83	676.07	636.90
TOTAL / PORCENTAJE	32.13%	29.12%	19.95%	18.80%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	91.27%	90.64%	84.33%	83.76%
TRANSPORTE DE MATERIALES	2.22%	2.45%	3.58%	3.80%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.03%	1.99%	4.90%	4.81%
TRANSPORTE DE MEZCLA	2.41%	2.65%	3.87%	4.11%
CONSTRUCCIÓN	2.07%	2.27%	3.31%	3.52%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL

100%

-9%

-38%

-41%

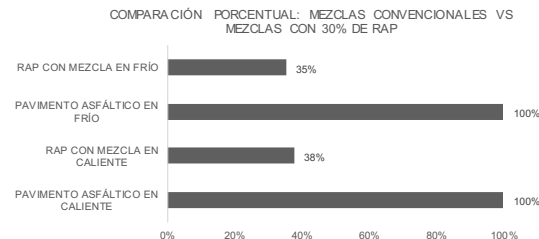
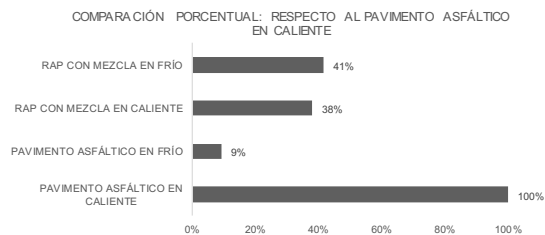
COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP

100%

100%

-38%

-35%





ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES

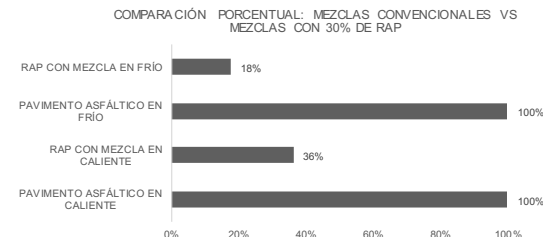
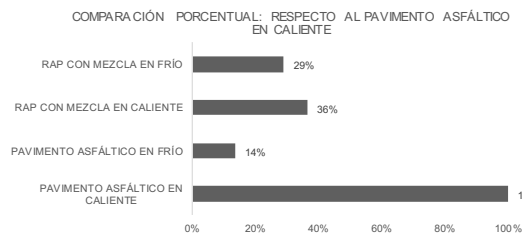
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	52.77	44.71	29.16	33.97
TRANSPORTE DE MATERIALES	1.89	1.89	1.89	1.89
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.29	2.03	3.54	3.28
TRANSPORTE DE MEZCLA	2.05	2.05	2.05	2.05
CONSTRUCCIÓN	2.57	2.54	2.54	2.54
197.70	61.57	53.22	39.18	43.73
TOTAL / PORCENTAJE	31.14%	26.92%	19.82%	22.12%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	85.71%	84.00%	74.42%	77.67%
TRANSPORTE DE MATERIALES	3.07%	3.55%	4.83%	4.32%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	3.73%	3.82%	9.04%	7.51%
TRANSPORTE DE MEZCLA	3.33%	3.85%	5.23%	4.68%
CONSTRUCCIÓN	4.17%	4.77%	6.49%	5.81%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-14%	-36%	-29%
-------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-36%	-18%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------



ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES

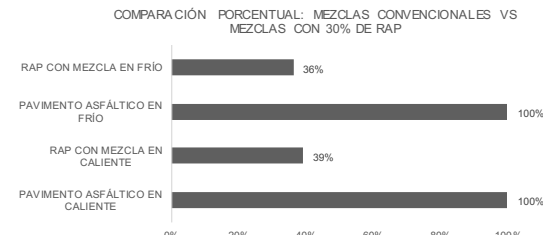
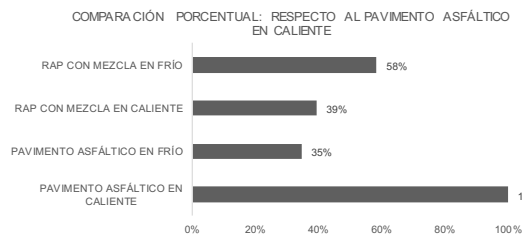
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	23,379.89	14,862.33	13,372.16	8,707.21
TRANSPORTE DE MATERIALES	211.49	211.49	211.49	211.49
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	463.30	410.95	718.46	666.11
TRANSPORTE DE MEZCLA	229.12	229.12	229.12	229.12
CONSTRUCCIÓN	519.89	518.71	518.71	518.71
66,418.84	24,803.68	16,232.59	15,049.93	10,332.63
TOTAL / PORCENTAJE	37.34%	24.44%	22.66%	15.56%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	94.26%	91.56%	88.85%	84.27%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.85%	1.30%	1.41%	2.05%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.87%	2.53%	4.77%	6.45%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.92%	1.41%	1.52%	2.22%
CONSTRUCCIÓN	2.10%	3.20%	3.45%	5.02%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-35%	-39%	-58%
-------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-39%	-36%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------





CONSUMO DE AGUA

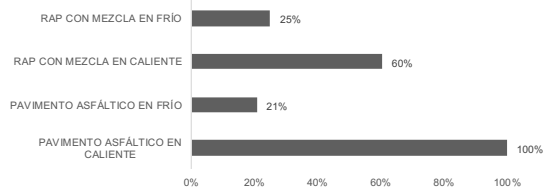
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	689.03	545.44	268.51	514.69
TRANSPORTE DE MATERIALES	1.34	1.34	1.34	1.34
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.83	2.51	3.48	3.16
TRANSPORTE DE MEZCLA	1.46	1.46	1.46	1.46
CONSTRUCCIÓN	1.34	1.31	1.31	1.31
2,046.12	696.01	552.06	276.09	521.96
TOTAL / PORCENTAJE	34.02%	26.98%	13.49%	25.51%

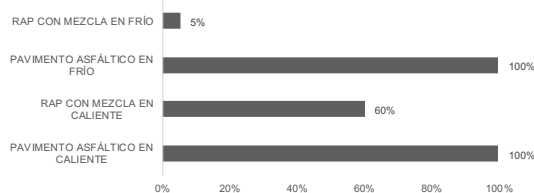
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	99.00%	98.80%	97.25%	98.61%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.19%	0.24%	0.49%	0.26%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.41%	0.45%	1.26%	0.60%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.21%	0.26%	0.53%	0.28%
CONSTRUCCIÓN	0.19%	0.24%	0.48%	0.25%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-21%	-60%	-25%
COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-60%	-5%

COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE



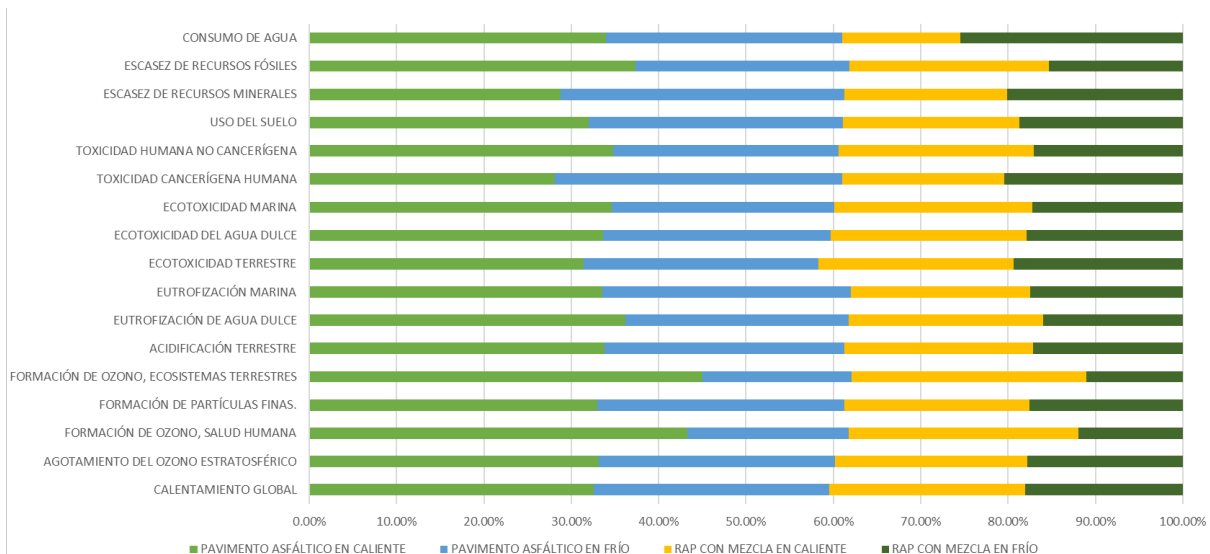
COMPARACIÓN PORCENTUAL: MEZCLAS CONVENCIONALES VS MEZCLAS CON 30% DE RAP





ETAPA/ PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	23,412.04	19,395.14	16,147.78	12,997.98
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	0.0259	0.0212	0.0172	0.0139
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	383.15	162.77	233.17	105.57
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	48.01	41.13	30.85	25.56
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRI	568.35	215.00	339.91	139.36
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	117.26	95.28	74.96	59.59
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	7.95	5.63	4.89	3.52
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1065	0.0900	0.0653	0.0554
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	89,272.51	76,383.80	63,477.19	55,198.62
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	49.15	37.92	32.78	26.12
ECOTOXICIDAD MARINA	830,717.50	610,402.18	542,944.04	413,005.10
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	23,217.59	27,143.37	15,295.12	16,862.57
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	768,414.87	568,150.54	494,089.63	376,247.86
USO DEL SUELO	1,113.84	1,012.01	701.26	651.06
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	63.54	71.78	41.15	44.45
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	25,023.99	16,452.90	15,270.24	10,297.78
CONSUMO DE AGUA	697.41	553.46	277.49	522.71

ETAPA/ PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	32.54%	26.96%	22.44%	18.06%
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	33.13%	27.08%	22.02%	17.78%
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	43.31%	18.40%	26.36%	11.93%
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	32.99%	28.26%	21.20%	17.56%
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRI	45.01%	17.03%	26.92%	11.04%
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	33.78%	27.45%	21.60%	17.17%
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	36.16%	25.60%	22.22%	16.02%
EUTROFIZACIÓN MARINA	33.58%	28.38%	20.58%	17.46%
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	31.40%	26.86%	22.33%	19.41%
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	33.67%	25.98%	22.46%	17.89%
ECOTOXICIDAD MARINA	34.66%	25.46%	22.65%	17.23%
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	28.14%	32.89%	18.54%	20.43%
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	34.82%	25.74%	22.39%	17.05%
USO DEL SUELO	32.02%	29.10%	20.16%	18.72%
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	28.76%	32.49%	18.63%	20.12%
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	37.32%	24.54%	22.78%	15.36%
CONSUMO DE AGUA	34.00%	26.98%	13.53%	25.48%





CALENTAMIENTO GLOBAL

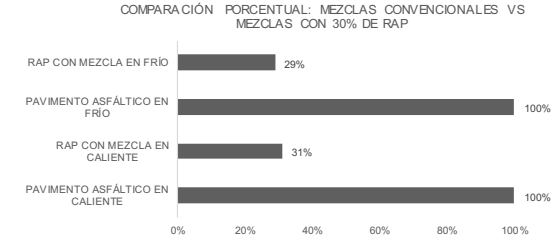
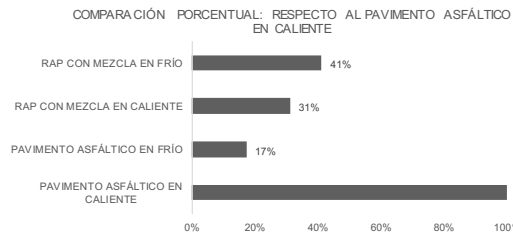
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	18,352.77	14,507.74	10,298.33	8,110.58
TRANSPORTE DE MATERIALES	938.69	938.69	938.69	938.69
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1,485.00	1,317.19	2,279.24	2,111.43
TRANSPORTE DE MEZCLA	1,016.92	1,016.92	1,016.92	1,016.92
CONSTRUCCIÓN	1,618.67	1,614.60	1,614.60	1,614.60
72,747.18	23,412.04	19,395.14	16,147.78	13,792.22
TOTAL / PORCENTAJE	32.18%	26.66%	22.20%	18.96%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	78.39%	74.80%	63.78%	58.81%
TRANSPORTE DE MATERIALES	4.01%	4.84%	5.81%	6.81%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	6.34%	6.79%	14.11%	15.31%
TRANSPORTE DE MEZCLA	4.34%	5.24%	6.30%	7.37%
CONSTRUCCIÓN	6.91%	8.32%	10.00%	11.71%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL 100% -17% -31% -41%

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP 100% 100% -31% -29%



USO DEL SUELO

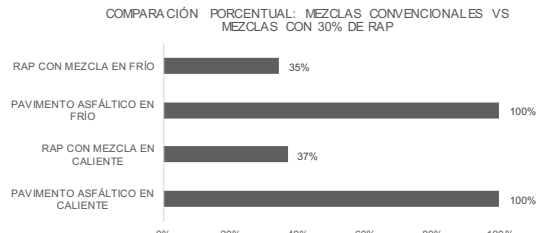
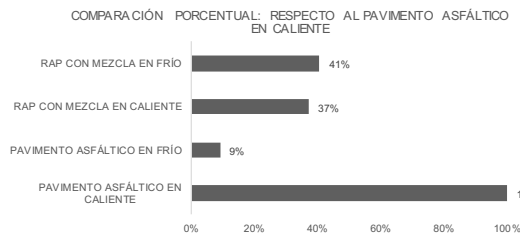
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	993.64	894.43	570.15	533.48
TRANSPORTE DE MATERIALES	36.26	36.26	36.26	36.26
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	22.13	19.63	33.15	30.65
TRANSPORTE DE MEZCLA	39.29	39.29	39.29	39.29
CONSTRUCCIÓN	22.52	22.40	22.40	22.40
3,489.19	1,113.84	1,012.01	701.26	662.08
TOTAL / PORCENTAJE	31.92%	29.00%	20.10%	18.98%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	89.21%	88.38%	81.30%	80.58%
TRANSPORTE DE MATERIALES	3.26%	3.58%	5.17%	5.48%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.99%	1.94%	4.73%	4.63%
TRANSPORTE DE MEZCLA	3.53%	3.88%	5.60%	5.93%
CONSTRUCCIÓN	2.02%	2.21%	3.19%	3.38%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL 100% -9% -37% -41%

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP 100% 100% -37% -35%





ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES

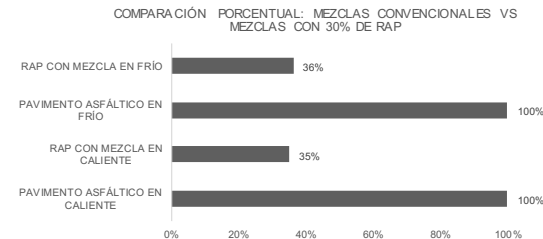
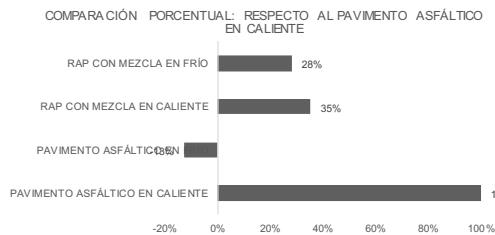
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	52.77	61.30	29.16	33.97
TRANSPORTE DE MATERIALES	2.84	2.84	2.84	2.84
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.29	2.03	3.54	3.28
TRANSPORTE DE MEZCLA	3.07	3.07	3.07	3.07
CONSTRUCCIÓN	2.57	2.54	2.54	2.54
222.17	63.54	71.78	41.15	45.70
TOTAL / PORCENTAJE	28.60%	32.31%	18.52%	20.57%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	83.05%	85.40%	70.86%	74.33%
TRANSPORTE DE MATERIALES	4.46%	3.95%	6.89%	6.20%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	3.61%	2.83%	8.61%	7.19%
TRANSPORTE DE MEZCLA	4.83%	4.28%	7.47%	6.72%
CONSTRUCCIÓN	4.04%	3.54%	6.18%	5.56%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	13%	-35%	-28%
-------------------------------	-------------	------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-35%	-36%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------



ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES

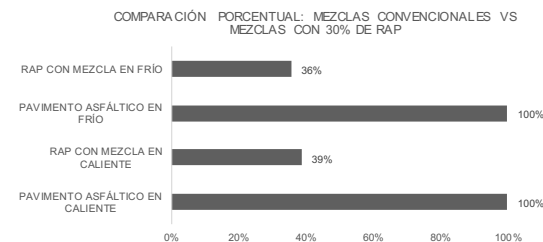
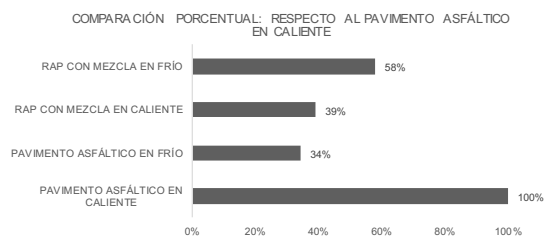
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	23,379.89	14,862.33	13,372.16	8,707.21
TRANSPORTE DE MATERIALES	317.24	317.24	317.24	317.24
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	463.30	410.95	718.46	666.11
TRANSPORTE DE MEZCLA	343.67	343.67	343.67	343.67
CONSTRUCCIÓN	519.89	518.71	518.71	518.71
67,300.05	25,023.98	16,452.90	15,270.24	10,552.94
TOTAL / PORCENTAJE	37.18%	24.45%	22.69%	15.68%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	93.43%	90.33%	87.57%	82.51%
TRANSPORTE DE MATERIALES	1.27%	1.93%	2.08%	3.01%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.85%	2.50%	4.70%	6.31%
TRANSPORTE DE MEZCLA	1.37%	2.09%	2.25%	3.26%
CONSTRUCCIÓN	2.08%	3.15%	3.40%	4.92%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-34%	-39%	-58%
-------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-39%	-36%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------





CONSUMO DE AGUA

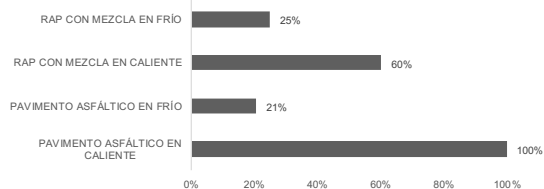
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	689.03	545.44	268.51	514.69
TRANSPORTE DE MATERIALES	2.01	2.01	2.01	2.01
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.83	2.51	3.48	3.16
TRANSPORTE DE MEZCLA	2.18	2.18	2.18	2.18
CONSTRUCCIÓN	1.34	1.31	1.31	1.31
2,051.71	697.41	553.46	277.49	523.36
TOTAL / PORCENTAJE	33.99%	26.98%	13.52%	25.51%

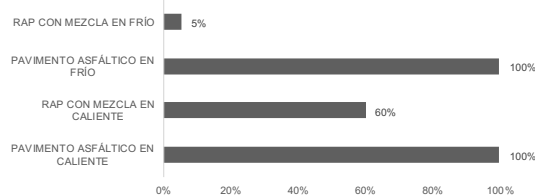
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	98.80%	98.55%	96.76%	98.34%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.29%	0.36%	0.73%	0.38%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.41%	0.45%	1.25%	0.60%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.31%	0.39%	0.79%	0.42%
CONSTRUCCIÓN	0.19%	0.24%	0.47%	0.25%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-21%	-60%	-25%
COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-60%	-5%

COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE



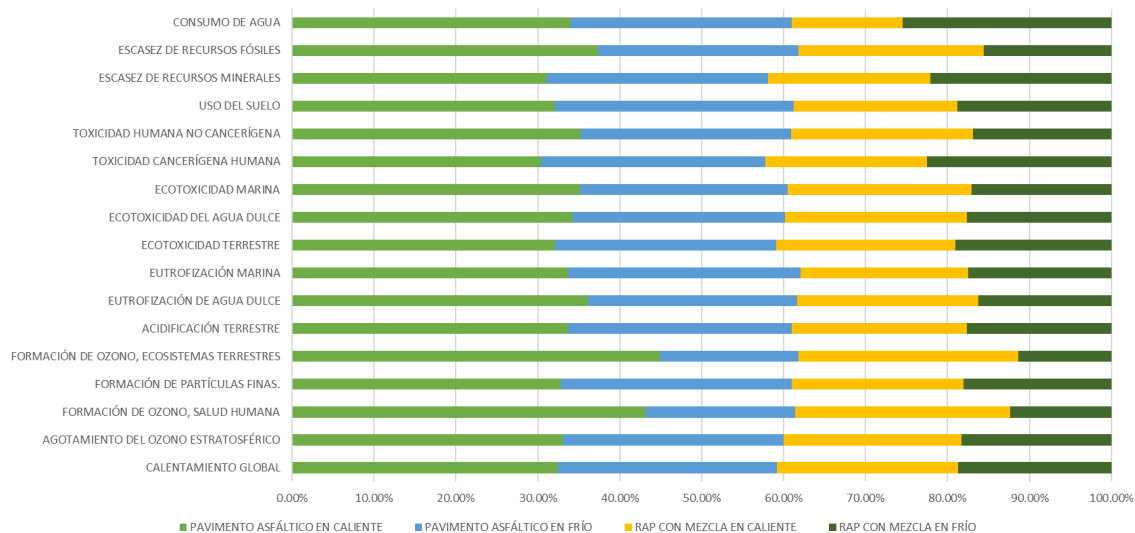
COMPARACIÓN PORCENTUAL: MEZCLAS CONVENCIONALES VS MEZCLAS CON 30% DE RAP





ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	24,063.91	20,047.01	16,799.65	13,649.85
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	0.0265	0.0218	0.0178	0.0145
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	384.17	163.79	234.19	106.59
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	48.63	41.75	31.47	26.18
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRI	569.42	216.08	340.98	140.44
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	118.62	96.64	76.32	60.95
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	8.03	5.71	4.97	3.60
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1085	0.0920	0.0673	0.0574
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	97,298.11	84,409.41	71,502.80	63,224.22
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	51.82	40.59	35.45	28.79
ECOTOXICIDAD MARINA	866,104.41	645,789.09	578,330.95	448,392.01
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	23,939.01	27,864.79	16,016.54	17,583.99
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	797,136.62	596,872.28	522,811.37	404,969.61
USO DEL SUELO	1,139.02	1,037.20	726.44	676.25
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	65.51	73.75	43.12	46.42
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	25,244.29	16,673.20	15,490.54	10,518.08
CONSUMO DE AGUA	698.80	554.86	278.89	524.11

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	32.27%	26.89%	22.53%	18.31%
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	32.89%	27.02%	22.10%	17.99%
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	43.23%	18.43%	26.35%	11.99%
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	32.85%	28.20%	21.26%	17.68%
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRI	44.95%	17.06%	26.91%	11.08%
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	33.65%	27.41%	21.65%	17.29%
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	36.00%	25.59%	22.26%	16.14%
EUTROFIZACIÓN MARINA	33.37%	28.29%	20.69%	17.64%
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	30.75%	26.68%	22.60%	19.98%
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	33.08%	25.91%	22.63%	18.38%
ECOTOXICIDAD MARINA	34.12%	25.44%	22.78%	17.66%
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	28.03%	32.63%	18.75%	20.59%
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	34.33%	25.71%	22.52%	17.44%
USO DEL SUELO	31.83%	28.98%	20.30%	18.90%
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	28.63%	32.23%	18.84%	20.29%
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	37.16%	24.55%	22.80%	15.48%
CONSUMO DE AGUA	33.98%	26.98%	13.56%	25.48%





CALENTAMIENTO GLOBAL

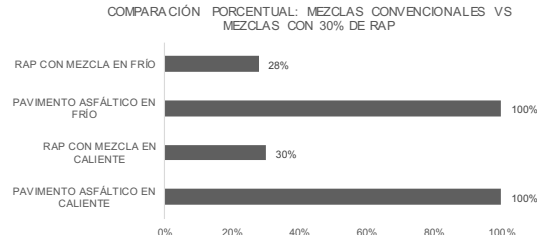
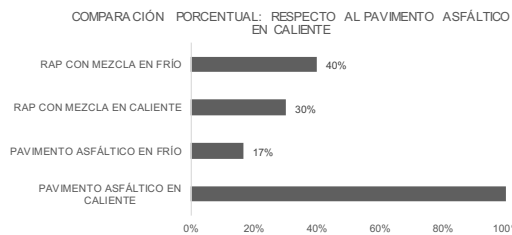
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	18,352.77	14,507.74	10,298.33	8,110.58
TRANSPORTE DE MATERIALES	1,251.59	1,251.59	1,251.59	1,251.59
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1,485.00	1,317.19	2,279.24	2,111.43
TRANSPORTE DE MEZCLA	1,355.89	1,355.89	1,355.89	1,355.89
CONSTRUCCIÓN	1,618.67	1,614.60	1,614.60	1,614.60
75,354.66	24,063.91	20,047.01	16,799.65	14,444.09
TOTAL / PORCENTAJE	31.93%	26.60%	22.29%	19.17%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	76.27%	72.37%	61.30%	56.15%
TRANSPORTE DE MATERIALES	5.20%	6.24%	7.45%	8.67%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	6.17%	6.57%	13.57%	14.62%
TRANSPORTE DE MEZCLA	5.63%	6.76%	8.07%	9.39%
CONSTRUCCIÓN	6.73%	8.05%	9.61%	11.18%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-17%	-30%	-40%
-------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-30%	-28%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------



USO DEL SUELO

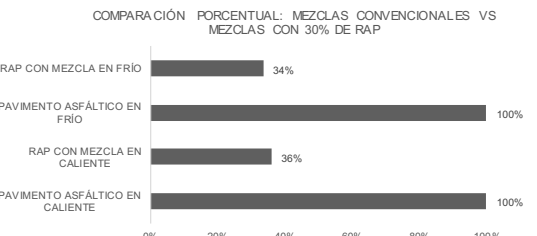
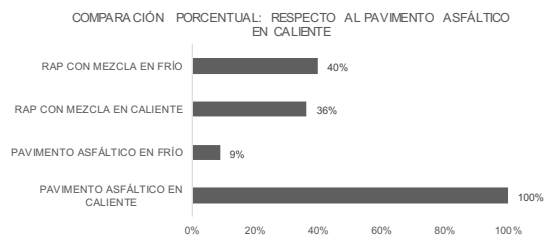
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	993.64	894.43	570.15	533.48
TRANSPORTE DE MATERIALES	48.35	48.35	48.35	48.35
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	22.13	19.63	33.15	30.65
TRANSPORTE DE MEZCLA	52.38	52.38	52.38	52.38
CONSTRUCCIÓN	22.52	22.40	22.40	22.40
3,589.92	1,139.02	1,037.20	726.44	687.27
TOTAL / PORCENTAJE	31.73%	28.89%	20.24%	19.14%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	87.24%	86.23%	78.49%	77.62%
TRANSPORTE DE MATERIALES	4.25%	4.66%	6.66%	7.04%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.94%	1.89%	4.56%	4.46%
TRANSPORTE DE MEZCLA	4.60%	5.05%	7.21%	7.62%
CONSTRUCCIÓN	1.98%	2.16%	3.08%	3.26%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-9%	-36%	-40%
-------------------------------	-------------	------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-36%	-34%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------





ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES

CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	52.77	61.30	29.16	33.97
TRANSPORTE DE MATERIALES	3.78	3.78	3.78	3.78
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.29	2.03	3.54	3.28
TRANSPORTE DE MEZCLA	4.10	4.10	4.10	4.10
CONSTRUCCIÓN	2.57	2.54	2.54	2.54
230.05	65.51	73.75	43.12	47.67
TOTAL / PORCENTAJE	28.48%	32.06%	18.74%	20.72%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	80.55%	83.12%	67.62%	71.26%
TRANSPORTE DE MATERIALES	5.77%	5.13%	8.77%	7.93%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	3.50%	2.76%	8.22%	6.89%
TRANSPORTE DE MEZCLA	6.25%	5.55%	9.50%	8.59%
CONSTRUCCIÓN	3.92%	3.45%	5.89%	5.33%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL

100%

13%

-34%

-27%

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP

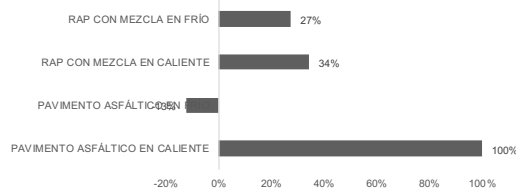
100%

100%

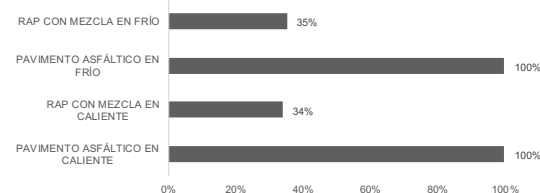
-34%

-35%

COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE



COMPARACIÓN PORCENTUAL: MEZCLAS CONVENCIONALES VS MEZCLAS CON 30% DE RAP



ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES

CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	23,379.89	14,862.33	13,372.16	8,707.21
TRANSPORTE DE MATERIALES	422.98	422.98	422.98	422.98
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	463.30	410.95	718.46	666.11
TRANSPORTE DE MEZCLA	458.23	458.23	458.23	458.23
CONSTRUCCIÓN	519.89	518.71	518.71	518.71
68,181.27	25,244.29	16,673.20	15,490.54	10,773.24
TOTAL / PORCENTAJE	37.03%	24.45%	22.72%	15.80%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	92.61%	89.14%	86.32%	80.82%
TRANSPORTE DE MATERIALES	1.68%	2.54%	2.73%	3.93%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.84%	2.46%	4.64%	6.18%
TRANSPORTE DE MEZCLA	1.82%	2.75%	2.96%	4.25%
CONSTRUCCIÓN	2.06%	3.11%	3.35%	4.81%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL

100%

-34%

-39%

-57%

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP

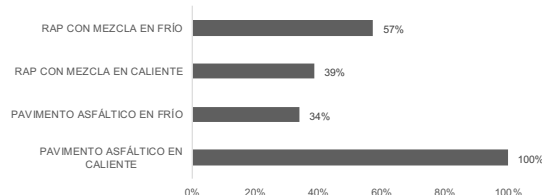
100%

100%

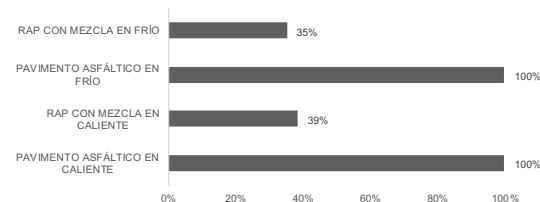
-39%

-35%

COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE



COMPARACIÓN PORCENTUAL: MEZCLAS CONVENCIONALES VS MEZCLAS CON 30% DE RAP





CONSUMO DE AGUA

CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

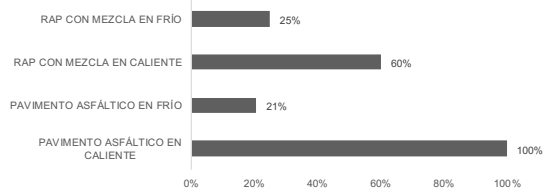
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	689.03	545.44	268.51	514.69
TRANSPORTE DE MATERIALES	2.69	2.69	2.69	2.69
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.83	2.51	3.48	3.16
TRANSPORTE DE MEZCLA	2.91	2.91	2.91	2.91
CONSTRUCCIÓN	1.34	1.31	1.31	1.31
2,057.31	698.80	554.86	278.89	524.76
TOTAL / PORCENTAJE	33.97%	26.97%	13.56%	25.51%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	98.60%	98.30%	96.28%	98.08%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.38%	0.48%	0.96%	0.51%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.41%	0.45%	1.25%	0.60%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.42%	0.52%	1.04%	0.55%
CONSTRUCCIÓN	0.19%	0.24%	0.47%	0.25%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

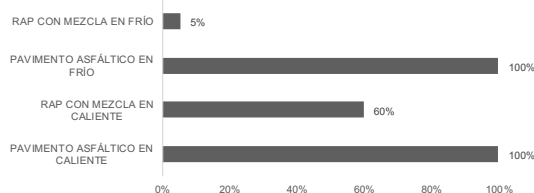
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-21%	-60%	-25%
-------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-60%	-5%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE



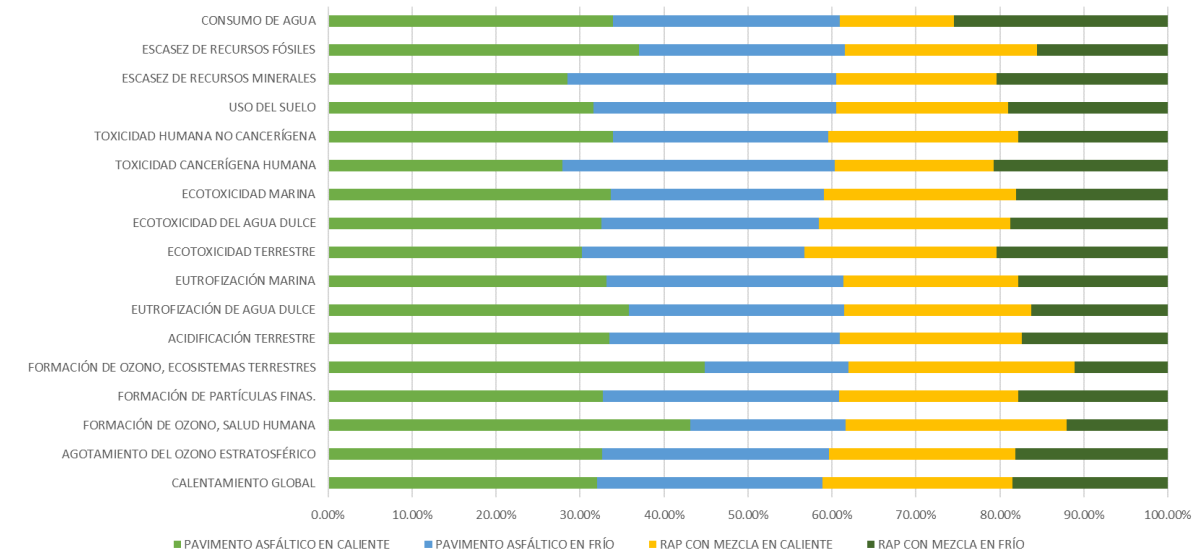
COMPARACIÓN PORCENTUAL: MEZCLAS CONVENCIONALES VS MEZCLAS CON 30% DE RAP





ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	24,715.78	20,698.88	17,451.51	14,301.72
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	0.0271	0.0223	0.0184	0.0151
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	385.19	164.81	235.21	107.61
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	49.26	42.37	32.09	26.80
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRI	570.49	217.15	342.05	141.51
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	119.98	98.00	77.68	62.31
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	8.11	5.79	5.04	3.68
EUTROFIZACIÓN MARINA	0.1104	0.0939	0.0692	0.0593
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	105,323.72	92,435.02	79,528.40	71,249.83
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	54.50	43.27	38.13	31.47
ECOTOXICIDAD MARINA	901,491.32	681,176.00	613,717.86	483,778.92
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	24,660.43	28,586.21	16,737.97	18,305.41
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	825,858.37	625,594.03	551,533.12	433,691.36
USO DEL SUELO	1,164.21	1,062.38	751.62	701.43
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	67.48	75.72	45.09	48.39
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	25,464.59	16,893.50	15,710.84	10,738.38
CONSUMO DE AGUA	700.20	556.25	280.29	525.51

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
CALENTAMIENTO GLOBAL	32.03%	26.82%	22.61%	18.53%
AGOTAMIENTO DEL OZONO ESTRATOSFÉRIC	32.67%	26.96%	22.19%	18.19%
FORMACIÓN DE OZONO, SALUD HUMANA	43.14%	18.46%	26.34%	12.05%
FORMACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS.	32.72%	28.15%	21.32%	17.81%
FORMACIÓN DE OZONO, ECOSISTEMAS TERRI	44.88%	17.08%	26.91%	11.13%
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	33.52%	27.38%	21.70%	17.41%
EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE	35.85%	25.58%	22.30%	16.26%
EUTROFIZACIÓN MARINA	33.18%	28.22%	20.79%	17.82%
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	30.22%	26.52%	22.82%	20.44%
ECOTOXICIDAD DEL AGUA DULCE	32.56%	25.85%	22.78%	18.80%
ECOTOXICIDAD MARINA	33.64%	25.42%	22.90%	18.05%
TOXICIDAD CANCERÍGENA HUMANA	27.93%	32.38%	18.96%	20.73%
TOXICIDAD HUMANA NO CANCERÍGENA	33.89%	25.67%	22.63%	17.80%
USO DEL SUELO	31.64%	28.87%	20.43%	19.06%
ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES	28.51%	31.99%	19.05%	20.45%
ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	37.01%	24.55%	22.83%	15.61%
CONSUMO DE AGUA	33.95%	26.97%	13.59%	25.48%





CALENTAMIENTO GLOBAL

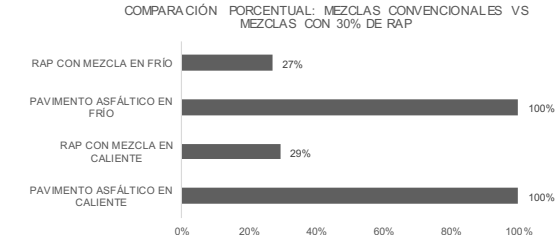
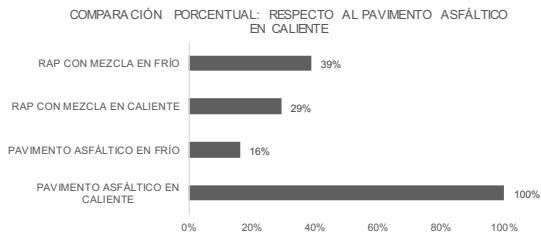
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	18,352.77	14,507.74	10,298.33	8,110.58
TRANSPORTE DE MATERIALES	1,564.48	1,564.48	1,564.48	1,564.48
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1,485.00	1,317.19	2,279.24	2,111.43
TRANSPORTE DE MEZCLA	1,694.86	1,694.86	1,694.86	1,694.86
CONSTRUCCIÓN	1,618.67	1,614.60	1,614.60	1,614.60
77,962.13	24,715.78	20,698.88	17,451.51	15,095.96
TOTAL / PORCENTAJE	31.70%	26.55%	22.38%	19.36%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	74.26%	70.09%	59.01%	53.73%
TRANSPORTE DE MATERIALES	6.33%	7.56%	8.96%	10.36%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	6.01%	6.36%	13.06%	13.99%
TRANSPORTE DE MEZCLA	6.86%	8.19%	9.71%	11.23%
CONSTRUCCIÓN	6.55%	7.80%	9.25%	10.70%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-16%	-29%	-39%
-------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-29%	-27%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------



USO DEL SUELO

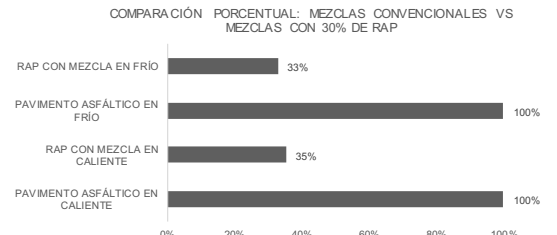
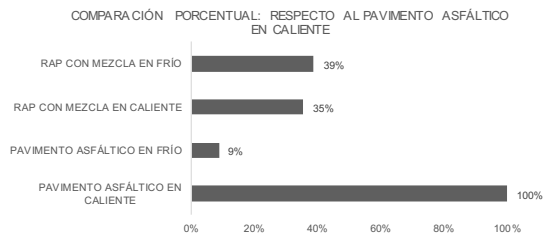
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	993.64	894.43	570.15	533.48
TRANSPORTE DE MATERIALES	60.44	60.44	60.44	60.44
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	22.13	19.63	33.15	30.65
TRANSPORTE DE MEZCLA	65.48	65.48	65.48	65.48
CONSTRUCCIÓN	22.52	22.40	22.40	22.40
3,690.66	1,164.21	1,062.38	751.62	712.45
TOTAL / PORCENTAJE	31.54%	28.79%	20.37%	19.30%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	85.35%	84.19%	75.86%	74.88%
TRANSPORTE DE MATERIALES	5.19%	5.69%	8.04%	8.48%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.90%	1.85%	4.41%	4.30%
TRANSPORTE DE MEZCLA	5.62%	6.16%	8.71%	9.19%
CONSTRUCCIÓN	1.93%	2.11%	2.98%	3.14%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-9%	-35%	-39%
-------------------------------	-------------	------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-35%	-33%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------





ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES

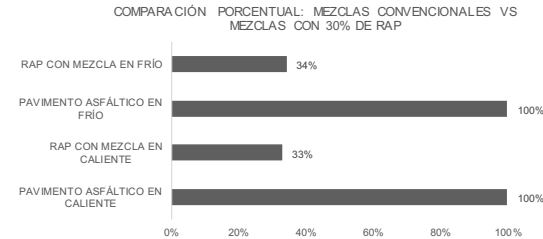
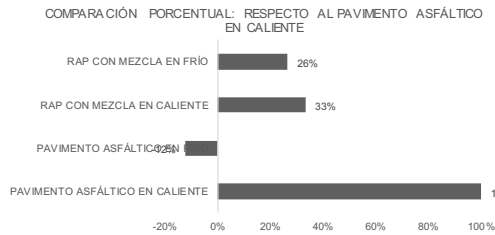
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	52.77	61.30	29.16	33.97
TRANSPORTE DE MATERIALES	4.73	4.73	4.73	4.73
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.29	2.03	3.54	3.28
TRANSPORTE DE MEZCLA	5.12	5.12	5.12	5.12
CONSTRUCCIÓN	2.57	2.54	2.54	2.54
237.93	67.48	75.72	45.09	49.64
TOTAL / PORCENTAJE	28.36%	31.83%	18.95%	20.86%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	78.20%	80.95%	64.67%	68.43%
TRANSPORTE DE MATERIALES	7.00%	6.24%	10.48%	9.52%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	3.40%	2.69%	7.86%	6.62%
TRANSPORTE DE MEZCLA	7.59%	6.76%	11.36%	10.31%
CONSTRUCCIÓN	3.81%	3.36%	5.64%	5.12%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	12%	-33%	-26%
-------------------------------	-------------	------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-33%	-34%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------



ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES

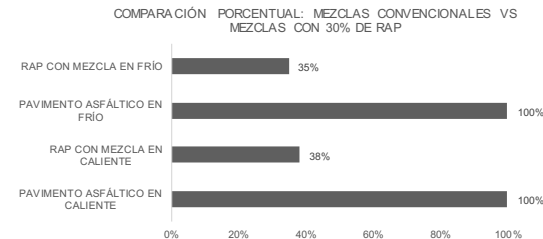
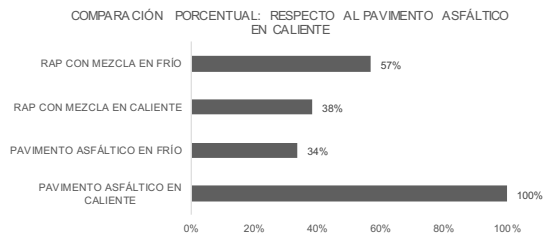
CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	23,379.89	14,862.33	13,372.16	8,707.21
TRANSPORTE DE MATERIALES	528.73	528.73	528.73	528.73
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	463.30	410.95	718.46	666.11
TRANSPORTE DE MEZCLA	572.79	572.79	572.79	572.79
CONSTRUCCIÓN	519.89	518.71	518.71	518.71
69,062.48	25,464.59	16,893.50	15,710.84	10,993.54
TOTAL / PORCENTAJE	36.87%	24.46%	22.75%	15.92%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	91.81%	87.98%	85.11%	79.20%
TRANSPORTE DE MATERIALES	2.08%	3.13%	3.37%	4.81%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	1.82%	2.43%	4.57%	6.06%
TRANSPORTE DE MEZCLA	2.25%	3.39%	3.65%	5.21%
CONSTRUCCIÓN	2.04%	3.07%	3.30%	4.72%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-34%	-38%	-57%
-------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-38%	-35%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------





CONSUMO DE AGUA

CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO: TIPO DE PAVIMENTO / ETAPA

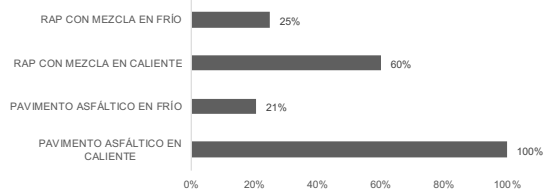
ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	689.03	545.44	268.51	514.69
TRANSPORTE DE MATERIALES	3.36	3.36	3.36	3.36
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	2.83	2.51	3.48	3.16
TRANSPORTE DE MEZCLA	3.64	3.64	3.64	3.64
CONSTRUCCIÓN	1.34	1.31	1.31	1.31
2,062.91	700.20	556.25	280.29	526.16
TOTAL / PORCENTAJE	33.94%	26.96%	13.59%	25.51%

ETAPA / PAVIMENTO	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO	RAP CON MEZCLA EN CALIENTE	RAP CON MEZCLA EN FRÍO
EXTRACCIÓN DE MATERIALES	98.40%	98.05%	95.80%	97.82%
TRANSPORTE DE MATERIALES	0.48%	0.60%	1.20%	0.64%
PRODUCCIÓN DE MEZCLA	0.40%	0.45%	1.24%	0.60%
TRANSPORTE DE MEZCLA	0.52%	0.65%	1.30%	0.69%
CONSTRUCCIÓN	0.19%	0.24%	0.47%	0.25%
SUMATORIA	100%	100%	100%	100%

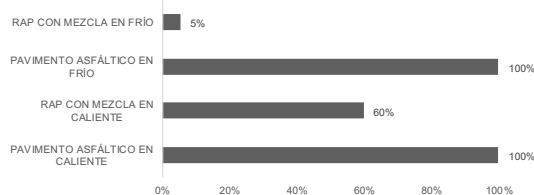
COMPARACIÓN PORCENTUAL	100%	-21%	-60%	-25%
-------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL RAP	100%	100%	-60%	-5%
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	------------

COMPARACIÓN PORCENTUAL: RESPECTO AL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE



COMPARACIÓN PORCENTUAL: MEZCLAS CONVENCIONALES VS MEZCLAS CON 30% DE RAP



Memoria fotográfica



Fotografía 1. (2024). Especimen que será sometido a la prueba de laboratorio de rueda de Hamburgo



Fotografía 2. (2024). Pavimento asfáltico fresado



Fotografía 3. (2024). Especimen sometido a la prueba de laboratorio de pérdida de partículas



Fotografía 4. (2024). Prueba de laboratorio resistencia a tracción indirecta



Fotografía 5. (2024). Extracción del ligante asfáltico





Fotografía 6. (2024). Espécimen sometido a la prueba de laboratorio determinación del contenido de huecos



Fotografía 7. (2024). Diseño, dosificación y producción de las 4 mezclas asfálticas



Fotografía 8. (2024). Prueba de laboratorio de equivalente de arena



Fotografía 9. (2024). Especímenes que serán sometidos a distintas pruebas de laboratorio



Fotografía 10. (2024). Especímenes resultantes del diseño y dosificación para las cuatro mezclas asfálticas en caliente y frío, dos de ellas con el 30% de agregado RAP





Fotografía 11. (2024). Probetas con las diferentes tipologías de mezclas asfálticas



Fotografía 13. (2024). Prueba de laboratorio resistencia a tracción indirecta



Fotografía 12. (2024). Pavimento asfáltico fresado



Fotografía 14. (2024). Extracción del ligante asfáltico



Fotografía 15. (2024). Prueba de laboratorio de porcentaje de partículas planas y alargadas





Fotografía 16. (2024). Prueba de laboratorio de equivalente de arena



Fotografía 18. (2024). Especímenes sometidos a la prueba de laboratorio de sensibilidad al agua



Fotografía 17. (2024). Prueba de briquetas ensayo Marshall



Fotografía 19. (2024). Espécimen sometido a la prueba de laboratorio de pérdida de partículas