



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Identificación y evaluación de procesos constructivos de pavimentos sostenibles y su aporte frente al cambio climático

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

More Nunura, Luis Miguel (orcid.org/0000-0001-7066-6631)

**ASESOR:**

Mg. Marcelo Sanchez, Ary Garlyn (orcid.org/0000-0002-4805-3860)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Diseño de Infraestructura Vial

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

**PIURA — PERÚ**

**2023**

## Dedicatoria

Quiero expresar mi reconocimiento a mi madre, quien ha sido una fuente constante de inspiración, alentándome a perseverar sin importar las circunstancias y brindándome un apoyo incondicional. También, agradezco a mi asesor por compartir sus valiosos conocimientos conmigo.

## **Agradecimiento**

Deseo agradecer a mis padres por respaldar mis objetivos y ofrecerme siempre su inquebrantable apoyo. Asimismo, quiero expresar mi aprecio hacia mi asesor, cuya sabiduría, conocimientos y experiencia han sido fundamentales para mi desarrollo como investigador y han contribuido de manera significativa al éxito de mi proyecto.



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, MARCELO SANCHEZ ARY GARLYN, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - PIURA, asesor de Tesis titulada: "Identificación y evaluación de procesos constructivos de pavimentos sostenibles y su aporte frente al cambio climático", cuyo autor es MORE NUNURA LUIS MIGUEL, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 16.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

PIURA, 06 de Febrero del 2024

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
MARCELO SANCHEZ ARY GARLYN <b>DNI:</b> 80225075 <b>ORCID:</b> 0000-0002-4805-3860	Firmado electrónicamente por: ARYMARCELOS el 06-02-2024 12:40:49

Código documento Trilce: TRI - 0737144



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

### **Declaratoria de Originalidad del Autor**

Yo, MORE NUNURA LUIS MIGUEL estudiante de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - PIURA, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Identificación y evaluación de procesos constructivos de pavimentos sostenibles y su aporte frente al cambio climático", es de mi autoría, por lo tanto, declaro que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
LUIS MIGUEL MORE NUNURA <b>DNI:</b> 71445714 <b>ORCID:</b> 0000-0001-7066-6631	Firmado electrónicamente por: LMORENU17 el 06-02- 2024 15:26:41

Código documento Trilce: TRI - 0737142

## Índice de contenidos

Dedicatoria.....	II
Agradecimiento.....	III
Declaratoria de autenticidad del asesor.....	IV
Declaratoria de originalidad del autor.....	V
Índice de contenidos.....	VI
Índice de tablas.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Resumen.....	X
Astract.....	XI
I. Introducción.....	1
II. Marco teórico.....	6
III. Metodología.....	22
3.1. Tipo y diseño de investigación:.....	22
3.1.1. Tipo de investigación:.....	22
3.1.2. Diseño de investigación:.....	22
3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización:.....	22
3.2.1. Categorías.....	22
3.2.2. Subcategorías.....	23
3.2.3. Matriz de categorización.....	24
3.3. Escenario de estudio:.....	24
3.4. Participaciones:.....	24
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:.....	25
3.5.1. Técnicas.....	25
3.5.1.1. Observación.....	25
3.5.1.2. Documental.....	25
3.5.2. Instrumentos.....	25
3.5.2.1. Ficha de Investigación.....	25
3.6. Procedimientos:.....	26
3.7. Rigor científico:.....	27
3.7.1. Validez.....	27
3.8. Método de análisis de la información:.....	27
3.9. Aspectos éticos:.....	28
IV. Resultados y discusión.....	29

<b>V. Conclusiones .....</b>	<b>38</b>
<b>VI. Recomendaciones .....</b>	<b>41</b>
Referencias .....	42
ANEXOS	

## Índice de tablas

Tabla 1. Uso de escoria de alto horno .....	29
Tabla 2. Influencia del RAP en el consumo de energía y emisiones.....	30
Tabla 3. Composición de mezclas bituminosas y medidas unitarias de materiales constituyentes utilizados .....	31
Tabla 4. Vida útil y frecuencia de mantenimiento.....	32
Tabla 5. Eficiencia Energética en el Ciclo de Vida (GER) vinculada a la fabricación de caucho granulado (CR).....	33
Tabla 6. Impacto de emisiones potencias del calentamiento global(GWP) vinculada a la fabricación de caucho granulado (CR). .....	34
Tabla 7. Comparación de tecnologías ecológicas para la captura de energía en pavimentos.....	35
Tabla 8. Estadísticas de dióxido de carbono que generan las construcciones de pavimentos .....	37

## Índice de figuras

Figura 1. Proceso de extracción de caucho .....	16
Figura 2. Ciclo de vida de un camino pavimentado.....	18
Figura 3. Transductores bajo presión piezoeléctricos .....	19
Figura 4. Sensores piezoeléctricos .....	20
Figura 5. Extracción de calor para la eficiencia energética .....	21

## **Resumen**

La construcción vial, responsable del 39% de los gases de efecto invernadero, afecta la calidad del aire, agua y genera el 50% de los residuos en vertederos.

El proyecto identificó procesos constructivos que reducen el impacto en un 50%, con estrategias como áridos reciclados, tecnología verde, agregados reciclados, pavimentos autorreparables y reutilización de desechos de construcción. El proyecto destaca avances significativos en la construcción de pavimentos sostenibles, logrando identificar procesos que reducen hasta un 39% las emisiones de gases de efecto invernadero al emplear materiales reciclables.

Se llevó a cabo análisis comparativos de varios tipos de mezclas asfálticas encontrando las opciones más amigables con el medio ambiente. Además, se evalúa la posibilidad de integrar agregados derivados de llantas en mezclas asfálticas, contribuyendo a la reducción de materiales de vertederos y promoviendo la sostenibilidad.

La inclusión de caucho reciclado conlleva una reducción significativa de emisiones de carbono. La transición hacia tecnologías más sostenibles, como la mezcla asfáltica cálida y el reciclaje en frío, se señala como crucial para lograr notables reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En conjunto, el proyecto aborda de manera integral la sostenibilidad en la construcción de pavimentos, proporcionando información valiosa respaldada por una extensa revisión de la literatura internacional.

Palabras clave: Procesos constructivos, sostenibilidad, cambio climático, pavimentos.

## **Abstract**

Road construction, responsible for 39% of greenhouse gas emissions, impacts air and water quality, generating 50% of landfill waste.

The project identified construction processes that reduce the impact by 50%, employing strategies such as recycled aggregates, green technology, self-repairing pavements, and the reuse of construction waste. The project highlights significant advancements in sustainable pavement construction, successfully identifying processes that can reduce greenhouse gas emissions by up to 39% through the use of recyclable materials.

Comparative analyses of various asphalt mixtures were conducted, identifying environmentally-friendly options. Additionally, the feasibility of integrating tire-derived aggregates into asphalt mixtures is assessed, contributing to landfill waste reduction and promoting sustainability.

The inclusion of recycled rubber results in a substantial reduction in carbon emissions. The transition to more sustainable technologies, such as warm-mix asphalt and cold recycling, is emphasized as crucial for achieving notable reductions in CO<sub>2</sub> emissions.

Overall, the project comprehensively addresses sustainability in pavement construction, providing valuable insights supported by an extensive review of international literature.

**Keywords:** Construction processes, sustainability, climate change, pavements.

## I. Introducción

El calentamiento global representa uno de los principales problemas ambientales que la humanidad ha enfrentado, en menos de dos siglos, las acciones humanas han provocado un incremento del 50% en los niveles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera.

Dentro de los distintos sectores industriales, la construcción de carreteras provoca un impacto ambiental significativo. Este abarca aproximadamente 1/3 del consumo mundial de energía, el 40% del consumo de materias primas y el 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Otros gases de efecto invernadero incluyen el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y diversos gases industriales (Naciones Unidas, 2022).

El verano de 2023 se destacó como el período más caluroso registrado a nivel mundial. Además, durante octubre del 2022, la Tierra experimentó el cuarto mes de octubre con temperaturas más elevadas desde que se comenzó a llevar registros hace 113 años. El aumento de las temperaturas podría llegar a ser de 2,2 grados en comparación con los niveles preindustriales para el año 2040, y alcanzar los 3,8 grados para el año 2100 (National Geographic, 2023).

Existe un 48% de probabilidad de que, en el próximo cuatrienio, la temperatura media anual del planeta supere en 1,5°C los niveles preindustriales. Los datos existentes estiman que, para uno de los años comprendido entre 2022 y 2026, la temperatura media anual oscile entre 1,1°C y 1,7°C. Además, existe una probabilidad del 93% de que al menos uno de los años en el período mencionado será posicionado como el más cálido registrado, y un 95% de que la media quinquenal durante este lapso supere la media de los años 2017-2021 (Naciones Unidas, 2022).

El sector construcción debido al impacto adverso que tiene en el planeta es responsable del 39% de los gases de efecto invernadero. He constatado que el sector de la construcción vial es compatible con un papel significativo en la contaminación ambiental. En específico, responsable del 23% de la contaminación

atmosférica, del 40% de la contaminación del agua potable y del 50% de los residuos depositados en vertederos (ARCHDESK, 2021).

El mundo todavía se dirige a un aumento de temperatura superior a 3°C este siglo. En 2019 las emisiones, alcanzaron un récord de 59,1 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GtCO<sub>2</sub>e). Las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> han aumentado en promedio 1,4% anual desde el 2010; sin embargo, según los gráficos analizados para el 2024 este habrá incremento más rápido, llegando a 2,9% (ONU, 2019).

El 5% de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el mundo se deben a las industrias del cemento. También, determine que la producción de 1 tonelada de áridos implica un consumo de 5,3 kilovatio hora (kWh) de electricidad, 2,3 m<sup>3</sup> de agua, 0,005 litros (l) de aceite lubricante, 0,002 kilogramos (kg) de hierro, 0,0011 kg de caucho para las cintas transportadoras y 0,31 l de gasolina. Asimismo, la producción de 1 tonelada de betún requiere 22,5 kg de betún natural gas, 50,5 kg de petróleo crudo, 10,9 kg de carbón, 0,003 kg de uranio y 1239 litros de agua (UNEP, 2023).

Investigadores científicos, profesionales de la ingeniería civil y conocedores del sector construcción han buscado reducir hasta un 50% el impacto que generan los procesos constructivos de carreteras. La construcción de pavimentos generó 13 de los 335 millones de toneladas (TM) de residuos de plástico en el año 2022, el 69% de estos terminan en los vertederos, reutilizar estos desechos para el relleno del terreno va a mejorar hasta un 40% el rendimiento de los materiales de construcción actuales (Enfrin et al, 2022).

Se ha registrado que las redes viales globales comprenden en su totalidad una extensión de 32 millones de kilómetros y se llevarán a cabo la edificación entre 3 y 4,7 millones de kilómetros de nuevas carreteras para el año 2050. Por esta razón, 194 países en el acuerdo de París han consignado reducir su producción de gases de efecto invernadero y aplicar sus 16 objetivos de emisiones netas cero para el año 2050 (Shehu et al, 2023).

En Perú, se han utilizado aproximadamente solo el 10% de todos los procesos constructivos sostenibles en la construcción de pavimentos que previamente se han utilizado en otros países con el propósito de reducir las emisiones de dióxido de carbono en un 50%.

Los métodos que destacan en este proyecto incluyen la composición de materiales con agregados reciclados, que representan entre el 70% y el 80% del volumen del concreto, así como técnicas de auto regeneración de grietas, pavimentos asfálticos autorreparables, la reutilización de desechos de construcción, la utilización de residuos de vidrio reciclado como polvo sustituto del polvo de piedra triturada en las capas asfálticas de pavimentos y el aprovechamiento de materiales de desecho como el caucho y plástico (Yalcin et al., 2018).

La información brindada ayudara a los interesados del sector de construcción vial, dado que con la obtención de los hallazgos se han considerando 4 de los 17 objetivos del acuerdo de París, basado en limitar el calentamiento global a 2°C, según un nuevo informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), (Naciones unidas, 2022).

Este proyecto analizó 190 publicaciones centradas en identificar procesos constructivos de pavimentos, el 65% de los hallazgos fueron como sustituir los adictivos, ya que se constituyen en un 80% en materias primas. Además, que durante su aplicación reduzcan en un 30% el impacto en la flora y fauna, ya que existen datos donde se ven afectadas en un 58% a causa de las construcciones viales y sobre todo las emisiones de CO<sub>2</sub> (Naciones unidas,2022).

El desarrollo de carreteras trae consecuencias negativas en los ecosistemas globales, los desechos generan degradación de hasta un 75% en el suelo, perdiendo áreas protegidas; también, se genera contaminación acústica durante el 100% de su desarrollo, trayendo problemas como el estrés, ansiedad, carencia en la concentración, etc. Afectando al 40% de la población local.

Durante décadas, las carreteras han sido una de las principales fuentes de ingresos

en la mayoría de los países, el sector transporte representa aproximadamente entre el 3% y el 5% del producto interno bruto (PIB) en las economías de varios países (Comisión Europea, 2017), la contribución efectiva del transporte al PIB oscila entre el 10% y el 20%. (Balaguera et al, 2018).

Es crucial destacar la importancia de esta investigación, ya que el 80% de las carreteras en Perú se encuentran expuestas a diversos factores naturales que, con el tiempo, pueden causar hasta un 200% de gastos en la infraestructura por mantenimiento.

Uno de los objetivos más significativos se abordó mediante tres elementos clave del acuerdo de París de 2018. Estos incluyen la limitación del aumento de las temperaturas a 1,5°C, el análisis de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el respaldo a las naciones más empobrecidas mediante financiación climática. Este acuerdo fue suscrito por más de 194 países (Paris, 2018).

Como parte de sus compromisos, cada cinco años, los países presentan un plan nacional actualizado de acción climática. Estos planos detallan las medidas que adoptarán para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un rango del 15% al 20%, conocido como Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN).

Los pormenores del libro de reglas de París fueron acordados durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP24) en Katowice, Polonia, en diciembre de 2018, y se finalizaron durante la COP26 en Glasgow, Escocia, en noviembre de 2021 (Naciones Unidas, 2021).

Para abordar las diversas problemáticas y redactar la información que desarrolló este proyecto, se plantearon las siguientes preguntas:

En el desarrollo general de esta investigación tomamos como interrogante: PG.  
¿Los nuevos métodos de construcción vial optan por un proceso sostenible y eficiente para su aplicación frente al cambio climático a nivel mundial?

Para sintetizar más esta investigación realice las siguientes interrogantes con fines de ver los problemas específicos: PE1. ¿Garantizan los métodos tradicionales sostenibilidad y seguridad en una infraestructura vial? Además ¿Se puede garantizar que el ciclo de vida de un pavimento sea largo y sostenible a la vez? PE2. ¿Los desechos de los materiales de un solo uso pueden ser procesos para la construcción de infraestructuras viales? PE3. ¿Qué pasaría si se aplican métodos innovadores de pavimentos verdes en las nuevas construcciones viales?

Este proyecto visualizo las consecuencias ambientales que traen consigo las construcciones viales, por ende, establezco objetivos que se resolverán con la visión establecida en los acuerdos internacionales de sostenibilidad. Estos objetivos fueron los siguientes:

OG. Generar nuevos conocimientos que contribuya al sector de la construcción vial a través de la identificación de procesos constructivos sostenibles frente al cambio climático de los últimos 7 años.

Además, nos planteamos los siguientes objetivos específicos:

OE1. Identificar los métodos de construcción de pavimentos sostenibles utilizados en diferentes naciones, así como su viabilidad y adaptación en el medio ambiente.  
OE2. Evaluar nuevas propuestas de infraestructura vial con la meta de alcanzar reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero.  
OE3. Determinar los impactos ambientales que tiene la construcción de carreteras aplicando métodos innovadores identificados.

## II. Marco teórico

El proyecto representa un avance relevante en los procesos constructivos de pavimentos sostenibles, destacando su aporte en el medio ambiente, dando a conocer métodos que disminuyen en un 39% los gases de efecto invernadero, con el uso de materiales reciclables. Recogí 190 documentos de fuentes de internet como scielo, scopus, elsevier, wos, libros, Naciones Unidas, organizaciones ambientales y otros, donde se utilizaron 83 antecedentes internacionales de los cuales respaldan este estudio y han sido tomadas como referencia en el desarrollo del proyecto. A continuación, se expondrán algunos antecedentes relevantes:

El estudio realizo por Akhtar y Sarmah (2018) con el título “Generation of Construction and Demolition Waste and Properties of Concrete with Recycled Aggregates: A Global Perspective”. Observaron que la introducción de vidrio triturado reciclado y metacaolín mejoraba las propiedades al reemplazar el 10% del contenido de cemento, logrando resultados satisfactorios con un contenido de agregados reciclados (RA) del 50%.

También destacaron que el 48% de agregados reciclados pueden sustituirse por agregados naturales sin comprometer las propiedades frescas del concreto. La dosis óptima para reemplazar el 10% del contenido de cemento con polvo de vidrio que contenga un tamaño máximo de 75 mm y un 30% de RA. Además, identificaron la dosis óptima para el vidrio utilizado como reemplazo del 10% de la arena, proporcionando la mayor resistencia a la compresión. El tamaño del vidrio clasificado entre 150 mm y 4,75 mm alcanzó una resistencia de más de 30 megapascal (MPa) para muestras cúbicas.

Un agregado nuevo es la roca original de caolín, este contiene entre un 31% y un 65% de caolín, mientras que el metacaolín se obtiene generalmente del caolín mediante tratamiento térmico a temperaturas elevadas de 500 °C a 800 °C. Se propuso una temperatura óptima de 800 °C para convertir caolín a metacaolín mediante tratamiento térmico. El metacaolín aumenta significativamente la resistencia del concreto hasta en un 60%, y se informó un aumento en la resistencia

a la compresión, a la tracción y a la flexión en el caso de concreto autocompactante con un 15% de metacaolín y RA.

La escoria de alto horno (BFS), utilizada en la producción de una tonelada de cal apagada con escoria granulada de alto horno molida (GGBFS), emite 0,07 t de CO<sub>2</sub>, considerablemente menos que el cemento (0,9 t), y la energía necesaria para su producción es de 1300MJ (megajoules). Además, es económicamente viable, ya que cuesta alrededor del 80% de lo que cuesta el cemento. La capacidad de carga de las vigas reforzadas con la inclusión de RA es superior a la del cemento Portland.

La resistencia a la compresión también aumentó para todos los niveles de reemplazo, y se obtuvieron resultados óptimos con un 50% de RA. Los agregados demostraron un mejor rendimiento con un 5% de GGBFS que las cenizas volantes en geopolímeros basados en residuos de carburo de calcio (CCR). Esto debido a que ayuda a construir ZIT más densas. Además, un 10% de GGBFS con un 10% de escoria de fósforo en presencia de un 25% de RA mejoró la resistencia hasta un 25%. La GGBFS mostró un mejor rendimiento que las cenizas volantes para mantener las propiedades del hormigón con agregados reciclados (RAC) mientras reduce el contenido de cemento y reemplaza los agregados naturales hasta un 50%.

El sector de transporte con geotecnia tiene un aporte importante por parte de Anshumali Mishraa, et al, (2023) titulado “Caracterización y sostenibilidad ambiental de roca residual de sobrecarga de mina de carbón a cielo abierto como geomaterial de pavimento” donde abarca a la roca residual como material inerte en las minas de carbón (OB), esta se considera adecuada para su uso en pavimentos, específicamente en capas de base y subbase, con un índice de impacto del 28 % y un índice de abrasión del 34 %. Además, su elevado índice de relación de carga de California (CBR) de 76 en condiciones no empapadas y 61 en condiciones empapadas respalda su idoneidad como un excelente material de subrasante.

Recolecto tres muestras visualmente distintas, denominadas mina de carbón muestra 1 (OBM1), mina de carbón M2 (OBM2) y mina de carbón de sobrecarga

sostenible (OBSS), con un total de 4 toneladas. Evaluó la densidad aparente mediante el método de prueba estándar para densidad aparente (ASTM C29/C29M-17<sup>a</sup>) y la densidad relativa mediante IS 2720. Las pruebas de resistencia al corte y corte directo las realizó utilizando método de prueba estándar para pruebas de corte directo de suelos en condiciones de drenaje consolidado (ASTM D3080/D3080M).

Las densidades aparentes de la OBM1, OBM2 y OBSS fueron de 1,75 g/cm<sup>3</sup>, 1,76 g/cm<sup>3</sup> y 1,78 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. La densidad máxima ( $\gamma_{max}$ ) de OB para compactación ligera oscila entre 13,72 kN/m<sup>3</sup> y 19,35 kN/m<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo ( $w_{opt}$ ) entre 10 y 22 %. Asimismo, la densidad mínima ( $\gamma_{min}$ ) para compactación pesada oscila entre 18,08 kN/m<sup>3</sup> y 20,13 kN/m<sup>3</sup> en el contenido de humedad óptimo ( $w_{opte}$ ) entre 6,5 y 11 %. Comparo la resistencia al aplastamiento de OBM1 con la de la arena eólica (SA) y las arenas estándar indias (S1 y S2), observándose que la resistencia al aplastamiento de OBM1, a la misma densidad, era menor que la de SA, S1 y S2.

La permeabilidad de los OB varia debido a su antigüedad de excavación; las puntas más nuevas tienen una permeabilidad en el rango de  $10^{(-2)}$  a  $10^{(-3)}$  cm/s, mientras que las más antiguas o compuestas por material más erosionado presentan una permeabilidad en el rango de  $10^{(-2)}$  a  $10^{(-5)}$  cm/s.

La resistencia al corte de OBM1, OBM2 y OBSS, con distintos pesos unitarios, fueron comparados con la respuesta al corte de la arena eólica (SA). Observó que OBM1, con una densidad ligeramente inferior a SA y una tensión normal de 150 kPa, tenía una resistencia al corte un 29 % menor.

En términos de impacto de abrasión de fracción gruesa, determino que las muestras OBM1 y OBM2 son satisfactorias para pavimentación de carreteras, siendo adecuadas para todas las capas de un pavimento, excepto la capa de superficie de concreto bituminoso, el revestimiento de superficie bituminosa y la capa de superficie. Según estas pruebas, OBM1 y OBM2 pueden utilizarse como subbase y capas base para caminos pavimentados y no pavimentados. Sin embargo, OBSS

solo podría utilizarse como alternativa al agregado fino.

En la evaluación comparativa entre agregado de sobrecarga (AS) y agregado natural (NA), observó que el uso de AS reduce el agotamiento de la capa de ozono y el calentamiento global en un 35 %. Asimismo, se reducen en un 18 % el agotamiento abiótico y un 70 % el agotamiento abiótico de los combustibles fósiles, en comparación con NA. La toxicidad humana, la ecotoxicidad acuática de agua dulce y la ecotoxicidad acuática marina disminuyeron en un 60%, 57% y 45%, respectivamente. La ecotoxicidad terrestre, la oxidación fotoquímica, la acidificación y el potencial de eutrofización también se redujeron en un 62%, 59%, 45% y 55%.

En el trabajo de investigación Nura Shehu et al, (2023) titulado “A comprehensive overview of the use of recycled waste technologies and materials in asphalt pavements: towards environmentally friendly and sustainable roads with low carbon emissions” exponen que la mezcla asfáltica que contiene un 18% de caucho reciclado (CR) demostró un potencial de reducción de carbono entre el 36% y el 44%, en comparación con la mezcla convencional. Estos resultados indican que la inclusión de un 18% de CR en las mezclas asfálticas mediante el método de tecnología húmeda representa la mejor estrategia para mejorar las propiedades de la mezcla al tiempo que se logra una disminución en las emisiones de carbono.

Las mezclas que contienen caucho granulado muestran una reducción del 17% en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en comparación con el asfalto modificado con estireno-butadieno. La estabilización con cal por sí sola presenta una disminución del 10,96% en las emisiones, mientras que la combinación de pavimento asfáltico recuperado (RAP) y estabilización con cal puede lograr una reducción del 48,27%. La tecnología de mezcla asfáltica cálida (WMA) incorpora aditivos que permiten la fabricación a temperaturas más bajas, entre 110 °C y 140 °C, lo que se estima que reduce el uso de energía en un 15% a un 16%.

Adicionalmente, reportaron una reducción del 30% al 40% en las emisiones de CO<sub>2</sub> al utilizar la tecnología de mezcla tibia en la construcción de pavimentos en

comparación con la mezcla convencional. Su análisis del impacto ambiental de la mezcla asfáltica medio cálida (HWMA) reveló una reducción del 58% en las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con la mezcla asfáltica caliente (HMA) durante todo el proceso de producción.

La HMA presenta un consumo de energía en CO<sub>2</sub> de 132,3 kWh/tonelada y emisiones de 35,5 kg CO<sub>2</sub>/tonelada de mezcla asfáltica. Por otro lado, la mezcla asfáltica en frío (CMA) muestra únicamente 37,4 kWh/tonelada y 7,1 kg CO<sub>2</sub>/tonelada de mezcla asfáltica. También hallaron que el reciclaje en frío reduce las emisiones en aproximadamente un 75% en comparación con los procedimientos de reciclaje convencionales.

Un dato a destacar durante el proceso constructivo es el uso de gas natural como sustituto del petróleo pesado, mencionan que este cambio puede reducir las emisiones en alrededor del 27,68% en los agregados de calefacción y un 40,82% en comparación con el carbón. De manera similar, la transición de la electricidad al gas natural puede disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 65%.

En el trabajo de investigación realizado por Wang et al, (2021) con el título "Comparative environmental impact assessments of three advanced cases of asphalt pavement construction" realizaron un análisis comparativo de tres tipos de pavimentos asfálticos, tomando en cuenta las diversas capas de asfalto involucradas. Además, identificaron los aspectos críticos mediante análisis comparativos.

Los resultados revelaron que, al considerar únicamente la capa superior, la construcción de una capa de autorreparación de 1 km representa la mayor carga ambiental, con 139.51 toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub><sup>e</sup>) y un consumo de energía de 1.81 Terajoule (TJ). Por otro lado, la capa reciclada de escoria de acero presentó consecuencias ambientales más leves, representando aproximadamente el 60% de la carga de la capa de autorreparación.

Desde una perspectiva general de todas las capas de asfalto, la construcción de

pavimentos de mezcla asfáltica tibia resulto ser la más amigable con el medio ambiente, generando 238.74 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente y un consumo de energía de 3.59 TJ por cada 1 km construido. Las cargas ambientales generadas en la etapa de extracción de materiales representan un porcentaje considerable, con un rango de 47.41% a 71.29% de CO<sub>2</sub> equivalente y de 55.08% a 73.68% del consumo de energía.

Arulrajah et al, (2019) en su artículo titulado “Tire-derived aggregates as supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications” nos indica que su investigación realizó un análisis exhaustivo de laboratorio para examinar las características de los agregados de concreto reciclado (RCA) mezclados con agregados derivados de llantas (TDA). Donde evaluaron las mezclas RCA-TDA para determinar su viabilidad geotécnica en la construcción de subbases de pavimentos.

Mezclaron RCA con diferentes proporciones de TDA (1%, 2% y 3% en peso) de tres tamaños distintos, con el objetivo de utilizarlos en aplicaciones de subbases de pavimento. Además, Indicaron que las mezclas RCA-TDA incluyó el análisis de la distribución del tamaño de partículas, el índice de plasticidad, el contenido de materiales extraños, la compactación mediante el ensayo Proctor modificado, la relación de carga de California y las pruebas triaxiales, incluyendo la medición de la deformación resiliente.

Los resultados indicaron que las mezclas RCA-TDA presentaban características geotécnicas adecuadas para su aplicación en pavimentos. Además, los ensayos de deformación resiliente bajo carga repetitiva y el módulo resiliente confirmaron la factibilidad de utilizar cantidades adicionales de TDA en subbases de pavimento. La incorporación incluso de un pequeño porcentaje de TDA permitiría desviar una cantidad considerable de estos materiales de los vertederos y promover la construcción de pavimentos sostenibles.

La investigación realizada por Di Chen, et al (2018) titulada como “Estimation and analysis of energy conservation and emission reduction effects of warm mix crumb

rubber-modified asphalt during the construction period” Los resultados revelan que para abordar los graves problemas ambientales derivados del incremento rápido en la cantidad de llantas de desecho y su inadecuado almacenamiento, una solución altamente efectiva consiste en modificar la mezcla asfáltica utilizada en la pavimentación de carreteras mediante la incorporación de polvo de caucho reciclado proveniente de llantas desechadas. Esta medida permite resolver el problema y promover el uso sostenible de los recursos de caucho.

El uso de asfalto modificado con caucho triturado de mezcla asfáltica (CTMA) presenta ventajas sobre el CTMA de mezcla caliente, como la reducción de la temperatura y el consumo de energía. Sin embargo, hasta ahora no se ha desarrollado una metodología para estimar la conservación de energía y la reducción de emisiones durante la producción de CTMA de mezcla tibia. Los investigadores crearon modelos de estimación para evaluar la conservación de energía y la reducción de emisiones en las diferentes etapas de producción de polvo de caucho, asfalto, CTMA, CTMA de mezcla caliente y CTMA de mezcla tibia.

Los resultados demostraron que, en comparación con la mezcla en caliente, por cada tonelada métrica de CTMA producida, se puede reducir el consumo de energía entre un 18% y un 36% y disminuir las emisiones de gases en las diferentes etapas entre un 15% y un 87%. La mezcla CTMA de mezcla tibia Evotherm con DAT como agente de mezcla tibia (mezcla CTMA de mezcla tibia EV-DAT) es aún más eficiente energéticamente, ahorrando aproximadamente 108,56 MJ de energía y reduciendo las emisiones de gases durante la mezcla y pavimentación en al menos un 32% y un 73%, respectivamente. Este modelo tiene el potencial de mejorar el estándar técnico del CTMA de mezcla tibia y la evaluación de la conservación de energía. También se ha establecido una lista de emisiones de gases durante el proceso de mezcla y pavimentación de las mezclas CTMA a través de mediciones simuladas y mediciones en el lugar de la pavimentación.

En lo que respecta a las teorías vinculadas al tema, presento conceptos de los subtemas que conforman y ayudan al desarrollo de este proyecto.

**Sostenibilidad**, implica la capacidad de atender las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para cubrir las suyas. Los principios fundamentales de la sostenibilidad abarcan aspectos económicos, sociales y ambientales para garantizar un desarrollo sostenible y respetuoso con el entorno.

**Calentamiento global**, fenómeno que atribuye principalmente a las actividades humanas que elevan la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), retienen el calor en la atmósfera, generando un efecto invernadero que contribuye al aumento de la temperatura global del planeta.

**Gases de efecto invernadero (GEI)**, gases presentes en la atmósfera. Estos desempeñan un papel fundamental en la regulación de la temperatura terrestre, permitiendo que la Tierra retenga parte del calor solar necesario para mantener una temperatura propicia para la vida. No obstante, las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y ciertos procedimientos industriales, han provocado un aumento significativo en las concentraciones de algunos de estos gases.

**Niveles preindustriales**, concentraciones atmosféricas de gases y otros parámetros antes del inicio de la Revolución Industrial, condiciones atmosféricas que prevalecían antes de que las actividades humanas, como la extensa quema de carbón, petróleo y gas, ocasionaran un notable incremento en las emisiones de gases que participan en el efecto invernadero.

**Cambio global**, comúnmente interconectadas en aspectos del entorno, la sociedad y la economía. Estas alteraciones pueden generar impactos profundos y de larga duración en los sistemas naturales y humanos. Algunos de los elementos fundamentales relacionados con el cambio global incluyen al cambio climático, el

cambio ambiental, la globalización, el cambio demográfico, el cambio tecnológico, el cambio social y el cambio económico. (IPCC, 2017)

**Pavimentos sostenibles**, superficies destinadas a la circulación vehicular, que son concebidas, edificadas y mantenidas con una orientación hacia la sostenibilidad en aspectos ambientales, sociales y económicos. Diseñados para reducir al máximo su impacto ambiental, fomentar la eficiencia energética y tener en cuenta consideraciones sociales a lo largo de todo su ciclo de vida.

**Proceso constructivo de pavimento**, se relaciona con las fases y tareas que abarcan la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de superficies destinadas al tráfico vehicular o peatonal, como carreteras o calles. Este procedimiento generalmente sigue distintas etapas, las cuales pueden diferir según el tipo de pavimento, las condiciones del lugar y los materiales empleados.

**Diseño del pavimento**, elaboración de planos y especificaciones que contienen información detallada acerca de la estructura del pavimento, los materiales a emplear y las dimensiones correspondientes.

**Materiales sostenibles**, materiales que son reciclados, reciclables o renovables, con el objetivo de disminuir la huella de carbono y reducir la dependencia de recursos no renovables.

**Capas de rodadura**, en el contexto de la construcción de carreteras y pavimentos, son las capas superiores de un pavimento que están diseñadas para soportar la carga del tráfico vehicular y proporcionar una superficie de rodadura resistente y duradera. Estas capas constituyen la parte visible y directamente en contacto con los neumáticos de los vehículos que circulan sobre la carretera.

**Impermeabilización**, en muchos casos, las capas de rodadura también actúan como una capa impermeable para prevenir la penetración del agua en las capas inferiores del pavimento, lo que puede causar daño por congelación y descongelación.

**Mezcla asfáltica semicaliente (HWMA)**, se produce en un rango de temperatura que va desde los 100 hasta los 140 °C y se aplica a temperaturas intermedias entre las mezclas asfálticas convencionales y las mezclas asfálticas tibias. Esta tecnología busca combinar los beneficios de las mezclas asfálticas convencionales, que se aplican a temperaturas más altas, y las mezclas asfálticas tibias, que se producen y aplican a temperaturas más bajas.

**Mezcla asfáltica en caliente estándar (HMA)**, se fabrica a una temperatura aproximada de 150 a 170 °C y se aplica a temperaturas relativamente elevadas. Esta temperatura permite la completa fusión del asfalto y la adecuada mezcla con los agregados.

**Mezcla asfáltica tibia (WMA)**, se caracteriza por su producción y aplicación a temperaturas entre 70 y 100 °C inferiores en comparación con las mezclas asfálticas convencionales. Mientras que las mezclas asfálticas convencionales requieren procesos a temperaturas más elevadas, las mezclas asfálticas tibias se elaboran y aplican a temperaturas notoriamente más moderadas (Nalbandian et al., 2021).

**Mezclas bituminosas**, también conocidas como mezclas asfálticas o mezclas asfálticas en caliente, son materiales de construcción utilizados en la pavimentación de carreteras y otras superficies. Estas mezclas consisten principalmente en agregados pétreos (como grava, arena y piedra triturada) y un aglutinante asfáltico.

**El aglutinante**, en el contexto de las mezclas bituminosas o asfálticas, se refiere a un material viscoso que se utiliza para unir y adherir los agregados pétreos en la construcción de pavimentos. Este componente es esencial para proporcionar cohesión a la mezcla y garantizar la durabilidad y resistencia del pavimento.

**Betún**, es una combinación de hidrocarburos naturales o derivados del petróleo, que pueden presentarse en forma sólida, viscosa o líquida, con una pequeña proporción de compuestos volátiles. Este material posee propiedades aglomerantes y se disuelve completamente en sulfuro de carbono.

**Betún asfáltico**, desempeña la función de unir y proporcionar cohesión en las mezclas bituminosas utilizadas en la pavimentación de carreteras. Se considera que los neumáticos son el componente de seguridad más destacado en los vehículos que circulan por carreteras.

**Polvo de neumático**, se refiere a partículas finas y pequeñas que se generan durante el desgaste de los neumáticos. Cuando un vehículo está en movimiento, los neumáticos se desgastan gradualmente debido a la fricción con la carretera. Este desgaste produce pequeñas partículas de goma y otros materiales presentes en los neumáticos.

**Caucho granulado**, pequeñas partículas de caucho derivadas de neumáticos reciclados u otros productos de caucho. Este material granulado se utiliza en diversas aplicaciones debido a sus propiedades elásticas y duraderas.

**Caucho asfáltico (CA)**, una mezcla de caucho reciclado y asfalto, que se utiliza en la fabricación de asfalto modificado con caucho (AMC). El caucho asfáltico es una forma de reciclar neumáticos de diseño, dándoles una segunda vida en aplicaciones viales.

**Figura 1. Proceso de extracción de caucho**



**Autorreparación de pavimentos**, hace alusión a la capacidad de un pavimento o

material vial para corregir de forma automática pequeñas grietas y defectos originados por el desgaste y otros factores. En esencia, implica la habilidad del pavimento para restaurar parte de su integridad estructural sin requerir intervención directa por parte de personas.

**Asfalto autorreparable**, creadas como parte de avances en la tecnología. Estas mezclas incorporan materiales especiales, como microcápsulas que contienen un agente rejuvenecedor. Estas cápsulas se rompen y liberan dicho agente cuando se forman grietas, contribuyendo a la reparación de los daños.

**Concreto autorreparable**, he investigado combinaciones que incluyen bacterias o componentes capaces de generar carbonato de calcio para sellar las fisuras. Además, la inclusión de determinados aditivos o agentes expansivos también puede contribuir a la autorreparación del concreto.

**Materiales poliméricos autorreparadores**, empleados en superficies viales han sido concebidos con características autorreparadoras. Estos materiales tienen la capacidad de cerrar fisuras y grietas mediante procesos químicos o físicos.

**Los áridos**, son materiales granulares compuestos principalmente por fragmentos de rocas, piedras, arena y grava que se utilizan en la construcción, especialmente en la fabricación de concreto y mezclas asfálticas para pavimentación. Estos materiales son esenciales en la industria de la construcción debido a sus propiedades mecánicas y su capacidad para proporcionar resistencia y estabilidad a diversas estructuras.

**El caolín**, también conocido como arcilla de caolín, es un tipo de arcilla blanca y suave compuesta principalmente por la mineral caolinita. No se presenta en forma de piedra, sino que es más comúnmente encontrada en forma de depósitos de arcilla.

**Sensores para detección temprana:** La incorporación de sensores en el pavimento puede ayudar a detectar problemas tempranos, lo que permite

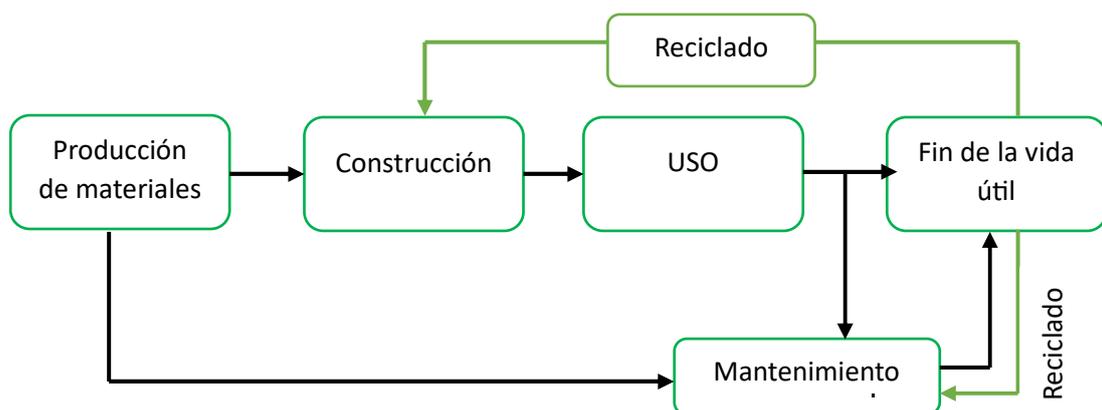
intervenciones rápidas y, en algunos casos, puede contribuir a estrategias de autorreparación al identificar áreas propensas a problemas.

**Reciclaje en frío**, técnica de renovación de pavimentos en la que se reutilizan los materiales asfálticos existentes sin someterlos a un calentamiento significativo. En contraste con los métodos convencionales que incluyen el calentamiento del asfalto, el reciclaje en frío tiene como objetivo reducir el uso de energía y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el calentamiento del asfalto.

**Pavimento asfáltico recuperado (RAP)**, materiales asfálticos reciclados obtenidos mediante la extracción y procesamiento de capas de pavimento asfáltico previamente existente. En vez de descartar por completo el pavimento antiguo, se recolecta, tritura y combina con nuevos materiales para formar una mezcla reciclada, la cual puede ser empleada en la construcción o renovación de carreteras. El proceso implica los siguientes pasos:

Remoción, fragmentación, mezcla y posicionamiento.

**Figura 2. Ciclo de vida de un camino pavimentado**



**Diseño permeable**, uso de pavimentos que poseen la capacidad de permitir el paso del agua a través de ellos, facilitando la recarga de acuíferos y disminuyendo la escorrentía superficial.

**Eficiencia energética**, implica tener en cuenta la eficiencia en la producción, instalación y mantenimiento de los pavimentos.

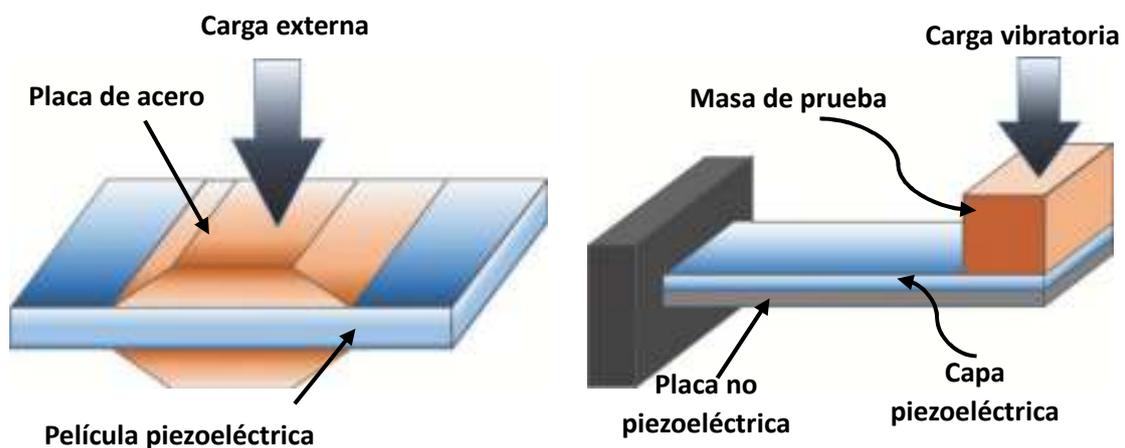
**Durabilidad y extensión prolongada del pavimento**, se refieren al diseño de pavimentos que exhiban una resistencia prolongada y necesiten un mantenimiento reducido, lo que conlleva a una menor generación de residuos y ahorro de recursos a lo largo del tiempo.

**Energía en pavimento**, hace referencia a sistemas creados con el propósito de capturar y utilizar la energía producida por el desplazamiento de vehículos y personas sobre la superficie de carreteras o aceras.

**Energía Piezoeléctrica**, Emplea materiales piezoeléctricos integrados en el pavimento que producen electricidad al ser comprimidos o deformados por el peso de vehículos o personas (Martínez Euclidianas, 2022).

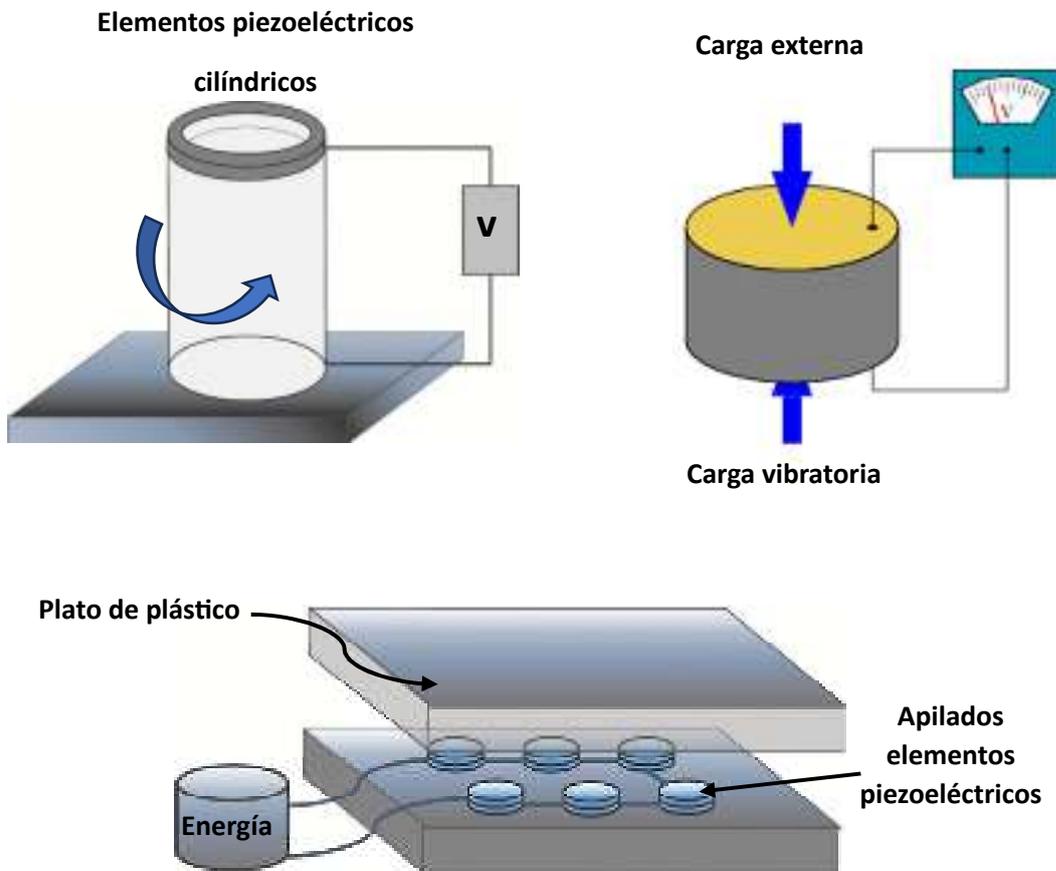
**Película piezoeléctrica**, sensores que tiene capacidades únicas y produce voltaje o carga proporcional a la deformación dinámica.

**Figura 3. Transductores bajo presión piezoeléctricos**



**Transductores piezoeléctricos**, son dispositivos que utilizan el efecto piezoeléctrico para transformar energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Estos transductores están mayormente constituidos por cristales piezoeléctricos, como el cuarzo o cerámicos específicos (Guoyang Lu, et al, 2018).

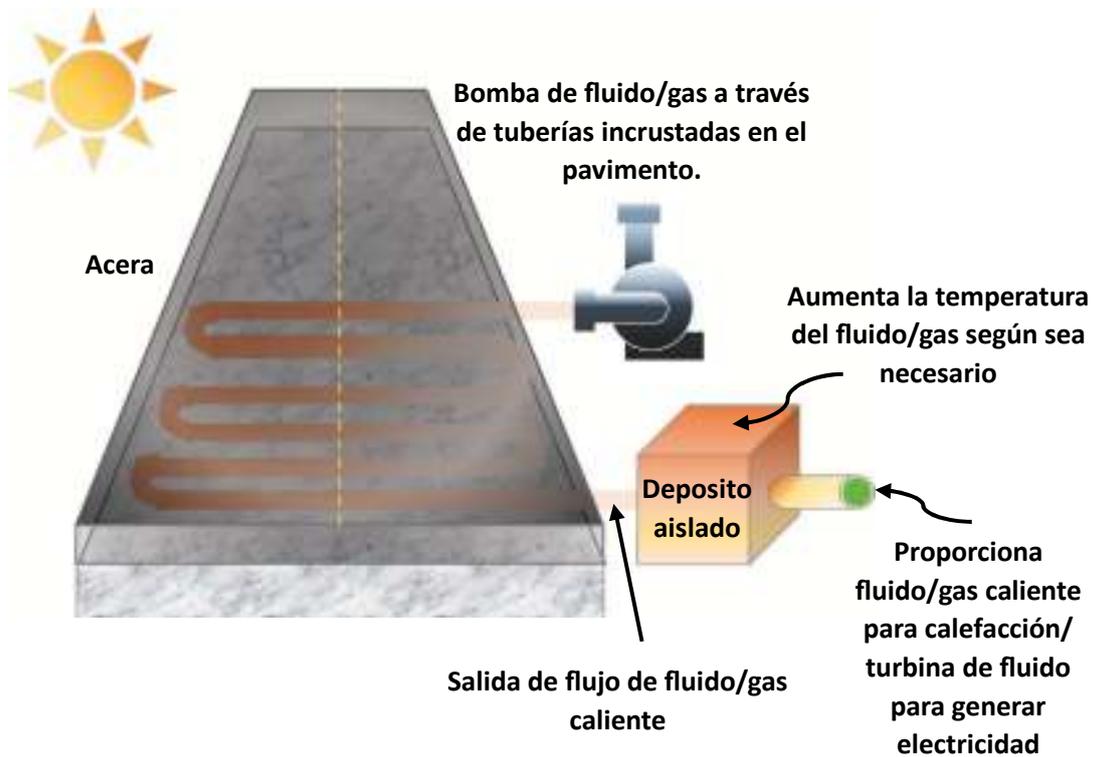
**Figura 4. Sensores piezoeléctricos**



**Energía solar para pavimentos,** sistemas que incluyen células solares fotovoltaicas directamente integradas en el pavimento o en componentes cercanos, posibilitando la producción de energía a partir de la radiación solar que impacta sobre la superficie.

**Extracción de calor con el sistema de tuberías en aceras,** técnica que emplea tuberías enterradas en el suelo para transferir o eliminar calor, comúnmente mediante un fluido o gas. Este método se aplica en estrategias de gestión térmica en entornos urbanos o proyectos de infraestructura, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental.

**Figura 5. Extracción de calor para la eficiencia energética**



### **III. Metodología**

El presente proyecto a recurrido a un enfoque cualitativo descriptivo a través de la revisión sistemática y literatura científica.

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación:

##### 3.1.1. Tipo de investigación:

La tesis propuesta se enmarca en el ámbito de la investigación aplicada, centrándose en la búsqueda de enfoques para los procesos constructivos. Su objetivo principal es proporcionar métodos que permitan a diversas partes interesadas adquirir conocimientos sobre sostenibilidad en el ámbito vial. Se pretende, que, en un futuro, interesados de la industria apliquen los resultados obtenidos mediante un análisis exhaustivo de contenido proveniente de diversas fuentes en línea.

##### 3.1.2. Diseño de investigación:

En cuanto al diseño de la investigación, se clasifica como no experimental, ya que no implica la manipulación de variables. El desarrollo del proyecto sigue un diseño de investigación descriptivo, el cual se basa en la revisión sistemática realizada mediante búsquedas en diversos repositorios. Este enfoque incluye el uso de términos tanto en español como en inglés, con el propósito de explorar en mayor medida los nuevos procesos constructivos y métodos sostenibles aplicables en pavimentos a nivel mundial.

#### 3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización:

En este punto desarrolle mis categorías y subcategorías respondiendo a los objetivos del proyecto, este proceso de redacción de información se llevó a cabo en el marco teórico.

##### 3.2.1. Categorías

Las categorías que utilice están vinculadas a cada objetivo planteado para el desarrollo de este proyecto, las cuales fueron:

Dando respuesta al objetivo número 1, se encuentra la categoría:

Procesos constructivos de pavimentos.

Dando respuesta al objetivo número 2, se encuentra la categoría:

Criterios de Pavimentos.

Dando respuesta al objetivo número 3, se encuentran las categorías:

Métodos evolutivos que aporte al cambio climático para la construcción de pavimentos asfálticos.

Beneficios de nuevos métodos sostenibles para los pavimentos y el medio ambiente.

### 3.2.2. Subcategorías

Las subcategorías complementan las categorías para desarrollar la realidad problemática y objetivos, redactando información importante y específicas de distintos proyectos a nivel internacional.

Tenemos las subcategorías que respaldan a la primera categoría:

Conceptos de procesos constructivos para pavimentos que buscan disminuir la contaminación ambiental por el uso de recursos no renovables.

Implicaciones teóricas de datos estadísticos para la composición de la estructura del pavimento y su viabilidad con el medio ambiente.

También existen las subcategorías que respaldan a la segunda categoría:

Concepciones de nuevas aplicaciones para la resistencia de pavimentos.

Descripción de Instrumentos tecnológicos para pavimentos que ayuden a las capas asfálticas en la distribución de cargas.

Además, contamos con la subcategoría que respaldan a la tercera categoría:  
Criterios de evaluación para el uso de recursos no renovables en los procesos constructivos de pavimentos.

Por último, la subcategoría que respaldan a la cuarta categoría:  
Concepción de métodos de construcción con materiales reciclados como el uso de caucho de las llantas para la compactación de las capas asfálticas.

Estadísticas de dióxido de carbono e impacto ambiental que generan las construcciones de pavimentos

### 3.2.3. Matriz de categorización

Ver anexos

### 3.3. Escenario de estudio:

Se ubica geográficamente en Piura, Perú; no obstante, mi investigación se ha expandido a nivel internacional, explorando diversas fuentes en la web. Se han considerado proyectos de alto impacto que implementan prácticas sostenibles en la construcción de pavimentos, con el objetivo de mitigar las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

La información recopilada proviene de países como Suiza, Países Bajos, Roma, España, Estados Unidos, Francia, Inglaterra, Emiratos Árabes Unidos, Singapur, entre otros. La selección de estos países se basó en su ranking global en términos de viabilidad y sostenibilidad de carreteras, en comparación con otros países.

### 3.4. Participaciones:

En este proyecto se emplearon técnicas de análisis de documentos para recolectar información, donde el análisis de investigaciones de distintas fuentes desempeño un papel fundamental en la recopilación de la mayor parte de los datos relacionados

con el estudio de procesos constructivos de pavimentos sostenibles.

La recolección de datos se llevó a cabo de forma online, con una búsqueda profunda en Google académico, la búsqueda se basó en distintos idiomas tales como el inglés, alemán, francés y castellano, el 80% de la información extraída son de fuentes confiable como Scopus, Scielo Wos y Sustainability.

### 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:

#### 3.5.1. Técnicas

##### 3.5.1.1. Observación

Utilice la técnica de la observación ya que es un método sistemático donde realice la visualización y captura estructurada de eventos en mi vida cotidiana, este es un problema que se puede detectar en todos lados, ya que la forma en la que nos transportarnos está presente de una u otra manera, de esta técnica tan básica y muy importante pude descubrir una gran problemática que afecta a nivel mundial.

##### 3.5.1.2. Documental

Hice la verificación de 190 documentos en distintos idiomas, los cuales tenían ideas que relacionaban el tema principal, sin embargo, todos estos no me establecían la información y datos necesarios para desarrollar los objetivos del proyecto, por lo cual descarte 107 documentos que no brindaban la información correspondiente y utilice 83, de estos recolecte información de gran impacto en la construcción vial y datos estadísticos para el desarrollo de los resultados. También, el análisis se utilizó como medio principal para capturar la mayor parte de los datos relacionados con los métodos de procesos constructivos en pavimentos.

#### 3.5.2. Instrumentos

##### 3.5.2.1. Ficha de Investigación

Como herramienta, emplearemos una ficha de investigación que se organiza según las contribuciones relacionadas con el medio ambiente, construcciones viales y

gases de efecto invernadero. Los cuadros, creados previamente en un documento de Word, estarán estructurados en cinco columnas, abarcando números, título del proyecto, autores, año de publicación y el enlace de la página web. Posteriormente, se llevó a cabo la verificación de la información de cada documento, eligiendo finalmente 83 de ellos debido a su mayor relevancia y conexión con el proyecto.

### 3.6. Procedimientos:

Se presentan a continuación las fases de la implementación de las categorías y subcategorías, es un listado de cómo se procedió a la recolección de información para el desarrollo de nuestro proyecto de investigación.

Etapa 1. Usando YouTube y Google académico, investigue la problemática de procesos constructivos en pavimentos a nivel mundial con influencia en el cambio climático.

Etapa 2. La búsqueda se basó en la identificación de procesos constructivos de pavimentos sostenibles y su aporte frente al cambio climático, encontramos distintos documentos con una antigüedad no mayor a 7 años.

Etapa 3. Estos documentos fueron sometidos a un análisis de su resumen, que abarcó su problemática, justificación, objetivos, métodos y resultados, con el propósito de verificar que contengan la información relevante y contribuyan al desarrollo de nuestra investigación.

Etapa 4. Valoramos la información más relevante que contribuye a nuestro progreso con el propósito de alcanzar nuestros objetivos de investigación. La revisión sistemática de estos documentos de investigaciones experimentales sobre procesos constructivos sostenibles ha sido fundamental para nuestro avance.

Etapa 5. Después de concluir nuestra búsqueda, recopilamos la información y reformulamos las contribuciones con el objetivo de ofrecer referencias para futuros investigadores interesados en encontrar métodos que reduzcan el impacto

ambiental en la construcción de infraestructuras viales.

Etapa 6. Se logró obtener un proyecto de tesis que brindará a los investigadores información relevante acerca de los pavimentos sostenibles en el contexto del cambio climático.

### 3.7. Rigor científico:

#### 3.7.1. Validez

La validez en el proyecto de método cualitativo se logró mediante la aplicación rigurosa de técnicas y estrategias, como la selección adecuada de documentos y la interpretación cuidadosa de los datos.

Lleve a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica existente, abordando trabajos relevantes y consolidados en el área de procesos constructivos de pavimentos sostenibles para fundamentar y respaldar tanto el enfoque como los métodos empleados. Además, busque garantizar la representatividad y pertinencia de los documentos utilizados, eligiendo criterios específicos alineados con los objetivos del proyecto de tesis.

La utilización de instrumentos de recolección de datos previamente validados, se llevó a cabo para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos. También, se proporciona una descripción detallada y transparente de los métodos utilizados, facilitando a otros investigadores replicar el estudio y verificar la validez de los resultados. Se emplean técnicas estadísticas y analíticas sólidas para garantizar la precisión en la interpretación de los datos y la validez de las conclusiones extraídas.

### 3.8. Método de análisis de la información:

Examine detalladamente los datos recopilados, como los documentos, datos en línea que se actualiza en vivo por parte de grupos internacionales como la ONU, Acuerdo de París, Greenpeace, World Wildlife Fund (WWF), 350.org, Climate Action Network (CAN), entre otros, con el objetivo de identificar patrones, temas y

categorías relevantes.

El análisis, implica la codificación de los datos, asigne categorías a segmentos de información, luego agrupe y organice estos segmentos en temas más amplios para basarnos netamente en buscar información sobre la dicha variable. Comprendí y describí en profundidad los fenómenos estudiados, así extraer el significado de los datos de documentos descriptivos, experimentales y no experimentales recopilados.

### 3.9. Aspectos éticos:

Obtuve los documentos de diversas plataformas en línea, utilizando fuentes altamente relevantes como Scopus, Scielo, WOS y organizaciones reconocidas como la ONU, el Acuerdo de París, Greenpeace, World Wildlife Fund (WWF), 350.org y Climate Action Network (CAN). Estas fuentes fueron cruciales para obtener información auténtica y significativa, proporcionando una base sólida para el desarrollo de mi proyecto de tesis. Examiné detenidamente los resúmenes, resaltando los puntos clave que contribuirían a la consecución de mis objetivos y resultados, garantizando la confiabilidad de los métodos encontrados y delineados en mi marco teórico.

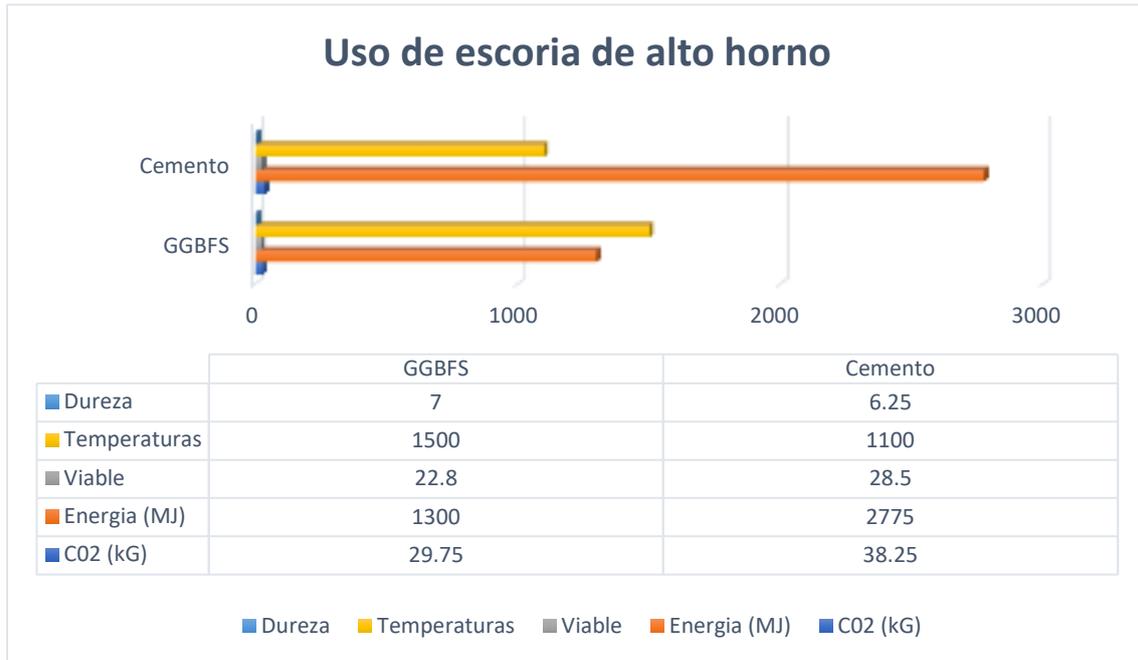
La autenticidad de los autores se reflejará en las citas según sea necesario. Todo el contenido analizado e interpretado se presentará con el objetivo de enriquecer el conocimiento de los interesados, proporcionando una recopilación de datos orientada a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de la construcción.

En todas las etapas de la investigación, se dará primordial importancia a los principios éticos de imparcialidad y equidad. Se seguirán los criterios éticos pertinentes para garantizar la correcta ejecución de la investigación a nivel global y nacional, asegurando la realización de un estudio justo y respetuoso hacia otros autores.

#### IV. Resultados y Discusión

**Identificación de métodos de construcción de pavimentos sostenibles utilizados en diferentes naciones, así como su viabilidad y adaptación en el medio ambiente.**

**Tabla 1.** Uso de escoria de alto horno



Fuente: propia de la investigación

La escoria de alto horno (BFS), utilizada en la producción de una tonelada de cal apagada con escoria granulada de alto horno molida (GGBFS), emite 0,7 t de CO<sub>2</sub>, considerablemente menos que el cemento (0,9 t), y la energía necesaria para su producción es de 1300MJ (megajoules). Además, es económicamente viable, ya que cuesta alrededor del 80% de lo que cuesta el cemento. La capacidad de carga de las vigas reforzadas con la inclusión de RA es superior a la del cemento Portland.

El cemento es el aditivo mas usado en el mundo, debido a los compuestos que garantizan el 99% de su eficiencia; sin embargo, la demanda de su producción causa un extremo consumo de materias primas que generan degradación en los ecosistemas y un impacto negativo en el medio ambiente.

**Tabla 2.** Influencia del RAP en el consumo de energía y emisiones

	Consumo de energía		Emisiones de CO2	
	MJ/m3	%	KgeqCO2/m3	%
Mezcla virgen				
Agregados	234.15	10.83%	16.58	15.25%
Conglomerante de asfalto	1564.89	72.41%	88.87	81.75%
Bacheo	362.16	16.76%	3.26	3.00%
<b>Total</b>	<b>2161.20</b>	<b>100%</b>	<b>108.71</b>	<b>100%</b>
Mezcla 30% RAP				
Agregados	182.55	9.79%	12.93	14.81%
Conglomerante de asfalto	1230.69	66.03%	69.89	80.07%
Bacheo	403.97	21.67%	3.64	4.17%
Preparación del RAP	46.74	2.51%	0.83	0.95%
<b>Total</b>	<b>1863.95</b>	<b>100%</b>	<b>87.29</b>	<b>100%</b>
Diferencia				
Agregados	51.6	22.04%	3.65	22.01%
Conglomerantes de asfalto	334.2	21.36%	18.98	21.36%
Bacheo	-41.89	-11.54%	-0.38	-11.66%
<b>Total</b>	<b>343.99</b>	<b>16%</b>	<b>22.25</b>	<b>20%</b>

Fuente: Propia de la investigación.

Estos hallazgos sugieren que la mejor estrategia para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas y, al mismo tiempo, reducir las emisiones de carbono consiste en incorporar un 18% de caucho granulado mediante el método de tecnología húmeda.

La estabilización con cal por sí sola presenta una disminución del 10,96% en las emisiones; sin embargo, la combinación de pavimento asfáltico recuperado (RAP) y estabilización con cal puede lograr una reducción del 48,27%.

## Evaluar nuevas propuestas de infraestructura vial con la meta de alcanzar reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero

**Tabla 3.** Composición de mezclas bituminosas y medidas unitarias de materiales constituyentes utilizados

El análisis del ciclo de vida se llevó a cabo utilizando los datos disponibles en SimaPro, un software desarrollado por Prè Consultant. El software sintetizó la composición de las diversas mezclas bituminosas, expresando esta composición en términos del contenido de aglutinante (%B). Además, proporcionó información sobre las cantidades unitarias (q, en kg/m<sup>3</sup>) de betún (pedex B), áridos (A), caucho granulado (CR) y pavimento asfáltico recuperado (RAP).

Guion	%	Cantidad (kg/m <sup>3</sup> )			
		q <sub>B</sub>	q <sub>A</sub>	q <sub>CR</sub>	q <sub>RAP</sub>
Mezcla estándar densa (S)	6.3	119.	226	-	-
		9	3		
Mezcla cauchutada (Wg)	9.2	155.	215	33	-
		3	3		
Mezcla de goma graduada con RAP (Wgr)	9.4	150.	193	33	220.
		3	9		4
Mezcla de goma densa y clasificada (Wd)	7.2	108.	208	19.	-
		9	6	5	
Mezcla clasificada densa, seca y engomada (D)	7.7	144.	221	22.	-
		8	9	4	

Fuente: Propia de la investigación

Las mezclas actúan de forma distinta a la resistencia de la compresión, los 5 contiene betún y áridos, pero 4 de estas mezclas tienen caucho granulado, las cuales ayudan a la estabilidad de las capas de los pavimentos y reducen hasta en un 12% las emisiones. Mientras tanto la mezcla de goma graduada con pavimento asfáltico recuperado tiene una vida útil de 20 años debido a sus composiciones y se le podrá dar mantenimiento 1 vez cada 10 años.

**Tabla 4.** Vida útil y frecuencia de mantenimiento

	Guion				
	S	Wg	Wgr	Wd	D
Vida útil en años	18	20	20	20	18
Mantenimiento (1/años)	1/5	1/7	1/7	1/7	1/5

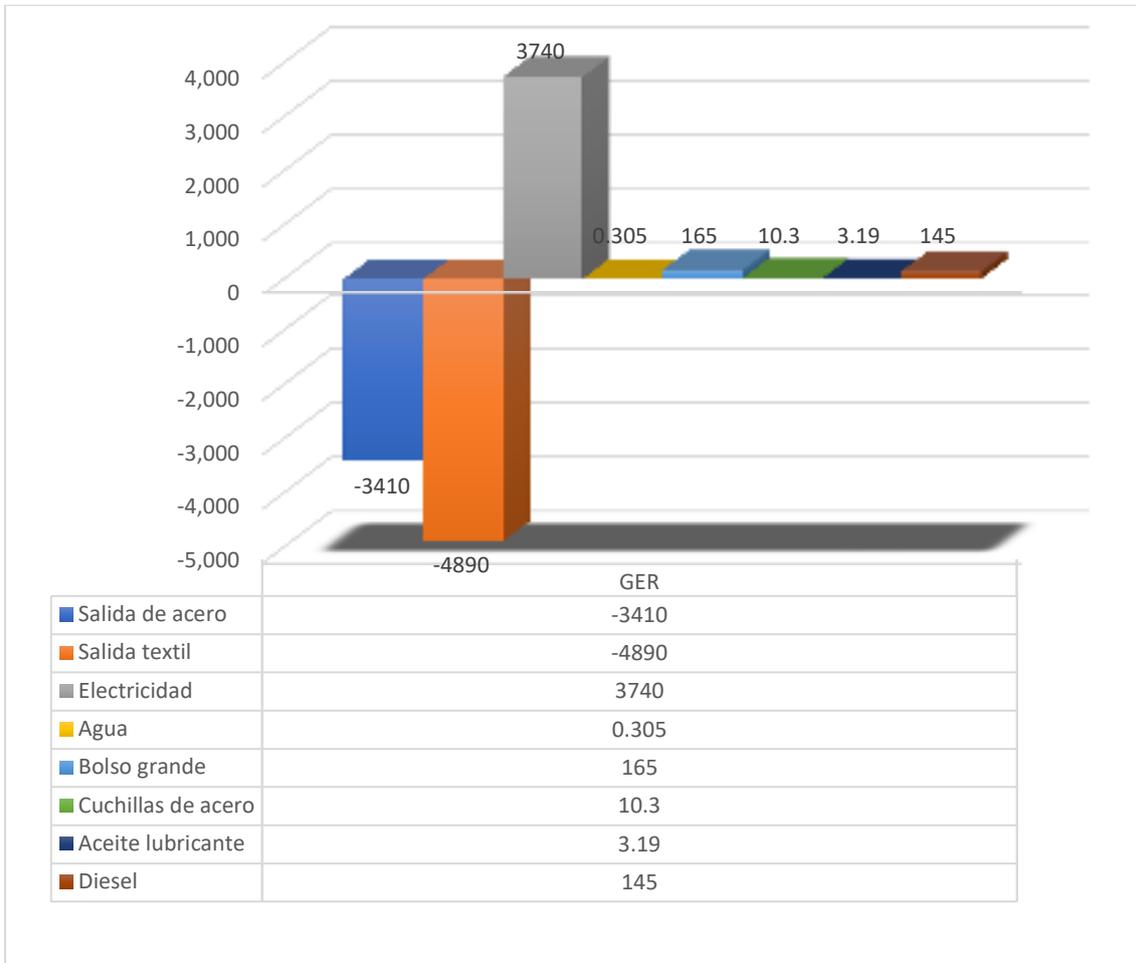
Fuente: Propia de la investigación.

Se evidencia que la utilización de materiales que contienen caucho reciclado (CR) conlleva a una notable disminución tanto en el consumo total de energía (GER) como en las emisiones de dióxido de carbono (GWP), con porcentajes que varían entre el 43% y el 46%, como se representa en la Tabla.

Estos valores indican que la incorporación de material reciclado de asfalto (RAP) en sustitución parcial de áridos vírgenes en la mezcla (Wgr) tiene un impacto relativamente leve en el perfil ecológico general en comparación con la mezcla convencional (MC). Cabe destacar que el betún y el aglutinante modificado son los componentes que más consumen energía en el proceso, mientras que la mezcla de plantas y el transporte son las fuentes principales de emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Determinar impactos que tiene la construcción de carreteras con métodos innovadores.**

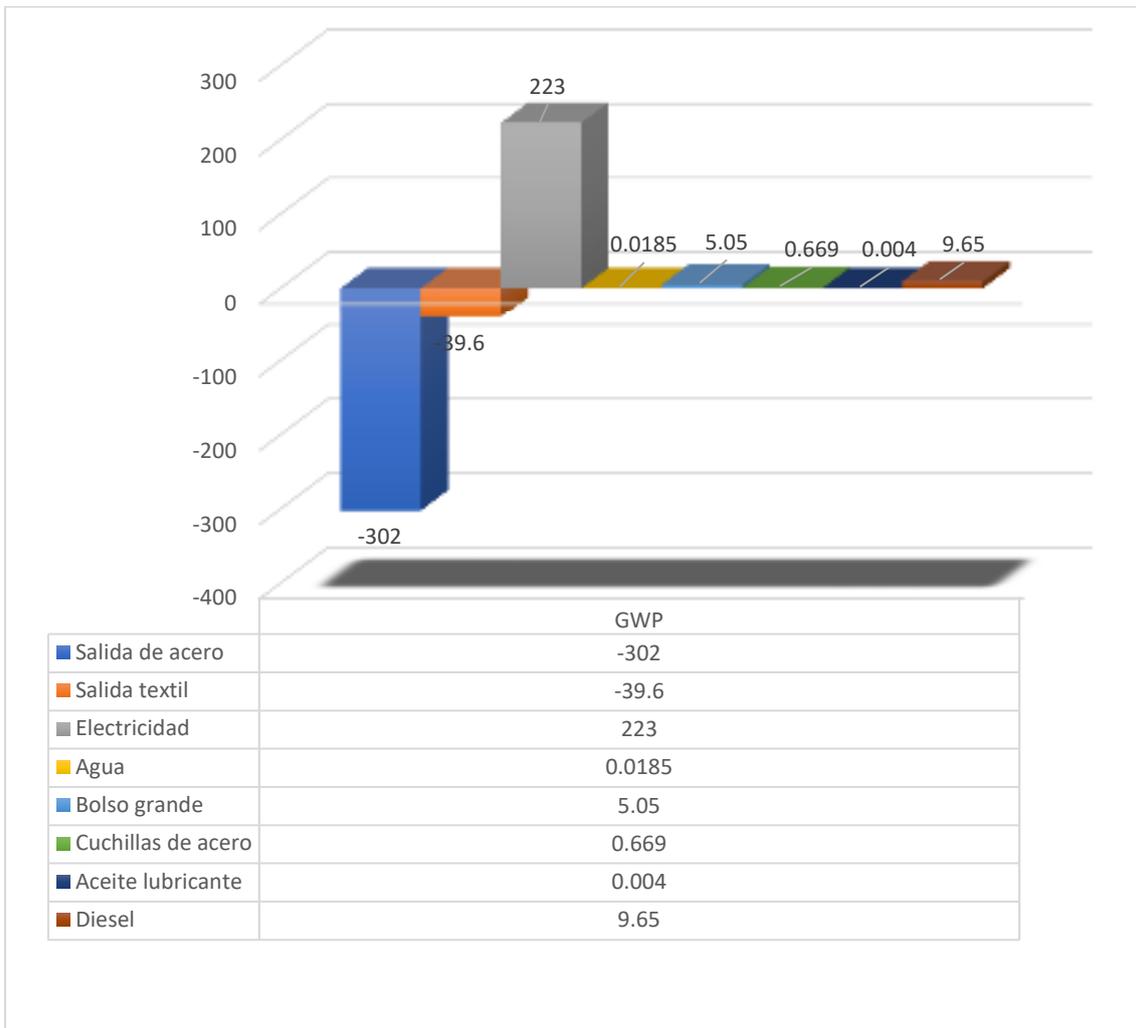
**Tabla 5.** Eficiencia Energética en el Ciclo de Vida (GER) vinculada a la fabricación de caucho granulado (CR)



Fuente: Propia de la investigación

De manera específica, se examinó que la fabricación de 1 tonelada de áridos implica el consumo de 5,3 kWh de electricidad, 2,3 m<sup>3</sup> de agua, 0,005 l de aceite lubricante, 0,002 kg de hierro para filtros, 0,0011 kg de caucho para las cintas transportadoras y 0,31 l de gasolina. En este marco, se asumió que la fabricación de 1 tonelada de betún requiere 22,5 kg de betún, 50,5 kg de petróleo crudo, 10,9 kg de carbón, 0,003 kg de uranio y 1239 litros de agua. Sin embargo, se determinó que la cadena de producción de caucho granulado se traduce en un ahorro de energía en el ciclo de vida (GER) de 4236 MJ/t y en un efecto invernadero neto.

**Tabla 6.** Impacto de emisiones potencias del calentamiento global(GWP) vinculada a la fabricación de caucho granulado (CR).



Fuente: propia de la investigación

Se presentan los valores de GWP asociados con las operaciones de construcción y mantenimiento de capas de rodadura. Específicamente, se comparan los CR a través de la tecnología húmeda.

Se observa que el uso de materiales que contienen CR resulta en una reducción significativa de la energía total gastada (GER) y de las emisiones de dióxido de carbono (GWP), con porcentajes que oscilan entre el 43% y el 46%. Esto indica que el uso de material RAP tiene un efecto leve en el perfil ecológico general del uso gradual de la mezcla de curso (Wg).

## Generar conocimientos que contribuya al sector de la construcción vial

**Tabla 7.** Comparación de tecnologías ecológicas para la captura de energía en pavimentos.

<b>Captación de energía para pavimentos</b>	<b>Método de transformación energética</b>	<b>Uso pavimentos</b>	<b>en Avanzado estado tecnológico</b>
Captación de energía Solar	Energía solar a energía eléctrica/térmica	Encendido de semáforos y señales	de Alto
Recolección de energía piezoeléctrica	Energía mecánica a energía eléctrica	Deshielo a pavimento	del Medio
Termoeléctrico recolección de energía	Energía térmica a energía eléctrica	Encendido de semáforos y señales	de y Bajo
Cosecha de energía Geotérmica	Energía geotérmica a energía eléctrica	(1) Enfriamiento de pavimentos (2) Producción de electricidad	Alto

*Fuente:* Fundación Alemana de investigación

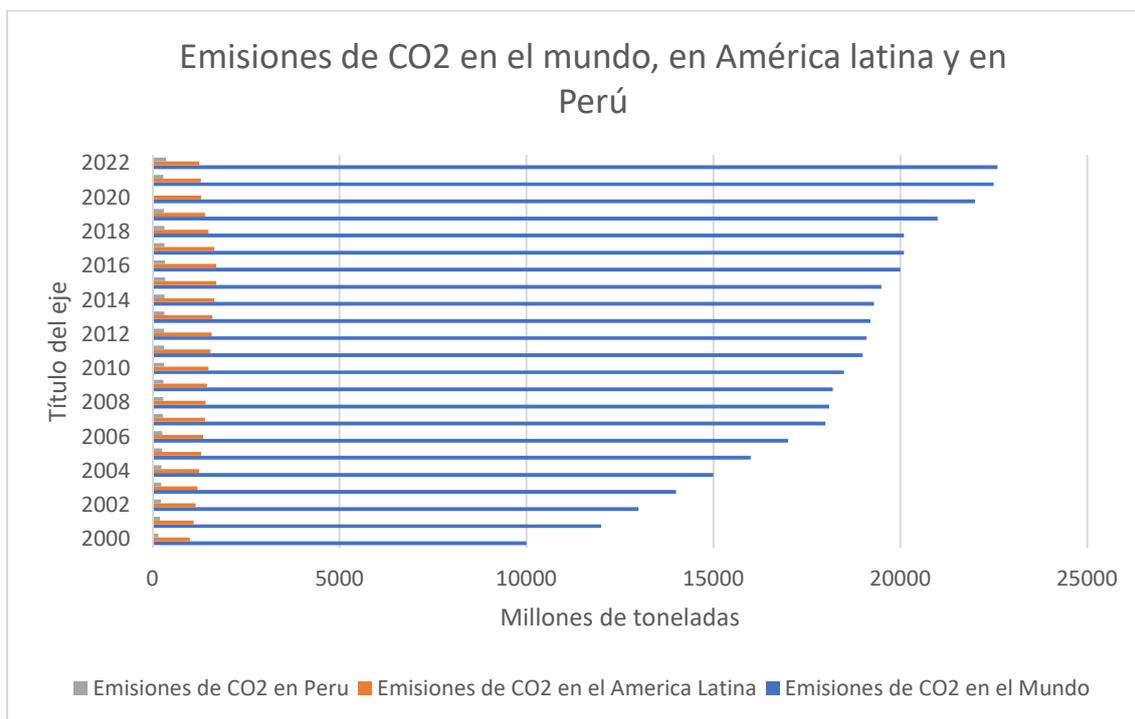
Las tecnologías de recolección de energía ofrecen diversas ventajas y desventajas en su implementación. La captación de energía solar destaca por su alta eficiencia de conversión y la abundancia de recursos disponibles. Por otro lado, presenta limitaciones climáticas y una eficiencia relativamente baja en ciertas condiciones.

La recolección de energía piezoeléctrica ofrece la ventaja de contar con una variedad de diseños para la recolección de energía, lo que proporciona flexibilidad en su aplicación. Sin embargo, esta tecnología enfrenta desafíos, como su baja eficiencia y el alto costo unitario asociado.

La recolección de energía termoeléctrica destaca por su flexibilidad de aplicabilidad, pero enfrenta limitaciones geológicas y desafíos técnicos en su implementación.

En cuanto a la cosecha de energía geotérmica, presenta una alta tasa de conversión de energía y se beneficia de la abundancia de recursos geotérmicos. A pesar de estas ventajas, la tecnología puede enfrentar limitaciones geológicas específicas.

**Tabla 8.** Estadísticas de dióxido de carbono que generan las construcciones de pavimentos



Fuente: Propia de la investigación

Las actividades humanas han aumentado el CO<sub>2</sub> atmosférico en un 50%, lo que significa que la cantidad de CO<sub>2</sub> es ahora el 150% de su valor en 1750. Se denota que a partir del año 2015 los datos de CO<sub>2</sub> han comenzado a disminuir, esto debido a la participación de 192 países en el acuerdo de París

La industria de la construcción representa uno de los mayores consumidores de materias primas, siendo el sector cementero responsable de aproximadamente el 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el principal gas causante del efecto invernadero y el cambio climático. El hormigón, material de construcción preeminente a nivel mundial, consume anualmente 1.6 billones de toneladas de cemento. Cada tonelada de cemento fabricada emite aproximadamente una tonelada de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Además, durante las fases de construcción, es común el uso de maquinaria pesada, generadora de considerables emisiones de dióxido de carbono. El transporte de materiales hasta el lugar de construcción contribuye alrededor del 6-8% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero para un proyecto.

## V. Conclusiones

1. La energía captada de los pavimentos en forma de electricidad puede emplearse para abastecer dispositivos eléctricos de señalización y semáforos, así como para realizar tareas como descongelar en climas fríos y monitorear características del pavimento como la temperatura, la deflexión y el tráfico.
2. El análisis detallado de los procesos de fabricación de áridos y betún revela una serie de impactos ambientales significativos asociados con el consumo de recursos naturales y la emisión de diversos materiales. Se destacan las considerables cantidades de electricidad, agua, aceite lubricante, hierro, caucho y gasolina utilizadas en la producción de áridos, así como los múltiples recursos involucrados en la fabricación de betún, incluyendo betún, petróleo crudo, carbón, uranio y agua.
3. La cadena de producción de caucho granulado presenta un aspecto positivo al generar un ahorro significativo de energía en el ciclo de vida (GER) de 4236 MJ/t y un impacto neto favorable en el efecto invernadero. Este hallazgo sugiere que la fabricación de caucho granulado puede considerarse una opción más sostenible desde una perspectiva ambiental en comparación con los procesos de producción de áridos y betún, subrayando la importancia de explorar y promover prácticas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente en la industria de la construcción.
4. Destacó la importancia de la tecnología húmeda en la construcción y mantenimiento de capas de rodadura, particularmente al comparar el rendimiento de materiales que contienen caucho reciclado (CR). La observación principal revela que la inclusión de estos materiales con tecnología húmeda conlleva a una reducción significativa tanto en la energía total gastada (GER) como en las emisiones de dióxido de carbono (GWP), con porcentajes notables que oscilan entre el 43% y el 46%. Estos resultados subrayan la viabilidad y beneficios ambientales asociados con el uso de

materiales reciclados en la construcción de capas de rodadura, sugiriendo un impacto positivo en el perfil ecológico global del proceso de mezcla de curso (Wg).

5. Los resultados derivados del análisis de Ciclo de Vida (ACV), indican que la utilización de capas de rodadura que contienen caucho asfáltico producido mediante tecnología húmeda puede generar ventajas sustanciales en términos de conservación de energía, impacto ambiental, salud humana, preservación de ecosistemas y minimización del agotamiento de recursos.

Estos beneficios mencionados anteriormente experimentan solo un aumento leve al incorporar material de pavimento asfáltico recuperado en reemplazo parcial de agregados vírgenes y están garantizados solo cuando las mezclas se diseñan e instalan adecuadamente, con la correspondiente posibilidad de reducir el grosor de la capa superficial y la frecuencia de mantenimiento.

6. Se abordó uno de los objetivos más destacados mediante tres componentes esenciales del Acuerdo de París de 2015. Estos componentes abarcan la limitación del aumento de las temperaturas a 1,5°C, la evaluación de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el respaldo financiero a las naciones más empobrecidas. Este acuerdo fue ratificado por más de 194 países. Como parte de sus compromisos, cada cinco años, los países presentan una actualización de su plan nacional de acción climática. Estos planes detallan las medidas que adoptarán para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un rango del 15% al 20%, conocido como Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN).

Los pormenores del reglamento de París fueron acordados durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP24) en Katowice, Polonia, en diciembre de 2018, y se finalizaron durante la COP26 en Glasgow, Escocia, en noviembre de 2021 (Naciones Unidas, 2021).

7. Según el informe del Banco Mundial de 2019, el 66% de la energía a nivel

mundial proviene de combustibles fósiles. Es por eso que la directora ejecutiva interina de ONU Medio Ambiente, Joyce Msuya, ha abogado para impulsar la transición de los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, hacia fuentes de energía renovables como la solar y la eólica, con la finalidad de reducir el consumo de materia primas y reducir la huella de carbono que se producen en su extracción.

8. Las nuevas iniciativas internacionales presentan un gran potencial, pero también enfrentan desafíos inherentes a la cooperación global. Aunque los gobiernos muestran una mayor disposición a colaborar, son menos propensos a proporcionar fondos a través de las fronteras, al igual que los actores privados que comparten datos y conocimientos en estas iniciativas.

Aunque la innovación pueda acelerarse con éxito, el mundo aún debe lidiar con consecuencias no deseadas, como el efecto rebote, donde, en el caso de innovaciones que ahorran energía, parte de la energía ahorrada por unidad del producto innovador se recupera a través de un mayor consumo actual.

9. A pesar de que la mayoría de los países asociados al Acuerdo de París están progresando en el logro de sus compromisos establecidos en 2020, la mayoría aún no ha tomado la dirección requerida para cumplir con sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) para el año 2030.

## **VI. Recomendaciones**

1. Los pavimentos permeables desempeñan un papel fundamental en la edificación de pavimentos sostenibles. La implementación de pavimentos permeables juega un papel significativo en la gestión de aguas pluviales y mejora la sostenibilidad hídrica al prevenir la escorrentía superficial durante los días de lluvia. Se necesita investigación futura para desarrollar diseños innovadores o emplear tecnologías avanzadas y materiales que refuercen la resistencia mecánica y la durabilidad de los pavimentos permeables, minimizando el impacto en la obstrucción. Asimismo, una tendencia emergente en la construcción de pavimentos sostenibles implica la integración de tecnologías de recolección de energía en pavimentos permeables, con el propósito de mejorar tanto la eficiencia en la conservación de energía como la sostenibilidad del agua.
2. La investigación venidera debe abordar los desafíos críticos vinculados a la aplicación de tecnologías ecológicas en pavimentos sostenibles. Estos desafíos abarcan la tecnología de construcción, las estrategias de mantenimiento y el desempeño a lo largo del ciclo de vida. Resolver de manera efectiva estos problemas contribuirá al fortalecimiento del entendimiento teórico en términos técnicos, económicos y sostenibles. A largo plazo, esto facilitará la extensa implementación de tecnologías verdes en la construcción de pavimentos sostenibles en la práctica.
3. Se necesitan investigaciones adicionales en varias áreas clave del hormigón con agregados reciclados. Actualmente, hay un enfoque limitado en el mejoramiento de la nanoestructura de los agregados reciclados (AR). Los siguientes puntos requieren una consideración seria para futuros esfuerzos de investigación.
4. Es necesario investigar las propiedades de los áridos reciclados (RA) según su procedencia. Este enfoque facilitará la generalización y el uso más

eficiente de los áridos reciclados.

5. Se requiere llevar a cabo un análisis exhaustivo de las estructuras de concreto asfáltico reciclado (RAC) expuestas a desastres naturales después de su prolongada permanencia en el entorno natural.
6. Es fundamental crear métodos de tratamiento eficaces y económicos para potenciar las propiedades del concreto asfáltico reciclado (RAC) durante las etapas de procesamiento en lugar de hacerlo durante la fase de construcción.
7. La selección de los métodos de construcción de carreteras más adecuados en respuesta al cambio climático puede depender de la región, el presupuesto, la disponibilidad de recursos y los objetivos específicos de sostenibilidad. A nivel global, existen diversas prácticas y enfoques que se reconocen como efectivos para mitigar el impacto de la construcción de carreteras en el cambio climático.
8. Los compromisos actuales expresados en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) son insuficientes para cerrar la brecha de emisiones en 2030. Aunque técnicamente aún es posible cerrar la brecha y asegurar que el calentamiento global se mantenga muy por debajo de 2°C y 1,5°C, si las ambiciones de las NDC no aumentan antes de 2030, será imposible evitar superar el objetivo de 1,5°C. En este momento, es más crucial que nunca que todas las naciones tomen medidas urgentes y sin precedentes. La evaluación de las acciones de los países del G20 indica que esto aún está por suceder; de hecho, las emisiones globales de CO<sub>2</sub> aumentaron en 2017 después de tres años de estancamiento.
9. Las emisiones globales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) derivadas de la energía y la industria experimentaron un aumento en 2017, rompiendo un período de tres años de estabilización. Las emisiones totales anuales de gases de efecto invernadero, que también incluyen aquellas relacionadas con el

cambio de uso de la tierra, alcanzaron un récord de 53,5 GtCO<sub>2</sub>e en 2017, reflejando un incremento de 0,7 GtCO<sub>2</sub>e en comparación con el año 2016. Contrariamente, para colocar al mundo en una trayectoria de menor costo hacia la limitación del calentamiento global a 2°C y 1,5°C, se requiere que las emisiones globales de gases de efecto invernadero en 2030 sean aproximadamente un 25% y un 55% menores, respectivamente, que las registradas en 2017.

## Referencias

1. Nura Shehu Aliyu, et al. A comprehensive overview of the utilization of recycled waste materials and technologies in asphalt pavements: towards environmental and sustainable low-carbon roads. *Procesos*, 2023, vol. 11, numero 7, p. 2095. <https://doi.org/10.3390/pr11072095>
2. Moretti, Laura; Loprencipe, Giuseppe. Climate change and transport infrastructures: State of the art. *Sostenibilidad*, 2018, vol. 10, núm 11, p. 4098. <https://doi.org/10.3390/su10114098>
3. De Abreu, Victor Hugo Souza; Santos, Andrea Souza; Monteiro, Thaís Guedes Máximo. Climate change impacts on the road transport infrastructure: A systematic review on adaptation measures. *Sostenibilidad*, 2022, vol. 14, núm 14, p. 8864. <https://doi.org/10.3390/su14148864>
4. Liu, Yuanyuan, et al. Identification of the potential for carbon dioxide emissions reduction from highway maintenance projects using life cycle assessment: A case in China. *Revista de producción más limpia*, 2019, vol. 219, p. 743-752. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.081>
5. Chen, Xiaodan; WANG, Hao. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect. *Revista de producción más limpia*, 2018, vol. 187, p. 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.207>
6. Sanei, Sadaf; Modarres, Amir. Optimization of asphalt cold recycling containing ordinary and waste additives based on life cycle assessment considering the road traffic level-case study: Coal preparation plant. *Estudios de casos en materiales de construcción*, 2023, vol. 19, p. e02329. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02329>
7. Hamada, Hussein, et al. Sustainable application of coal bottom ash as fine

- aggregates in concrete: A comprehensive review. *Estudios de caso en materiales de construcción*, 2022, vol. 16, p. e01109. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01109>
8. QAIDI, Shaker MA, et al. Recycling of mine tailings for the geopolymers production: A systematic review. *Estudios de caso en materiales de construcción*, 2022, vol. 16, p. e00933. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00933>
  9. CHEN, Xiaodan; WANG, Hao. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect. *Revista de producción más limpia*, 2018, vol. 187, p. 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.207>
  10. CHOI, Jae-ho. Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement. *Revista de producción más limpia*, 2019, vol. 209, p. 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.226>
  11. ZHENG, Xiaoyan, et al. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Revista de producción más limpia*, 2019, vol. 213, p. 659-672. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.227>
  12. SANTOS, Joao, et al. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 138, p. 283-297. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.012>
  13. AZARIJAFARI, Hessam; YAHIA, Ammar; AMOR, Mourad Ben. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Revista de Producción Más Limpia*, 2016, vol. 112, p. 2187-2197. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.080>

14. GIANI, Martina Irene, et al. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Recursos, Conservación y Reciclaje*, 2015, vol. 104, p. 224-238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
15. SAEED, Saeed Modibbo, et al. Review on the effect of curing on cold recycled asphalt mixture. En *ICCOEE2020: Proceedings of the 6th International Conference on Civil, Marina y Ambiental (ICCOEE2020)*. Springer Singapore, 2021. p. 1052-1060. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118505>
16. CHEN, Zhaojie; WANG, Duanyi. Numerical analysis of a multi-objective maintenance decision-making model for sustainable highway networks: Integrating the GDE3 method, LCA and LCCA. *Energía y Edificios*, 2023, vol. 290, p. 113096. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113096>
17. LIU, Yuanyuan; WANG, Yuanqing; LI, Di. Estimation and uncertainty analysis on carbon dioxide emissions from construction phase of real highway projects in China. *Revista de producción más limpia*, 2017, vol. 144, p. 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.015>
18. WANG, Fusong, et al. Comparative study for global warming potentials of Chinese and Norwegian roads with life cycle assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 177, p. 1168-1180. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.063>
19. ABDALLA, Ahmed; FAHEEM, Ahmed F.; WALTERS, Evelyn. Life cycle assessment of eco-friendly asphalt pavement involving multi-recycled materials: A comparative study. *Revista de Producción Más Limpia*, 2022, vol. 362, p. 132471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132471>
20. LOUHGHALAM, Arghavan; AKBARIAN, Mehdi; ULM, Franz-Josef. Carbon

- management of infrastructure performance: Integrated big data analytics and pavement-vehicle-interactions. *Revista de Producción Más Limpia*, 2017, vol. 142, p. 956-964. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.198>
21. TAN, Xianchun, et al. Scenario analysis of urban road transportation energy demand and GHG emissions in China—A case study for Chongqing. *Sostenibilidad*, 2018, vol. 10, no 6, p. 2033. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115512>
22. LIU, Gang, et al. Life cycle assessment of road network infrastructure maintenance phase while considering traffic operation and environmental impact. *Revista de Producción Más Limpia*, 2023, vol. 422, p. 138607. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138607>
23. Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., & Guppy, R. (2021). Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127936>
24. Bulei, C., Todor, M & Heput, T. (2018). Directions for material recovery of used tires and their use in the production of new products intended for the industry of civil construction and pavements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 294, 012064. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/294/1/012064/meta>
25. Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirhanian, S. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579-604. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006>
26. Pourkhorshidi, S., Sangiorgi, C., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2020). Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Unbound Layers of Pavements. *Sustainability*. 12(22), 9386.

<https://doi.org/10.3390/su12229386>

27. Szpotowicz, R., & Tóth, C. (2020). Revision of Sustainable Road Rating Systems: Selection of the Best Suited System for Hungarian Road Construction Using TOPSIS Method. *Sustainability*, 12(21), 8884; <https://doi.org/10.3390/su12218884>
28. Nalbandian, K. M., Carpio, M., & González, Á. (2021). Analysis of the scientific evolution of self-healing asphalt pavements: Toward sustainable road materials. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126107>
29. Xu, S., Tabaković, A., Liu, X., & Schlangen, E. (2018). Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 169, 379-387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.046>
30. Norambuena-Contreras, J., Yalcin, E., Garcia, A., Al-Mansoori, T., Yilmaz, M., & Hudson-Griffiths, R. (2018). Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules. *Construction and Building Materials*, 175, 254-266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.153>
31. Norambuena-Contreras, J., Serpell, R., Vidal, G. V., González, A., & Schlangen, E. (2016). Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. *Construction and Building Materials*, 127, 369-382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.005>
32. Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A. (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials & Design*, 106, 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.095>

33. Miura, N., Sakai, A., Taesiri, Y., Yamanouchi, T., & Yasuhara, K. (1990). Polymer grid reinforced pavement on soft clay grounds. *geotextiles and geomembranes*, 9(1), 99-123. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(90\)90007-Y](https://doi.org/10.1016/0266-1144(90)90007-Y)
34. Biabani, M. M., & Indraratna, B. (2015). An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(3), 240-249. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.002>
35. Khan, M. A., & Puppala, A. J. (2023). Sustainable pavement with geocell reinforced reclaimed-asphalt-pavement (RAP) base layer. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135802. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135802>
36. Wu, M., Tian, W., Liu, F., & Yang, J. (2023). Dynamic behavior of geocell-reinforced rubber sand mixtures under cyclic simple shear loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 107595. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107595>
37. Liu, L., Li, Z., Cai, G., Zhang, J., & Dai, B. (2022). Long-term performance of temperature and humidity in the road embankment constructed with recycled construction and demolition wastes. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131851. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131851>
38. Liu, L., Cai, G., Zhang, J., Liu, X., & Liu, K. (2020). Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A compressive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 126, 109831. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109831>
39. Lu, Y., Zhang, Y., Liu, S., Guo, W., & Xu, F. (2022). Mechanical behaviour and permeability of expansive soils mixed with scrap tire rubbers subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 199, 103580.

<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103580>

40. Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., & Guppy, R. (2021). Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127936>
41. Bamigboye, G. O., Bassey, D. E., Olukanni, D. O., Ngene, B. U., Adegoke, D., Odetoyan, A. O., ... & Nworgu, A. T. (2021). Waste materials in highway applications: An overview on generation and utilization implications on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124581>
42. Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Maghool, F., & Horpibulsuk, S. (2019). Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications. *Journal of Cleaner Production*, 230, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.084>
43. Gedik, A. (2021). An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction. *Construction and Building Materials*, 300, 123980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123980>
44. Balaguera, A., Carvajal, G. I., Albertí, J., & Fullana-i-Palmer, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>
45. Wang, Q., & Di Chen, Z. (2018). Estimation and Analysis of Energy Conservation and Emissions Reduction Effects of Warm-Mix Crumb Rubber-Modified Asphalts during Construction Period. *Sustainability*. 10(12), 4521; <https://doi.org/10.3390/su10124521>

46. Galarcio, L. (2019). Bogota and its inclusion in the use of clean technologies with the construction of roads from modified asphalt mixtures with rubber grain. Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/35894>
47. Wang, F., Hoff, I., Yang, F., Wu, S., Xie, J., Li, N., & Zhang, L. (2021). Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126659. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126659>
48. Bressi, S., Primavera, M., & Santos, J. (2022). A comparative life cycle assessment study with uncertainty analysis of cement treated base (CTB) pavement layers containing recycled asphalt pavement (RAP) materials. *Resources, conservation and recycling*, 180, 106160. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106160>
49. Elliot, T., Carter, A., Ghattuwar, S., & Levasseur, A. (2023). Environmental impacts of road pavement rehabilitation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 118, 103720. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103720>
50. Pei, Z., Yi, J., Xu, M., Ai, X., Cao, J., Hu, W., ... & Feng, D. (2023). Exploration of the design theory of crack-resistant rejuvenator for warm-mix recycled asphalt mixtures with high RAP contents. *Journal of Cleaner Production*, 135855. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135855>
51. Ai, X., Cao, J., Feng, D., Gao, L., Hu, W., & Yi, J. (2022). Performance evaluation of recycled asphalt mixtures with various percentages of RAP from the rotary decomposition process. *Construction and Building Materials*, 321, 126406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126406>
52. Zhang, Z., Wang, J., Song, Z., Wang, Y., Cheng, Z., Guo, Q., ... & Wu, L. (2021). Downregulation of microRNA-199a-5p alleviated lidocaine-induced

- sensory dysfunction and spinal cord myelin lesions in a rat model. *Toxicology letters*, 336, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.11.001>
53. Kan, H., Wang, Y., Wang, D., Sun, H., Zhou, S., Wang, H., ... & Li, M. (2018). Cordycepin rescues lidocaine-induced neurotoxicity in dorsal root ganglion by interacting with inflammatory signaling pathway MMP3. *European Journal of Pharmacology*, 827, 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2018.01.049>
54. Lee, C. H., Kim, K. W., Lee, S. M., & Kim, S. Y. (2022). Downregulated miRNAs associated with auditory deafferentation and compensatory neural plastic changes following single-sided deafness in the inferior colliculi of rats. *Gene*, 845, 146822. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2022.146822>
55. Aten, S., Page, C. E., Kalidindi, A., Wheaton, K., Niraula, A., Godbout, J. P., ... & Obrietan, K. (2019). miR-132/212 is induced by stress and its dysregulation triggers anxiety-related behavior. *Neuropharmacology*, 144, 256-270. <https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2018.10.020>
56. Zhang, L., Xu, L., Wang, Y., Zhang, X., Xue, T., Sun, Q., ... & Hu, Z. (2023). Histone methyltransferase Setdb1 mediates osteogenic differentiation by suppressing the expression of miR-212-3p under mechanical unloading. *Cellular Signalling*, 102, 110554. <https://doi.org/10.1016/j.cellsig.2022.110554>
57. BARBIERI, Diego Maria, et al. Assessment of carbon dioxide emissions during production, construction and use stages of asphalt pavements. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2021, vol. 11, p. 100436. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100436>
58. CHOI, Jae-ho. Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement. *Journal of cleaner production*, 2019, vol. 209, p. 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.226>

59. WHITE, Philip, et al. Modeling climate change impacts of pavement production and construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, vol. 54, no 11, p. 776-782. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.007>
60. CORREIA, Natalia de Souza; ROCHA, Sabrina Andrade. Reinforcing effect of recycled polypropylene fibers on a clayey lateritic soil in different compaction degrees. *Soils and Rocks*, 2021, vol. 44. <https://doi.org/10.28927/SR.2021.061520>
61. XIN, Jiyu; AKIYAMA, Mitsuyoshi; FRANGOPOL, Dan M. Sustainability-informed Management Optimization of Asphalt Pavement Considering Risk Evaluated by Multiple Performance Indicators Using Deep Neural Networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, p. 109448. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109448>
62. MISHRA, Anshumali; DAS, Sarat Kumar; REDDY, Krishna R. Characterization and environmental sustainability of open pit coal mine overburden waste rock as pavement geomaterial. *Transportation Geotechnics*, 2023, vol. 42, p. 101094. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101094>
63. ZAUMANIS, Martins; MALLICK, Rajib B.; FRANK, Robert. 100% hot mix asphalt recycling: Challenges and benefits. *Transportation Research Procedia*, 2016, vol. 14, p. 3493-3502. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.315>
64. PLATI, Christina. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 211, p. 539-555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>
65. SUN, Wenjuan, et al. The state of the art: Application of green technology in

- sustainable pavement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9760464>
66. AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 186, p. 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
67. FARINA, Angela, et al. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 117, p. 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>
68. SANTOS, João, et al. SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 206, p. 524-540. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.308>
69. ENFRIN, Marie; GIUSTOZZI, Filippo. Recent advances in the construction of sustainable asphalt roads with recycled plastic. *Polymer International*, 2022, vol. 71, no 12, p. 1376-1383. <https://doi.org/10.1002/pi.6405>
70. SANTAMOURIS, Mattheos. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 207, p. 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
71. KASEER, Fawaz; MARTIN, Amy Epps; ARÁMBULA-MERCADO, Edith. Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 211, p. 974-987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286>

- 72.XU, Meng; ZHANG, Yuzhen. Study of rejuvenators dynamic diffusion behavior into aged asphalt and its effects. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 261, p. 120673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120673>
- 73.CHANG, Qiuhaio, et al. An atomistic model of aged asphalt guided by the oxidation chemistry of benzylic carbon with application to asphalt rejuvenated with a triglyceride. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 400, p. 132743. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132743>
- 74.DING, Yongjie, et al. Use of molecular dynamics to investigate diffusion between virgin and aged asphalt binders. *Fuel*, 2016, vol. 174, p. 267-273. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.022>
- 75.MANNAN, Umme Amina; AHMAD, Mohiuddin; TAREFDER, Rafiqul A. Influence of moisture conditioning on healing of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 146, p. 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.087>
- 76.XIANG, Hao, et al. Key factors and optimal conditions for self-healing of bituminous binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, vol. 31, no 9, p. 04019172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.145>
- 77.SU, Jun-Feng, et al. Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 106, p. 317-329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.120>
- 78.SUN, Yihan, et al. The healing properties of asphalt mixtures suffered moisture damage. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 127, p. 418-424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.048>
- 79.LV, Quan; HUANG, Weidong; XIAO, Feipeng. Laboratory evaluation of self-healing properties of various modified asphalt. *Construction and Building*

Materials, 2017, vol. 136, p. 192-201.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.045>

80. LI, Chunyan, et al. Study on the Factors Affecting the Self-healing Performance of Asphalt Mixture and Pavement Based on Fracture Mechanics and Calculation Formula. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, p. 103954. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103954>
81. ALZIOUD, Mahmoud; ABBAS, Ala; HUANG, Qindan. Effect of traffic monitoring period on mechanistic-empirical pavement design. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 360, p. 129584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129584>
82. CALABI-FLOODY, A.; MIGNOLET-GARRIDO, C.; VALDÉS-VIDAL, G. Evaluation of the effects of textile fibre derived from end-of-life tyres (TFELT) on the rheological behaviour of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 360, p. 129583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129583>
83. TAFRESHI, SN Moghaddas; AMIRI, A.; DAWSON, A. R. Sustainable use of End-of-Life-Tires (ELTs) in a vibration isolation system. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 405, p. 133316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133316>

## Anexos

### Anexo 1: Tabla de categorización

Ámbito temático	Problema de la investigación	Preguntas de investigación	Objetivo general	Objetivos específicos	Categorías	Subcategorías
Evaluación e identificación de Procesos constructivos de pavimentos sostenibles y su aporte frente al cambio climático	Debido al desarrollo económico de cada país, la expansión de pavimentos sigue en aumento, necesitando la construcción de amplias vías, estas requieren materiales cada vez menos dañinos para la salud de las personas y a la vez reducir el	¿Los nuevos métodos de construcción vial optan por un proceso sostenible y eficiente para su aplicación frente al cambio climático a nivel mundial?	Generar nuevos conocimientos que contribuya al sector de la construcción vial a través de la identificación de procesos constructivos sostenibles frente al cambio climático de los últimos años.	Identificar los métodos de construcción de pavimentos ecológicos utilizados en diferentes naciones, así como su viabilidad y adaptación en el medio ambiente.	Procesos constructivos de pavimentos que buscan disminuir la contaminación ambiental por el uso de recursos no renovables.	-Tipos de procesos constructivos -Implicaciones de datos estadísticos de uso de pavimentos sostenibles. - Materiales agregados en mezcla asfáltica

	<p>impacto ambiental, obteniendo resultados favorables.</p>	<p>¿Garantizan los métodos tradicionales sostenibilidad y seguridad en una infraestructura vial? Además ¿se puede garantizar que el ciclo de vida de un pavimento sea largo y sostenible a la vez?</p>		<p>Evaluar innovaciones en la construcción de pavimentos, con el objetivo de lograr un tránsito sostenible y eficiente.</p>	<p>-Composición de mezclas bituminosas y medidas unitarias de materiales constituyentes utilizados</p> <p>-Comparación de tecnologías ecológicas para la captura de energía en pavimentos.</p>	<p>-Aplicaciones para la resistencia de pavimentos.</p> <p>- Vida útil y frecuencia de mantenimiento</p>
		<p>¿Los desechos de los materiales de un solo uso pueden ser procesos para la construcción de</p>		<p>Determinar los impactos que tiene la construcción de carreteras con métodos</p>	<p>Materiales desechados en la construcción de pavimentos asfálticos.</p>	<p>-Eficiencia Energética en el Ciclo de Vida (GER) vinculada a la fabricación de caucho granulado (CR)</p>

		<p>infraestructuras viales?</p> <p>¿Qué pasaría si se aplican métodos innovadores de otros países en Perú?</p>		<p>innovadores identificados.</p>	<p>-Impacto de emisiones potencias del calentamiento global (GWP) vinculada a la fabricación de caucho granulado (CR).</p> <p>-Estadísticas de dióxido de carbono que generan las construcciones de pavimentos</p>	<p>-Tecnología de reducción.</p> <p>-Ahorro de energía.</p> <p>- Estadísticas de dióxido de carbono e impacto ambiental que generan las construcciones de pavimentos.</p> <p>-Sustituir la electricidad por el gas natural.</p>
--	--	--	--	-----------------------------------	--	---