

**Análisis cualitativo del impacto ambiental de un asfalto RAP y asfalto virgen  
a través de matriz de Leopold**

<sup>1</sup>Angie Cepeda Vargas

<sup>2</sup>Laura Alejandra Trujillo Cortes

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Director: Zuleny Irene Cuarán Cuarán

Asesor Metodológico: Luis Efrén Ayala Rojas

20 de junio de 2024

---

<sup>1</sup> Estudiante de la Universidad La Gran Colombia - correo: [acepedav@ulagrancolombia.edu.co](mailto:acepedav@ulagrancolombia.edu.co)

<sup>2</sup> Estudiante de la Universidad La Gran Colombia - correo: [ltrujillo2@ulagrancolombia.edu.co](mailto:ltrujillo2@ulagrancolombia.edu.co)

### **Resumen**

Este artículo de investigación se realiza dentro del Semillero de investigación de Materiales de Construcción y Sostenibilidad (SEIMAS), el cual se basa en el uso del asfalto recuperado RAP (Reclaimed Pavement Asphalt) por sus siglas en inglés, donde esta recuperación del asfalto se ha convertido en una técnica sostenible e innovadora. En este estudio se evalúa la caracterización del asfalto recuperado desde un componente cualitativo no experimental y el análisis de impacto ambiental por medio de la matriz de evaluación ponderativa de Leopold para el asfalto virgen desde la extracción de los materiales vírgenes, el procesamiento, transporte y utilización, y el asfalto recuperado desde su recuperación, tratamiento y uso. Dentro de los resultados de la caracterización del asfalto recuperado indican que se deben agregar agentes rejuvenecedores para que el material recupere sus propiedades físicas y mecánicas. Adicionalmente, con la evaluación y análisis cualitativo se obtuvieron valoraciones con impactos negativos críticos al procesar y utilizar el asfalto virgen, en cuanto al asfalto recuperado se obtuvieron impactos positivos muy importantes al ambiente, por lo que utilizar este material para la generación de un nuevo elemento de construcción como adoquines convencionales de tráfico livianos se considera una alternativa sostenible y sustentable para el medio ambiente. Este trabajo de investigación presenta información de importancia para la utilización del asfalto recuperado y los beneficios que genera, promoviendo la conservación y el cuidado de los recursos naturales.

*Palabras clave: Impacto Ambiental, Asfalto RAP, Materiales de construcción, Matriz de Leopold.*

### **Abstract**

This article has done by the research group on Construction Materials and Sustainability (SEIMAS), which is based on the use of reclaimed pavement asphalt (RAP), where this asphalt recovery has become a sustainable and innovative technique. This study evaluates the characterization of reclaimed asphalt from a non-experimental qualitative component and the environmental impact analysis by means of Leopold's weighting evaluation matrix for virgin asphalt from the extraction, processing, transport and application, and reclaimed asphalt from its recovery, treatment, and use. The results of the characterization of the recovered asphalt indicate that rejuvenating agents should be added so that the material recovers its physical and mechanical properties. Additionally, with the qualitative evaluation and analysis, critical negative impact evaluations were obtained when processing and using virgin asphalt; as for the recovered asphalt, very important positive impact evaluations were obtained for the environment, so using this material for the generation of a new construction element such as conventional light traffic pavers is considered a sustainable and environmentally sustainable alternative. This research work presents valuable information on the use of reclaimed asphalt and the benefits it generates, promoting the conservation and care of natural resources.

*Keywords: Environmental impact, RAP, Construction materials, Leopold Matrix*

De acuerdo con Pinzón (2013), “En Bogotá se generan anualmente un promedio de 10.500.000 m<sup>3</sup> de escombros, por parte de las empresas públicas generadoras de obras” (p.2), la Secretaría Distrital de Ambiente tiene como objetivo reducir el impacto que generan los residuos sólidos de construcción y demolición (RCD) debido a que actualmente, estos residuos no cuentan con un adecuado manejo y disposición final, terminando depositados en las fuentes hídricas y lugares en donde se afecta el medio ambiente, por lo que se convierten en un problema al generar la degradación progresiva de los ecosistemas y la afectación del espacio público en general.

Se establece en la Resolución 1115 (2012), define en su artículo 4, todas las empresas públicas que son generadoras de residuos sólidos de construcción y demolición y de acuerdo con el marco de la gestión integral de residuos sólidos, a partir del año 2013 deberán realizar la utilización como mínimo del 25% de estos residuos.

De acuerdo con Growing Buildings (2019), “La construcción es uno de los mayores consumidores de materias primas. El sector cementero es responsable de alrededor del 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, principal gas productor del efecto invernadero y cambio climático” (párr. 2). Así mismo, en la explotación de canteras la obtención de material granular se realiza mediante métodos explosivos y mecánicos, estas explotaciones se realizan en zonas montañosas, previo estudios que indican que el material cumple con características físicas y químicas para realizar todo tipo de infraestructura, pero realizar estas actividades conlleva a generar un fuerte impacto medioambiental de manera que al finalizar el ciclo de vida de estas canteras no se logra la rehabilitación morfo ecológica del sitio explotado, al mismo tiempo se presentan alteraciones en las zonas de recarga de acuíferos, contaminación por polvo, inestabilidad, lo que conduce a derrumbes y desplazamientos del suelo y graves afectaciones al paisaje. En resumen, como indica Aceves, et al. (2020), el ser humano tiene gran responsabilidad por las actividades que

desarrolla debido a que estas por mínimo que sean causan un impacto negativo al ambiente lo que puede contribuir significativamente con el cambio climático.

Por otro lado, el petróleo, es un recurso natural no renovable y es el recurso con el que se realiza la mayor parte de actividades a nivel mundial, de acuerdo con Schwarz (1993), el petróleo se extrae por medio de perforaciones verticales en el suelo hasta alcanzar los depósitos, este proceso se debe realizar por medio de presión y en algunos casos inyectar agua y gas, una vez obtenido el material se lleva a las refinerías para realizar un tratamiento de separación por fracciones, para obtener el asfalto se realiza un tratamiento por destilación al vacío lo que implica un proceso de calentamiento de hornos a temperaturas elevadas. Del mismo modo, al lograr esta obtención del recurso natural se presentan alteraciones a los ecosistemas, como pérdidas de flora y fauna, contaminación del agua superficial y subsuperficial, erosiones, desplazamiento del terreno, salinización del agua, contaminación del aire debido a las emisiones de material particulado, incendios provocados, crecimientos de ciudades desordenadas, grandes cantidades de material removidos para la construcción de oleoductos y la creación de nuevas carreteras que impactan gravemente al ecosistema y el ambiente.

El pavimento asfáltico recuperado conocido como Asfalto RAP (Reclaimed Pavement Asphalt) por sus siglas en inglés, “es un material que se recupera mediante el fresado de las vías en donde el pavimento flexible ya ha cumplido con su vida útil”, (Arguello, 2019, p. 1), al retirar este material de las vías, Caputo, et al. (2022) señala que resulta una combinación entre agregados y asfalto envejecido, el cual contiene porcentajes de asfalto entre el 4 y 6% que al combinarlos con agentes rejuvenecedores pueden alcanzar niveles similares de resistencia comparados con un asfalto convencional reduciendo su rigidez y equilibrando su estructura de máltenos y asfáltenos.

Existen varios métodos para reciclar el asfalto RAP como puede ser en caliente o en frío, en los países de Europa y EE. UU. se recicla más del 80% del material para construcción de carreteras, (Ortiz et al.,2012), lo que conlleva a tener ahorros en uso de energías no renovables, bajas emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, realización de proyectos de construcción con materiales amigables con el ambiente, así como promover la sostenibilidad ambiental en la ingeniería civil, reduciendo la utilización de materiales de construcción, utilizando eficientemente los materiales usados, para incorporarlos nuevamente en la cadena de valor generando una economía circular.

Es la economía circular de acuerdo con Marcet et al. (2018), "un nuevo modelo económico que busca mantener los materiales, los productos y sus componentes en procesos circulares, mediante los cuales pueden ser reintegrados en la cadena de valor una vez terminada su vida útil"(p. 11 ), es por ello que resulta importante incorporar en los procesos estrategias para utilizar lo menos posible los recursos naturales, reducir las emisiones en todo el ciclo de vida del material, extender la vida útil y realizar un adecuado aprovechamiento del material una vez que este finalice su proceso y así volverlo a incorporar en el mercado.

El presente proyecto de investigación se centra en realizar el análisis de manera cualitativa, realizando una caracterización del asfalto recuperado, junto con la reutilización de este material para la fabricación de adoquines que sean funcionales para tránsito peatonal y finalmente un análisis cualitativo de la evaluación del impacto ambiental por medio de la matriz de impactos ponderativa de Leopold. Los objetivos de este proyecto de investigación se centran en analizar la viabilidad del aprovechamiento y uso de los residuos sólidos de construcción y demolición específicamente el asfalto recuperado para el diseño de adoquines funcionales para tránsito peatonal, mediante la caracterización cualitativa no experimental del material y realizar

una evaluación del impacto ambiental que se produce con la utilización del asfalto reciclado mediante una matriz de evaluación ponderativa de tipo cualitativa matriz de Leopold, esta matriz es un cuadro de doble entrada que permite realizar la evaluación de los impactos ambientales generados en el sistema biótico, abiótico y socioeconómico por causa de las acciones del proyecto de investigación realizando un contraste entre el asfalto recuperado y el asfalto virgen.

Para alcanzar los objetivos, en el desarrollo del proyecto se presenta un enfoque cualitativo no experimental con una revisión exhaustiva de antecedentes, revisión de literatura y estudios de caso, lo que permitirá tener una visión más detallada sobre la caracterización del material y los impactos que puede generar la utilización del material.

### **Revisión de Literatura**

En Colombia se tienen parámetros para realizar el aprovechamiento de los residuos sólidos de construcción en donde la Resolución 1257 (2021), define en su artículo 8,

La Estrategia Nacional de Economía Circular promueve el aprovechamiento de subproductos y el cierre de ciclos de materiales, priorizando dentro de sus metas y acciones la revalorización de RCD como uno de los mecanismos para la generación de sistemas productivos eficientes y sostenibles ambiental, social y económicamente.

De igual manera en el artículo 19 de la misma resolución se definen las metas de aprovechamiento de los RCD en donde se debe alcanzar como mínimo el 30% de aprovechamiento de estos residuos para el uso en los proyectos de infraestructura que se estén desarrollando.

El origen del asfalto parte de la producción de petróleo el cual es un hidrocarburo que se extrae como un recurso natural no renovable y se le realiza una serie de tratamientos para obtener

diferentes productos, según Schwarz (1993), el petróleo es una mezcla de hidrocarburos que es acompañada de varias sustancias las cuales contienen altos niveles de azufre, nitrógeno y oxígeno, a este material se le realizan diferentes procesos para fraccionarlo y obtener diversos productos entre estos es asfalto. Del mismo modo Schwarz (1993), menciona que para obtener el asfalto tiene que pasar por un proceso de destilación al vacío donde se aprovecha el crudo reducido que queda en los fondos producto de la destilación primaria, con el fin de no desintegrar las moléculas de los hidrocarburos. Este asfalto se utiliza en las actividades de construcción de carreteras y reciben el nombre de cementos asfálticos, de acuerdo con Valenzuela (2003), este cemento se prepara especialmente para pavimentación de carreteras debido a que es un material resistente para la función que cumple, además es impermeable, adhesivo y duradero.

Al explotar los pozos petroleros se genera degradación de los recursos naturales no renovables, esta actividad requiere la construcción de nuevas carreteras y la construcción de oleoductos lo cual conlleva a tener contaminación en la flora y fauna, así como la degradación del suelo, la geomorfología, afectaciones en la calidad del agua y aire debido a los constantes derrames de petróleo que generan grandes emisiones de dióxido de carbono, Aceves (2020), indica que todos los combustibles fósiles que se queman a diario mundialmente y se liberan en la atmósfera generan emisiones de gases de efecto invernadero provocando un desequilibrio climático, es decir un aumento significativo de la temperatura. En general toda la actividad para extraer el petróleo genera contaminación y deteriora los ecosistemas, adicionalmente la falta de políticas serias que ayuden a regular la explotación son factores que afectan el medio ambiente, según Avellaneda (1990), la mayoría de las actividades industriales requiere de la utilización de

petróleo y para fabricarlo, además debe pasar por diferentes fases que destruyen y desequilibran los hábitats naturales.

Por otra parte, en el informe IPCC (2014), mencionan que las actividades económicas y demográficas contribuyen a un aumento significativo de las emisiones de dióxido de carbono. Lo que resulta preocupante debido a que los recursos naturales se agotan y toda la actividad humana no para de crecer, haciendo que el planeta se caliente y generando desestabilidad en el medio ambiente.

Ahora bien, para la fabricación del asfalto y la construcción de carreteras se requiere la utilización de materiales granulares, los cuales se deben extraer de canteras y como se puede constatar en el Decreto 2655 (1988), que define en su artículo 112, las canteras son un área de explotación que se realiza a cielo abierto con el fin de extraer materiales para las actividades de construcción. Así mismo menciona Arroyave, (2000), las canteras causan un fuerte impacto a nivel ambiental debido a que con las actividades que se desarrollan hay una gran pérdida y deterioro del suelo, agua, flora, fauna y en general contaminación ambiental.

La explotación de las canteras genera fuertes impactos al medio ambiente los cuales al terminar su vida útil se intentan recuperar, pero no vuelven a regenerarse, de acuerdo con Arroyave (2000), los impactos con mayor porcentaje de afectación que generan por la actividad de la extracción de materiales son el deterioro de la morfología, erosiones con intensidad, contaminación por polvo o gases, derrumbes y deslizamientos, afectación de acuíferos, destrucción de bosques y alteración del paisaje.

De acuerdo con la Secretaría Distrital de Ambiente (2021), los residuos sólidos de construcción y demolición resultan de las actividades de demolición y excavación generados por parte de empresas públicas en ocasión a las obras civiles, del mismo modo la Secretaría de

Ambiente (2021) indica que “son un factor de deterioro ambiental y paisajístico para la ciudad, su inapropiado manejo genera una afectación tanto al espacio público como a los elementos que componen la Estructura Ecológica Principal (EEP)”(párr. 2), por no realizar y tener conocimiento del apropiado manejo. De este modo como menciona Aceves et. al (2020), se debe evitar el uso de combustibles fósiles y de materiales naturales no renovables para reducir el impacto ambiental que se genera diariamente.

Por otra parte, el asfalto recuperado o asfalto RAP, es un material que se encuentra dentro del grupo de los residuos sólidos de construcción y demolición. Para obtener este asfalto se debe realizar un proceso de fresado con un tipo de maquinaria especial para esta actividad que pueden ser escarificadoras y fresadoras de lo que resulta una combinación entre agregados y asfalto, por lo que de acuerdo con Caputo, et al. (2022) este asfalto ha sufrido con el paso del tiempo un envejecimiento y deterioro y se ha comprobado por medio de ensayos de laboratorio que los porcentajes de asfalto que presenta este material varían entre el 3% y el 6%, que al combinarlo con agentes rejuvenecedores pueden recuperar sus propiedades mecánicas, reequilibrando su estructura con el fin de que tenga las condiciones adecuadas como las de un betún nuevo. Adicionalmente Ortiz et al. (2012) menciona que existen diferentes métodos para realizar el reciclado del material que pueden ser en caliente o en frío, además, menciona que países como Europa y EE. UU. se recicla más del 80% del RAP para la construcción de carreteras.

El uso de residuos de construcción y demolición cada vez aumenta debido a la evidente escasez de los recursos naturales y a la degradación que se realiza al explotar los recursos naturales, es así como la reutilización y aprovechamiento eficiente de los residuos para la creación de nuevos materiales resulta benéfico para el medio ambiente generando una economía circular en donde según Cerdá et al. (2016), actualmente existe un modelo económico lineal que

consiste en tomar, utilizar y tirar pero se debe ir hacia el cambio es decir hacia un modelo de economía circular que preserve y aumente el capital natural, optimice los recursos, y haga que los productos y materiales estén siempre en circulación lo cual alargue su vida útil, todo esto ayuda y contribuye con la reducción del daño causado como la contaminación del aire, suelo, agua, emisiones de sustancias tóxicas y en general al cambio climático.

La utilización del asfalto RAP como un nuevo material de construcción es una alternativa innovadora, como menciona Arguello (2019), el propósito de utilizar el asfalto RAP es para lograr sostenibilidad y mayor economía ahorrando el uso de materiales vírgenes mitigando el impacto ambiental, en Colombia se tienen diferentes decretos, leyes y resoluciones como la 1257 de 2021, que promueven el uso de asfalto RAP y en general de los residuos sólidos de construcción y demolición.

Los beneficios que presenta la reutilización del asfalto RAP son muchos a nivel ambiental, de acuerdo con Caputo et al. (2022), es una forma de implementar la economía circular conservando los recursos y salvaguardando el medio ambiente, reciclar el asfalto es una manera adecuada de reducir la utilización de materiales vírgenes pero se aclara que este material debe pasar por un proceso de rejuvenecimiento para recuperar sus propiedades mecánicas debido a que por el uso ya ha sufrido un envejecimiento.

Diferentes investigaciones han demostrado que al mezclar el asfalto recuperado con otros materiales como el granulo de caucho presentan un mejor comportamiento elástico, (Ladino & Rubiano, 2017), del mismo modo se ha realizado la caracterización del material desde la granulometría, dando como resultado una granulometría bien gradada, así mismo el análisis cualitativo con porcentajes de asfalto que varían entre el 4.3% al 6.5%. Además de acuerdo con Mora (2020), reutilizar el material por el método en frío es más viable, primero porque no se

emiten altos porcentajes de dióxido de carbono al ambiente teniendo un ahorro energético y segundo por el ahorro económico al no tener que desplazar el material a las plantas y usar las plantas.

A partir de los anteriormente planteado, realizar la evaluación del impacto ambiental que tienen las acciones de la utilización del asfalto virgen y el asfalto RAP, arrojaría un indicador para conocer si es viable ambientalmente utilizar el RAP, estas evaluaciones de impacto ambiental se realizan en la fase preliminar de un proyecto para conocer qué tan viable es la realización del mismo, en la evaluación se identifican y predicen los impactos que puede tener la ejecución del proyecto sobre el medio ambiente, los cuales pueden ser positivos o negativos y dan un análisis de manera cualitativa o cuantitativa y se realiza a través de diferentes metodologías.

En el estudio de Guzmán (2021), se desarrolló un estudio de la utilización de dos tipos de pavimentos, en el cual se realizó la valoración cualitativa por medio de la matriz de Leopold y se evidenció que había mayor impacto ambiental al realizar la pavimentación con pavimento flexible, los factores ambientales en donde se evidenció mayor impacto fueron, el derrame de líquidos peligrosos, vertimiento al suelo desnudo y alteración de las propiedades físicas del suelo, gradiente térmico, emisión de gases, suspensión de material particulado, niveles de ruido ambiental, salud y seguridad.

Por otra parte en el estudio realizado por Yantorno (2021), en el cual se realizó la evaluación del impacto ambiental de la generación de residuos sólidos en el barrio patio bonito de la ciudad de Bogotá, y por medio de la matriz de Leopold evidenció que los factores ambientales más afectados por la generación desmedida de los residuos son el suelo, calidad del aire, agua, flora, también las emisiones de gases y la suspensión del material particulado tuvo

una calificación crítica y el manejo inadecuado de los residuos sólidos de construcción y demolición generando degradación del suelo y pérdida de biodiversidad.

Finalmente, la matriz de Leopold fue desarrollada por Luna B. Leopold, la cual es una herramienta que funciona para evaluar los impactos ambientales que se causen con las acciones de los proyectos, esta matriz da como resultado información para evaluar los impactos causados en los componentes bióticos, abióticos y socioeconómicos, Leopold et al. (1971). El diligenciamiento de la matriz se realiza con la magnitud e importancias, estos valores se evalúan de manera positiva y negativa dependiendo el tipo de proyecto, en un rango de 1 a 10 de acuerdo con la intensidad y la alteración, si es baja, media, alta y muy alta, los valores se introducen en signo negativo, por otro lado, la importancia también se evalúa en rangos de 1 a 10 de acuerdo con la duración y la influencia según si es temporal, media y permanente así mismo si es puntual, local, regional o nacional, estos valores van en signo positivo.

Ahora bien, para el proyecto de investigación los factores que impactan y se analizan en las diferentes acciones con el uso del asfalto RAP y el asfalto virgen se relacionan en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Valoraciones y factores ambientales del proyecto*

VALORACIONES	FACTORES AMBIENTALES
Medio Abiótico (Características Físicas y Químicas)	Geomorfología Suelo Materiales de construcción Calidad del aire Temperatura Calidad del agua
Medio Biótico (Condiciones Biológicas)	Fauna Flora
Medio Socioeconómico (Factores Culturales)	Usos del territorio Paisaje Socioeconómico

*Elaboración propia*

Por otra parte, de acuerdo con Dellavedova (2011), existen diferentes acciones que pueden causar los impactos ambientales las cuales se incluyen de acuerdo con la naturaleza de cada proyecto y el impacto que se requiere evaluar. Para el proyecto se contemplaron en el análisis las acciones relacionadas en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Acciones que generan el impacto ambiental del proyecto*

<b>ACCIONES DE GENERACIÓN DEL IMPACTO</b>	
Modificación del régimen	Superficie o Pavimento Ruido y Vibraciones
Transformación de Territorio y Construcción	Preparación del terreno Carreteras y caminos
Extracción de Recursos	Excavaciones Transporte de materiales
Procesos	Refinerías de petróleo
Alteraciones del terreno	Paisaje
Recursos renovables	Reciclado de residuos
Tratamiento de Residuos	Derrames de pozos de petróleo
Otros	Fabricación de adoquines Instalación de adoquines Mantenimiento

*Elaboración propia*

### **Metodología**

Este proyecto es de tipo exploratoria con enfoque cualitativo no experimental, debido al uso de metodologías como matrices de información y cuadros sinópticos con el fin de sintetizar y compilar la información de las principales fuentes de investigación. Para el desarrollo de la presente investigación se establecen tres fases; la primera fase se compone de una recopilación de información orientada a una evaluación crítica para establecer el estado del arte del tema en estudio, la segunda fase se ha enfocado en la recopilación y síntesis de información describiendo las características físicas y mecánicas de forma cualitativa del asfalto recuperado para su

transformación como alternativa sostenible y amigable con el medio ambiente y finalmente en la tercera fase utilizando la información analizada, se procede con la determinación de la matriz del impacto ambiental por medio del método cualitativo desarrollando la matriz de evaluación ponderativa de Leopold, la cual dará a conocer cuánto es el impacto que causa el uso del asfalto virgen y el asfalto recuperado.

**Tabla 3.**

*Metodología.*

Objetivo	Metodología propuesta	Actividades desarrolladas	Herramientas / Ensayos
Investigar la viabilidad ambiental y el impacto que tiene la utilización del asfalto virgen y asfalto recuperado como materia prima principal mediante el aprovechamiento de los residuos sólidos de construcción y demolición.	Recopilación de Información y Revisión Bibliográfica	Consulta y análisis del estado del arte <ul style="list-style-type: none"> <li>● Residuos sólidos de construcción y demolición en Colombia</li> <li>● Aprovechamiento de residuos sólidos de construcción y demolición</li> <li>● Pavimento asfáltico reciclado (RAP)</li> <li>● Pavimentos Articulados</li> </ul>	Bases de datos y documentos publicados brindados por la universidad como Science Direct, Scopus, E-Collection, etc.
Establecer y plantear una metodología para evaluar las características físicas y mecánicas de los residuos sólidos de construcción específicamente el asfalto recuperado.	Caracterización cualitativa del asfalto RAP	Determinación de la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados Determinación cuantitativa del asfalto  Determinación de la resistencia a la deformación plástica Determinación de peso unitario	Análisis granulométrico de agregados INVE-213-13 Extracción de asfalto en mezclas de pavimentos INVE 732-13 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas INVE 748-13 Gravedad Específica BULK y densidad de mezclas asfálticas INVE 734-13
Evaluar el impacto ambiental del proceso del asfalto virgen y recuperado desde la extracción del petróleo, fabricación del asfalto, transporte y colocación. Realizar la evaluación del impacto ambiental del aprovechamiento del asfalto RAP comparándolo con la utilización del asfalto virgen como alternativa para fabricación de adoquines para tráfico liviano.	Determinación del impacto ambiental	Identificación de Impactos Claves  Resultado de la Valoración de los Impactos  Medidas de Mitigación	Matrices de información y cuadros sinópticos

*Elaboración propia*

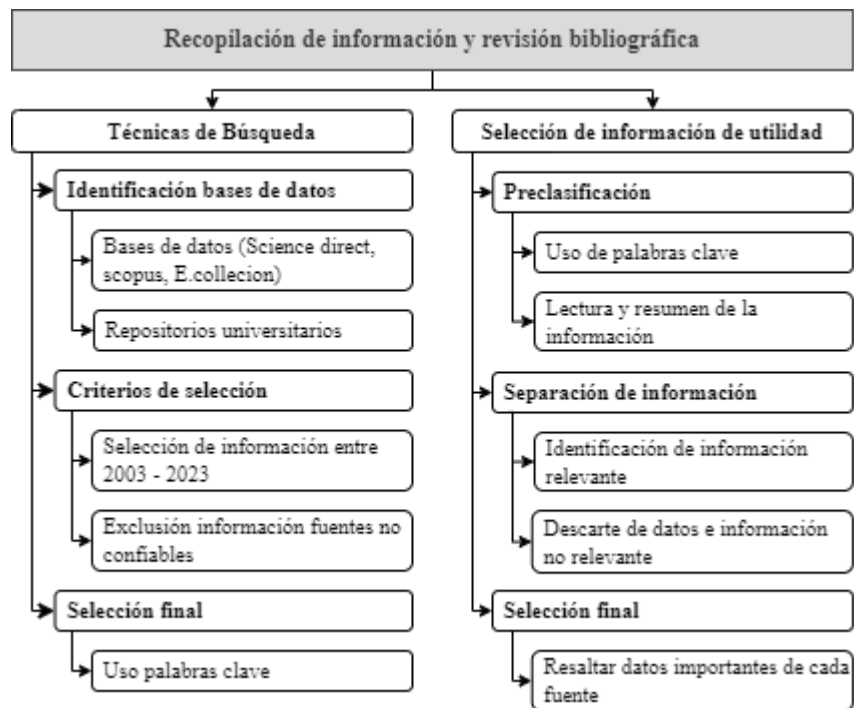
### Recopilación de información y revisión bibliográfica

Para continuar con el proceso de investigación se indaga en la problemática para así identificar las distintas técnicas de búsqueda en donde se realiza la recopilación de información identificando las distintas bases de datos, repositorios y documentos públicos brindados por la

universidad, en cuanto a los criterios de selección se realiza mediante el uso de palabras clave y selección de información según su utilidad de bases de datos que datan entre los años 2003 al 2023. Una vez seleccionada esta información se realiza el análisis y compilación de información de interés conformando así el respectivo estado del arte.

### Figura 1.

*Proceso recopilación de información y revisión bibliográfica.*



*Elaboración propia*

### Caracterización cualitativa del asfalto RAP

Para realizar la caracterización cualitativa del asfalto recuperado se realizó la selección de 5 fuentes bibliográficas con el fin de realizar un análisis de las características físicas y mecánicas del asfalto recuperado en distintos usos y diseños de mezclas.

**Tabla 4.***Características físicas del RAP.*

Tipo de Propiedades	Características	Rango de valores
Físicas	Peso unitario	1940 - 2300 kg/m <sup>3</sup> (120 - 140 lb/ft <sup>3</sup> )
	Contenido de asfalto	Máximo: 7% - 8% Normal: 4,5% - 6% Rango Máximo: 3% - 7%

*Tomado de:* “Análisis aplicativo del pavimento asfáltico recuperado (RAP) en Colombia” por Cueto, 2022.

(<https://hdl.handle.net/20.500.12494/45691>)

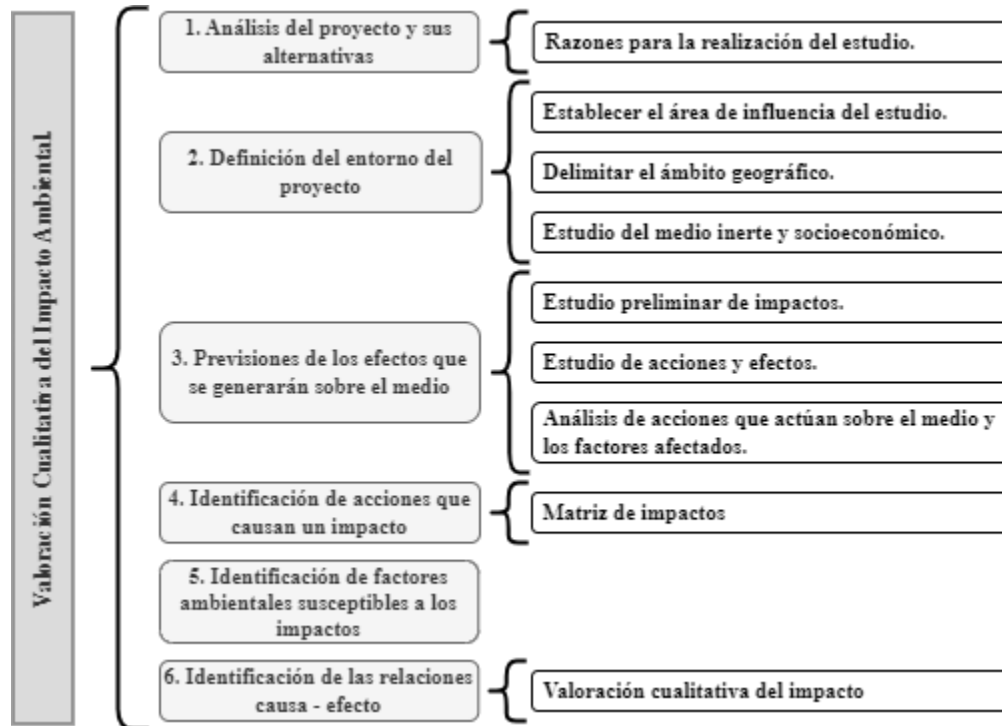
Con el fin de consolidar la información de los 5 informes seleccionados, en la Tabla 5 se realiza la clasificación de los distintos ensayos e información de interés para la realización del análisis de datos según las características físicas y mecánicas del asfalto RAP mencionados en la Tabla 4.

### **Determinación del impacto ambiental.**

Para la determinación del impacto ambiental se realizará un modelo cualitativo utilizando la metodología de la matriz de evaluación ponderativa mayormente conocida como Matriz de Leopold, debido a que evalúa el impacto ambiental sobre las acciones y la calidad del medio ambiente con el fin de interpretar el impacto.

**Figura 2.**

*Valoración cualitativa del impacto ambiental*



*Elaboración propia*

## Resultados

### Consolidación de información.

Los datos consolidados en la Tabla 5 hacen referencia a los ensayos obtenidos de los informes seleccionados sobre la fabricación de adoquines mediante un sistema de aprovechamiento de residuos sólidos y al uso del asfalto recuperado mediante distintas técnicas y uso de mezclas.

**Tabla 5.***Revisión de informes*

Informe	Información	Tipo de Mezcla	Caracterización del asfalto	Análisis Granulométrico	Extracción de asfalto	Estabilidad y Flujo	Peso unitario	Resistencia a la compresión	Resultado
Fabricación de adoquín a partir de un sistema de aprovechamiento de escombros en obra. (Martínez & Poveda, 1985)	Las muestras tomadas para la realización del estudio corresponden al material de obra debidamente triturado.	Aditivos aglomerantes (cal hidratada y cemento portland)		La granulometría realizada indica que el material corresponde a un material homogéneo				110 Mpa	El material reciclado se considera óptimo dentro del sistema de aprovechamiento de escombros ya que supera lo establecido para las pruebas de flexo tracción y compresión.
Adoquines en Asfalto Reciclado y Grano de Caucho Reciclado "CGR" (Ladino & Rubiano, 2017)	Las muestras tomadas para la realización del estudio son provenientes del fresado.	Emulsión asfáltica en frío.	5% de asfalto	La granulometría realizada dio como resultado mal gradada lo cual requiere un mejor planteamiento de mezcla	4.5% de asfalto	1.2 kN/mm	1950 kg/m <sup>3</sup>	69.6 Mpa	El material reciclado presenta mejor comportamiento elástico con la presencia de GCR mitigando el agrietamiento del elemento y su resistencia a la humedad.
Comparación de asfalto convencional frente a asfalto modificado con material orgánico y granulo de caucho. (Montejo & Nieto, 2020)	Material obtenido de la planta de producción del Tunjuelo en Bogotá.	Emulsión asfáltica en caliente. MDC-19	Porcentaje de asfalto entre el 5% y 7%	La granulometría realizada contiene mayoría del material grueso y poco finos.	5.5% de contenido óptimo	3.05 kN/mm	2250 kg/m <sup>3</sup>		El material modificado con mejor comportamiento es el granulo de caucho de llantas, ya que presenta bajos porcentajes de vacíos asegurando una mejor compactación.
Aprovechamiento de reciclado RAP: para el mejoramiento de las vías terciarias de Colombia. (Mora, 2020)	Las muestras de material son tomadas de la planta de asfaltos de la unidad de mantenimiento vial de Bogotá.	Emulsión asfáltica en caliente de rotura lenta CRL-1	Porcentaje de asfalto del 9%	La granulometría realizada se encuentra bien gradada	5.4% de asfalto		2255 kg/m <sup>3</sup>		Se considera que el material reciclado en frío es el más viable.
Evaluación del impacto del uso de RAP en las propiedades de mezclas asfálticas tibias con tecnología de espumado. (Ortiz, 2021)	El material procede de la refinería de Apiay, se clasifica como un asfalto 60-70	Mezcla asfáltica tibia WMA MDC-19	Porcentaje de asfalto 6%	Realizan 2 enfoques, la granulometría del asfalto RAP y de los agregados pétreos contenidos en el RAP.	Se estima en 6.5% de asfalto	4.84 kN/mm	2220 kg/m <sup>3</sup>		Como conclusión la resistencia a la carga, fatiga y humedad de las mezclas tibias con RAP pueden llegar a ser comparables con los de una mezcla caliente tradicional.

Adaptado de: "Fabricación de adoquín a partir de un sistema de aprovechamiento de escombros en obra" por Martínez, Y. & Poveda, J. 2015. (<http://repository.ugc.edu.co/bibliodigital.ugc.edu.co/handle/11396/4248>), "Adoquines en asfalto reciclado y grano de caucho reciclado (CGR)" por Ladino, Y. & Rubiano, Á. 2017. (<http://hdl.handle.net/11396/3328>), "Comparación de asfalto convencional frente a asfalto modificado con material orgánico y gránulo de caucho" por Montejó, K. Nieto, L. 2020. (<https://hdl.handle.net/10983/25823>), "Aprovechamiento de reciclado RAP: para mejoramiento de las vías terciarias en Colombia" por M (23) Mora, J. 2020. (<https://hdl.handle.net/10983/25722>) "Evaluación del impacto del uso de RAP en las propiedades de mezclas asfálticas tibias con tecnología de espumado" por Ortiz, A. 2021. (<https://repository.escuelaing.edu.co/handle/001/1561>)

**Granulometría.**

A continuación, mediante la Tabla 6 se detallan los valores obtenidos en cada uno de los informes correspondientes al ensayo Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos según la norma INV E 213 - 13. Dada esta información se procede con la generación de la Figura 3 donde se presentan los comportamientos de las curvas granulométricas de cada uno de los informes, así como los límites inferiores y superiores según el Artículo 461-13 de la norma INVIAS.

**Tabla 6.**

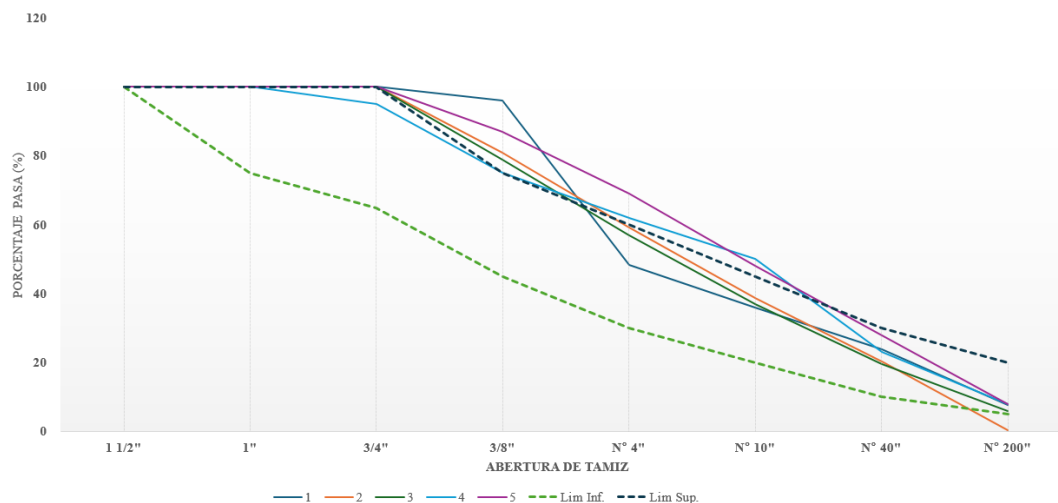
*Granulometría.*

TAMIZ	INFORMES					ARTÍCULO 461-1	
	1 % Pasa	2 % Pasa	3 % Pasa	4 % Pasa	5 % Pasa	Lim Inf. % Pasa	Lim Sup. % Pasa
1 1/2"	100	100	100	100	100	100	100
1"	100	100	100	100	100	75	100
3/4"	100	100	100	95	100	65	100
3/8"	95,94	80,94	79	75	87	45	75
Nº 4"	48,45	59,14	57	62	69	30	60
Nº 10"	36,04	38,78	37	50	48	20	45
Nº 40"	23,84	20,43	19,5	23	28	10	30
Nº 200"	7,68	0,34	6	8	8	5	20

*Elaboración propia*

**Figura 3.**

*Curvas granulométricas.*



*Elaboración propia*

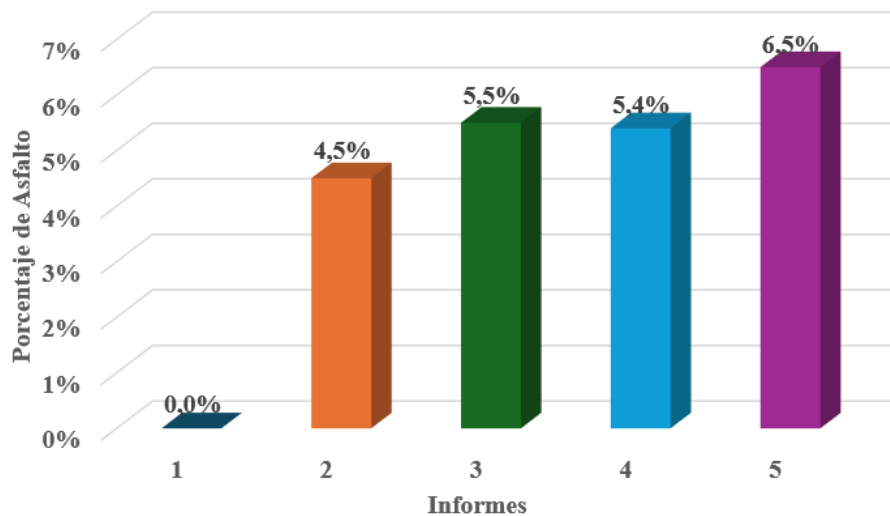
Al realizar el análisis de las curvas granulométricas se evidencia que el informe No. 3 cumple con los límites superiores e inferiores establecidos en el artículo 461-13 de las normas INVIAS para los materiales lo cual indica que se encuentra bien gradado, los informes No. 1 y 2 excedan los límites superiores en los materiales gruesos sin embargo se encuentran dentro de los límites para los materiales finos, caso contrario el informe No. 4 cuenta con mayor cantidad de finos y finalmente el informe No. 5 excede significativamente el límite superior indicando mayor cantidad de gruesos y pocos finos. Sin embargo, al realizar la adición de granulo de caucho en el informe No. 2 este cumple con los límites establecidos para una buena gradación del material.

### Extracción de asfalto.

La Figura 4 detalla la comparación del contenido de asfalto obtenido mediante el Ensayo de extracción cuantitativa del asfalto en mezclas de pavimentos según la norma INV E 732-13.

### Figura 4.

*Contenido de asfalto.*



*Elaboración propia*

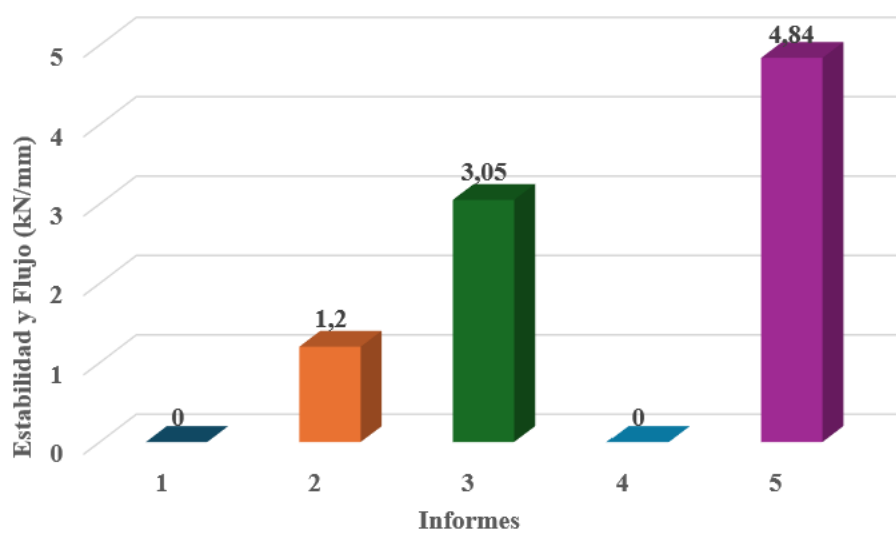
Se evidencia una tendencia de valores entre los rangos máximos de contenido de asfalto entre 3% a 7%, donde el mayor contenido de asfalto se obtuvo en el informe 5 con un total de 6.5%, sin embargo, con una diferencia de 2.2% en el informe 2 se obtuvo un total de 4.3%, con un valor promedio de los 4 informes de 5.4% representando un contenido de asfalto normal según la Tabla 3. Uno de los indicadores para la variación de este resultado corresponde al lugar de recolección de las muestras del material, así como las condiciones de acopio del mismo.

### Estabilidad y Flujo

En cuanto a los resultados de los ensayos de Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas los cuales se realizaron de acuerdo con la norma INV E 748-13, en estos se evidencia una variación de 1.82 kN/mm entre los informes 2, 3 y 4 obteniendo resultados entre 1,2 kN/mm y 4,84 kN/mm. Estos resultados pueden variar de acuerdo con la naturaleza de las muestras, así como su temperatura.

### Figura 5.

*Estabilidad y flujo.*



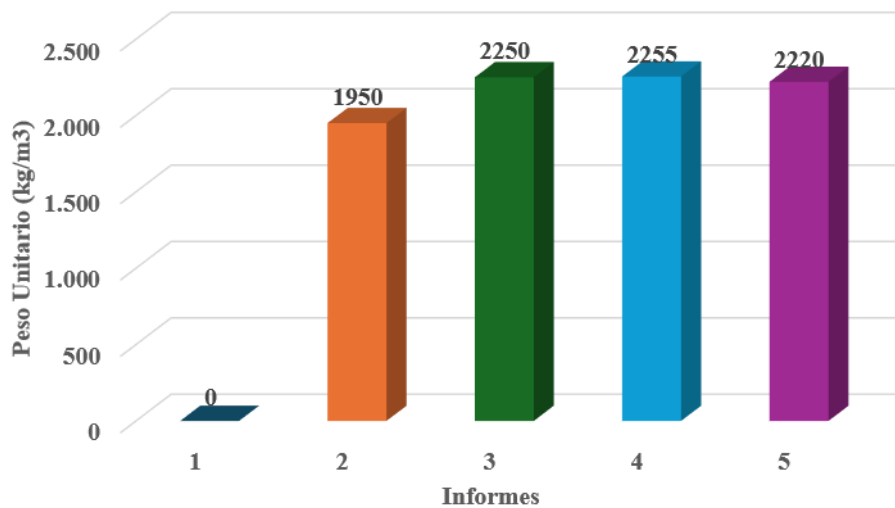
*Elaboración propia*

### Peso unitario

La Figura 6 muestra los resultados de los ensayos de Gravedad Específica BULK y densidad de mezclas asfálticas según la norma INV E 734-13, de acuerdo con los rangos de valores estipulados en la Tabla 4 se estima que los informes 2, 3 y 5 cumplen ya que se encuentran dentro de los límites permisibles.

### Figura 6.

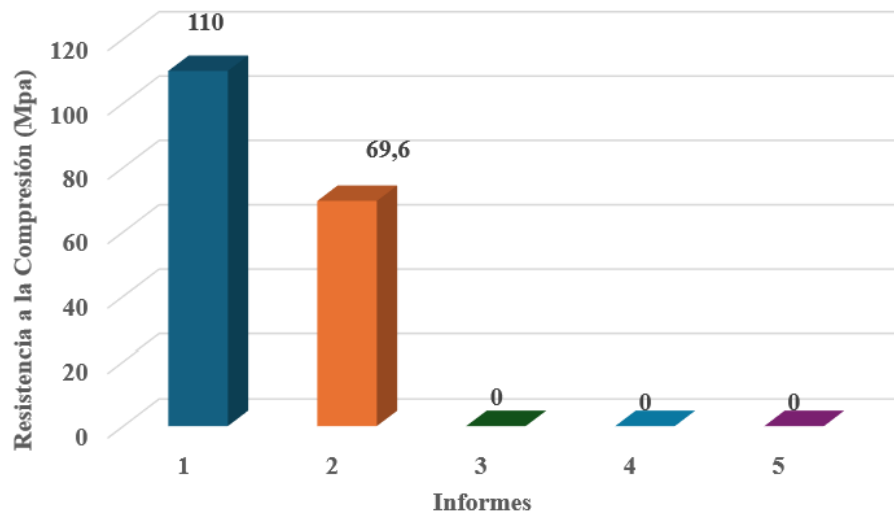
*Peso unitario.*



*Elaboración propia*

### Resistencia a la compresión.

Finalmente se realiza el análisis de los valores obtenidos en los informes 1 y 2 correspondientes a los ensayos de resistencia a la compresión de muestras de material de obra triturado y asfalto recuperado. En el informe 1 se evidencia que la mayor resistencia a la compresión de un total de 110 Mpa corresponde a la mezcla con un 7% de adición de material reciclado triturado, sin embargo, en el informe 2 se establece que la mayor resistencia a la compresión con un valor total de 69.6 Mpa corresponde a la mezcla con un 5% de adición de granulo de caucho reciclado.

**Figura 7.***Resistencia a la compresión.**Elaboración propia*

Los resultados obtenidos son mayores a los resultados de resistencia a la compresión de los adoquines convencionales los cuales de acuerdo con las especificaciones técnicas de un adoquín de tráfico liviano, Nov Arcillas, datan entre 22 Mpa para adoquines en arcilla y 45 Mpa para adoquines en concreto.

### **Análisis Cualitativo Matriz de Leopold**

Se realizó la valoración y análisis de la matriz revisando de manera general cada una de las acciones en cuanto a la fabricación y utilización del asfalto virgen y el asfalto recuperado junto con el impacto que estos generan en los sistemas biótico, abiótico y socioeconómico, este análisis se realiza de manera cualitativa de acuerdo con la metodología del proyecto de investigación, a continuación se presentan la Tabla 7 y la Tabla 8 en las que se muestra el análisis del asfalto virgen y recuperado según las valoraciones y factores de impacto establecidos en la Tabla 1.

**Tabla 7.**

*Análisis cualitativo del impacto ambiental del asfalto virgen.*

ASFALTO VIRGEN		
VALORACIONES	IMPACTOS	ANÁLISIS CUALITATIVO DEL IMPACTO AMBIENTAL
<b>Medio Abiótico</b> (Características Físicas y Químicas)	Geomorfología	Cambios en la geomorfología debido a los procesos constructivos y destructivos que alteran este relieve relacionado con la explotación de recursos naturales. Arroyave (2000) .los impactos con mayor porcentaje de afectación que generan por la actividad de la extracción de materiales son el deterioro de la geomorfología.
	Suelo	Degradación del suelo por la extracción de materiales vírgenes, causando erosión, movimiento de tierras, contaminación por derrames de petróleo. Arroyave, (2000), las canteras causan un fuerte impacto a nivel ambiental debido a que con las actividades que se desarrollan hay una gran pérdida y deterioro del suelo, y en general contaminación ambiental.
	Materiales de construcción	Alta extracción de materiales de construcción generando pérdidas de recursos naturales. Arroyave, (2000), las canteras causan un fuerte impacto a nivel ambiental debido a que con las actividades que se desarrollan hay contaminación ambiental.
	Calidad del aire	Contaminación por polvo causado por la extracción de materiales y el transporte por medio de volquetas emitiendo altos niveles de material particulado a la atmósfera.
	Temperatura	Emisiones de Dióxido de carbono, y gases de efecto invernadero generando calentamiento. Aceves (2020), indica que todos los combustibles fósiles que se queman a diario mundialmente y se liberan en la atmósfera generan emisiones de gases de efecto invernadero lo que aumenta la temperatura de la tierra, provocando el cambio climático.
	Calidad del agua	Debido a la explotación de materiales vírgenes y recursos no renovables se contaminan los acuíferos subterráneos, aguas superficiales y hay salinización del agua.
<b>Medio Biótico</b> (Condiciones Biológicas)	Fauna	Perdida de Fauna por la extracción de materiales vírgenes. Arroyave, (2000), las canteras causan un fuerte impacto a nivel ambiental debido a que con las actividades que se desarrollan hay una gran pérdida de fauna.
	Flora	Perdida y deforestación por la extracción de materiales y cambios en los relieves. Arroyave, (2000), las canteras causan un fuerte impacto a nivel ambiental debido a que con las actividades que se desarrollan hay una gran pérdida de flora.
<b>Medio Socioeconómico</b> (Factores Culturales)	Paisaje	Alteración del paisaje debido a la extracción de materiales pétreos y materiales de construcción.
	Socioeconómico	Degradación de territorios, crecimiento desordenado de poblaciones, consumo de materiales pétreos, construcción de nuevas carreteras en zonas de cuidado especial, generación de empleos.

*Elaboración propia*

**Tabla 8.**

*Análisis cualitativo del impacto ambiental del asfalto recuperado.*

ASFALTO RECUPERADO		
VALORACIONES	IMPACTOS	ANÁLISIS CUALITATIVO DEL IMPACTO AMBIENTAL
<b>Medio Abiótico</b> (Características Físicas y Químicas)	Geomorfología	Menores alteraciones a la geomorfología por no realizar explotación de materiales.
	Suelo	Menores alteraciones en la capa superficial del suelo, por lo que no se tendría erosión y movimiento de tierras al no realizar explotación de materiales.
	Materiales de construcción	Reutilización de materiales de construcción para creación de nuevos materiales que contribuyen con el mejoramiento del medio ambiente.
	Calidad del aire	Menores emisiones del polvo comparado con la producción de asfalto virgen.
	Temperatura	Bajas emisiones de gases de efecto invernadero al reutilizar el material asfáltico en frío.
	Calidad del agua	Menores alteraciones de la calidad del agua al no tener que explotar recursos naturales.
<b>Medio Biótico</b> (Condiciones Biológicas)	Fauna	Menor pérdida de fauna al no extraer los materiales vírgenes.
	Flora	Menor pérdida y degradación de flora al no extraer los materiales vírgenes.
<b>Medio Socioeconómico</b> (Factores Culturales)	Paisaje	Mejoramiento progresivo del paisaje al no extraer materiales vírgenes.
	Socioeconómico	Organización de los usos del suelo, gracias a la reutilización y a la nueva construcción de obras civiles. Ahorros económicos al reutilizar el asfalto en nuevos materiales para la construcción de andenes o carreteras, promueve la reutilización de materiales y la economía circular, generación de empleos.

*Elaboración propia*

**Matriz de Leopold**

Se realizaron las valoraciones del impacto generado por cada acción de acuerdo con la base de datos recopilada y el análisis preliminar realizado, en cuanto a la conformación de la matriz por una parte en las filas incluyen los factores o recursos ambientales que más impacto generan en el proyecto, en las columnas se incluye cada una de las acciones que se valoran como importantes y las cuales generan un impacto ya sea positivo o negativo en los factores, de la intersección entre los factores y las acciones se establece la valoración de cada uno de los impactos. Se realizaron dos matrices de Leopold, la primera corresponde a la Tabla 9 la cual se realiza respecto a la fabricación y utilización del asfalto virgen con un análisis desde su origen hasta el transporte y colocación del mismo.

**Tabla 9.**

*Matriz de Leopold - Asfalto virgen.*

Factores Ambiental	Acciones del proyecto											Afectaciones			Impacto
	Modificación del régimen		Transformación de Territorio y Construcción		Extracción de Recursos		Procesos	Alteraciones del terreno	Recursos renovables	Tratamiento de Residuos		+	-	Total	
	Superficie o Pavimento	Ruido y Vibraciones	Preparación del terreno	Carreteras y caminos	Excavaciones	Transporte de materiales	Refinerías de petróleo	Paisaje	Reciclado de residuos	Derrames de pozos de petróleo					
<b>Asfalto Virgen</b>															
Medio Abiótico (Características Físicas y Químicas)	Geomorfología	-6	-4	-8	-7	-10	-4	-10	-8	-8	-8	0	10	10	-474
	Suelo	-4	-5	-7	-7	-10	-5	-10	-8	-8	-10	0	10	10	-506
	Materiales de construcción	-7	-9	-7	-8	-10	-5	-9	-8	-9	-8	0	10	10	-450
	Calidad del aire	-6	-7	-6	-5	-7	-8	-10	-5	-6	-8	0	10	10	-317
	Temperatura	-5	-5	-7	-6	-6	-6	-10	-5	-5	-9	0	10	10	-384
Calidad del agua	-6	-4	-7	-6	-9	-6	-10	-7	-6	-10	0	10	10	-434	
Medio Biótico (Condiciones Biológicas)	Fauna	-5	-4	-6	-5	-6	-4	-8	-5	-5	-10	0	10	10	-281
	Flora	-5	-4	-6	-5	-6	-4	-8	-5	-5	-10	0	10	10	-281
Medio Socioeconómico (Factores Culturales)	Paisaje	-6	-6	-8	-8	-9	-7	-8	-10	-8	-9	0	10	10	-580
	Socioeconómico	6	-7	-6	-8	-6	-6	-8	-8	-5	-7	1	9	10	-389
Afectaciones	+	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	99	100	-4096	
	-	9	10	10	10	10	10	10	10	10	99				
	Total	10	10	10	10	10	10	10	10	10	100				
Impacto		-238	-216	-362	-424	-460	-294	-768	-469	-358	-507				

*Elaboración propia*

En segundo lugar, corresponde a la Tabla 10 en la cual se realizó la matriz de impactos que genera la reutilización del asfalto recuperado con un análisis desde el proceso de fresado, transporte y colocación en frío.

**Tabla 10.**

*Matriz de Leopold - Asfalto recuperado.*

Factores Ambiental		Acciones del proyecto									Afectaciones			Impacto								
		Modificación del régimen		Transformación de Territorio y Construcción		Extracción de Recursos		Procesos	Alteraciones del terreno	Recursos renovables	Tratamiento de Residuos	+	-		Total							
		Superficie o Pavimento	Ruido y Vibraciones	Preparación del terreno	Carreteras y caminos	Excavaciones	Transporte de materiales	Refinerías de petróleo	Paisaje	Reciclado de residuos	Derrames de pozos de petróleo											
<b>Asfalto Recuperado</b>																						
Medio Abiótico (Características Físicas y Químicas)	Geomorfología	-2	-2	-5	-2	2	-2	-2	3	9	-1	3	7	10	48							
	Suelo	-4	-5	-7	-2	3	-2	-3	4	9	-3	3	7	10	-14							
	Materiales de construcción	-2	-2	-7	9	9	-6	5	5	10	4	6	4	10	158							
	Calidad del aire	-3	-4	-5	-1	-4	-3	-3	-2	8	-2	1	9	10	-81							
	Temperatura	-3	-3	-5	-2	-3	-3	-2	-4	8	-3	1	9	10	-61							
	Calidad del agua	-2	-1	-4	-2	8	-2	-3	4	9	-4	3	7	10	24							
Medio Biótico (Condiciones Biológicas)	Fauna	4	3	-4	2	6	4	-2	5	10	-2	7	3	10	183							
	Flora	4	3	-4	2	6	4	-2	5	10	-2	7	3	10	183							
Medio Socioeconómico (Factores Culturales)	Paisaje	-3	-4	-8	3	8	-2	-3	10	-2	4	6	10	160								
	Socioeconómico	5	4	6	5	8	4	4	9	5	3	10	0	10	372							
Afectaciones												+	-	Total								
												45	55	100	972							
												7	7	10	55							
												10	10	10	100							
<b>Impacto</b>												-17	-45	-150	77	251	-27	-17	271	660	-31	972

*Elaboración propia*

**Resultado de la clasificación de los impactos**

La clasificación de los resultados se realizó de acuerdo con los rangos negativos y positivos establecidos en la Tabla 11.

**Tabla 11.***Rangos impactos negativos y positivos*

<b>Calificación</b>		<b>Rangos</b>	
<b>Negativa</b>	Irrelevantes	0	-25
	Moderados	-25	-50
	Severos	-50	-75
	Críticos	mayor	-75
<b>Positiva</b>	Poco Importante	0	25
	Importante	25	50
	Muy Importante	mayor	50

*Elaboración propia*

En la Tabla 9 correspondiente a la matriz de Leopold de asfalto virgen se evidenció que todas las acciones impactan negativamente el ambiente y se clasifica como impacto crítico, unas de las acciones con mayor impacto negativo fueron la de procesos con la refinería de petróleo con un impacto crítico de (-768), tratamiento de residuos con el derrame de pozos de petróleo con un impacto crítico de (-507) y extracción de recursos con excavaciones con un valor crítico de (-460). Asimismo, los factores ambientales también se impactaron negativamente clasificándose como impacto crítico, siendo los factores más afectados el medio socioeconómico con el paisaje el cual tuvo una valoración crítica de (-580), el medio abiótico con el suelo con una valoración crítica de (-506) y la geomorfología con una valoración crítica de (-474).

Con respecto a la Tabla 10 correspondiente a la matriz de Leopold de asfalto recuperado se evidencia que las acciones con mayor impacto positivo tienen una correlación con el ambiente, estos impactos positivos se reflejan en los recursos renovables con el reciclado de los residuos con una valoración muy importante de (660), las alteraciones del terreno con el paisaje con una valoración muy importante de (271) y la extracción de recursos con las excavaciones con una valoración muy importante de (251). También se generan impactos negativos en

transformación de territorio y construcción en la preparación del terreno con una valoración crítica de (-150) y en la modificación del régimen con el ruido y las vibraciones con una valoración moderada de (-45). Del mismo modo, los factores ambientales generan impactos positivos frente al medio socioeconómico con una valoración muy importante de (372), el medio biótico con la flora y la fauna las cuales tuvieron una valoración muy importante de (183) y el medio abiótico en los materiales de construcción con una valoración muy importante de (158), adicionalmente estos factores también generan unos impactos negativos en el medio abiótico por la calidad del aire con una valoración crítica de (-81) y la temperatura con una valoración severa de (-61).

### **Descripción de los Impactos**

Se realizó la descripción de cada uno de los valores que se incluyeron en las matrices de Leopold tanto de asfalto virgen como asfalto recuperado, especificando la magnitud e importancia de cada una de las acciones y factores, además de un análisis del impacto de cada acción la cual se presenta en el anexo 1.

### **Medidas de Mitigación**

Finalmente, en la Tabla 12 se realizó un análisis sobre cada uno de los factores e impactos ambientales generados por el uso del asfalto virgen desde la extracción del petróleo, fabricación del asfalto, transporte y colocación del mismo, evidenciando impactos negativos irreparables en el ambiente, los cuales requieren de mayores medidas de mitigación y ejecución para lograr una transición hacia las energías renovables.

**Tabla 12.***Medidas de mitigación asfalto virgen.*

ASFALTO VIRGEN		
VALORACIONES	FACTORES AMBIENTALES	MEDIDAS DE MITIGACIÓN
<b>Medio Abiótico</b> (Características Físicas y Químicas)	Geomorfología	Generación de proyectos que minimicen las alteraciones del terreno y modificaciones de la geomorfología del suelo. así como la revegetación de las zonas de extracción de materiales.
	Suelo	Minimizar el tiempo de transporte de materiales evitando la degradación del suelo. revegetación de las zonas afectadas, implementar alternativas para la limitación de las zonas de extracción de material evitando la contaminación masiva del suelo.
	Materiales de construcción	Búsqueda de alternativas para la optimización de las mezclas asfálticas reduciendo el consumo de materiales vírgenes.
	Calidad del aire	Implementación sistemas de filtros en las plantas de tratamiento, reducción de los tiempos de desplazamiento del material minimizando la contaminación por dióxido de carbono.
	Temperatura	Generación de estructuras o elementos estructurales que contengan materiales que reflejen la luz minimizando la absorción de calor del asfalto. uso de estructuras verdes y revegetación de las zonas afectadas.
	Calidad del agua	Se recomienda implementar la utilización de materiales renovables para las actividades de construcción, en ellas realizar la utilización de aguas lluvias y realizar la recirculación de las que se utilizan para no deteriorar el recurso hídrico y contaminar los acuíferos debido a que son parte importante para la vida.
<b>Medio Biótico</b> (Condiciones Biológicas)	Fauna	Realizar análisis de las zonas en donde se realizan las extracciones de los materiales vírgenes que sean necesarios explotar sin alterar los ecosistemas y que se migren las especies deteriorando el medio ambiente.
	Flora	Realizar estudios detallados de las zonas de explotación, para que sean zonas en donde los individuos arbóreos y la vegetación en general sean especies introducidas para no dañar los ecosistemas.
<b>Medio Socioeconómico</b> (Factores Culturales)	Paisaje	Se recomienda la reutilización de materiales de construcción y demolición para creación de nuevos materiales reemplazando los materiales vírgenes con el fin de no alterar el paisaje debido a que una vez se deteriora no vuelve a quedar en las mismas condiciones generando cambios fuertes y daños ambientales irreparables.
	Socioeconómico	Se recomienda iniciar y aprender sobre la economía circular y concientización en la población sobre el uso de recursos no renovables y materiales pétreos y las consecuencias que generan en el medio ambiente. Mayor rigor en las normas ambientales y en las políticas ambientales para preservar el ambiente y generar una cultura de reciclar, reutilizar y reducir el uso y consumo.

*Elaboración propia*

Por otro lado, en la Tabla 13 se realiza un análisis sobre de los factores e impactos del uso del asfalto recuperado, donde se evidencia que el uso de este asfalto conlleva a generar impactos positivos en el medio ambiente debido al aprovechamiento de residuos reduciendo el efecto de gases invernadero por la no producción de materiales vírgenes, sin embargo aún se generan impactos negativos moderados los cuales requieren la implementación de medidas de mitigación para así lograr una transición total hacia la economía circular y hacia la creación de materiales nuevos a partir de los residuos sólidos de construcción y demolición.

**Tabla 13.***Medidas de mitigación asfalto recuperado.*

ASFALTO RECICLADO		
VALORACIONES	FACTORES AMBIENTALES	MEDIDAS DE MITIGACIÓN
<b>Medio Abiótico</b> (Características Físicas y Químicas)	Geomorfología	Reducción en la explotación de materiales y pozos de petróleo, generación de proyectos que minimicen las alteraciones del terreno.
	Suelo	Establecer áreas de acopio adecuados para el material evitando las alteraciones del suelo, evitar en lo posible la extracción de materiales vírgenes.
	Materiales de construcción	Generar obras de infraestructura que generen el aprovechamiento de residuos, mitiguen el uso de maquinaria pesada y contengan puntos de acopio monitoreados.
	Calidad del aire	Utilización de maquinaria con sistemas de filtros que mitiguen la contaminación por material particulado en la extracción del material. Puntos de acopio con control de material particulado.
	Temperatura	Generación de elementos estructurales que eviten la refracción de la luz en el asfalto y en los puntos de acopio, utilización de energías no renovables para los proyectos, y vehículos que tengan tecnologías que las incluyan para evitar las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.
<b>Medio Biótico</b> (Condiciones Biológicas)	Calidad del agua	Generación de puntos de acopio alejados de fuentes hídricas. Control de maquinaria, recirculación del agua, reutilización de aguas lluvias para los procesos de construcción, evitar el uso y derrame de aceites e hidrocarburos en el suelo para evitar la contaminación de los acuíferos y las aguas superficiales.
	Fauna	Evaluación de la fauna existente en el lugar de trabajo, control paso de fauna, control de maquinaria pesada y puntos de acopio.
<b>Medio Socioeconómico</b> (Factores Culturales)	Flora	Manejo zonas de acopio de material, uso de materiales reciclados evitando la explotación de materiales y alteraciones en la vegetación.
	Paisaje	Estudio viabilidad de construcción de nuevas estructuras evitando el deterioro del paisaje, zonas de acopio del material, disminución de extracción de materiales vírgenes. Reforestación y revegetación zonas afectadas.
	Socioeconómico	Implementación de capacitaciones uso racional y acopio de materiales, participación en la reutilización de materiales, desarrollo de tecnologías limpias y eficientes así como de una economía circular.

*Elaboración propia*

### Conclusiones y Recomendaciones

En conclusión, al realizar el análisis de las características físicas y mecánicas del asfalto reciclado RAP en cada uno de los informes seleccionados, se evidencia que este cumple con lo establecido en las normas Colombianas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), sin embargo, para que el asfalto RAP cumpla con las especificaciones de las normas se plantean los siguientes valores típicos, al realizar el proceso de extracción de asfalto de la muestra este se debe encontrar entre 4.5% y 6% de asfalto, el material debe ser homogéneo y que cumpla con una granulometría con porcentajes de gruesos y finos bien gradados. De acuerdo con los resultados de los informes, se evidencia un mejor comportamiento con el uso de emulsión asfáltica en frío de rompimiento lento con una adición del 4% al 5% de la misma en la mezcla, al realizar esta adición de ligante asfáltico al material se genera un rejuvenecimiento del asfalto con el fin de que éste recupere sus propiedades físicas y mecánicas y se cumpla con una reestructura entre los asfáltenos y máltenos,

obteniendo en sí una resistencia a la deformación plástica mayor a (1 kN/mm), un peso unitario promedio de (2.200 kg/m<sup>3</sup>) y una resistencia a la compresión mayor a la de un adoquín convencional de arcilla (22 Mpa) y concreto (45 Mpa), teniendo en cuenta que esta resistencia a la compresión puede variar según el agregado en las mezclas del RAP ya sea incluyendo granulo de caucho triturado o material de obra reciclado.

De acuerdo con las características físicas y mecánicas obtenidas se considera el asfalto RAP como un material con propiedades adecuadas para la reutilización e implementación como asfalto alternativo para la generación de un nuevo material de construcción como adoquines convencionales de tráfico liviano. Así mismo, dadas las variabilidades de las mezclas es recomendable el estudio a detalle de las características mecánicas de los elementos a implementar evaluando la funcionalidad y vida útil del material.

Al realizar la evaluación del impacto ambiental con la utilización del asfalto virgen se pudo evidenciar que ocurren efectos ambientales negativos en el medio ambiente, desde que se extraen los recursos, se realiza el tratamiento, se utiliza el material y cumple su vida útil al retirarlo generando residuos sólidos de construcción y demolición. Dentro de las valoraciones analizadas en la matriz de impactos ponderativa de Leopold, tanto en las acciones como en los factores ambientales, todas recibieron una calificación mayor a (-75) lo que es una valoración crítica y por lo cual se evidencia gran afectación y degradación a los recursos naturales no renovables.

Las valoraciones con mayor impacto ambiental negativo para el asfalto virgen se deben a las acciones de los procesos de las refinerías de petróleo y al derrame de los pozos de petróleo al ambiente, con valoraciones de (-768) y (-507) respectivamente, del mismo modo los factores con

mayor impacto ambiental negativo fueron en el medio socioeconómico con el paisaje y en el medio abiótico con el suelo con valoraciones de (-580) y (-506) respectivamente.

Por otra parte, se logró evidenciar que, al realizar la evaluación del impacto ambiental con la utilización del asfalto recuperado, este por su parte tuvo mayores valoraciones con impactos positivos al medio ambiente, desde que se realiza su retiro, recolección, tratamiento e implementación como un nuevo material para la construcción.

Avanzar hacia la creación de nuevos materiales de construcción utilizando los residuos sólidos de demolición es una alternativa sostenible y sustentable para el cuidado y la preservación del medio ambiente asegurando un desarrollo sostenible y un equilibrio en los ecosistemas.

Las acciones con mayor impacto positivo para el asfalto recuperado se deben a la utilización de recursos renovables con el reciclado de residuos y a las alteraciones del terreno con el paisaje con valoraciones de (660) y (271) respectivamente, de la misma manera los factores ambientales con mayor impacto positivo fueron el medio socioeconómico con (372) y el medio biótico con fauna y flora con (183).

Se puede concluir que con la utilización del asfalto virgen se generan mayores impactos negativos los cuales son críticos para el medio ambiente, por lo cual se recomienda la reutilización de residuos sólidos de construcción y demolición para la creación de nuevos materiales reemplazando aquellos que se extraen por medio de procesos de explotación y que generan degradación en los ecosistemas, del mismo modo, se recomienda realizar los procesos de fabricación teniendo en cuenta la metodología de la economía circular para así continuar con

el ciclo de vida de los materiales, implementando un aprovechamiento eficiente y desarrollando tecnologías limpias.

El uso del asfalto recuperado por su parte es una alternativa sostenible y amigable con el medio ambiente, este presenta impactos positivos al reutilizarse aportando significativamente al cuidado y preservación de los ecosistemas y sin duda logran aportar con los objetivos de desarrollo sostenible en cuanto a la producción, consumo responsable y acción por el clima. Por otra parte, es indispensable cumplir con mayor rigor en las normas y políticas ambientales para preservar el ambiente y generar una cultura de uso y consumo de materiales responsable, campañas de concientización y sensibilización para entender los impactos que se generan y cómo las pequeñas acciones logran cambios significativos en el medio ambiente.

### **Lista de Referencias**

- Aceves, H, López, O, Mercado, S. M. y Arévalo, J. L. (2020). Huella de carbono de una pavimentación con la metodología del ACV y SIMAPRO. *Revista de Energías Renovables*, 4 (12), 8-20. <http://dx.doi.org/10.35429/JRE.2020.12.4.8.20>
- Aguilar, P. (2024). Evaluación de los Impactos Ambientales en la Cantera Taparachi Generadas por la Explotación de Materiales Empleados en la Construcción. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(2), 1307-1326. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i2.10568](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10568)
- Arguello, M. I. (2019). *Mezclas Asfálticas con RAP: Pavimentos Asfálticos Recuperados. (Vol. 10)* Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales – PITRA. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1421>

- Camacho, L. & Lozano, D. (2023). Evaluar el impacto ambiental de la generación de residuos sólidos en el barrio Patio Bonito. [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/54153>
- Caputo, P., Eskandar Fat, S., Porto, M., Loise, V., Abe, A. A., Calandra, P., Venturini, L., & Oliviero Rossi, C. (2023). Effect and mechanism of rejuvenation of field-aged bitumen extracted from reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Procedia*, 69, 863-870. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.246>
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, 401(3), 11-20. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5771932>
- Cueto, O. & Rozo, C. (2022). Análisis aplicativo del pavimento asfáltico reciclado (RAP) en Colombia. [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/45691>
- Decreto 2655/88, diciembre 23, 1988. Ministerio de Minas y Energía. (Colombia). Obtenido el 28 de mayo de 2024. [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/decreto\\_2655\\_de\\_1988.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/decreto_2655_de_1988.pdf)
- Dellavedova, M. (2010). Taller vertical meda Altamirano yantorno. *Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental*. <https://blogs.ead.unlp.edu.ar/planeamientofau/files/2013/05/Ficha-N%C2%BA-17-Gu%C3%ADa-metodo%C3%B3gica-para-la-elaboraci%C3%B3n-de-una-EIA.pdf>
- Growing Buildings. (2017). Construcción y emisiones de Co2 a la atmósfera. <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/>

- IPCC. (2015). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (R.K. Pachauri y L.A. Meyer, Eds.). IPCC.
- Ladino, Y. & Rubiano, Á. (2017). *Adoquines en asfalto reciclado y grano de caucho reciclado "CGR"*. [Trabajo de grado, Universidad La Gran Colombia]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/11396/3328>
- Laura, M. (2019). *Análisis comparativo entre dos tipos de pavimentos para el campus de la UNALM*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3931>
- Leopold, L., Clarke, F., Hanshaw, B., & Balsley, J. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact*. Geological Survey Circular 645, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- Marcet, M., & Vergés, F. (2018). *Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio*. Asociación Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona. 4. <https://www.pacteindustrial.org/es/publicaciones/papel-4-que-es-la-economia-circular-y-por-que-es-importante-para-el-territorio/>
- Martínez, Y. & Poveda, J. (2015). *Fabricación de adoquín a partir de un sistema de aprovechamiento de escombros en obra* [Tesis de pregrado, Universidad La Gran Colombia]. Repositorio Institucional. <http://repository.ugc.edu.co/bibliodigital.ugc.edu.co/handle/11396/4248>
- Montejo, K. & Nieto, L. (2020). *Comparación de asfalto convencional frente a asfalto modificado con material orgánico y gránulo de caucho* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/10983/25823>

- Mora, J. (2020). *Aprovechamiento de reciclado RAP: para mejoramiento de las vías terciarias en Colombia* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/10983/25722>
- Novarcillas. (2024). *Adoquín tráfico liviano*. <https://novarcillas.com/adoquin-trafico-liviano>
- Ortiz, A. (2021). *Evaluación del impacto del uso de RAP en las propiedades de mezclas asfálticas tibias con tecnología de espumado*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1561>
- Pinzón, A. (2013). *Formulación de lineamientos para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá*. [Tesis de Especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10654/11004>.
- Resolución 1115/12, septiembre 23, 2012. Secretaría Distrital de Ambiente. (Colombia). Obtenido el 4 de junio de 2024. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=49822>
- Resolución 1257/21, noviembre 23, 2021. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Colombia). Obtenido el 28 de mayo de 2024. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1257-de-2021/>
- Reyes, O., Berardinelli, E., Alvarez, A., Carvajal, J., & Fuentes, L. (2012). Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.889>
- Schwarz, M. (1993). La refinación del petróleo. *Ingeniería Industrial*, 7(007), 57-68. <https://doi.org/10.26439/ing.ind1993.n007.3069>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2023). *Lineamientos de la política de RCD en Bogotá*.

<https://www.ambientebogota.gov.co/residuos-de-construccion-y-demolicion>

Troncoso, P. (2018). Gestión de la Economía Circular en la producción de mezcla asfáltica en

Chile. [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio

Institucional. <http://hdl.handle.net/10251/106485>

Valenzuela, M. (2003). El asfalto, en la conservación de pavimentos. [Tesis de grado,

Universidad Austral de Chile].

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfciv161a/doc/bmfciv161a.pdf>

### Agradecimientos

Agradecemos al Semillero de Investigación de Materiales de Construcción y Sostenibilidad (SEIMAS) especialmente a los ingenieros José Darío Gavilanes y Harold Zambrano por su apoyo y la posible realización de este estudio, agradecemos a nuestra directora de proyecto, la ingeniera Zuleny Irene Cuarán y a nuestro asesor metodológico, el ingeniero Luis Efrén Ayala por su acompañamiento, compromiso y disposición a lo largo del desarrollo de este proyecto, finalmente agradecemos a la Universidad La Gran Colombia, a los docentes y directivos que aportaron en nuestro desarrollo profesional.