

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.



**ELABORACIÓN DE ADITIVOS PARA EL PAVIMENTO ASFALTICO A PARTIR DEL PLÁSTICO, CAUCHO DE NEUMÁTICO, Y ASFALTO RECUPERADO COMO, UNA SOLUCIÓN SOSTENIBLE EN LA PAVIMENTACIÓN DE VÍAS.**

**JEYSON CAMILO CÓRDOBA CUBILLOS.  
CÓDIGO DE ESTUDIANTE: 10481519126**

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL.  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL.  
BOGOTÁ, D.C, COLOMBIA.  
2021.**

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

**ELABORACIÓN DE ADITIVOS PARA EL PAVIMENTO ASFALTICO A PARTIR DEL  
PLÁSTICO, CAUCHO DE NEUMÁTICO, Y ASFALTO RECUPERADO COMO, UNA  
SOLUCIÓN SOSTENIBLE EN LA PAVIMENTACIÓN DE VÍAS.**

**JEYSON CAMILO CÓRDOBA CUBILLOS.**

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR EL  
TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL.**

**DIRECTOR: PROFESOR CALOS MOLINA.**

**LINEA DE INVESTIGACIÓN: PAVIMENTACIÓN SOSTENIBLE**

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL.  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL.  
BOGOTÁ, D.C, COLOMBIA.  
2021.**

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

**FIRMA DIRECTOR**

---

**FIRMA JURADO N° 1**

**Bogotá, D.C, noviembre de 2021**

---

**FIRMA JURADO N° 2**

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

## **AGRADECIMIENTOS**

Antes de todo agradezco a Dios por darme la sabiduría, el entendimiento, la paciencia y la disciplina para lograr satisfactoriamente mi tesis de grado. También quiero agradecer a mis padres Manuel Córdoba y Flor Cubillos por su apoyo incondicional a todo mi proceso de formación profesional y superación personal. A mi asesor de tesis el ingeniero Carlos Molina por acompañarme cuidadosamente en todo lo referente al tema de mi investigación, a los docentes que hicieron posible mi formación académica y a la UAN por aceptarme como estudiante y velar por mi proceso aprendizaje.

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

## **ABSTRACT**

This project is based on generating new raw materials that provide an improvement to the final product, making the consuming public aware of caring for the environment by disposing of the material and advertising the manufacturing process for the final product. In practice, the procedure will use solid waste from domestic, commercial, and industrial consumption as raw material for road construction, with emphasis on plastic, rubberized, and recycled asphalt materials. The objective is to know the procedure to elaborate a material that can be added as a substance, which when mixed with the asphalt generates a modified product with improved characteristics. The material to be elaborated will be known as an additive for the asphalt mixture, said material will have a method of obtaining through the recycling of solid materials, which will be processed by crushing. The additive must be mixed with the asphalt in such a way that the process can generate a homogeneous mixture that does not alter the conventional physical properties and characteristics, in terms of chemicals, the only modifications will be reflected in an improvement in performance and durability. a traditional asphalt. Additionally, modifying asphalt by means of a recycled material additive is contributing to the care of the environment, and at an adequate mixing temperature, energy consumption and atmospheric pollution by greenhouse gases can be mitigated, however, the construction of the road with Modified asphalt generates an increase in the initial budget, although maintenance costs are very low compared to traditional asphalt.

**KEYWORDS:** asphalt additive, modified asphalt, recycling, environment.



Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

## **RESUMEN**

El presente proyecto se basa en generar nuevas materias primas que brinden una mejoría al producto final, concientizando al público consumidor a cuidar el medio ambiente mediante la disposición del material y la publicidad del proceso elaborativo para el producto final. En la práctica el procedimiento empleará como materia prima los desechos sólidos del consumo doméstico, comercial, y de la industria para la construcción de carreteras, haciendo énfasis en los materiales plásticos, cauchutados, y asfalto reciclado. El objetivo es conocer el procedimiento para elaborar un material que pueda ser añadido como una sustancia, que al ser mezclada con el asfalto genere un producto modificado con características mejoradas. El material a elaborar será conocido como aditivo para la mezcla asfáltica, dicho material tendrá un método de obtención a través del reciclado de materiales sólidos, los cuales se procesarán mediante la trituración. El aditivo debe ser mezclado con el asfalto de tal manera que el proceso pueda generar una mezcla homogénea que no altere las propiedades y características físicas convencionales, en cuanto a las químicas las únicas modificaciones se verán reflejadas en una mejoría al rendimiento y la durabilidad que tiene un asfalto tradicional. Adicional, el modificar asfalto mediante un aditivo de material reciclado está contribuyendo al cuidado del medio ambiente, y a una temperatura adecuada de mezcla se puede mitigar el consumo energético y la contaminación atmosférica por gases de efecto invernadero, no obstante, la construcción de la vía con asfalto modificado genera un aumento en el presupuesto inicial, aunque los costos mantenimiento son muy bajos respecto al asfalto tradicional.

**PALABRAS CLAVE:** aditivo asfáltico, asfalto modificado, reciclaje, medio ambiente.

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

## TABLA DE CONTENIDO

|     |                                  |    |
|-----|----------------------------------|----|
| 1.  | INTRODUCCIÓN.....                | 1  |
| 2.  | OBJETIVO GENERAL .....           | 3  |
| 3.  | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....      | 4  |
| 4.  | MARCO CONCEPTUAL.....            | 5  |
| 5.  | ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....     | 15 |
| 6.  | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....  | 23 |
| 7.  | METODOLOGÍA.....                 | 28 |
| 8.  | CASO APLICADO .....              | 44 |
| 9.  | CONCLUSIONES.....                | 52 |
| 10. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 54 |

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla N°1. Tipo de mezcla para tener en cuenta en el diseño de mezcla según el INVIAS.  | 7  |
| Tabla N°2. Porcentaje de reducción de gases de efecto invernadero de distintos países con la tecnología WMA.                                | 9  |
| Tabla N°3. Tipo de mezclas asfálticas y consumo de combustible en función de la temperatura.  | 10 |
| Tabla N°4. Prueba de propiedades de requisitos previos para un aditivo en polvo y/o ceniza teniendo en cuenta las recomendaciones técnicas. | 12 |
| Tabla N°5. Clasificación de polímeros usados como materia prima para el aditivo plástico  | 15 |
| Tabla N°6. Clasificación de polímeros usados como materia prima para el aditivo plástico  | 16 |
| Tabla N°7. Susesos historicos de la mezcla asfaltica en tibio   | 21 |
| Tabla N°8. Porcentaje de uso del aditivo en polvo de plástico basado en el peso total del aditivo.  | 29 |
| Tabla N°9. Tipo de mezcla más efectiva y porcentaje de uso del aditivo en polvo de plástico basado en el peso del bitumen asfaltico.        | 30 |
| Tabla N°10. Mejorías proporcionadas por el aditivo de plástico a la mezcla asfáltica.   | 31 |
| Tabla N°11. Costos del reciclaje de plásticos y elaboración del aditivo plástico en pesos colombianos.                                      | 32 |
| Tabla N°12. Costos de la construcción de una vía con asfalto modificado por aditivo plástico en pesos colombianos.                          | 32 |
| Tabla N°13. Emisión de GHG de un asfalto tradicional VS asfalto modificado con aditivo de caucho y mezcla WMA                               | 34 |
| Tabla N°14. Porcentaje de uso del aditivo en polvo de cucho basado en el peso total del aditivo.  | 35 |
| Tabla N°15. Tipo de mezcla más efectiva y porcentaje de uso del aditivo en polvo de caucho basado en el peso del bitumen asfaltico.         | 36 |
| Tabla N°16. Mejorías proporcionadas por el aditivo de caucho a la mezcla asfáltica.   | 37 |
| Tabla N°17. Costos de producción de una vía con asfalto modificado por aditivo de caucho en pesos colombianos.                              | 38 |
| Tabla N°18. Impacto en los costos de las fases de construcción del pavimento asfaltico mezclado con el aditivo de caucho.                   | 38 |
| Tabla N°19. Porcentaje de RAP para reducir el volumen consumido en la carpeta asfáltica en vías EE. UU.                                     | 41 |
| Tabla N°20. Ahorro de costos generales en dólares para EE. UU de la mezcla asfáltica empleando RAP.   | 42 |
| Tabla N°21. Rendimiento del asfalto RAP en función de la tecnología de mezcla   | 43 |
| Tabla N°22. Mejoría en las características del asfalto con modificación del aditivo RAP   | 43 |
| Tabla N° 23. Procedimiento adecuado para la elaboración del asfalto modificado con caucho   | 44 |
| Tabla N° 24. Características del asfalto Barranca por ECOPETROL.  | 45 |
| Tabla N° 25. Propiedades físicas modificadas de Asfalto Barranca (80-100)   | 46 |
| Tabla N° 26. Tamaño de partícula del agregado   | 48 |
| Tabla N° 27. Valores predeterminados para las mezclas asfálticas  | 50 |

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura N°1. Estructura del pavimento flexible. ....   | 5  |
| Figura N°2. Relación de temperatura VS combustible. ....  | 10 |
| Figura N° 3. Proceso para obtener el caucho granular. ....  | 16 |
| Figura N°4. Proceso para obtener asfalto recuperado. ....   | 17 |
| Figura N°5. Residuos sólidos de la industria del plástico. (a) Poliéster. (b) Polietileno. (c) Polipropileno. (d) Poliestireno. (e) Polietileno de alta densidad. (f) Residuos electrónicos. .... | 28 |
| Figura N°6. Residuos sólidos del reciclaje de polietileno tereftalato (PET) ....  | 28 |
| Figura N°7. Relación costo / periodo de uso que tiene un asfalto tradicional respecto a un asfalto modificado. ....   | 33 |
| Figura N°8. Emisión de CO <sub>2</sub> de un asfalto tradicional VS asfalto modificado con aditivo de caucho y mezcla WMA. ....   | 34 |
| Figura N° 9. Residuos sólidos de la industria del caucho. (a) Caucho desmenuzado grueso. (b) Caucho desmenuzado fino. ....  | 35 |
| Figura N° 10. Consumo energético para diferentes porcentajes de RAP VS el tradicional. ....   | 39 |
| Figura N° 11. Emisión de GHG para diferentes porcentajes de RAP VS el tradicional. ....   | 40 |
| Figura N° 12. Correlación del % RAP empleado en la mezcla, consumo energético y emisiones de GHG. ....  | 40 |
| Figura N° 13. Relación de costos por mantenimiento vial VS años de vida útil. ....  | 42 |
| Figura N° 14. Caracterización reológica del asfalto Barranca con frecuencia de 10 ras/s ....  | 47 |
| Figura N° 15. Caracterización reológica del asfalto Barranca con envejecimiento a horno. ....   | 47 |
| Figura N° 16. Caracterización reológica del asfalto Barranca con envejecimiento a presión. ....   | 48 |
| Figura N° 17. Ecuación que describe el contenido de ligante asfáltico. ....   | 49 |
| Figura N° 18. Localización del tramo y los sub-tramos a construir ....  | 50 |

Aditivo para el asfalto a partir de materiales reciclados.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde principios de la década de los 70s el considerable aumento de precio del petróleo y crisis por demanda comenzó a ser un factor incidente en la creación de nuevas metodologías para el diseño de estrategias en fabricación del asfalto (Jamshidi & White, 2019, pág. 7). Para el hombre su mayor reto consiste en crear nuevas tecnologías que innoven todos los campos de acción ejecutados como actividad humana.

La contaminación ambiental causada por el desmesurado incremento de residuos sólidos está acentuando la huella de carbono presente en la atmosfera, generando enfermedades y contaminación a los recursos naturales (Chadar & Chadar, 2017, pág. 2). Por otro lado, la contaminación de los recursos naturales renovables aumenta con el paso de los años, causando angustia e incertidumbre para la especie humana. Para la época actual el tema de sostenibilidad ambiental ha tomado fuerza en los gobiernos a nivel mundial, esto radica en la posición que el hombre ha puesto el planeta Tierra en cuanto a contaminación, desechos y polución, lo que conlleva a soluciones integrales para el manejo del impacto ambiental.

Por ahora el interés de la humanidad en cuanto a sostenibilidad ambiental se centra en la creación de energías limpias, reciclaje de residuos sólidos, reutilización y renovación de materias industriales (Hasan M. , 2018, pág. 4)

Por medio del reciclaje de residuos sólidos se puede efectuar una correcta separación de los mismos, dando como resultado la disposición de materia prima para la fabricación de nuevos materiales o artefactos. De esta manera se idealizó reutilizar algunos materiales reciclados para la elaboración del aditivo que, al ser mezclado con el asfalto, provee a la sustancia una mejoría en alguna de las propiedades físicas (Gobierno Nueva Gales, 2020, págs. 27-30). Puntualmente en

esta investigación se tendrán en cuenta materiales reciclados tales como el caucho de neumático, plástico de alta densidad, y asfalto recuperado.

La aplicación de este material, ha tenido aceptación en la pavimentación de las vías tanto a nivel nacional como a nivel internacional. En Colombia, se han establecido normativas que apoyan el desarrollo sostenible, mediante un instrumento técnico expedido por el INVIAS y avalado por los ministerios de ambiente y vivienda. El documento se titula “Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura para el subsector vial” en esta guía se establecen parámetros que promuevan la sostenibilidad en la construcción de vías que carecen de licencia en cuanto a los procesos técnicos establecidos en el sector vial (INVIAS, 2013, pág. 37). Los proyectos planteados para la implementación de sostenibilidad en vías para Colombia se basan en la construcción de carreteras de tránsito moderado y acera peatonal (INVIAS, 2013). Entre los proyectos que planean construir con los estándares colombianos de sostenibilidad se tienen la Troncal de Catatumbo en Norte de Santander a la conexión pacífico, la Traversal de la Macarena, la Troncal de la Orinoquia San José, y la Transversal Momposina (DNP, 2020, págs. 20-50).



## **2. OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estado del conocimiento de los procesos que tiene la elaboración de una sustancia que se empleara como aditivo en el pavimento asfáltico, para ser utilizado como material en la pavimentación de vías de tránsito moderado y ciclo-rutas, con los estándares de sostenibilidad legislados por cada nación que adopte esta medida medioambiental.

### **3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Mencionar el origen de la materia prima para la fabricación del aditivo.
- Mencionar los parámetros técnicos para la elaboración de esta sustancia.
- Considerar la relación costo/ beneficio que tiene la fabricación del aditivo.
- Enunciar las tecnologías que generen un impacto sostenible en los procesos con mayor demanda energética y emisión de gases.

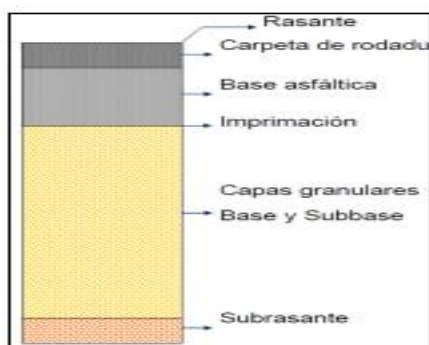
## 4. MARCO CONCEPTUAL

Para contextualizar la teoría del tema en estudio, es necesario conocer los conceptos claves de tal manera que se pueda ampliar la información acerca de lo que se quiere dar a conocer.

### 4.1. Pavimento asfáltico

Es una estructura de la construcción vial, conformada principalmente por una carpeta granular, una carpeta asfáltica y una superficie de rodadura. La carpeta granular está compuesta de una capa llamada sub-base la cual se construye con agregados gruesos, y otra carpeta llamada base la cual se construye con agregados finos. La carpeta asfáltica está compuesta de una o varias capas de mezcla asfáltica variando la granulometría de los agregados dispuestos para la mezcla permitiendo una mayor porosidad al material. La superficie de rodadura la parte más superficial de la carpeta asfáltica, permitiendo la fricción de los neumáticos del vehículo con el pavimento, y la entrega de las cargas ocasionadas por el tránsito para luego ser distribuidas por el resto de la estructura (Sanchez, Castro, & Vega, 2011, pág. 12). Se puede apreciar en la figura N°1, la disposición de las carpetas asfálticas de un pavimento flexible.

Figura N°1. Estructura del pavimento flexible.



Nota. La construcción de vías tiene una estructura fundamental para su realización. Fuente: (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 19).

#### 4.2. Mezcla asfáltica tradicional

El asfalto o bitumen es una mezcla heterogénea, viscosa, con elasticidad variable, no cristalino y de color negro compuesta de agregados finos y gruesos, aglutinante (bitumen) compuesto de hidrocarburos cuya composición es 84% carbón, 10% hidrogeno, 1% oxígeno y 5% nitrógeno y otras trazas, moléculas de aire, y ligante mineral de ser necesario el uso, de tal manera que los agregados son aproximadamente un 80% del peso de la mezcla (Hasan, Chew, Jamshidi, Yang, & Othman, 2019, pág. 10). Para esta investigación se pretende añadir un aditivo a partir del reciclaje de residuos sólidos, una opción para mezclar el aditivo a la mezcla asfáltica es procesar la materia prima en forma de polvo. Para un asfalto típico el contenido óptimo de la mezcla bituminosa es del 4% al 5% del peso, de esta manera el porcentaje de uso del aditivo es del 0,5% al 50%, de tal manera que los residuos sólidos tendrían un peso del porcentaje de uso aproximadamente del 2% al 2,5% (Hasan, Chew, Jamshidi, Yang, & Othman, 2019, págs. 12-18). La mezcla asfáltica tradicional debe presentar técnicamente las siguientes características:

- A temperaturas normales de uso en planta y compactación debe tener baja rigidez. (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 23)
- En temperaturas altas debe presentar altas rigidez para prevenir el deterioro gradual de la superficie. (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 23)
- A bajas temperaturas debe tener características optimas en cuanto elasticidad, con el fin de evitar el agrietamiento causado por variación térmica. (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 25)
- En presencia de humedad debe tener un óptimo desempeño adherente. (Rodriguez & Sanchez, 2016, págs. 23-26)

#### 4.2.1. Clasificación de la mezcla asfáltica tradicional

La clasificación de las mezclas asfálticas se divide según la densidad y viscosidad de la mezcla, tradicionalmente a nivel mundial es aceptada la HMA como tecnología y temperatura características de la misma. Esta calificación está establecida de la siguiente manera:

- MDC (mezcla densa en caliente). (Senior, 2013, págs. 53-54)
- MSC (Mezcla Semi-densa en caliente). (Senior, 2013, pág. 53)
- MGC (Mezcla Gruesa en Caliente). (IDU, idu.gov.co, 2011, pág. 3)
- MAM (Mezcla Alto Modulo). (Senior, 2013, pág. 54)

#### 4.2.2. Características de la mezcla asfáltica tradicional.

En Colombia la especificación técnica que proporciona el INVIAS para el tipo mezcla en función de la superficie de rodadura está dada por la tabla N°1:

Tabla N°1. Tipo de mezcla para tener en cuenta en el diseño de mezcla según el INVIAS.

| TIPO DE CAPA | ESPEJOR COMPACTO (mm) | TIPO DE MEZCLA      |
|--------------|-----------------------|---------------------|
| Rodadura     | 30 – 40               | MDC-3               |
|              | 40 – 60               | MDC-2, MSC-2        |
|              | > 60                  | MDC-1, MDC-2, MSC-2 |
| Intermedia   | > 50                  | MDC-1, MSC-1        |
| Base         | > 75                  | MSC-1, MG-0, MGC-1  |
| Alto módulo  | 60 – 130              | MAM                 |

*Fuente:* (INVIAS, 2013, pág. 35).

- Estabilidad: Capacidad que ofrece el material para soportar los cambios físicos ocasionados por la deformación generada del tránsito vehicular que circula sobre el pavimento. (Rodríguez, Castaño, Martínez, & Hernández, 2010, pág. 14)

- Durabilidad: Resistencia del material al cambio de temperaturas, y al desgaste ocasionado por la acción de cargas generadas por el tránsito. (Perez, 2014, pág. 6)
- Impermeabilidad: Capacidad que tiene el material, para oponerse al flujo del agua que se incorpora hasta las capas granulares. (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 23)
- Flexibilidad: Comportamiento que poseen los asfaltos, brindando una mayor resistencia al agrietamiento, y al constante asentamiento del suelo. (Senior, 2013, pág. 54)
- Resistencia a la fatiga: Capacidad para resistir las cargas a flexión de manera repetida transmitidas por los vehículos, sin que el material se fragmente. (Senior, 2013, pág. 55)
- Resistencia al deslizamiento: Característica propia del pavimento, permitiendo un mayor grado de fricción entre la rueda del vehículo y la rasante del pavimento. (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 24)

#### *4.3. Tecnología para el mezclado del asfalto*

En la pavimentación tradicional la mezcla asfáltica normalmente se hace en caliente (HMA por sus siglas en inglés) debido al poco contenido de aire entre vacíos (3% al 9%) y la alta densidad del material. Ejecutar de esta manera el proceso tiene un mayor impacto ambiental debido al consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero (GHG por sus siglas en inglés). Estos tienen un mayor impacto en la fase de mezcla, tendido y compactación, eso sin incluir la fase de producción, y la fase de transporte. La mezcla en caliente (HMA) tiene temperaturas de 150°C a 190° C, de tal manera que la producción de gases de efecto invernadero aumentan considerablemente en un 97% respecto a la mezcla en frío (CMA por sus siglas en inglés) que tiene temperaturas menores a los 60°C y 80% respecto a la mezcla en tibio (WMA por sus siglas en inglés), cuyas temperaturas son de 100°C a 140°C (Reza & Shishehbor, 2019, págs. 3-4).

Para el año 2007 la producción mundial de mezcla asfáltica fue de 1600 millones de toneladas métricas, para esta producción se necesitaron  $1,4 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> de combustible,  $1,28 \cdot 10^4$  GW de consumo energético, generando 46,08 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, representando estadísticamente el 0,15% del CO<sub>2</sub> emitido a nivel mundial. (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 6) se presenta en la tabla N°2 los estudios realizados en diferentes países a nivel global.

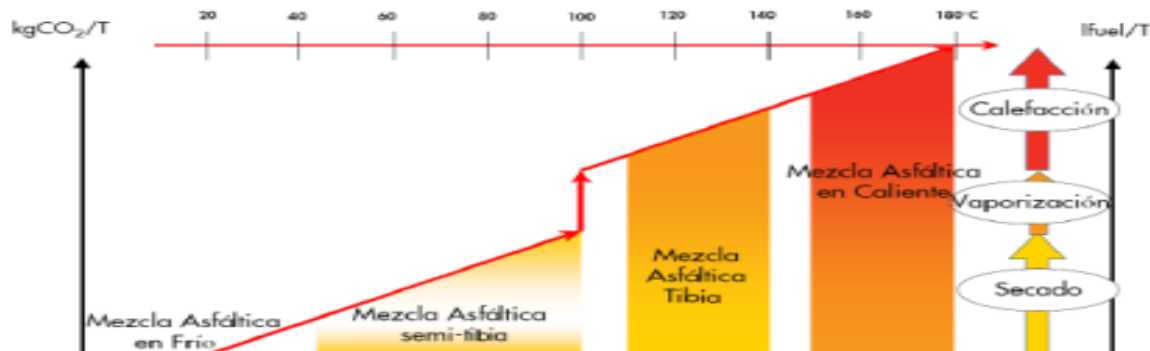
Tabla N°2. Porcentaje de reducción de gases de efecto invernadero de distintos países con la tecnología WMA.

| Emission Component | Oliveira et al. [18] | Middleton and Forfylyow [19] | Vaitkus et al. [20] | Powers [21] | D'Angelo et al. [6]; Capitão et al. [22] | McIver [23] | Davidson and Pedlow [24] | Larsen et al. [25] | De Groot et al. [26] |
|--------------------|----------------------|------------------------------|---------------------|-------------|--|-------------|--------------------------|--------------------|----------------------|
| CO <sub>2</sub>    | 32                   | 10.9                         | 30-40               | 13.8        | 15-40                                    | 46          | 17.4                     | 31.4               | 31                   |
| SO <sub>2</sub>    | 24                   | -14.3                        | 35                  | -           | 20-35                                    | 81          | -17.2                    | -                  | -                    |
| VOC                | -                    | -                            | 50                  | 31.9        | 50                                       | 30          | 20                       | -                  | -                    |
| CO                 | 18                   | 10.4                         | 10-30               | -           | 10-30                                    | 63          | 19.5                     | 28.5               | 29                   |
| NO <sub>x</sub>    | 33                   | 8.3                          | 60-70               | 16.1        | 60-70                                    | 58          | 20                       | 61.5               | 62                   |
| Dust               | -                    | -                            | 20-25               | -           | 25-55                                    | -           | -                        | -                  | -                    |

Fuente: (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 6).

La mezcla asfáltica en tibio (WMA) tiene temperaturas de 100°C a 140° C, esto depende de la mezcla en caliente que se empleó. Entre las cualidades que resaltan se encuentran la reducción del consumo de combustibles fósiles que oscila alrededor de 20 a 40%, la disminución de gasto energético y la mitigación de los gases de efecto invernadero. (Cabrera, y otros, 2020, pág. 2). En la figura N°2 y en la tabla N°3 se relaciona la temperatura adecuada para cada mezcla y el consumo de combustible.

Figura N°2. Relación de temperatura VS combustible.



Fuente: (Rodriguez & Sanchez, 2016)

Tabla N°3. Tipo de mezclas asfálticas y consumo de combustible en función de la temperatura.

| NOMBRE DE LA MEZCLA    | TEMPERATURA        | OBJETIVO  | CARACTERÍSTICAS   |
|------------------------|--------------------|---|---|
| Mezclas en frío        | De 25 °C a 60 °C   | Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción, de material reciclado.                         | Las mezclas en frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.  |
| Mezclas Semi-templadas | De 60 °C a 100 °C  | Maximizar los ahorros energéticos y las emisiones aprovechando parte de la humedad presente en los agregados. | Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi-templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye y se hace posible el revestimiento completo de los agregados. |
| Mezclas Tibias WMA     | De 100 °C a 135 °C | Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas en caliente  | Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y colocación, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso.   |
| Mezclas en Caliente    | De 135 °C a 180 °C | Producción de mezcla asfáltica convencionalmente.   | Son mezclas producidas por técnicas convencionales donde la temperatura de producción es elevada. Estas mezclas son de alto desempeño.  |

Fuente: (Senior, 2013, pág. 66).

En cuanto a los costos relacionados con esta tecnología, hay un aumento en los costos de mezcla puesto que se deben a la tecnología empleada, ya que hay una modificación al sistema de control de planta, instalación de equipos mecánicos, aditivos y costos de diseño de mezcla, no obstante, los costos de diseño de mezcla y aditivos pueden equilibrarse con algunos beneficios aportados por la técnica WMA, tales como bajo costo de consumo energético en la planta, mayor



durabilidad del pavimento, y una posible eliminación de aditivos antideslizantes. (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 7).

Por el rendimiento de la tecnología WMA tiene mejor formación de surcos, mayor resistencia a la fatiga, y resistencia al agrietamiento térmico, no obstante, es susceptible a la humedad, lo cual causa angustia prematura ya que la disminución de temperatura baja los niveles de resistencia al daño por humedad. Aunque este inconveniente tiene solución a partir de la adición de aditivos químicos que contrarresten los niveles de humedad. (Hasan M. , 2018, págs. 2-3).

#### *4.4. Aditivo para la mezcla asfáltica modificada*

La mezcla asfáltica modificada es un material que ha sufrido cambios en la estructura original, los cambios pueden ser de adición de un componente a la mezcla o de sustracción porcentual a algún componente de la estructura original. (Perez, 2014, pág. 11)

El aditivo es una sustancia y/o componente adicional que se mezcla con el bitumen asfáltico y los agregados finos o gruesos con el fin de proporcionar un mayor rendimiento a la mezcla asfáltica. Las principales ventajas de preparar la mezcla con un aditivo son:

- Mayor flexibilidad a bajas temperaturas. (Kishchynsky, Nagaychuk, & Bezuglyi, 2016, pág. 12)
- Mayor resistencia a las deformaciones. (Munera, 2012, pág. 37)
- Mitigación del impacto ambiental causado en la fase de mezcla, tendido y compactación. (Abdullah, y otros, 2016, pág. 3)
- Mejoría en el rendimiento general de la estructura. (Bargil Cubillos, 2014, pág. 7)
- Ahorro en los costos de operación, mantenimiento y reparaciones. (Chadar & Chadar, 2017, pág. 2)

- Reducción de agrietamiento. (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 26)
- Mayor periodo de utilidad. (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 26)

Por otro lado, las principales desventajas del proceso que tiene mezclar el aditivo con el asfalto son:

- Aumento en los costos de producción e inversión. (Jamshidi & White, 2019, pág. 7)
- Implementación de procesos técnicos para mezcla. (Mamani, 2015, pág. 4)
- Adaptación de las tecnologías tradicionales para la mezcla. (Mamani, 2015, pág. 5)
- Falta de estudios, ensayos y aceptación por parte del sector vial. (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 28)

El proceso de obtención del aditivo elaborado a partir de materiales reciclados empieza por el reciclaje de los materiales, después pasa a desinfección y limpieza, luego es procesado mediante maquinas trituradoras, ese residuo es refinado por molinos, y al final se tamiza para de lograr obtener el aditivo apto para la mezcla con el asfalto. En el caso del pavimento recuperado, el procedimiento inicia con un proceso de fresado, los residuos obtenidos de fresado se hidratan y finalmente se adicionan a la mezcla asfáltica como un agregado. (Jamshidi & White, 2019, pág. 2)

Los aditivos en polvo/ceniza presentan los siguientes procesos y recomendaciones técnicas detallados en la tabla N°4:

Tabla N°4. Prueba de propiedades de requisitos previos para un aditivo en polvo y/o ceniza teniendo en cuenta las recomendaciones técnicas.

| <b>Pruebas</b>                     | <b>Métodos de prueba</b>   | <b>Requisitos</b>   | <b>Estándares</b>              | <b>Limitaciones de ingeniería</b>  |
|------------------------------------|--|---|--------------------------------|--|
| Tamaño (mm)                        | Agitador de tamiz mecánico para polvo y cenizas<br><br>Vista de microscopio en solución para fibra   | Tamiz de paso de cenizas y polvos No. 200<br><br>Fibra max 6 mm   | NULO                           | Para asegurar una dispersión homogénea en la mezcla sin grumos.  |
| Térmico                            | Horno secado a 210 ° C durante 2 h y pérdida de masa medida<br><br>Se mezclaron 30 g de fibra y 100 g de asfalto, se secaron al horno a 165 ° C durante 5 h y se tomó la pérdida de masa   | Sin cambio de color y máximo 6%<br><br>Comparado con la pérdida de masa con control                           | JT-T 533<br><br>NULO           | Los puntos de fusión predeterminados y las temperaturas de mezcla para garantizar que no se descompongan ni se consuman durante la mezcla. |
| Drenaje aglutinante de asfalto (%) | Mezcla de fibras y mezcla, secada al horno a 165 ° C durante 1 hora y se mide la pérdida de masa<br><br>10 g de fibra con 30 g de aglutinante asfáltico colocados en una cesta de acero, secado al horno a 140 ° C durante 2 h y medida de la masa | El% de drenaje es menor que la mezcla de control<br><br>Método de Schulenburg al 3% de drenaje de aglutinante | AASHTO T305<br><br>EN 12697-18 | Para absorber e inhibir el drenaje del asfalto para mejorar la durabilidad y el envejecimiento de la mezcla.                               |

|                                    |   |      |                            |   |
|------------------------------------|---|------|----------------------------|---|
| Pérdida por ignición (LOI) (%)     | Incinerado a 450 ° C, 750 ° C, 950 ° C y 1200 ° C y prueba de LOI. Cuando la LOI está estancada, el valor más bajo como punto de incineración | NULO | NULO                       | Para asegurar que los componentes combustibles residuales se incineren                                    |
| Prueba de límites de Atterberg (%) | Enjuague una muestra de 1500 g de material suspendido tamizado y pase un tamiz de 400 um. Ensayo de límite líquido y plástico realizado.      | NULO | GTM-7<br>ASTM<br>D4318     | Una mayor plasticidad sugiere una muestra más fina con baja materia orgánica que mejora la unión adhesiva |
| Absorción de agua (%)              | La muestra colocada en cámara de curado, 90% de humedad a 20 ° C durante cinco días y masa medida en intervalo de 10 h                        | NULO | NULO                       | Para asegurar un almacenamiento adecuado y sin alta capacidad de absorción en condiciones atmosféricas.   |
|                                    | Agregados finos mediante picnómetro   |      | AASHTO<br>T84 ASTM<br>C128 | Indicador de volumen de absorción de asfalto  |

Nota. Los parametros tecnicos recomendales para los analizis de las pruebas de un aditivo en polvo. Fuente: (Hasan, Chew, Jamshidi, Yang, & Othman, 2019, págs. 23-24).

## 5. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Este tema es una línea de investigación relativamente nueva que requiere de entender los sucesos y los procesos más relevantes de esta innovadora tecnología.

### 5.1. Aditivo de materiales reciclados

#### 5.1.1. Aditivo de plástico

Este material que en la actualidad es novedoso ha tenido una corta trayectoria por el sector de la construcción (Jithendrun, Raja, Smphat, & Bhaskar, 2020, pág. 2), no obstante, la investigación en este campo presenta los grandes avances. Los estudios y aditivos que en la actualidad existen, están relacionados con los plásticos mencionados en la tabla N°5.

Tabla N°5. Clasificación de polímeros usados como materia prima para el aditivo plástico

|                    |              |
|--------------------|--------------|
| <b>Plastómeros</b> | EVA          |
|                    | EMA          |
|                    | PE           |
|                    | PP           |
|                    | Poliestireno |

Nota. Los plásticos clasifican poliestireno, EVA (etilvinilacetato), EMA (etileno-acrilato de metilo), PE (polietileno), PP (polipropileno). Fuente: (Perez, 2014, pág. 14).

#### 5.1.2. Aditivo de caucho

El uso de este material ha tenido mayor aceptación a nivel mundial (AL-Rubaie & Joni, 2021, pág. 8), el exceso aumento del desecho de llantas ha hecho que las industrias productoras de asfalto se inclinen por la fabricación del aditivo cauchutado. Los más usuales para esta industria son los que se presentan en la tabla N°6

Tabla N°6. Clasificación de polímeros usados como materia prima para el aditivo plástico

|                    |                |
|--------------------|----------------|
| <b>Elastómeros</b> | <b>Natural</b> |
|                    | <b>SBS</b>     |
|                    | <b>SBR</b>     |
|                    | <b>EPDM</b>    |
|                    | <b>PBD</b>     |

Nota. El caucho se clasifica en Natural, SBS (estireno-butadieno-estireno), SBR (caucho estireno- butadieno), EPDM (etileno propileno dieno), PBD (polibutadieno). Fuente: (Perez, 2014, pág. 14).

Figura N° 3. Proceso para obtener el caucho granular.



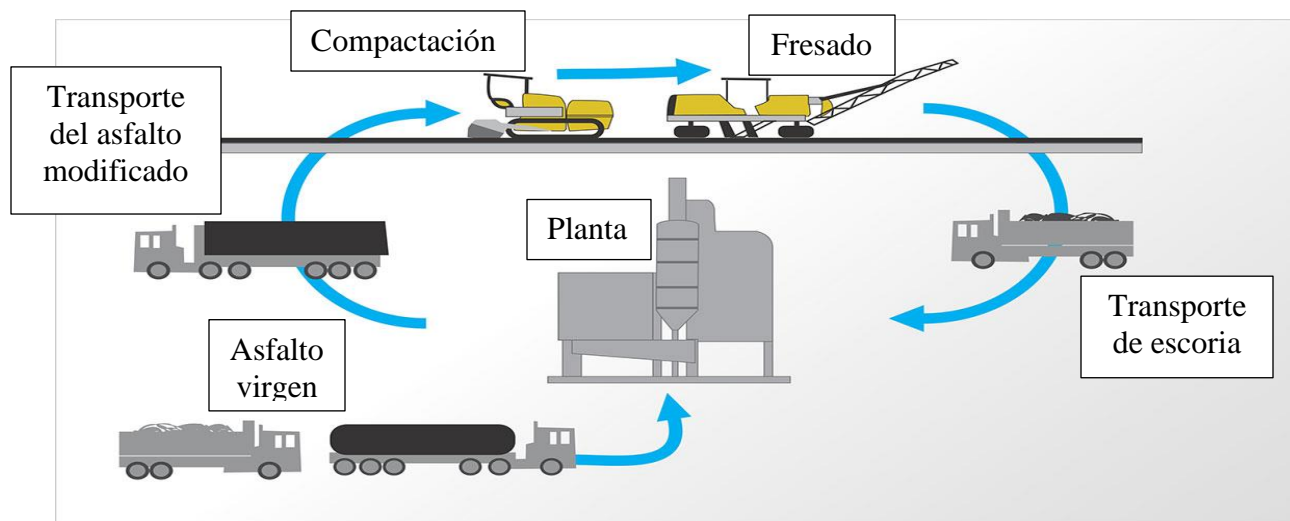
Fuente: (Diaz & Castro, 2017, pág. 67)

### 5.1.3. Aditivo RAP

Este material tan conocido en la industria de vías, se suele obtener por el fresado de un asfalto que ya haya culminado el periodo de uso (Panos & Loizos, 2021, págs. 5-7). El objetivo de reciclar este asfalto y mezclarlo con la uno nuevo es reducir los costos de inversión para el proyecto, no obstante, se tiene presente la aplicación medioambiental que lleva el procedimiento

de reciclado (Gireesh, 2020, pág. 3). En la figura N°3 se evidencia el proceso de reciclaje del asfalto.

Figura N°4. Proceso para obtener asfalto recuperado.



Fuente: (Panos & Loizos, 2021)

## 5.2. Asfalto modificado

### 5.2.1. Asfalto modificado con polímero plástico

Para la época actual el tema medioambiental es un factor importante a resaltar, no cabe duda que implementar medidas sostenibles mejorarían los factores que están deteriorando con el habitat, entorno y ecosistema (Mejia & Sierra, 2017, pág. 28). El plástico es uno de los principales causantes de la contaminación ambiental por desechos sólidos, y es por ello que la ingeniería y la ciencia han tomado cartas en asunto para tratar de resolver la problemática (Nasir, Imran, & Umair, 2016, pág. 4). Una de esas soluciones se centra en la creación de materiales y tecnologías que amplíen las opciones de mitigar el impacto ambiental. Es por ello que a comienzos de los 90 la ingeniería abrió la posibilidad de reutilizar el plástico para ser añadido como un aditivo a la mezcla asfáltica (Mamani, 2015, pág. 2). En el año 2000 ya se hacían los primeros procesos constructivos

en el país de la India, en un estudio realizado por científicos de ese país, descubren que reemplazar un 30% del bitumen asfáltico por aditivo plástico da como resultado un aumento del 250% en estabilidad Marshall y el ensayo de tracción indirecta (Bajpayee, 2014, pág. 14). El innovativo procedimiento no ha sido patentado, pero ya tiene varias aplicaciones en forma de producto, aditivo, o ligante asfáltico, tal es el caso de Dow una empresa norteamericana que ha desarrollado tecnología ecológica para la construcción de asfaltos, otro caso de desarrollo está en un producto llamado MR6, el cual emplea el plástico como materia prima para la creación de aditivo asfáltico, también se encuentra en esta lista la empresa colombiana ECODEK, que hace superficies asfálticas sostenibles a partir de bases plásticas drenantes (Metaute & Casas, 2010, pág. 19).

### 5.2.2. Asfalto modificado con tritura de caucho

Este método se crea en Suecia, y luego en 1978 los EE. UU patenta el procedimiento que lleva a cabo la elaboración de este material llamándolo Plus Ride, teniendo como componente principal las partículas de caucho en polvo las cuales pasen el tamiz N°8 (AL-Rubaie & Joni, 2021, pág. 7). En 1990 la administración federal de carreteras de EE. UU decreto una ley para que el uso del asfalto cauchutado se pudiera usar como materia en la construcción vial. En 1991 se introduce al mercado un nuevo aglutinante de caucho en forma líquida con el fin de evitar la fractura prematura del asfalto ya pavimentado. En 1995 Charles McDonald patentó la mezcla asfáltica modificada con tritura de caucho en un proceso húmedo y para esa época Arizona, California, y Texas eran estados líderes en la pavimentación con asfalto modificado (Xu, y otros, 2021, pág. 5). Para el año 2017 una investigación en Brasil descubre que adicionar un 15% de caucho a la mezcla asfáltica generaría una reducción de agrietamiento de 5 a 6 más en comparación de las mezclas



asfálticas tradicionales. Unos estudios de laboratorio y de campo demuestran que mezclar un 20% de tritura de caucho a la mezcla reduce en 2.5 dB el ruido causado por la interacción de los neumáticos con el asfalto para los automóviles que se movilizan a 50 Km/h en una vía que tenga un estado seco (Ghabchi , Arshadi, Zaman, & March, 2021, págs. 4-7).

### 5.2.3. Asfalto modificado con asfalto recuperado (RAP)

El material que se extrae del reciclaje del pavimento es sin duda uno de los más comunes en la industria de la construcción de vías flexibles, ya que puede emplearse tanto en la construcción de la superficie de rodamiento como en bases (Zhao, Goulias, & Peterson, 2021, pág. 3). En el 2017 se realizó un estudio que la producción de asfalto virgen ha tenido una gran demanda en la última década, lo cual lleva a una elevación del costo por esta razón y por temas ambientales se concluye que hay una necesidad de incluir la reutilización de asfalto, para ello tomaron muestras del RAP para ser evaluado en los ensayos de Marshall, relación de rodamientos, y compresión no confinada, dando como resultado una relación satisfactoria de rendimiento, y durabilidad. (Gireesh, 2020, pág. 2). En otro estudio realizado por Anil Pradyudma un profesional de la investigación occidental, determino que el reciclaje de asfalto con mezcla en caliente tiene un óptimo rendimiento en las pruebas de módulo de resistencia, humedad, susceptibilidad, fluencia dinámica, y prueba de surco dando como resultado general una mejoría del 20% en las propiedades de rendimiento del asfalto, concluyendo de esta manera que el RAP tiene un mejor desempeño frente al asfalto tradicional en las mismas condiciones de mezcla (Gireesh, 2020, pág. 3).

### 5.3. Mezcla asfáltica en tibio WMA

Aunque esta tecnología es relativamente novedosa, con menos de 30 años en la industria de la construcción ya ha logrado un avance científico que le permita implementarse en los proyectos

de infraestructura vial. La idea nace en Europa sobre la década de los 90s como medida preventiva para la contaminación ambiental (Rodriguez & Sanchez, 2016, pág. 13). En la tabla N°7, se redactan algunos sucesos importantes que marcaron un punto en la historia de esta tecnología.

Tabla N°7. Susesos historicos de la mezcla asfáltica en tibio

| AÑO       | ANTECEDENTE   |
|-----------|---|
| 1995      | En 1995, Shell y Kolo Viedekke, iniciaron un programa en conjunto, para el desarrollo de un producto, y del proceso para la fabricación de mezcla agregado -asfalto a temperaturas más bajas; obteniendo mejores propiedades o equivalentes condiciones de desempeño, con relación a las mezclas tradicionales en caliente. |
| 1999-2001 | Reportes iniciales de las tecnologías de la mezcla tibia en el Congreso Euraspalt/Eurobitume, el Fórum Alemán de Bitumen, Conferencia sobre Pavimentos Asfálticos en Sudáfrica, principalmente.   |
| 2002      | Recorrido de exploración a Dinamarca, Alemania y Noruega realizado por directores de NAPA para examinar las tecnologías de la mezcla asfáltica tibia (WMA), Aspha-min, la Espuma y el Sasobit. En la agenda de trabajo del grupo, se incluyeron   |
|           | reuniones con el Fórum Alemán de Bitumen, con el objetivo de considerar algunas actividades del grupo de Trabajo sobre Reducción de Temperatura.  |
| 2003      | Los estudios sobre mezclas tibias, son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA.  |
| 2003      | El Centro Nacional para la Tecnología en Asfalto, investiga sobre los procesos de las mezclas tibias, Alpha-min (zeolite cristalino) y Sasobit (una cera de Fsher-Tropsch). La investigación es patrocinada por NAPA, Administración Federal de Carreteras FHWA, Eurovia (Aspha-min) y Sasol (Sasobit).                     |
| 2004      | Meadwestva company, introduce Evothem DAT (aditivo químico) a la mezcla, al tiempo que apoya la investigación de NCAT.  |
| 2004      | La demostración de mezclas tibias, es presentada en el Mundo del Asfalto.   |
| 2004      | Las primeras pruebas de campo fueron realizadas en Florida y Carolina del Norte   |
| 2005      | Formación del grupo de trabajo (TWG) de la mezcla Asfáltica Tibia de NAPA-FHWA. El objetivo principal del trabajo es la implementación adecuada a través de recolección de datos y análisis, de un método genérico de especificaciones técnicas en WMA.   |
| 2005      | Declaración de investigación de problemas sometido a la consideración de la American Association of State Highway and Transportation Officials ,AASHTO.   |
| 2005      | Se realizan pruebas de campo en Florida, Indiana, Maryland, New Hampshire, Ohio; y en Canadá.   |
| 2005      | La NCAT, publica sus primeros reportes sobre Sasobit y Aspha-min.   |
| 2006      | Durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto, se presenta una sesión de medio día sobre mezclas tibias   |
| 2006      | Grupo de Trabajo Técnico TWG, publica lineamientos sobre el funcionamiento y pruebas ambientales.   |
| 2006      | Con base en la declaración de investigación de problemas, cuyo documento fue sometido en 2005 a evaluación por parte de la AASHTO, se define como de alta prioridad la destinación de fondos de la investigación en WMA.  |
| 2006      | El TWG, somete dos declaraciones más de investigación, a consideración por parte de la AASHTO.  |

|      |  |
|------|--|
| 2006 | Se realizan pruebas de campo en: California, con la mezcla de hule asfáltico; Michigan, Missouri, sobre la nueva aplicación para evitar baches causados por temperatura en la carretera; Nueva York, donde se probó el nuevo proceso de Asfalto de bajo consumo de energía; Ohio, donde se realizó una exhibición abierta al público con 225 asistentes; Carolina del Sur, Texas, Virginia y Wisconsin, también se realizaron exhibiciones abiertas al público.  |
| 2006 | Un contratista de Missouri, realiza trabajos de producción de pavimento con mezcla en tibio partiendo de una prueba exitosa.   |
| 2006 | NCAT publica un reporte sobre el Evotherm.   |
| 2006 | Para la realización de la Conferencia Anual de NAPA, fueron requeridas numerosas presentaciones  |
| 2007 | AASHTO y FHWA, realiza visitas guiadas a experiencias en WMA, en Francia, Alemania y Noruega.  |
| 2007 | La sesión de trabajo de 2007, del Grupo en Investigación de Transporte TRB, tuvo como único tema WMA   |
| 2007 | Astec Industries introduce su tecnología de asfalto espumado.  |
| 2007 | Meadwestva company, presenta el sistema de introducción de la Tecnología del Asfalto Dispersado (DAT) para el Evotherm.  |
| 2007 | Se desarrolla, Advera WMA, un producto a partir de Zeolite, introducido por PQ Corporation.  |
| 2007 | Demostración en calle de San Antonio en la Reunión Anual de la APWA.   |
| 2007 | <p>30.000 toneladas de diferentes tecnologías de WMA, son colocadas cerca de Yellowstone, para el mes de Agosto.</p> <p>En las pruebas realizadas en la Yellowstone, se utilizaron 9,000 toneladas métricas de asfalto, en cada una de las tres secciones (Sección de Control, Sección Sasobit y Sección de Advere WMA). Durante el proceso de acarreo, las mezclas fueron conducidas cerca de 90 minutos desde una planta portátil en Cody, Wyo.</p> <p>Aunque fue difícil la logística, las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advere WMA-93.9% de densidad teórica máxima; el promedio de Sasobit – 93.4%. Neitke, quien estuvo a cargo del proyecto, declaró que: "La densidad no fue difícil de alcanzar, aun cuando las temperaturas de la mezcla bajan", ante lo cual, "Parecía un tanto difícil mantener bajas las temperaturas de la mezcla; las temperaturas de producción tenían una tendencia a brincar de 120 a 127°C. Las pruebas mostraron que los agregados se secaron adecuadamente aun con las temperaturas bajas. Los contenidos de humedad estaban abajo del máximo de 0.5% tanto para las mezclas en tibio como para la mezcla de control".</p> |
| 2007 | Son realizadas numerosas pruebas de campo, en California, Illinois, Nueva Jersey, Nueva York, Carolina del Norte, Ohio, Carolina del Sur, Tennessee, Texas, Virginia, Wisconsin, Wyoming y otros estados; y en Ontario.  |

Nota. Con las mezclas WMA se tiene un paso a tecnologías limpias Fuente: (Lopera, 2011, págs. 33-35).

## 6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la contaminación ambiental ha causado grandes desmanes al medio ambiente, en especial al ecosistema acuático y aéreo. Los principales factores que han permitido el deterioro de los ecosistemas mencionados anteriormente son la polución, la acumulación de residuos sólidos, el vertimiento de aguas negras a fuentes hídricas, y la inconciencia del ser humano.

La acumulación de residuos sólidos es tan descomunal, que ha causado la presencia de basura en lugares recónditos del planeta, tales como las fosas de las marianas, el monte Everest, y las islas más dispuestas geográficamente en mar adentro. Es tanta la basura que se genera que hasta el mismo océano a través de sus corrientes ha creado una isla de desechos sólidos nombrada como la gran mancha de basura del pacifico, ubicada en lo más adentro de océano pacifico norte, el tamaño de este fenómeno es tres veces más grande que el área total de Francia.

Otro tema a resaltar es el calentamiento global o como es conocido en la ciencia el cambio climático, que a este ritmo acelerado de contaminación a la atmosfera causada por los gases de efecto invernadero y el elevado consumo energético, tienen derritiendo los polos del planeta y causando desordenes en las temperaturas ambientales, los periodos de las estaciones del año, fenómenos climáticos tales como altas precipitaciones, olas de calor, inundaciones, sequias extremas a tal punto que no son solo terrestres, sino que están presentes en ríos, envases, y deltas. Por otro lado, el acelerado derretimiento de los polos está ocasionando un aumento en el nivel del mar, causando alteraciones al ecosistema acuático y fenómenos oceánicos.

Todo el tema de calentamiento global y contaminación al medio ambiente está estrechamente ligado a un término que hoy en día toma fuerza en todo el mundo, y es un indicador

de los niveles de contaminación ambiental, conocido como la huella de carbono, que a través de un cálculo estimado se puede conocer los porcentajes y los niveles de contaminación que genera cada proceso generado de la actividad humana. El gas de mayor impacto a la atmosfera es el CO<sub>2</sub>, puesto que es el más longevo, su duración puede llegar a tomar has cien años de presencia en la capa atmosférica. En el 2018 la presencia de CO<sub>2</sub> llego a 408 ppm, lo que refleja un 147% de veces mayor que en la época preindustrial.

Los gobiernos a través de organizaciones mundiales como la ONU (Organización de las Naciones Unidas) exponen temas generales relacionados con la proyección a futuro de la estabilidad nacional para el país que representen, entre estos temas los más relevantes son aquellos que se relacionan con salud, calidad de vida, economía, milicia, educación, medio ambiente y ecología. En cuanto al medio ambiente los países desarrollados presentan propuestas novedosas que permiten la integración de tecnologías y metodologías con los procesos de la vida cotidiana en diferentes disciplinas optimizando los procesos para el cuidar el medio ambiente. No obstante, para los países sub-desarrollados y en vía de desarrollo la falta de estabilidad económica y musculo financiero, frena todos los procesos que impliquen una gran inversión teniendo en cuenta que no solo están obstruidos por la parte financiera, sino que la mayoría de veces carecen de recursos y medios que permitan realizar investigaciones, estudios, y experimentaciones que contribuyan a las nuevas tecnologías.

Desde la ecología se incentiva a la práctica del uso triple R (reciclar, reutilizar y reducir) con el fin de mitigar los impactos medioambientales. Pues como bien se sabe en la actualidad las practicas eficientes hacia el cuidado del medio ambiente son cada vez más representativas y presentan un campo en la administración de los gobiernos.

Es por ello que el sector vial a nivel mundial desde hace unas décadas ha realizado investigaciones, estudios, análisis, estrategias, experimentos, y tecnologías que permitan implementar el reciclaje de algunos materiales que ya han cumplido con el periodo útil para ser reutilizados como componentes a la mezcla asfáltica. Tradicionalmente esta sustancia densa y de color negro es diseñada con tecnologías no sostenibles, pues debido que es un material que debe ser eficiente, duradero y económico, pensar en estas condiciones hace que los fabricantes y los constructores de asfalto ignoren la situación medioambiental del siglo presente. En la pavimentación las fases que presentan mayor impacto ambiental son el mezclado, el tendido del asfalto y la compactación debido que son procesos que generan gran emisión de gases de efecto invernadero y consumo energético. En el caso de la mezcla asfáltica la manera más convencional de mezclar es en caliente, debido que la es la tecnología más eficiente y económica, en países desarrollados debido al cambio climático, han estudiado la posibilidad de cambiar la tecnología tradicional HMA por la tecnología WMA, esto debido que la mezcla en tibio tiene un menor grado de temperatura para preparar el mezclado, de tal manera que los efectos contaminantes son menores respecto a la mezcla en caliente. Esta tecnología se crea en Europa en el año 1997 dada las condiciones de contaminación ambiental buscando una alternativa que no altere drásticamente las características del asfalto, y aunque es una tecnología relativamente nueva lo cierto es que desde la década de los 50 se venían haciendo estudios que permitieran patentar otra tecnología diferente a la tradicional HMA.

Para hacer posible la implementación de soluciones que den paso a las tecnologías amigables con el medio ambiente se han diseñado procedimientos de mezcla para incorporar los aditivos obtenidos de los materiales reciclados con la mezcla asfáltica tradicional con una tecnología que reduzca el calor necesario para culminar satisfactoriamente la fase de mezcla sin

afectar el rendimiento y la durabilidad del asfalto. Los estudios realizados para este tema han demostrado que la mezcla asfáltica modificada a temperaturas de 100°C a 140°C puede no solo conservar las características originales del asfalto tradicional, sino también puede proveer a la mezcla una mejoría a las características originales y unas propiedades adicionales. No obstante, realizar este procedimiento tiene como principal desventaja el aumento a los costos de producción e inversión. Lo cierto es que realizar este procedimiento es un paso al desarrollo sostenibles y las tecnologías ecológicas.

En cuanto a la sostenibilidad presente en la investigación, no solo se tiene en cuenta la tecnología de mezcla, sino también el hecho que se recicle y reutilice la materia desechada. Los materiales desechados no pueden tener un segundo uso, no obstante, se debe hacer una selección del material a emplear comenzando desde el proceso de reciclaje que, básicamente mediante personal operativo se recolecta de los vertederos, calles y canecas, para luego trasportarla a planta y ser procesada mediante una fase de limpieza, otra de molienda y otra de tamizaje. Cuando el finalice el procedimiento para elaborar el aditivo, ya se puede dosificar para ser mezclado con el asfalto. Este proceso de elaboración es totalmente sostenible, ya que la materia prima no requiere de combustibles fósiles para la producción, ni explotación de los recursos, ni genera emisión de gases de efecto invernadero en el proceso de producción, no obstante, la maquinaria empleada para triturar y pulverizar el material requiere un consumo energético el cual es mínimo, y una disposición del recurso hídrico para el proceso de limpieza y desinfección aunque para llevar a cabo este proceso se espera que el agua empleada provenga del reciclaje de otras aguas o de las aguas lluvias.



De este procedimiento, surgen inquietudes relacionadas con temas técnicos, económicos, medioambientales, y sociales. De esa manera, ¿Qué se está haciendo en Colombia y para implementar el procedimiento que conlleva a la elaboración de un asfalto sostenible en la construcción de carreteras?

## 7. METODOLOGÍA

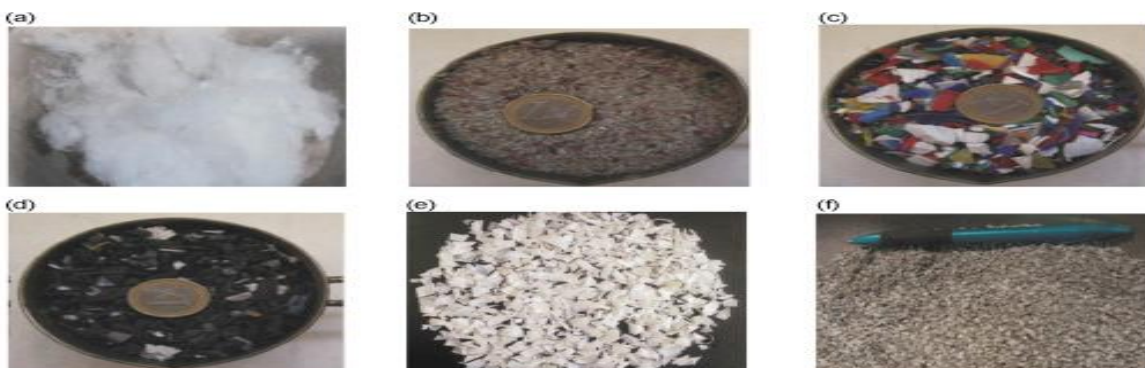
Con la finalidad de cumplir con los objetivos específicos, a continuación, se planteará la manera puntual para elaborar el aditivo con los materiales reciclados.

### 7.1. Obtención del aditivo a partir del plástico

#### 7.1.1. Enfoque técnico

Este material tiene como principal proceso el de reciclado, que mediante una selección de residuos sólidos se puede obtener la materia prima adecuada. Después de la selección del material adecuado, se procede a triturar la materia prima y el resultado cualitativo de este proceso se muestra en las figuras N°4 y N°5:

Figura N°5. Residuos sólidos de la industria del plástico. (a) Poliéster. (b) Polietileno. (c) Polipropileno. (d) Poliestireno. (e) Polietileno de alta densidad. (f) Residuos electrónicos.



Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 16)

Figura N°6. Residuos sólidos del reciclaje de polietileno tereftalato (PET)



Fuente: (Ben, Jakarni, Hassim, & Muniandy, 2021, pág. 4)

Esta selección de materiales mediante el reciclaje se clasifica en aquellos plásticos de tipo Termoplástico, pues tienen propiedades de flexibilidad con la acción de temperatura (Abdullah, y otros, 2016, pág. 4). En cuanto a la temperatura, la ideal por rendimiento y cohesión de materiales la más indicada es la mezcla en caliente, no obstante, la mezcla en tibio es una alternativa sostenible debido que requiere menor temperatura y con la mezcla de aditivos más adecuada se puede obtener una mezcla óptima con propiedades incluso mejores que las que se pueden obtener con la mezcla en caliente. (Hasan, y otros, 2016, pág. 20). En las tablas N°8, N°9 y N°10 se relacionan los datos que hacen referencia a la temperatura para la mezcla asfáltica y las propiedades mejoradas.

Tabla N°8. Porcentaje de uso del aditivo en polvo de plástico basado en el peso total del aditivo.

| Industria   | Clasificación de residuos sólidos |             | Opciones para incorporar residuos sólidos al aglutinante asfáltico |        |       | *<br>Uso (%) | Referencia               |
|-------------|-----------------------------------|-------------|--|--------|-------|--------------|--------------------------|
|             | Origen                            | Escribe     | Polvo  | Ceniza | Fibra |              |                          |
| El plástico | Computadora                       | Electrónico | ✓  | -      | -     | 5,0          | Mohd Hasan y col. (2016) |
|             | Petroquímico                      | Polietileno | ✓  | -      | -     | 4,0          | Ge et al. (2016)         |
|             | embalaje                          |             | ✓  | -      | -     | 4,0          | Fang y col. (2015)       |
|             | Envasado de leche                 |             | ✓  | -      | -     | 4,0          | Yu y col. (2015)         |

Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 22)

Tabla N°9. Tipo de mezcla más efectiva y porcentaje de uso del aditivo en polvo de plástico basado en el peso del bitumen asfáltico.

| Clasificaciones de residuos sólidos   |                                  | Pretratamiento de residuos sólidos | Aditivo aglutinante | Rendimiento de la mezcla asfáltica |               |                          |
|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------|--------------------------|
| Industria                             | Escribe                          |                                    |                     | Rutting                            | Agrietamiento | Resistencia a la humedad |
| Polietileno                           | Limpinado, triturado y tamizado  | -                                  | ✓                   | ✓                                  | NULO          |                          |
| Polvo de PE                           | -                                | -                                  | ✓                   | NULO                               | NULO          |                          |
| Polvo de polietileno de alta densidad | Limpio, criogénico reducido      | -                                  | NULO                | ✓                                  | NULO          |                          |
|                                       | Segregado y triturado            | -                                  | ✓                   | NULO                               | ✓             |                          |
| Polvo de PP                           | Limpinado, triturado y tamizado  | -                                  | ✓                   | ✓                                  | ✓             |                          |
|                                       | Limpinado, triturado y molido    | Polímero                           | ✓                   | NULO                               | ✓             |                          |
| Polvo de PVC                          | Triturado y tratado químicamente | -                                  | ✓                   | ✓                                  | NULO          |                          |
| Polvo de PET                          | Cortado, triturado y tamizado    | -                                  | NULO                | ✓                                  | NULO          |                          |
|                                       | Limpinado, triturado y tamizado  | -                                  | NULO                | ✓                                  | NULO          |                          |

Nota: polvo de PE ( Polietileno), polvo de PP ( Polipropileno), polvo de PVC ( Policloruro de Vinilo), polvo PET ( Tereftalato de Polietileno).Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 23)

Tabla N°10. Mejorías proporcionadas por el aditivo de plástico a la mezcla asfáltica.

| Clasificación de residuos sólidos |                              | Opciones para incorporar residuos sólidos a la mezcla asfáltica |         |       |         |        | *<br>Uso (%) |      |
|-----------------------------------|------------------------------|---|---------|-------|---------|--------|--------------|------|
| Origen                            | Escribe                      | Tipo de mezcla  | Agregar |       | Relleno |        |              |      |
|                                   |                              |   | Grueso  | Multa | Polvo   | Ceniza | Fibra        |      |
| Envase                            | Poliétileno                  | SMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 1,0  |
| Percha                            | Poliestireno                 | WMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 1,0  |
| Textil                            | Poliéster                    | SMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 0,3  |
| Botella                           | Poliétileno de alta densidad | HMA   | -       | ✓     | -       | -      | -            | 10,0 |
|                                   |                              | WMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 20,0 |
|                                   |                              | HMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 4,0  |
| Tapón de tierra                   | Polipropileno                | WMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 20,0 |
|                                   |                              | WMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 1,0  |
|                                   |                              | HMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 0,5  |
| Botella                           | Cloruro de polivinilo        | HMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 5,0  |
| Residuos electrónicos             | Electrónico                  | HMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 5,0  |
| Botella                           | Tereftalato de polietileno   | HMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 1,0  |
|                                   |                              | SMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 1,0  |
|                                   |                              | HMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 0,5  |
|                                   |                              | HMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 0,5  |
|                                   |                              | HMA   | -       | -     | ✓       | -      | -            | 1,0  |

Nota: SMA (Stone Mastic Asphalt), WMA( Warm Mix Asphalt), HMA ( Hot Mix Asphalt)

Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 24)

### 7.1.2. Enfoque económico

Para estimar un gasto promedio relacionado a la construcción de una vía sostenible, se toma como base la información que se tiene en el mantenimiento del tramo vial para las carreteras del estado de Tamil Nadu- India. Para este procedimiento se tomaron tramos de 1 Km de longitud, con 10 m de ancho, reemplazando un 10% del bitumen aplicado a la mezcla asfáltica. En las tablas N°11 y N°12 se relacionan los costos necesarios para elaborar esta actividad (Monrroy & Pardo, 2020, pág. 7).

Tabla N°11. Costos del reciclaje de plásticos y elaboración del aditivo plástico en pesos colombianos.

| Tipo de Pavimento                                   | Costo          |
|---|----------------|
| Recolección de Plásticos                            | \$ 2682853,58  |
| Costo de la trituradora y otros equipos             | \$ 2682853,58  |
| Construcción de carretera (mano de obra/materiales) | \$ 21462828,65 |

Fuente: (Monrroy & Pardo, 2020, pág. 7)

Tabla N°12. Costos de la construcción de una vía con asfalto modificado por aditivo plástico en pesos colombianos.

| Tipo de Mezcla                                      | Costo (Pesos)  |
|---|----------------|
| Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento             | \$3.735.357,2  |
| Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 2% | \$5.984.012,4  |
| Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 4% | \$8.183.530,5  |
| Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 6% | \$10.245.662,6 |

Fuente: (Monrroy & Pardo, 2020, pág. 7)

En la figura N°6 se relacionan los costos del procedimiento de inversión y mantenimiento para una vía con asfalto convencional comparada con una vía de asfalto modificado con polímeros de plástico. En la gráfica se tiene como tiempo útil de vida un periodo de 10 años, para evaluar la diferencia de los asfaltos se determinó mediante un estudio que el asfalto modificado puede tener un periodo de hasta 15 años de vida útil (Monrroy & Pardo, 2020, pág. 10).

Figura N°7. Relación costo / periodo de uso que tiene un asfalto tradicional respecto a un asfalto modificado.



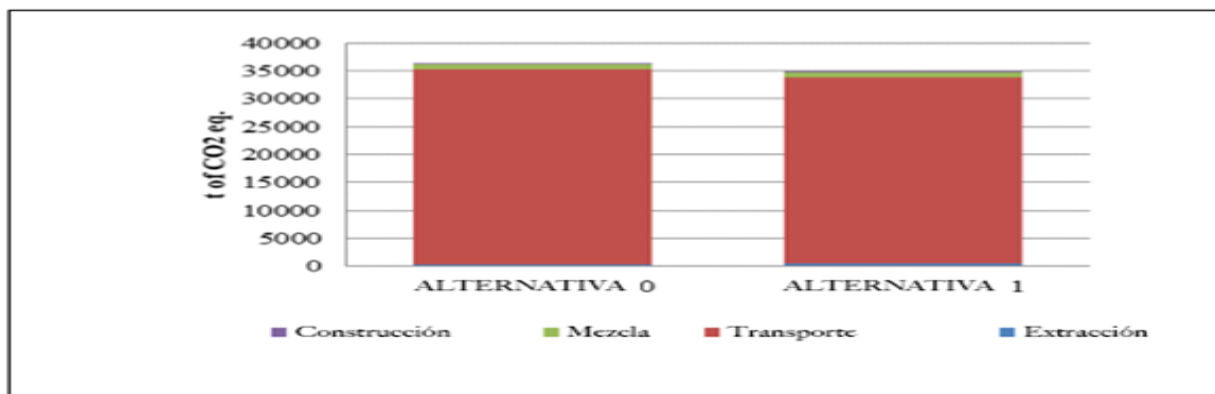
Nota: A.C (Asfalto Convencional), A.M.P (Asfalto Modificado con Polimero). Fuente: (Monrroy & Pardo, 2020, pág. 10)

## 7.2. Obtención del aditivo a partir del caucho

### 7.2.1. Enfoque ambiental

En la figura N°7 se relaciona la emisión de Greenhouse Gases (GHG) de una mezcla asfáltica tradicional comparada a una mezcla asfáltica modificada con caucho. De la gráfica se puede concluir que el asfalto modificado tiene una reducción de CO<sub>2</sub> del 4% respecto a la tradicional. (Monrroy & Pardo, 2020, pág. 13)

Figura N°8. Emisión de CO<sub>2</sub> de un asfalto tradicional VS asfalto modificado con aditivo de caucho y mezcla WMA.



Fuente: (Arroyo, y otros, 2018, pág. 4)

En cuanto a la emisión de GHG el asfalto modificado tiene un porcentaje del 15% de reducción gases en cuanto al asfalto tradicional. La producción de estos gases tiene un factor de impacto en los procesos de producción de bitumen, transporte y mezcla asfáltica. En la tabla N°13 se hace una comparación numérica de los dos tipos de asfalto. (Arroyo, y otros, 2018, pág. 3)

Tabla N°13. Emisión de GHG de un asfalto tradicional VS asfalto modificado con aditivo de caucho y mezcla WMA

| FASES                              | ALTERNATIVA 0    |                  |                 | ALTERNATIVA 1    |                  |                 |
|------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|
|                                    | CO <sub>2</sub>  | N <sub>2</sub> O | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub>  | N <sub>2</sub> O | CH <sub>4</sub> |
| <b>Extracción</b>                  | 411.70           | 0.0028           | 0.0234          | 448.64           | 0.004            | 0.032           |
| <b>Transporte</b>                  | 34,665.21        | 0.76             | 0.0241          | 33,179.98        | 0.731            | 0.023           |
| <b>Mezcla</b>                      | 894.98           | 0.0198           | 0.0349          | 855.90           | 0.019            | 0.033           |
| <b>Construcción</b>                | 16.78            | 0.152            | 0.000011        | 16.78            | 0.152            | 1.06E-05        |
| <b>TOTAL</b>                       | <b>35,988.67</b> | <b>0.94</b>      | <b>0.082</b>    | <b>34,501.30</b> | <b>0.906</b>     | <b>0.089</b>    |
| <b>CO<sub>2</sub> equivalentes</b> | <b>35,988.67</b> | <b>280.12</b>    | <b>2.05</b>     | <b>34,501.30</b> | <b>269.988</b>   | <b>2.225</b>    |
| <b>Total CO<sub>2</sub> eq.</b>    | <b>36,270.84</b> |                  |                 | <b>34,773.51</b> |                  |                 |
| <b>CO<sub>2</sub> eq./Km</b>       | <b>1450.8</b>    |                  |                 | <b>1390.9</b>    |                  |                 |

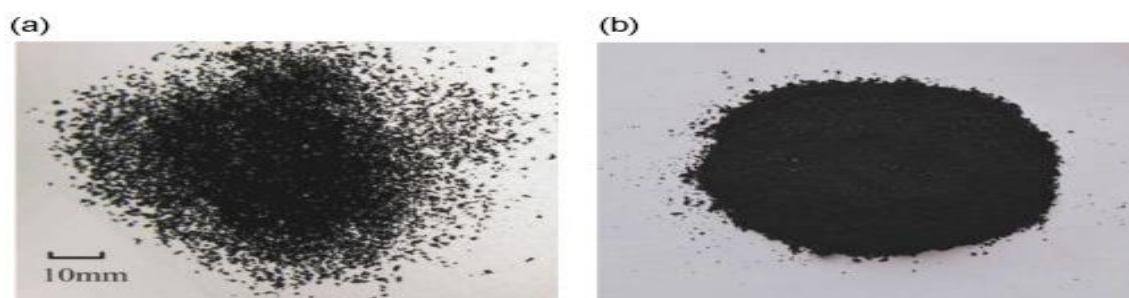
Fuente: (Arroyo, y otros, 2018, pág. 4)



### 7.2.2. Enfoque técnico

En la figura N°8 se representa la manera como se procesa la materia prima para proceder a elaborar el aditivo de caucho para la mezcla asfáltica modificada. Y en la tabla N°14 se muestra la relación de porcentaje de aditivo empleado en la mezcla, en función de su peso total. (Hasan, y otros, 2016, pág. 17)

Figura N° 9. Residuos sólidos de la industria del caucho. (a) Caucho desmenuzado grueso. (b) Caucho desmenuzado fino.



Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 17)

Tabla N°14. Porcentaje de uso del aditivo en polvo de cucho basado en el peso total del aditivo.

| Industria | Clasificación de residuos sólidos  |                    | Opciones para incorporar residuos sólidos al aglutinante asfáltico |        |       | * Uso (%) | Referencia        |
|-----------|------------------------------------|--------------------|--|--------|-------|-----------|-------------------|
|           | Origen                             | Describe           | Polvo  | Ceniza | Fibra |           |                   |
| Caucho    | Neumático al final de su vida útil | Polvo de neumático | ✓  | -      | -     | 10,0      | Ge et al. (2016)  |
|           |                                    |                    | ✓  | -      | -     | 50,0      | Wu y col. (2016)  |
|           |                                    |                    | ✓  | -      | -     | 18,0      | Yu y col. (2016)  |
|           |                                    |                    | ✓  | -      | -     | 15,0      | Yan y col. (2015) |
|           |                                    |                    | ✓  | -      | -     | 20,0      | Oda y col. (2012) |

Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 12)

En un estudio más detallado de los materiales empleados para fabricación del aditivo representados en la tabla N°15 se puede demostrar que el material de origen se clasifica en los siguientes porcentajes de uso del aditivo en función del su peso, también muestra la tecnología más adecuada para el mezclado. (Hasan, y otros, 2016, pág. 20)

Tabla N°15. Tipo de mezcla más efectiva y porcentaje de uso del aditivo en polvo de caucho basado en el peso del bitumen asfáltico.

|                                    |                              |     |   |   |   |   |   |      |
|------------------------------------|------------------------------|-----|---|---|---|---|---|------|
| Textil                             | Poliéster                    | SMA | - | - | ✓ | - | - | 0,3  |
| Botella                            | Poliétileno de alta densidad | HMA | - | ✓ | - | - | - | 10,0 |
| Neumático al final de su vida útil | Polvo de neumático           | HMA | - | - | ✓ | - | - | 3,5  |
|                                    |                              | HMA | - | - | ✓ | - | - | 1,0  |
|                                    |                              | HMA | - | - | ✓ | - | - | 10,0 |
|                                    |                              | HMA | - | - | ✓ | - | - | 20,0 |
|                                    |                              | HMA | - | - | ✓ | - | - | 1,0  |

Nota: SMA (Stone Mastic Asphalt), HMA ( Hot Mix Asphalt) Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 23)

Una de las mayores expectativas de este material es mejorar la relación costo/beneficio, puesto que en inversión y presupuesto se debe manejar un porcentaje de ahorro, con el fin de que las finanzas y el costo total del proyecto no generen sobrecostos. No obstante, la calidad del material debe ser lo suficientemente bueno para evitar bajas calidades y rendimientos en los materiales. Para este caso el rendimiento de los materiales tiene un aumento significativo en las principales características del asfalto. (IDU, idu.gov.co, 2011, pág. 18). Como se evidencia en la tabla N°16 la característica que presenta una mayor mejoría es la resistencia a la ruptura.

Tabla N°16. Mejorías proporcionadas por el aditivo de caucho a la mezcla asfáltica.

| Clasificaciones de residuos sólidos |                               | Pretratamiento de residuos sólidos | Aditivo aglutinante | Rendimiento de la mezcla asfáltica |               |                          |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------|--------------------------|
| Industria                           | Escribe                       |                                    |                     | Rutting                            | Agrietamiento | Resistencia a la humedad |
| Polvo de caucho granulado           | -                             | -                                  | ✓                   | NULO                               | NULO          |                          |
|                                     | Cortado, triturado y tamizado | -                                  | ✓                   | ✓                                  | NULO          |                          |
|                                     | Molido                        | -                                  | ✓                   | NULO                               | NULO          |                          |
|                                     | Limpiado, triturado y molido  | -                                  | ✓                   | NULO                               | ✓             |                          |
|                                     | Molido                        | -                                  | ✓                   | NULO                               | NULO          |                          |

*Fuente:* (Hasan, y otros, 2016, pág. 24)

### 7.2.3. Enfoque económico

La inversión de un proyecto debe estar en función del presupuesto y la utilidad del proyecto, es por ello que en la tabla N°17 se muestran los costos totales de dos mezclas asfáltica modificadas con dos tipos de aditivo de caucho.

Tabla N°17. Costos de producción de una vía con asfalto modificado por aditivo de caucho en pesos colombianos.

| Tipo de mezcla            | Precio \$/Ton | Densidad Compactada Ton/ m <sup>3</sup> | Cantidad de mezcla Necesaria m <sup>3</sup> | Costo unitario de la Mezcla. | Costo Total de la mezcla | % Diferencia en costo |
|---------------------------|---------------|---|---|------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Mezcla MDC-2              | \$195.000     | 2,4                                     | 810   | \$379.080.000                | \$379.080.000            | 18,803                |
| Mezcla Modificada con GCR | \$280.000     | 2,4                                     | 270   | \$181.440.000                | \$ 307.800.000           |                       |
|                           | \$195.000     | 2,4                                     | 270   | \$126.360.000                |                          |                       |

Nota. Relación de los costos totales de una mezcla tradicional VS una mezcla modificada con caucho granular. Fuente: (Trujillo, Vásquez, & Sánchez, 2017, pág. 21).

En un contexto general, se puede relacionar el resalto económico que han tenido los procedimientos para la producción del asfalto. En la tabla N°18 se puede conocer los procedimientos que tiene un alza de costos.

Tabla N°18. Impacto en los costos de las fases de construcción del pavimento asfaltico mezclado con el aditivo de caucho.

| Fase         | Subfase       | Impacto de los costes |           |
|--------------|---------------|-----------------------|-----------|
| Producción   | Materia prima | Agregar               | Lo mismo  |
|              |               | Aglutinante           | Aumentado |
|              | Planta        | Disminuido            |           |
| Construcción | Transporte    | Lo mismo              |           |
|              | Pavimentación | Lo mismo              |           |
|              | Compactación  | Disminuido            |           |
|              | Mantenimiento | Disminuido            |           |

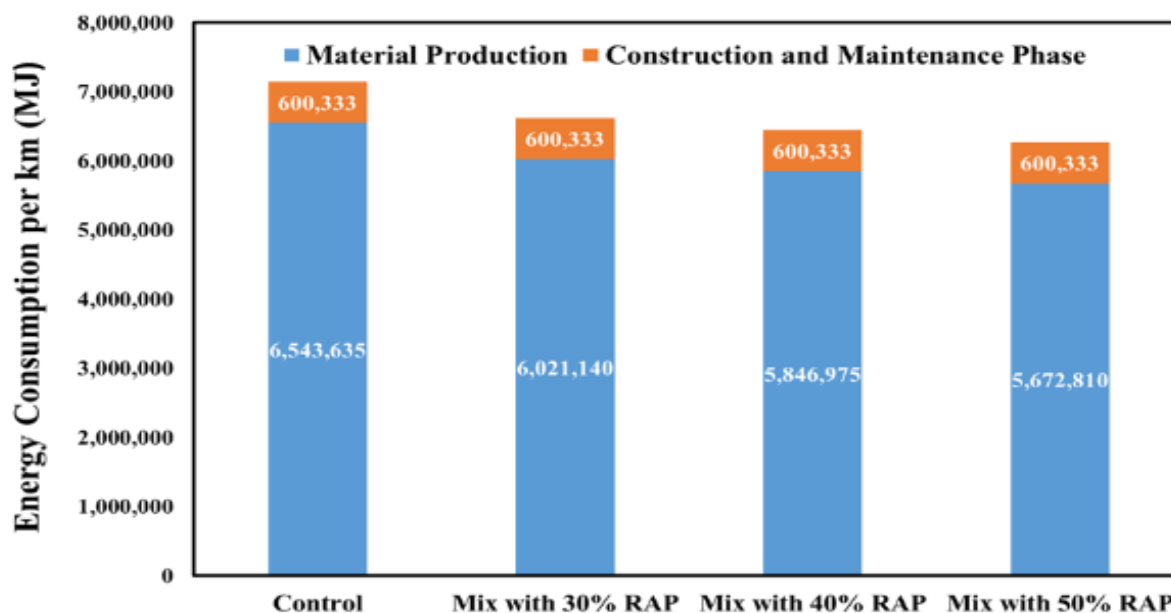
Fuente: (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 17)

### 7.3. Obtención del aditivo a partir del pavimento asfáltico recuperado (RAP)

#### 7.3.1. Enfoque Ambiental

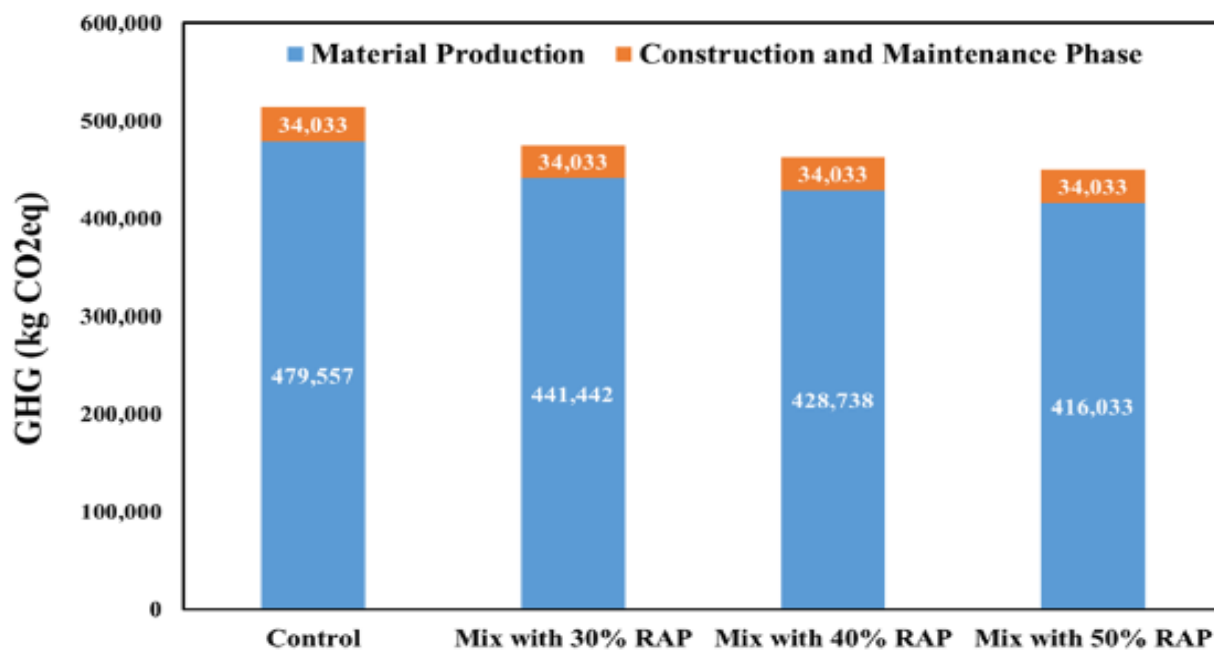
El alto consumo de materias primas para la obtención del bitumen es arrasaste, lo cual conlleva a un alza en la demanda de materias vírgenes. Por otro lado, se evalúa el consumo de energía y la emisión de GHG, que son factores de alto impacto ambiental en la mezcla asfáltica tradicional. La mezcla tradicional tiene un consumo energético de  $3.1 \cdot 10^6$  MJ, y una liberación de GHG estimado en  $2.3 \cdot 10^5$  Kg. Adicionar un 50% de (RAP) por sus siglas en inglés, a la mezcla tradicional reduce del 17% al 28% del consumo energético y de emisiones de GHG (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 8). En las figuras N°9, N°10, y N°11 se puede evidenciar una reducción de GHG y energía a medida que se emplea aditivo en la mezcla.

Figura N° 10. Consumo energético para diferentes porcentajes de RAP VS el tradicional.



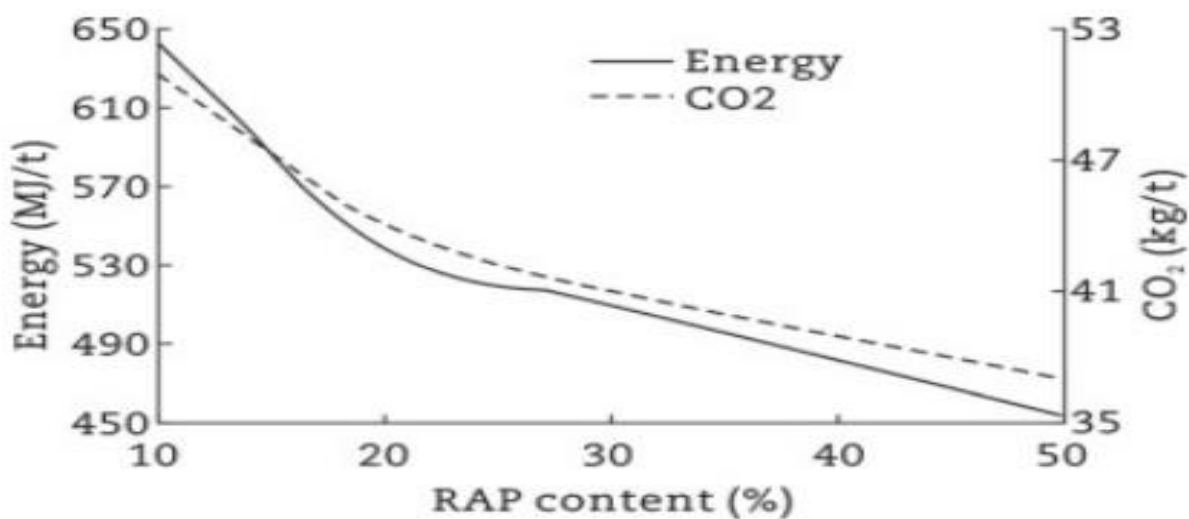
Fuente: (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 14).

Figura N° 11. Emisión de GHG para diferentes porcentajes de RAP VS el tradicional.



Fuente: (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 14).

Figura N° 12. Correlación del % RAP empleado en la mezcla, consumo energético y emisiones de GHG.



Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 35)

### 7.3.2. Enfoque económico

El uso de este material generaría ahorros significativos para el proyecto, usar un 20% a un 50% de RAP en la mezcla asfáltica puede ahorrar un 14% a un 34% de los costes de producción. (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 16). En la tabla N°19 se relaciona los beneficios sustanciales de cada porcentaje de RAP empleado en la mezcla asfáltica.

Tabla N°19. Porcentaje de RAP para reducir el volumen consumido en la carpeta asfáltica en vías EE. UU.

| % de RAP | Costo / tonelada | Ahorro de \$ / tonelada | Ahorro (%) |
|----------|------------------|-------------------------|------------|
| 0        | 11,9             | -                       | -          |
| 20       | 10.26            | 1,64                    | 14         |
| 30       | 9.44             | 2,46                    | 21         |
| 40       | 8,62             | 3,28                    | 28         |
| 50       | 7.8              | 4.1                     | 34         |

Fuente: (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 18).

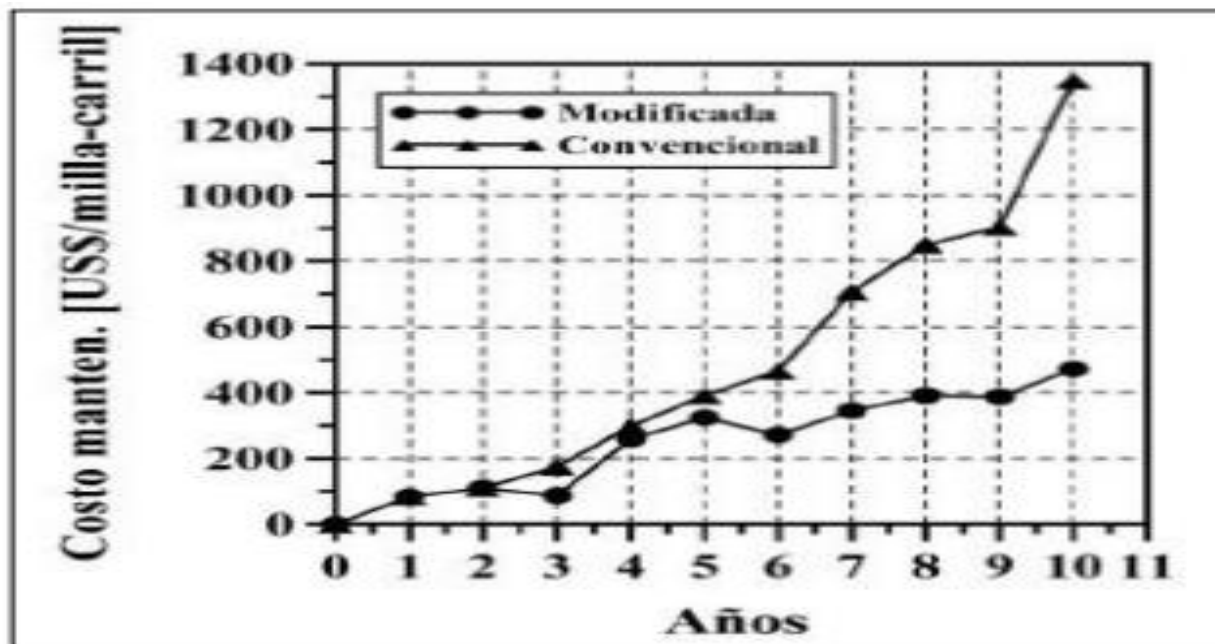
En la tabla N°20 se relacionan los datos correspondientes al porcentaje de reducción para la mezcla asfáltica por cada carpeta construida, lo cual puede llevar a un criterio para elaborar el control de gastos por tramo construido (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 17). Por otro lado, en la figura N°12 se grafica la relación del costo del mantenimiento vial para una carretera con RAP en función del periodo útil de vida.

Tabla N°20. Ahorro de costos generales en dólares para EE. UU de la mezcla asfáltica empleando RAP.

| Contenido de RAP (%) | Carpeta total necesaria (%) | Carpeta virgen (%) | Carpeta recuperada (%) | Carpeta virgen reducida (%) |
|----------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|
| 0                    | 5.9                         | 5.9                | 0                      | 0                           |
| 20%                  | 5.7                         | 4.8                | 0,9                    | 15,8                        |
| 40%                  | 5,65                        | 3.8                | 1,85                   | 32,7                        |

Fuente: (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 19).

Figura N° 13. Relación de costos por mantenimiento vial VS años de vida útil.



Fuente: (Bargil Cubillos, 2014, pág. 38)



### 7.3.3. Enfoque técnico

Este tipo de asfalto modificado tiene como principal característica la versatilidad para ser un material de alto permeabilidad y flexibilidad. La temperatura de mezcla y el porcentaje de RAP tienen influencia sobre el rendimiento del material (Hasan, y otros, 2016, pág. 24). En la tabla N°21 se muestran los datos de temperatura y rendimiento.

Tabla N°21. Rendimiento del asfalto RAP en función de la tecnología de mezcla

| Rate                    | Type of recycled mix |          |                     |
|-------------------------|----------------------|----------|---------------------|
|                         | Hot                  | Warm     | Cold                |
| RAP, %                  | < 50                 | 100      | 100                 |
| Initial cohesion        | Very good            | Good     | Poor                |
| Maturing period         | No need              | No need  | Several weeks       |
| Contribution aggregates | Yes                  | No       | No                  |
| Binder                  | Bitumen              | Emulsion | Emulsion            |
| Working temperature     | High temperature     | > 60 °C  | Ambient temperature |

Fuente: (Hasan, y otros, 2016, pág. 25)

Sin duda adicionar RAP al contenido asfáltico mejora las características del asfalto, entre las más relevantes se pueden apreciar los cambios en la tabla N°22.

Tabla N°22. Mejoría en las características del asfalto con modificación del aditivo RAP

| Parámetro de rendimiento / prueba | Efecto                    |             |             |          |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|----------|
|                                   | Mismo                     | Incrementar | Disminución | Mezclado |
| Rigidez                           | Módulo dinámico (E *)     | √           |             | √        |
|                                   | Ángulo de fase            |             | √           |          |
| Rutting                           | Desviación                | √           | √           |          |
|                                   | Rigidez de fluencia       |             |             | √        |
|                                   | Tiempo de flujo lento     |             | √           |          |
| Susceptibilidad a la humedad      | Sensibilidad a la humedad | √           | √           |          |
|                                   | Índice de tenacidad       |             |             | √        |
| Agrietamiento                     | Fatiga                    | √           | √           | √        |
|                                   | reflexivo                 |             | √           |          |
|                                   | Térmico                   | √           | √           |          |

Fuente: (Reza & Shishehbor, 2019, pág. 22)

## 8. CASO APLICADO

La tecnología elegida para exponer los procedimientos correspondientes a los temas de investigación será a través del pavimento modificado con miga de caucho a temperatura alta. El proyecto a presentar se llevará a cabo en la ciudad de Bogotá, D.C con la colaboración del instituto de desarrollo urbano (IDU) de la alcaldía mayor de Bogotá y la universidad de los Andes (UNIANDES), titulado “SEGUNDA FASE DEL ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS – PISTA DE PRUEBA” bajo el contrato expedido por la alcaldía mayor con consecutivo IDU-306-003 elaborado en el año 2005 (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 14). El procedimiento para elaborar satisfactoriamente el proyecto se divide en cuatro fases fundamentales que son la recopilación de información, ensayos de laboratorio, diseño de la mezcla asfáltica, y finalmente la construcción del tramo vial. A continuación, se explicará brevemente los temas más relevantes de cada fase.

### 8.1. Fase de recopilación de información.

Lo primero que se investigo fue los conceptos fundamentales para la contextualización del tema general, entre esos temas se tuvo en cuenta el procedimiento que lleva mezclar la miga de caucho con el asfalto. En la tabla N°23 se asociarán los procedimientos y tecnologías para la elaboración del asfalto modificado.

Tabla N° 23. Procedimiento adecuado para la elaboración del asfalto modificado con caucho

| MATERIAL | PROCESO | TECNOLOGÍA   | PRODUCTO  |
|----------|---------|--------------|---|
| GCR      | Húmedo  | Bachadas     | Asfalto modificado con caucho ó<br>Asfalto-caucho |
|          |         | Continua     |   |
|          |         | Terminal     |   |
|          | Seco    | PlusRide     | Mezcla asfáltica mejoradas con<br>caucho          |
|          |         | Genérica     |   |
|          |         | Convencional |   |

Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 28)

El caucho empleado en este proyecto se extrajo de acople de llantas Renovadora de Llantas LTDA estas llantas proceden de camiones, la trituración será por proceso mecánico y no criogénico puesto que elevaría el CAPEX del proyecto, aunque sería el más sostenible, el tamaño de partícula apropiada es de 2,38 mm a 74  $\mu\text{m}$ , y el proceso se hará por vía húmeda. La modificación del asfalto con grano de caucho reciclado (GCR) aporta como principal característica el aumento de viscosidad lo cual hace que la mezcla sea más flexible a altas temperaturas, de tal manera presenta una mejoría en el rendimiento a la deformación permanente, la fatiga, y la resistencia a las fisuras. En países desarrollados como EE. UU se viene investigando este tema desde el año 1994 con un porcentaje del 5% de GCR a la mezcla, hasta un 20% de GCR implementado en el año de 1997, siendo California, Arizona y Florida los estados líderes en la implementación de esta tecnología. En cuanto a los costos generales, implementar esta tecnología tiene mayor CAPEX, puesto que el proceso por vía seca requiere de mayor cantidad de ligante asfáltico, maquinaria especializada para tritura y mezcla, diseño de mezcla modificado, almacenamiento de caucho, cambio de bombas y tuberías, y mayor energía para mezclar, no obstante, a largo plazo los costos se equilibran gracias al bajo CAPEX del mantenimiento y reparaciones. En cuanto al ligante empleado en este proyecto se usó el asfalto Barranca elaborado por la planta de asfalto Barranca. En la tabla N°24 se darán a conocer las características del asfalto Barranca.

Tabla N° 24. Características del asfalto Barranca por ECOPETROL.

| Características                | Unidades | Métodos | Mínimo | Máximo |
|--------------------------------|----------|---------|--------|--------|
| Ductilidad a 25°C, 5cm/min     | cm       | D 113   | 100    |        |
| Penetración a 25°C, 100 g 5s   | mm/10    | D 5     | 80     | 100    |
| Punto de ablandamiento         | ° C      | D 36    | 42     | 53     |
| Punto de Inflamación           | ° C      | D 92    | 232    |        |
| Solubilidad en tricloroetileno | g/100g   | D 2042  | 99     |        |
| Pérdida de masa                | g/100    | D 2872  |        | 1      |

Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 34)

## 8.2. Fase de ensayos de laboratorio

Un proceso previo a la modificación del asfalto y el posterior diseño de mezcla se inicia con una caracterización física de los materiales, según lo establecido por el INVIAS. Posteriormente el asfalto ligante es envejecido en horno rotatorio de lámina delgada RTFOT, también en cámara de envejecimiento a presión PAV- RTFOT, de esta manera se puede obtener información necesaria para la fabricación, colocación y compactación del asfalto. Por último, se hace un proceso de caracterización reológica, con un reómetro de corte dinámico modelo Autogap CSI 2100 fabricado por TA instruments, este ensayo proporciona información acerca de esfuerzos de corte cíclico, determina el corte complejo, y el ángulo de fase. Entre los ensayos de caracterización física y reología a ejecutar para este estudio se hicieron los siguientes:

- Penetración
- Punto de Ablandamiento (anillo y bola)
- Ductilidad
- Viscosidad de Brookfield (Barrido de temperaturas).
- Estabilidad al almacenamiento
- Envejecimiento de horno rotatorio de película delgada (RTFO), y cálculo de pérdida de masa.
- Envejecimiento de cámara de presión (PAV).
- Reología de los ligantes en DSR, para caracterización viscoelástica.

En la tabla N°25 se muestran los resultados del estudio de caracterización física del asfalto Barranca con un estado de adaptación y modificación.

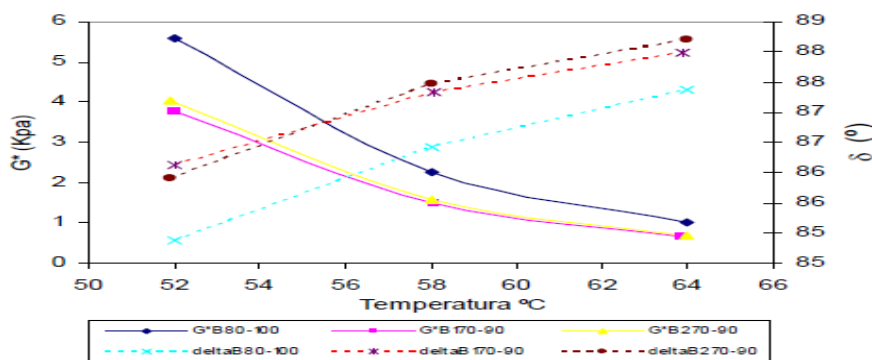
Tabla N° 25. Propiedades físicas modificadas de Asfalto Barranca (80-100)

| PRUEBA                        | Barranca 80-100 |
|-------------------------------|-----------------|
| Viscosidad a 135°C(cP)        | 683             |
| Penetracion Original(dmm)     | 92              |
| Ductilidad(cm)                | 150             |
| Estabilidad al almacenamiento | SI              |
| Punto Ablandamiento(°C)       | 50              |
| Penetracion del Residuo(dmm)  | 33              |
| Pérdida de Masa (%)           | 0,08            |

Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 40)

Del estudio reológico se obtuvieron los resultados presentados a continuación en las figuras N°13, N°14, y N°15. En la figura N°16 se describe la visco-elasticidad del material en estado original, resultando que a altas temperaturas el módulo de corte es menor y un aumento progresivo del ángulo de fase, dando un comportamiento viscoso.

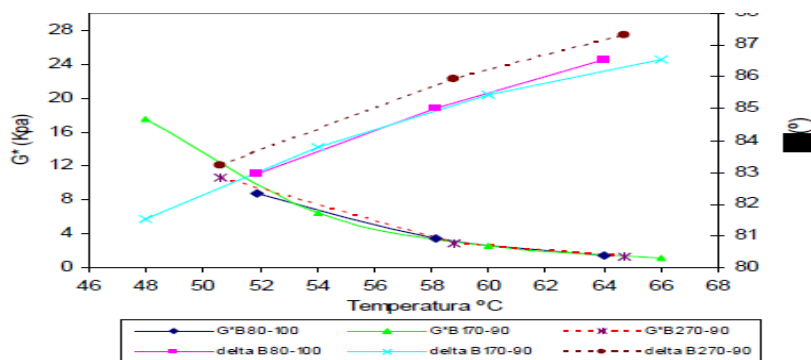
Figura N° 14. Caracterización reológica del asfalto Barranca con frecuencia de 10 ras/s



Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 56)

En la gráfica N°8 se presenta el comportamiento del material sometido al envejecimiento por horno, de esto se puede concluir que, aunque el módulo de corte y la fase de ángulo disminuyó, el material presenta una mayor rigidez.

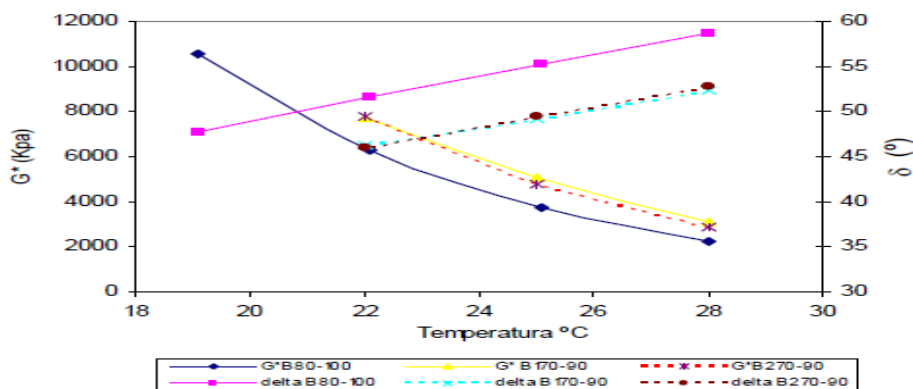
Figura N° 15. Caracterización reológica del asfalto Barranca con envejecimiento a horno.



Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 56)

En la gráfica N°9 se puede evidenciar el comportamiento del asfalto Barranca sometido a envejecimiento a presión, del cual se puede concluir que pavimento tendrá una duración mayor a 10 años.

Figura N° 16. Caracterización reológica del asfalto Barranca con envejecimiento a presión.



Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 57)

Para tener una eficiencia en el proceso de vía en húmedo, se estableció que los tiempos de mezcla deben ser entre 20 y 40 minutos, y el porcentaje de caucho incorporado a la mezcla debe ser de 15% y 20% del total del peso de la mezcla, la temperatura adecuada debe ser de 155°C, y la granulometría se determinó como material que pasa el tamiz #30.

### 8.3. Fase de diseño de mezcla

Para este ítem se sintetizó la información en dos parámetros fundamentales que son la granulometría de los agregados y el contenido de ligante. En la tabla N°26 se relaciona el material como agregado empleado a la mezcla.

Tabla N° 26. Tamaño de partícula del agregado

| Cantera | Pétreos       |               | Arena         |       |
|---------|---------------|---------------|---------------|-------|
|         | Vista Hermosa | Vista Hermosa | Vista Hermosa | Guamo |
| Tamaño  | 1/2"          | 3/8"          | arena         | arena |
| origen  | Peña          | Peña          | Peña          | Río   |

Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 79)

Para el contenido de ligante asfáltico la ecuación que describe la cantidad se presenta en la figura

N°7

Figura N° 17. Ecuación que describe el contenido de ligante asfáltico

$$\text{Contenido...de...ligante} = K\alpha^3\sqrt{\Sigma}$$

$$\alpha = \frac{2.65}{\gamma_G}$$

Donde:

$\Sigma$  : superficie específica convencional =  $0.25 G + 2.3 S + 12 s + 135 f$ .

**K** : módulo de riqueza.

**f** : proporción en peso de partículas menores del tamiz 200.

**G** : porción en peso de partículas de más de 6.3 mm.

**S** : proporción en peso de partículas comprendidas entre 6.3 y 0.315 mm.

**s** : proporción en peso de partículas comprendidas entre 0.315 y 0.08 mm.

Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 85)

#### 8.4. Fase de construcción del tramo vial

El proyecto se localizará en la localidad de Engativá barrio los Álamos, sobre la carrera 96 entre calles 63 y 67. El tramo a construir tendrá un perfil de tránsito moderado, vía terciaria, tráfico uniforme, con una circulación de vehículos mixtos. El tramo intervenido de la carrera 96 se compone de dos calzadas en sentido contrario con un ancho de calzada de 7 mts, la construcción se hará por tramos de diferente mezcla asfáltica en la calzada sentido norte-sur con una longitud de 270 mts. Para lograr construir esta calzada se hicieron cuatro apiques a lo largo de la vía con distancias de 84 mts, con el fin de evaluar la geotecnia de la sub-rasante, también se procesará el asfalto en una planta pequeña construida in situ, el material ligante se traerá hasta la obra para luego ser mezclado con el asfalto en la planta de la obra. La construcción por tramos tendrá longitudes de 54 mts repartidos en 5 secciones, cada sección se construye con material diferente. Para la selección de la mezcla se pretende adicionar un 18% de caucho con una temperatura de mezcla de 163°C y un tiempo de mezclado de 25 minutos, con el fin de obtener una viscosidad de 2000 a 2500 cP. En la tabla N°27 se exponen los valores de la mezcla.

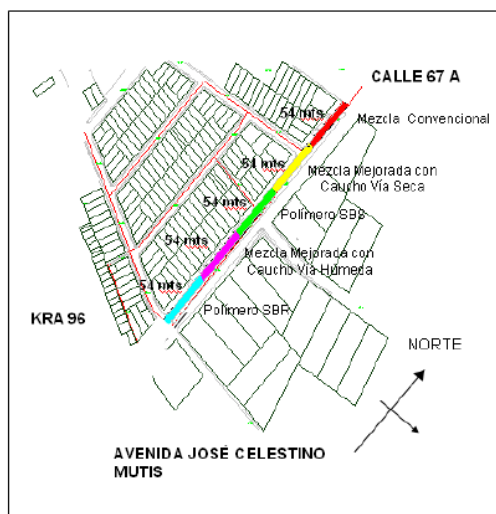
Tabla N° 27. Valores predeterminados para las mezclas asfálticas

| Característica                                    | Valor     |
|---|-----------|
| Porcentaje de Caucho incorporado (%)              | 18        |
| Tiempo de mezcla (min)                            | 25        |
| Viscosidad Brookfield (cP)                        | 2000-2500 |
| Temperatura de Falla sin envejecimiento (°C)      | 74-76     |
| Temperatura de Falla con envejecimiento RTFO (°C) | 65-70     |
| Temperatura de Falla con envejecimiento PAV (°C)  | 16 - 16,5 |

Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 110)

En la figura N° se muestra la ubicación del tramo y los sub-tramos a construir

Figura N° 18. Localización del tramo y los sub-tramos a construir



Fuente: (IDU & UNIANDES, idu.gov.co, 2005, pág. 149)

Las fases de construcción son las siguientes; fresado, extracción, seriado, compactación de la sub- rasante, seguido de un procedimiento para medir deflexiones, luego se coloca la mezcla asfáltica según el diseño y ligante elegido para el sub- tramo, y por último la compactación del pavimento.



En la actualidad la pavimentación de vías en Colombia con material reciclado se produce por tramos de prueba, en el documento mencionado anteriormente se puede apreciar que esta pavimentación también se realizó mediante tramos de prueba, solo con la diferencia que se pavimento sub-tramos para comparar el rendimiento y la eficiencia de mezcla en campo. Por ahora Colombia implementa estas tecnologías en vías de bajo tránsito como tramos de prueba, así como se tiene en el proyecto realizado en el departamento de la Guajira, en el sector de Dibulla. La vía cuenta con 1634 mts de longitud, 3,6 mts de ancho y 10 cm de espesor, y fue construida por la empresa norteamericana Dow, en colaboración de las empresas nacionales grupo Sufrax, construcciones El Cóndor, y Esenttia. Para realizar la construcción se requirieron más de 250 mil recipientes plásticos, los cuales pesaron una tonelada. La rueda de prensa la dirigió el director de Dow Colombia anunciando que el informe del tramo de prueba ya se había entregado al presidente de la republica Iván Duque. (Forbes, 2021). En cuanto al gobierno actual se tiene proyectado un programa de fomentación vial para construir vías a competentes con tecnología sostenible y de mayor rendimiento en una visión al 2030, el documento se titula “Declaración de importancia estratégica del compromiso por Colombia: programa vías para la legalidad y la reactivación, visión 2030” y tiene como objetivo la rentabilidad de vías adjudicadas en proyectos enfocados a departamentos con una participación importante para el país. En cuanto a la construcción de vías con materiales reciclados, se espera pavimentar tramos al comienzo, en la mitad y al final del corredor vial, de tal manera que no supere un 10% de la longitud total de la calzada. (DNP, 2020, pág. 52)

## 9. CONCLUSIONES

- ✓ La manera de obtener los materiales para el aditivo tiene fundamento en el reciclaje, el proceso de reciclarlos depende de la fuente elegida para obtenerlos, en el caso específico del plástico hay que tener cuidado con la composición polimérica del material debido a que su fuente de obtención es muy dispersa, esto puede generar una mala selección del plástico.
- ✓ Para los materiales como en caucho y el asfalto reciclado la disposición de este material tiene un procedimiento de selección menos meticulosa que para el plástico, pues los materiales anteriormente mencionados no son mezclados con otros residuos sólidos, ni tienen una composición química variable como la de los polímeros plásticos.
- ✓ El procedimiento puntual para obtener el aditivo consta en general de la trituración mecánica de los materiales reciclados, para luego ser procesados en una planta de asfalto y de esta manera obtener el pavimento modificado.
- ✓ El porcentaje óptimo de uso del aditivo plástico para ser añadido a la mezcla no debe superar el 15% del total del, pero de la mezcla.
- ✓ Con el aditivo RAP se debe tener como máximo un 50% de material empleado en la mezcla, más de este porcentaje endurecería demasiado el asfalto.
- ✓ Diseñar una mezcla asfáltica modificada con algún polímero reciclado, aumenta considerablemente los costos de producción, el aditivo más costoso de producir es el que se obtiene a partir de los polímeros de plástico, debido que producir un ligante asfáltico que funcione como conglomerante es más complejo y costoso.

- ✓ Las tecnologías más eficientes en cuanto a sostenibilidad se fundamentan en un procedimiento que no emplee tanta energía y por ende no genere tanto calor. Las tecnologías tibias en el caso de la mezcla mitigan la contaminación por GHG.
- ✓ El presente estudio realizado mediante la investigación de parámetros fundamentales para la elaboración de un aditivo a partir de materiales reciclados permite evidenciar la presencia de estudios, laboratorios y pruebas tanto técnicas como prácticas con el fin de corroborar los datos y la información necesaria del proceso que tiene elaborar un aditivo con materiales reciclados y a su vez una mezcla asfáltica que se empleara en la construcción de vías sostenibles.
- ✓ Este proyecto presenta estándares de sostenibilidad y enfoque ambiental, de tal manera que aplicando las tecnologías apropiadas para cada procedimiento se puede obtener resultados satisfactorios. El pensar en verde es una práctica del siglo actual, ya que los impactos ambientales generados a diario por las actividades humanas están acabando con el ecosistema y los recursos naturales no renovables.
- ✓ Los gobiernos a nivel internacional están tomando medidas que permitan apoyar desde la parte legislativa con el objetivo de implementar en sus planes de gobierno la sostenibilidad ambiental.
- ✓ La relación costo/ beneficio que se obtiene de implementar estas tecnologías presenta un incremento al CAPEX del proyecto, pero una reducción de costos al OPEX, de tal manera que diseñar una propuesta para construir proyectos de esta magnitud sean viables y permitan el desarrollo social.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, M., Abd, S., Putra, R., Yaacob, H., Hassan, N., & Wan, N. (2016). *matec-conferences.org*. Obtenido de Efecto de los residuos plásticos como betún modificado en una mezcla de asfalto: [https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/17/matecconf\\_iscee2017\\_09018.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/17/matecconf_iscee2017_09018.pdf)
- Al adday, F., Awad, A., & Alsaleh, F. (2020). *geomatejournal.com*. Obtenido de Pavimento de bajo costo usando residuos sólidos, áridos reciclados, caucho granular y residuos plásticos para carreteras rurales: <https://www.geomatejournal.com/sites/default/files/articles/18-23-20169-Feras-Jan-2021-77.pdf>
- AL-Rubaie, A., & Joni, H. (2021). *opscience.iop.org*. Obtenido de Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas modificadas con caucho de desecho de llantas a altas temperaturas: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1895/1/012026/pdf>
- Arroyo, P., Herrera, R., Salazar, L., Gimenez, Z., Martinez, J., & Colahorra, M. (2018). *scielo.conicyt.cl*. Obtenido de Un nuevo enfoque para la integración de factores ambientales, sociales y económicos para evaluar mezclas asfálticas con y sin neumáticos de desecho: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732018000300301](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732018000300301)
- Bajpayee, S. (2014). *academia.edu*. Obtenido de Carreteras de plastico: [https://www.academia.edu/33239789/PLASTIC\\_ROADS\\_A\\_SEMINAR\\_REPORT\\_SUBMITTED\\_IN\\_PARTIAL\\_FULFILLMENT\\_OF\\_THE\\_REQUIREMENTS\\_FOR\\_THE\\_AWARD\\_OF\\_THE\\_DEGREE\\_OF\\_BACHELOR\\_OF\\_TECHNOLOGY\\_SUPERVISED\\_BY](https://www.academia.edu/33239789/PLASTIC_ROADS_A_SEMINAR_REPORT_SUBMITTED_IN_PARTIAL_FULFILLMENT_OF_THE_REQUIREMENTS_FOR_THE_AWARD_OF_THE_DEGREE_OF_BACHELOR_OF_TECHNOLOGY_SUPERVISED_BY)
- Bargil Cubillos, C. (2014). *uniandes.edu.co*. Obtenido de reciclaje de pavimentos y metodos de reciclaje de pavimentos: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22026/u258953.pdf?sequence=1>
- Ben, M., Jakarni, F., Hassim, S., & Muniandy, R. (2021). *mdpi.com*. Obtenido de Una breve reseña: Aplicación de tereftalato de polietileno reciclado en el refuerzo de pavimentos de asfalto: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1303/htm>
- Cabrera, H., Figueroa, J., Avila, J., Mendez, K., Lopez, C., & Lopez, B. (2020). *opscience.iop.org*. Obtenido de Evaluación de la generación de residuos en una obra de construcción de viviendas para desarrollar mejoras en su disposición final: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/503/1/012020/pdf>
- Chadar, S., & Chadar, K. (2017). *juniperpublishers.com*. Obtenido de Contaminación por desechos sólidos: un peligro para el medio ambiente: <https://juniperpublishers.com/rapsci/pdf/RAPSCI.MS.ID.555586.pdf>
- Diaz, C., & Castro, L. (2017). *usta.edu.co*. Obtenido de Implementación del grano de caucho reciclado (gcr) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y

- garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá:  
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf>
- DNP. (2020). *dnp.gov.co*. Obtenido de Declaración de importancia estratégica del compromiso por Colombia: programa vías para la legalidad y la reactivación, visión 2030:  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4010.pdf>
- Dueñas, M., & Calume, A. (2017). *usta.edu.co*. Obtenido de Recopilación y análisis sobre el uso del grano de caucho modificado (gcm) para la utilización por vía seca en el diseño de carpetas asfálticas en Bogotá : <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2649>
- Forbes. (2021). *forbes.co*. Obtenido de <https://forbes.co/2021/09/03/actualidad/inauguran-la-primera-carretera-hecha-con-plastico-reciclado-de-colombia/>
- Ghabchi , R., Arshadi, A., Zaman, M., & March, F. (2021). *mdpi.com*. Obtenido de Desafíos técnicos de la utilización de caucho para neumáticos de tierra en pavimentos de asfalto en los Estados Unidos: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4482/htm>
- Gireesh, P. (2020). *iopscience.iop.org*. Obtenido de Una revisión completa sobre el reemplazo de material virgen utilizando material de pavimento asfáltico recuperado (RAP) en pavimentos flexibles: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1006/1/012041>
- Gobierno Nueva Gales. (2020). *www.lgnsw.org.au*. Obtenido de Alcaldía Nueva Gales:  
[https://www.lgnsw.org.au/common/Uploaded%20files/PDF/Technical\\_Review\\_Recycled\\_Materials\\_in\\_Roads-Pavements.pdf](https://www.lgnsw.org.au/common/Uploaded%20files/PDF/Technical_Review_Recycled_Materials_in_Roads-Pavements.pdf)
- Hasan, M. (2018). *iopscience.iop.org*. Obtenido de Sostenibilidad de los materiales de pavimentación asfáltica que contienen diferentes materiales de desecho:  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/454/1/012176/pdf>
- Hasan, M., Chew, J.-W., Jamshidi, A., Yang, X., & Othman, M. (2019). *sciencedirectassets.com*. Obtenido de Revisión de las consideraciones de sostenibilidad, pretratamiento e ingeniería de los modificadores de asfalto de los desechos sólidos industriales:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756418302563?via%3Dihub>
- Hasan, R., Colbert, B., Zhanping, Y., Heiden, P., Jamshidi, A., & Othman, M. (2016). *sciencedirectassets.com*. Obtenido de Un tratamiento simple de plásticos de desechos electrónicos para producir aditivos aglutinantes de asfalto con propiedades mejoradas:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816300769?via%3Dihub>
- IDU. (2011). *idu.gov.co*. Obtenido de Mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas, y de alto módulo: <https://www.idu.gov.co/web/content/7623/510-11.pdf>
- IDU. (2011). *idu.gov.co*. Obtenido de Mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía: <https://www.idu.gov.co/web/content/7632/560-11.pdf>
- IDU, & UNIANDES. (2005). *idu.gov.co*. Obtenido de Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas – pista de prueba.:  
[https://www.idu.gov.co/web/content/7461/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas](https://www.idu.gov.co/web/content/7461/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas)
- INVIAS. (2013). *invias.gov.co*. Obtenido de Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura subsector vial: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/guia-de-manejo-ambiental-de-proyectos/971-guia-de-manejo-ambiental/file>
- Iskandar, D., Hadiwardoyo, S., & Sumabrata, R. (2018). *iopscience.iop.org*. Obtenido de Deformación de la formación de surcos debido al cambio de temperatura debido al

- reciclaje de asfalto de mezcla en caliente con caucho desmenuzado:  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/453/1/012015/pdf>
- Jamshidi, A., & White, G. (2019). *mdpi.com*. Obtenido de Evaluación del desempeño y desafíos del uso de materiales de desecho en la construcción de pavimentos: una revisión crítica:  
<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/1/226/htm>
- Jithendrun, C., Raja, S., Smphat, N., & Bhaskar, P. (2020). *researchgate.net*. Obtenido de Una revisión sobre el uso de plástico en Construcción de Carreteras:  
[https://www.researchgate.net/publication/341098184\\_A\\_Review\\_on\\_Use\\_of\\_Plastic\\_in\\_Construction\\_of\\_Roads](https://www.researchgate.net/publication/341098184_A_Review_on_Use_of_Plastic_in_Construction_of_Roads)
- Khurshid, B., Qureshi, N., Hussain, A., & Iqbal, J. (2018). *link.springer.com*. Obtenido de Mejora de las propiedades del asfalto de mezcla en caliente (HMA) utilizando polímeros de desecho: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13369-019-03748-3>
- Kishchynsky, S., Nagaychuk, V., & Bezuglyi, A. (2016). *sciencedirectassets.com*. Obtenido de Mejora de la calidad y durabilidad del hormigón bituminoso y asfáltico mediante la modificación con una composición de polímero a base de polietileno reciclado:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816304544>
- Lopera, H. (2011). *unal.edu.co*. Obtenido de Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma:  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8751/15507009.2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lubo, O., & Martínez, A. (2019). *ucc.edu.co*. Obtenido de Asfaltos modificados con cauchos en vías primarias en las ciudades Santa Marta, Barranquilla y Bogotá como alternativa de mejoramiento de la capa de rodadura de los pavimentos flexibles entre los años 2012-2019:  
[https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15630/2/2019\\_asfaltos\\_modificados\\_cauchos..pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15630/2/2019_asfaltos_modificados_cauchos..pdf)
- lyroad. (2015). *lyroad.com*. Obtenido de <https://www.lyroad.com/fr/centrale-d-enrobage-discontinue-lb.html>
- Mamani, D. (2015). *ideassonline.org*. Obtenido de PLASTIC ROADS construidas en la India:  
<http://www.ideassonline.org/public/pdf/PlasticRoadsIndia-ESP.pdf>
- Mejia, C., & Sierra, A. (2017). *unipiloto.edu.co*. Obtenido de Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio universidades de Bogotá d.c.: <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00003837.pdf>
- Metaute, D., & Casas, D. (2010). *eafit.edu.co*. Obtenido de Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos:  
[https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/343/DianaMilena\\_MetauteHeredia\\_2009.pdf;jsessionid=DCDA0D833F6779CD956813A87DAEE098?sequence=1](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/343/DianaMilena_MetauteHeredia_2009.pdf;jsessionid=DCDA0D833F6779CD956813A87DAEE098?sequence=1)
- Monrroy, G., & Pardo, R. (2020). *acofi.edu.co; usta.com*. Obtenido de Factibilidad de desarrollar pavimentos: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/853>
- Munera, C. (2012). *www.eafit.edu.co*. Obtenido de Modificación polimérica de asfaltos:  
[https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/700/JuanCamilo\\_MuneraOssa\\_2012.pdf;jsessionid=FB631A411E49D6406DFC7BC2DEAA8205?sequence=1](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/700/JuanCamilo_MuneraOssa_2012.pdf;jsessionid=FB631A411E49D6406DFC7BC2DEAA8205?sequence=1)
- Nasir, M., Imran, M., & Umair, M. (2016). *mdpi.com*. Obtenido de Evaluación del desempeño del asfalto modificado con desechos municipales para la construcción de pavimentos sostenibles: <https://www.mdpi.com/2071-1050/8/10/949/htm>

- Panos, G., & Loizos, A. (2021). *mdpi.com*. Obtenido de Caracterización de mezclas asfálticas sostenibles con alto contenido de asfalto recuperado y escoria de acero: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/17/4938>
- Perez, R. (2014). *unimilitar.edu.co*. Obtenido de Realidades y percepciones del uso de materiales reciclados: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12236/TRABAJO%20FINAL%20MODIFICADOS%2017-06-2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Reza, M., & Shishehbor, M. (2019). *mdpi.com*. Obtenido de Evaluación de la sostenibilidad de las mezclas de asfalto verde: una revisión: <https://www.mdpi.com/2076-3298/6/6/73/htm>
- Rodriguez, N., & Sanchez, J. (2016). *udistrital.edu.co*. Obtenido de Desarrollo de una mezcla asfáltica tibia reciclada bajo criterios técnicos y medioambientales: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3696/RodriguezRojasNataliSánchezMoralesJohnJairo2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, R., Castaño, V., Martínez, M., & Hernández, G. (2010). *imt.mx*. Obtenido de Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt160.pdf>
- Sanabria Torres, A., Arenas Ariza, C., & Acevedo Pérez, J. (2021). *unilibre.edu.co*. Obtenido de Estudio de la asfaltita y aplicaciones en mezclas asfálticas tibias y semitibias: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/7068/6858>
- Sanchez, E., Castro, D., & Vega, A. (2011). *journals.vgtu.lt*. Obtenido de Mezclas de asfalto sostenibles: uso de aditivos y materiales reciclados: <https://bjrbe-journals.rtu.lv/article/view/bjrbe.2011.32>
- Senior, V. (2013). *unal.edu.co*. Obtenido de Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico ac 60-70 con licomont bs-100 para diferentes niveles de precipitación: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/20187/55312753.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Trujillo, P., Vásquez, J., & Sánchez, M. (2017). *eafit.edu.co*. Obtenido de Viabilidad de la implementación del asfalto caucho a partir de un diseño de mezcla de MPI en Procopal S.A: [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12256/JuanPablo\\_DiezTrujillo\\_JuanSimon\\_VasquezVasquez\\_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12256/JuanPablo_DiezTrujillo_JuanSimon_VasquezVasquez_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Xu, X., Leng, Z., Lan, J., Wang, W., Yu, J., Bai, Y., . . . Hu, J. (2021). *sciencedirectassets.com*. Obtenido de Práctica sostenible en la ingeniería de pavimentos a través del reciclaje colectivo de valor agregado de residuos plásticos y neumáticos de desecho de caucho: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809920303738?via%3Dihub>
- Yan, K., Sun, H., You, L., & Wu, S. (2020). Obtenido de Características del caucho de desecho de neumáticos (WTR) y mezclas de asfalto poroso modificado compuesto de poli alfa olefina amorfa (APAO): <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182031076X?via%3Dihub>
- Yepes Piqueras, V. (2014). *upv.es*. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/fresadora/>
- Zhao, Y., Goulias, D., & Peterson, D. (2021). *mdpi.com*. Obtenido de Reciclado asfalto materiales de pavimento en la infraestructura de pavimentos de transporte: análisis y métricas de sostenibilidad: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/8071/htm>