

Estudio Comparativo Entre Mezcla Asfáltica Convencional Y Mezcla Asfáltica
Modificada Con Polvo De Caucho Reciclado, Para Pavimentos Flexibles En Vías
Semiáridas.

Edgar Manuel Batista Valencia

Tecnólogo en Obras Civiles

Director

Alba Yajaira Sánchez Delgado

Msc. en Ingeniería con énfasis en Transporte

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2025

Estudio Comparativo Entre Mezcla Asfáltica Convencional Y Mezcla Asfáltica
Modificada Con Polvo De Caucho Reciclado, Para Pavimentos Flexibles En Vías
Semiáridas.

Edgar Manuel Batista Valencia

Tecnólogo en Obras Civiles

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Alba Yajaira Sánchez Delgado

Msc. en Ingeniería con énfasis en Transporte

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2025

Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía constante, por concederme la fortaleza necesaria para continuar en cada etapa de este proceso y por iluminar mi camino en los momentos de mayor dificultad.

A mis padres y a mi abuela, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental para alcanzar este logro. Gracias por su esfuerzo, por brindarme el respaldo económico cuando fue necesario y por acompañarme moralmente con palabras de aliento que fortalecieron mi determinación. Este trabajo es también fruto de su dedicación y confianza.

A mi tutora, **Alba Yajaira Sánchez**, por su acompañamiento permanente, su paciencia y su disposición para orientarme en cada uno de los momentos críticos de esta investigación. Su guía académica y humana fue esencial para consolidar este proyecto.

A la **Universidad de Pamplona**, por permitirme utilizar sus laboratorios, instalaciones y recursos bibliográficos, los cuales fueron indispensables para el desarrollo metodológico y la revisión documental que sustentan este estudio.

Y finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de este trabajo: compañeros, docentes, personal de apoyo y cada individuo que, con sus palabras, acciones o conocimientos, aportó un valor significativo al proceso investigativo.

A todos, mi más sincero agradecimiento.

Tabla de Contenido

	Pag.
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos.....	17
MARCO REFERENCIAL.....	18
Marco de Antecedentes o Estado Del Arte	19
Internacionales	20
Nacionales.....	35
Regionales.....	41
Breve Historia del caucho.....	42
Marco Teórico.....	43
Asfalto Natural (Nativo)	44
Derivados Del Petróleo	45
Tipos de Asfaltos	48
Cementos Asfálticos (AC).....	48
Asfalto Líquido	49
Emulsión Asfáltica.....	50
Propiedades Físico-mecánicas	50

Durabilidad	50
Adhesión	51
Cohesión	51
Susceptibilidad a la Temperatura.....	51
Endurecimiento y Envejecimiento	51
Ductilidad.....	51
Elasticidad.....	52
Índice de Penetración	52
Penetración.....	52
Pérdida de Masa	52
Punto de Ablandamiento.....	52
Punto de Inflamación	53
Solubilidad	53
Viscosidad.....	54
Comportamiento Físico-Mecánico Del Asfalto	54
Reacción Del Asfalto Ante Altas Temperaturas	56
Reacción Del Asfalto Ante Bajas Temperaturas	57
Reacción Del Asfalto a Temperatura Ambiente	58
Envejecimiento del Asfalto.....	59
Composición Química	59
Asfáltenos	61
Máltenos.....	61
Aromáticos	61

Saturados.....	61
Resinas	61
Función Del Asfalto en Los Pavimentos.	62
Aglutinante.....	62
Impermeabilizante.....	62
Asfaltos Modificados	62
Asfalto Modificado Con Polímero.....	62
Polímero.....	63
Principales Modificadores Utilizados en el Asfalto.....	63
Polímero Tipo I.....	64
Polímero Tipo II.....	64
Polímero Tipo III	64
Agregados Pétreos	65
Agregados naturales.....	65
Agregados de Triturados.....	65
Agregados artificiales	65
Caucho Molido De Neumáticos (GCR Grano de Caucho Reciclado).....	65
Mezclas Asfálticas	66
Polvo de Caucho	66
Marco Legal	67
Marco Contextual.....	70
Localización.....	70

METODOLOGÍA	72
Tipo y diseño de investigación	72
Tipo de investigación:	72
Diseño de investigación:	72
Población, muestra y muestreo	73
Población.....	73
Muestra	73
Muestreo	74
Diagrama Metodológico	74
Desarrollo Metodológico	76
Primer Objetivo:.....	76
Etapa 1: Preparación de Datos	79
Etapa 2: Cargar Archivos.....	81
Etapa 3: Crear un Código Para Cada Pregunta de Investigación.....	81
Etapa 4: Crear una Clasificación.....	82
Segundo Objetivo:	86
Tercer Objetivo:	95
Análisis cuantitativo y correlaciones	99
Extracción de parámetros clave.	101
Análisis comparativo y correlaciones.	102
Implicaciones para pavimentos en zonas semiáridas.....	103
Tendencias generales identificadas.....	104
Beneficios del uso de caucho reciclado	105

Limitaciones identificadas en los estudios.....	106
Cuarto Objetivo:.....	107
Archivo 1. Aplicación de Caucho Reciclado para la Mejora de las Propiedades de la Carpeta Asfáltica de la Carretera Playa Lobos, Eten, Chiclayo (2021).....	107
Hallazgos técnicos relevantes (viabilidad técnica)	107
Impactos ambientales.....	108
Aspectos económicos.....	108
Archivo 2. 1. Análisis del comportamiento reológico y caracterización de asfalto modificado con llanta triturada (caucho) en relación al asfalto convencional, como alternativa de mitigación de contaminación ambiental por llantas en desuso	108
Hallazgos Técnicos Relevantes (Viabilidad Técnica)	109
Impactos ambientales.....	109
Aspectos económicos.....	109
Artículo 3. 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.....	110
Hallazgos técnicos relevantes (viabilidad técnica)	110
Impactos ambientales.....	110
Aspectos económicos.....	111
Metaanálisis Técnico	113
Variables analizadas.....	113
Variables volumétricas (únicamente disponibles en el estudio de Tarapoto).....	115
Análisis Económico y Costo–Beneficio Proyectado	116

Costos considerados.....	116
Supuestos técnicos para cantidades	117
Cálculo de costos unitarios por m ³	117
Frecuencia de mantenimiento (referenciada a prácticas INVIAS en Colombia)....	118
Costos de rehabilitación (supuestos operativos)	119
Flujo de intervenciones dentro de 30 años.....	119
Valor presente total (NPV de costos) — 30 años	120
Discusión.....	121
RESULTADOS.....	123
RESULTADOS POR ACTIVIDAD.....	123
OBJETIVO ESPECÍFICO 1	123
OBJETIVO ESPECÍFICO 2	125
OBJETIVO ESPECÍFICO 3	126
OBJETIVO ESPECÍFICO 4	127
CONCLUSIONES	129
RECOMENDACIONES.....	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134
APÉNDICES.....	143
Apéndice A. Tablas Comparativas Criterios Mínimos Necesarios Para Zona de Estudio.	
.....	143
Apéndice B. Fotografías de Ensayos Granulométricos Tomados en el Laboratorio de	
Suelos y Pavimentos de Universidad de Pamplona.	177

Apéndice C. Granulometrías Tomadas Traídas de Excel.	180
---	-----

Lista de Tablas

	Pag.
Tabla 1 <i>Cronograma y descripción de Actividades.</i>	74
Tabla 2 <i>Términos de Búsqueda y Estrategias de Consulta Empleadas para la Recuperación de Artículos en Bases de Datos de la universidad de Pamplona y académicas.</i> ...	78
Tabla 3	83
Tabla 4 <i>Tabla comparativa de estudios seleccionados por clima (temperatura min y máx.) y similitud vial.</i>	90
Tabla 5	92
Tabla 6	94
Tabla 7 <i>Matriz comparativa de parámetros clave y correlación con características de los materiales.</i>	96
Tabla 8 <i>Cuadro comparativo de Ventajas y desventajas de implementar polvo de caucho en mezclas asfálticas convencionales.</i>	111
Tabla 9	113
Tabla 10 <i>Flujo Marshall según contenido de PCR (Tarapoto).</i>	115
Tabla 11 <i>Parámetros volumétricos del estudio de Tarapoto.</i>	115

Lista de Figuras

	Pag.
Figura 1 <i>Composición del asfalto.</i>	45
Figura 2 <i>Productos y temperaturas típicas de destilación.</i>	47
Figura 3 <i>Productos bituminosos.</i>	48
Figura 4 <i>Conducta viscoelástica del cemento asfáltico.</i>	55
Figura 5 <i>Deformación permanente en el pavimento asfáltico debido a altas temperaturas.</i>	56
Figura 6 <i>Esfuerzo en el pavimento.</i>	57
Figura 7 <i>Composición química del asfalto.</i>	60
Figura 8 <i>Ubicación del departamental de la Zona de estudio.</i>	70
Figura 9 <i>Ubicación local, Tramo de estudio, vía 49 94-73, Agustín Codazzi, Cesar.</i>	71
Figura 10 <i>Matriz 4 X 4, registro de literatura dependiendo de su procedencia, método de estudio y método de integración.</i>	77
Figura 11 <i>Archivos de Transcripción.</i>	79
Figura 12 <i>Transcripciones importadas desde la carpeta “Fichas Bibliográficas” a el apartado de “Datos”.</i>	81
Figura 13 <i>Códigos creados a cada una de las etiquetas puesta a las preguntas realizadas en la primera etapa.</i>	82
Figura 14 <i>Formación de grupos para cada uno de los códigos anteriormente creados.</i>	82
Figura 15 <i>Subrayado de metodología usada en una tesis investigativa experimental de uno de los archivos compilados anteriormente.</i>	85

Resumen

La presente investigación tuvo como finalidad desarrollar el diseño de una mezcla asfáltica modificada con incorporación de polvo de caucho reciclado (PCR) para su aplicación en pavimentos flexibles ubicados en zonas de clima semiárido. Para ello, se llevó a cabo una revisión sistemática de investigaciones previas, un análisis granulométrico del material disponible en la zona de estudio y una comparación detallada de parámetros volumétricos y mecánicos obtenidos en estudios similares. Mediante la codificación y síntesis de la información recopilada se identificaron patrones de mejora asociados al uso de caucho reciclado, principalmente en términos de estabilidad Marshall, disminución de vacíos, incremento de rigidez y mayor durabilidad. Con base en los resultados, se formuló un diseño preliminar de mezcla MDC-19 modificada por vía seca con 0.5 % de polvo de caucho reciclado, ajustado a la granulometría local y a las condiciones ambientales propias de regiones semiáridas. Posteriormente, se evaluó la viabilidad económica utilizando costos oficiales del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), encontrándose que la mezcla modificada presenta un menor costo inicial y una reducción significativa del costo del ciclo de vida respecto a la mezcla convencional, con ahorros superiores al 19 % en un horizonte de 30 años. Adicionalmente, se identificaron beneficios ambientales asociados al aprovechamiento de neumáticos fuera de uso, contribuyendo a la sostenibilidad de las infraestructuras viales. En conjunto, los resultados evidencian que la incorporación de polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas representa una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable, adecuada para pavimentos flexibles construidos en zonas semiáridas, y constituye una estrategia coherente con los principios de economía circular y gestión sostenible de residuos.

Palabras clave: polvo de caucho reciclado, pavimentos flexibles, vía seca, diseño MGCR-19, zonas semiáridas.

Abstract

The purpose of this research was to develop the design of a modified asphalt mixture incorporating recycled rubber powder (PCR) for use in flexible pavements located in semi-arid climates. To this end, a systematic review of previous research was carried out, along with a granulometric analysis of the material available in the study area and a detailed comparison of volumetric and mechanical parameters obtained in similar studies. Through the coding and synthesis of the information collected, patterns of improvement associated with the use of recycled rubber were identified, mainly in terms of Marshall stability, reduction of voids, increased stiffness, and greater durability. Based on the results, a preliminary design was formulated for a dry-modified MDC-19 mixture with 0.5% recycled rubber powder, adjusted to the local granulometry and environmental conditions typical of semi-arid regions. Subsequently, economic feasibility was evaluated using official costs from the National Roads Institute (INVIAS), finding that the modified mix has a lower initial cost and a significant reduction in life cycle cost compared to the conventional mix, with savings of more than 19% over a 30-year horizon. In addition, environmental benefits associated with the use of end-of-life tires were identified, contributing to the sustainability of road infrastructure. Overall, the results show that the incorporation of recycled rubber powder in asphalt mixtures represents a technically, economically, and environmentally viable alternative, suitable for flexible pavements built in semi-arid areas, and constitutes a strategy consistent with the principles of circular economy and sustainable waste management.

Keys words: recycled rubber powder, flexible pavements, dry road, MGCR-19 design, semi-arid areas.

Introducción

El crecimiento de la infraestructura vial en Colombia ha incrementado la demanda de materiales de pavimentación más resistentes, sostenibles y adaptados a las condiciones ambientales específicas de cada región. En zonas clasificadas como semiáridas, donde predominan altas temperaturas, baja humedad y fluctuaciones térmicas significativas, los pavimentos flexibles suelen experimentar fisuración, pérdida de cohesión, deformación plástica y disminución de su vida útil. Estas condiciones generan la necesidad de investigar alternativas que mejoren el desempeño de las mezclas asfálticas convencionales y reduzcan los costos de mantenimiento a largo plazo.

En los últimos años, el uso de polvo de caucho reciclado (PCR) proveniente de neumáticos fuera de uso ha adquirido relevancia como modificador del asfalto debido a sus efectos positivos en estabilidad, durabilidad y resistencia al envejecimiento. Esta alternativa no solo mejora las propiedades mecánicas del pavimento, sino que además contribuye al manejo adecuado de residuos sólidos y promueve prácticas de economía circular en el sector vial. Diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de caucho, en porcentajes controlados, puede incrementar la rigidez de la mezcla, disminuir la susceptibilidad térmica y reducir la aparición de deformaciones, aspectos especialmente relevantes en ambientes semiáridos.

La presente investigación tiene como propósito diseñar una mezcla asfáltica tipo MDC-19 modificada con polvo de caucho reciclado utilizando la granulometría proveniente de la zona de estudio, y evaluar su comportamiento técnico mediante la comparación con resultados de estudios previos desarrollados en condiciones similares. Para ello se realizaron tres fases principales: (1) una revisión y codificación de literatura científica relacionada con mezclas modificadas con caucho, (2) un análisis granulométrico y comparación con mezclas empleadas en regiones

semiáridas, y (3) la evaluación de parámetros volumétricos y mecánicos como estabilidad, flujo, vacíos y durabilidad, con el fin de establecer correlaciones y determinar la viabilidad del diseño propuesto.

Asimismo, se efectuó un análisis económico basado en los precios unitarios oficiales del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), con el objetivo de comparar los costos iniciales y el costo del ciclo de vida entre la mezcla convencional y la mezcla modificada. Este análisis permitió valorar la factibilidad financiera del uso de polvo de caucho reciclado como aditivo en pavimentos flexibles, evidenciando su potencial para reducir las intervenciones de mantenimiento y mejorar la relación costo–beneficio a largo plazo.

En conjunto, esta investigación aporta una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para el diseño y aplicación de mezclas asfálticas en zonas semiáridas, contribuyendo al desarrollo de pavimentos más resistentes, sostenibles y acordes con las necesidades actuales de la infraestructura vial del país.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar el diseño de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho para la creación de pavimentos flexibles, teniendo en cuenta el desempeño y características físicas propias de vías semiáridas.

Objetivos Específicos

- Analizar investigaciones existentes sobre modificación de mezclas asfálticas con polvo de caucho reciclado y evaluar técnicamente la viabilidad de este a través del estudio de las diferentes metodologías desarrolladas.
- Proponer el diseño de una mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho reciclado, utilizando la granulometría obtenida de la zona de estudio.
- Evaluar los resultados de ensayos de laboratorio obtenidos en investigaciones previas sobre mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado, contrastándolos con su aplicación en pavimentos flexibles en vías semiáridas.
- Sintetizar resultados de investigaciones previas sobre la viabilidad técnica y económica de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado. Determinando ventajas y desventajas de la incorporación de dicho polvo en mezclas asfálticas.

Marco Referencial

La construcción de pavimentos flexibles en vías semiáridas presenta desafíos particulares debido a las condiciones climáticas extremas que caracterizan estas regiones. Las variaciones significativas de temperatura, los ciclos de humedecimiento y secado, y la escasez de recursos hídricos afectan la durabilidad y el rendimiento de los pavimentos. En este contexto, la investigación sobre mezclas asfálticas se ha centrado en encontrar soluciones innovadoras que mejoren la resistencia y la sostenibilidad de los pavimentos.

Las mezclas asfálticas convencionales, a pesar de ser ampliamente utilizadas, presentan limitaciones en su resistencia a la fatiga, la deformación permanente y el daño por humedad (González et al., 2020). Estas deficiencias se acentúan en vías semiáridas, donde las condiciones climáticas extremas aceleran el deterioro del pavimento. La incorporación de polvo de caucho reciclado en las mezclas asfálticas se presenta como una alternativa prometedora para superar estas limitaciones.

En Colombia, se estima una producción anual de 5.300.000 llantas usadas, de las cuales 2.000.000 corresponden a la ciudad de Bogotá, según datos del Ministerio de Ambiente. Se calcula que aproximadamente el 40% de estas llantas se destinan a la elaboración de asfalto caucho. Desde el año 2012, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) se fijó la meta de incorporar asfalto con grano de caucho en un 5% del total del pavimento utilizado en contratos que involucren mezclas asfálticas. Esta decisión se basa en la Resolución 6891 de 2011 de la Secretaría Distrital de Ambiente, que destaca la proyección del IDU en innovación tecnológica y producción limpia. La propuesta aspira a alcanzar un 25% de utilización de asfalto con grano de caucho en los contratos licitados por la entidad. (Galarcio Africano, 2019).

Desde una perspectiva técnica, la utilización del asfalto con granulo de caucho se ha venido implementando en Colombia de manera gradual. Las primeras características observadas en este material fueron la reducción del ruido generado por la fricción entre los neumáticos y el pavimento, así como, y de manera más significativa, una mayor durabilidad que requería menor mantenimiento de la carpeta asfáltica. Estas características han posicionado al asfalto con granulo de caucho como un material de construcción sostenible. (Galarcio Africano, 2019).

Marco de Antecedentes o Estado Del Arte

La investigación sobre mezclas asfálticas que incorporan polvo de caucho reciclado ha cobrado mucha importancia en los últimos años, gracias a su capacidad para mejorar el rendimiento de pavimentos flexibles, especialmente en condiciones ambientales difíciles. Diseñar pavimentos flexibles en regiones semiáridas es un reto considerable debido a las altas temperaturas. Las mezclas asfálticas tradicionales tienen sus limitaciones en estas circunstancias, mostrando un rendimiento deficiente frente al agrietamiento por fatiga y la pérdida de estabilidad. En este sentido, la modificación de las mezclas asfálticas con materiales reciclados, como el polvo de caucho, se presenta como una alternativa muy prometedora. Varios estudios han evidenciado las ventajas de utilizar polvo de caucho reciclado para mejorar las propiedades mecánicas y el rendimiento a largo plazo de estas mezclas, incluyendo una mayor resistencia al daño por fatiga, mejor resistencia a la deformación permanente y una durabilidad superior. Sin embargo, aún hay vacíos en la literatura sobre su comportamiento específico en zonas semiáridas, lo que justifica este estudio comparativo que busca evaluar el desempeño de estas mezclas frente a las mezclas asfálticas convencionales bajo las condiciones climáticas particulares de estas regiones. Además, se pretende contribuir al estado del arte mediante un análisis comparativo que evalúe las

propiedades mecánicas y funcionales de ambas mezclas, proporcionando datos técnicos que faciliten su implementación sostenible en este tipo de vías. Por ello que debe realizar un análisis tanto a nivel mundial con nacional y regional, permitiendo así hacernos una idea de cómo este polímero permite la modificación de un pavimento asfáltico mejorando algunas características físico-mecánicas.

Internacionales

Alvarado (2022), en su trabajo de investigación titulado “**Diseño De Mezcla Asfáltica Drenante En Caliente Para Pavimento Flexible Utilizando Asfalto Modificado Con Polímeros SBS**”. Tiene como objeto general diseñar una mezcla asfáltica para pavimentos de concreto asfáltico drenante en caliente utilizando asfalto modificado, para mejorar la evacuación del agua hacia los elementos de drenaje de las carreteras. En Guatemala. Usando como referencias las normas INVIAS de Colombia. Para el desarrollo del diseño de mezcla, se elaboraron especímenes de ensayo con distintos contenidos del ligante y se evaluaron las propiedades fisicomecánicas de estos en condiciones de laboratorio. Determinándose el contenido óptimo de bitumen para una granulometría específica, obteniendo así el diseño de la mezcla asfáltica drenante. Se observó que alrededor de un contenido de bitumen del 5,0 % se obtiene la resistencia máxima al desgaste de la mezcla; al aumentar el contenido de bitumen comienza a reducir su resistencia. el contenido óptimo de la mezcla es 4,5 % ya reúne los requisitos exigidos por el artículo 453-13 para mezclas asfálticas drenantes y permite elaborar una mezcla con el menor uso de bitumen, optimizando su costo.

Camacho y Castañeda (2021) en su tesis titulada “**Aplicación de Caucho Reciclado Para la Mejora de Las Propiedades de la Carpeta Asfáltica de la Carretera Playa Lobos, Eten,**

Chiclayo 2021”. Se enfoca en analizar la viabilidad de incorporar caucho reciclado de neumáticos fuera de uso en la mezcla de asfalto, con el propósito de mejorar el diseño y, por ende, las propiedades de la carpeta asfáltica, logrando así una mayor estabilidad, flexibilidad y durabilidad. Para obtener los resultados deseados, se llevaron a cabo varios ensayos con agregados habituales, así como con el nuevo agregado de caucho reciclado. Después de determinar los parámetros óptimos para su uso conforme a las especificaciones del MTC, procedieron a realizar el ensayo Marshall con diferentes briquetas de mezcla asfáltica. Utilizando un 5.72% de cemento asfáltico y diversos porcentajes de caucho reciclado (2%, 1.5%, 1% y 0.5%). Este último porcentaje fue el que arrojó mejores resultados en comparación con la mezcla asfáltica convencional, mejorando la estabilidad, fluidez, porcentaje de vacíos y rigidez. Al llegar a la conclusión de que la inclusión de caucho reciclado mejora las propiedades de la carpeta asfáltica, se acercaron al propósito principal de esta investigación.

De Jesús Palacios (2019) en su tesis de pregrado titulada “Estudio Del Pavimento Flexible Con Polvo de Caucho Frente al Efecto de Fatiga. Se centra en la creación de un diseño de mezcla asfáltica que incluye el uso de polvo de caucho reciclado por vía seca, una opción efectiva para mejorar las propiedades de un pavimento y reducir los impactos ambientales derivados del mismo. Al mezclar polvo de caucho reciclado con asfalto, se obtienen mejoras en el pavimento, mostrando que las mezclas modificadas prolongan la durabilidad del pavimento en comparación con las convencionales. Analizando las propiedades físicas y reológicas de una mezcla modificada y una convencional, se evaluó la resistencia a la fatiga de la capa de rodadura de un pavimento. Tras los análisis llevados a cabo, se pudo comprobar que la inclusión de GCR en la mezcla asfáltica ha aumentado sustancialmente la resistencia a la fatiga del pavimento en un 55.15% en

comparación con una mezcla convencional, lo que sugiere la conveniencia de adoptar este enfoque de diseño para las superficies asfálticas en el país.

Espino (2015), en su anteproyecto de tesis titulada “El Uso De Polímeros Provenientes De Neumáticos Reciclados Y Su Influencia En El Comportamiento De Mezclas Asfálticas En Caliente En La Provincia De Ica”. Tiene como objetivo general evaluar si el uso de polímeros proveniente de neumáticos reciclados mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente en la Provincia de Ica. En Perú. Con una metodología de investigación tipo descriptiva y de diseño experimental, ya que se realizó un diseño de mezcla de asfalto modificándolo con porcentajes de caucho y cemento asfáltico, hasta obtener un diseño óptimo. Para el tema de investigación se utilizarán documentos y publicaciones sobre investigaciones llevadas a cabo en varias partes del mundo, además se revisarán tesis desarrolladas en Universidades Nacionales y extranjeras, especialmente en Universidades de Colombia donde se ha desarrollado la gestión del pavimento. EL método de adición de caucho que se recomienda es el húmedo con porcentajes de cauchos entre 18-24% con respecto al peso del ligante.

Hamzani et al. (2020) en su artículo titulado “Determinación de Las Propiedades de Pavimentos Semiflexibles Utilizando Polvo de Caucho de Neumáticos de Desecho y Zeolita Natural”. Tiene como propósito de este estudio evaluar diferentes propiedades de un pavimento semiflexible (SFP) utilizando polvo de caucho de neumáticos reciclados (WTR) como aditivo y Zeolita natural como sustituto del cemento, incluyendo resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, contracción por secado, permeabilidad, durabilidad y la relación tensión-deformación. La mezcla asfáltica porosa fue elaborada considerando la proporción ideal de asfalto y árido de calidad abierta, tal como se indica en las Normas Bina Marga de Indonesia del año 2010 y por la Asociación Australiana de Pavimentos Asfálticos (AAPA) de 2014, respectivamente. Durante el

proceso, se incorporó polvo WTR al asfalto líquido en proporciones del 3%, 4% y 5% previo a la mezcla con el asfalto poroso. Posterior a esto, se llevó a cabo una prueba Marshall en las muestras con el fin de verificar si cumplían con los estándares de Bina Marga. Las muestras de asfalto poroso fueron tratadas con mortero de cemento y se sustituyó el contenido de cemento por 0%, 5%, 15% y 25% de zeolita natural (en peso) para generar las SFP. Posteriormente, se evaluaron las propiedades de las SFP tras 14 días. Los resultados revelaron que las propiedades óptimas se lograron con un 5% de polvo de caucho de neumáticos y un 15% de contenido de zeolita.

Ramirez et al. (2023) en su tesis de investigación titulada “Propuesta de Reutilización de Neumáticos Usados Para Fabricación de Gránulos de Caucho de la Ciudad de Cajamarca”.

Tiene como objetivo proponer una solución amigable con el medio ambiente y sostenible a través del reciclaje de neumáticos desechados, los cuales se convierten en gránulos de caucho reciclado. Esto contribuirá a la creación de ciudades más sostenibles y a la lucha contra el cambio climático. Esto se debe a que cuentan con una cantidad limitada y una capacidad reducida en sus vertederos, además del costo adicional de S/10 por llanta para la eliminación de llantas usadas, según lo explicado por el Ministerio del Ambiente en su informe del 2009. Se ha podido concluir que, en el futuro, cuando las mezclas asfálticas hechas con polvo de caucho lleguen al final de su vida útil, podrán ser recicladas. Utilizar neumáticos fuera de uso en la elaboración de capas asfálticas, brinda la oportunidad de preservar el entorno y edificar urbes más sustentables a lo largo del tiempo.

Smith & Gonzales (2020), en su trabajo de investigación titulado “Inclusión De Caucho Granulado De Neumáticos Reciclados Para Mejorar Propiedades Mecánicas Del Pavimento Flexible En Urbanizaciones: Revisión Sistemática 2011 – 2020”. Tiene como objeto describir los diferentes enfoques positivos que tiene la inclusión del caucho granulado (CG) de neumáticos reciclados (NFU); para, mejorar las propiedades mecánicas del pavimento flexible en las

urbanizaciones de la ciudad de Trujillo. En Perú. De igual forma, potencializar los conocimientos de la ciudadanía, dar a conocer las posibilidades de reusar neumáticos fuera de uso (NFU) para su posterior aplicación en construcciones ecológicas como los pavimentos y conocer las propiedades mecánicas que sirven para mejorar la vida útil de estos; como también, una mejora en el lado económico y costo por mantenimiento. A través de ensayos de laboratorio dan afinidad a lo expuesto demostrando que estas nuevas tecnologías son la solución al problema de baja calidad (pavimentos convencionales) en las infraestructuras viales de esa ciudad, paralelamente se es amigable con el medio ambiente. Se puede observar que aplicando un 20% de caucho granulado de neumáticos fuera de uso en una mezcla asfáltica en caliente se puede obtener un asfalto modificado con caucho que ahorre económicamente un 24.62% por cada metro cúbico producido. Siendo esto una ventaja económica muy buena en comparación con la mezcla convencional. La inclusión al asfalto se recomienda que sea por vía seca, ya que es un proceso no complicado y solamente bastaría con homogenizar uniformemente los materiales para ayudar a mejorar las propiedades mecánicas, en todo momento considerando como parte de los materiales a usar.

Ubidia Pinedo (2019) en su tesis de pregrado titulada “Diseño de Pavimento Flexible Con la Utilización de Polvo de Caucho Reciclado Para Minimizar la Generación de Fisuras Del Jr. Jorge Chávez Cdra. 01-09 Ciudad de Tarapoto San Martín”. Se centró en la elaboración de una mezcla asfáltica convencional y otra modificada con Polvo de Caucho Reciclado (PCR), con el propósito de compararlas posteriormente. Actuando simultáneamente como un sistema para reutilizar los desechos sólidos que son las llantas usadas, con la meta de ofrecer una innovadora solución a los inconvenientes que impactan en el pavimento y en especial en la capa asfáltica. El desarrollo de esta tesis se centró en un tipo de falla conocido como fisuramiento, el cual incide directamente en la carpeta asfáltica, provocando la formación de dichas fisuras. Por otro lado, la

contaminación generada por estos desechos sólidos es un tema que no ha recibido el tratamiento adecuado en el contexto de la situación ambiental que actualmente afecta al país. Según los resultados de esta investigación, se hallaron valores que excedían los límites establecidos por las normativas peruanas. Concluyendo que el uso del Polvo de Caucho Reciclado en la mezcla asfáltica para pavimentos flexibles mejora sus propiedades físico-mecánicas, según lo diseñado.

Vera Cortez (2014), en su tesis de maestría titulada “Análisis Del Comportamiento Reológico Y Caracterización De Asfalto Modificado Con Llantita Triturada (Caucho) En Relación Al Asfalto Convencional, Como Alternativa De Mitigación De Contaminación Ambiental Por Llantitas En Desuso”. Analiza y resalta la importancia ambiental que tiene el reúso y manejo de llantas que ya cumplieron su vida útil, se presentan resultados del desarrollo de una mezcla asfáltica densa, modificada con asfalto y caucho reciclado de neumáticos usados. El objetivo principal es establecer de manera confiable la metodología a seguir para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas utilizando caucho molido. Mejorando propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas para pavimentos, asegurando así una mayor durabilidad y resistencia a las cargas durante su vida útil. Se empleo el método fue Marshall y tracción indirecta para obtener porcentajes óptimos de asfalto-agregado-caucho molido. Se graficaron y compararon los resultados entre sí para su análisis. El método de integración utilizado fue por vía húmeda. Se observó que la obtención del caucho es de forma económicamente viable, usando llantas desechadas que deben ser molidas hasta obtener tamaños apropiados, solucionando así el problema ambiental que estos generan al terminar su vida útil.

Fernandes (2008), en su informe final de curso titulado “Caracterización De Asfalto Modificado Con Caucho Molido Proveniente De Neumáticos Usados”, Se estudiaron los efectos de la adición de caucho molido reciclado (CRM) de neumáticos de camión tipo 350 en las

propiedades fisicoquímicas y reológicas de asfalto derivado de crudo Boscán. Se emplearon dos marcas comerciales de CRM, con porcentajes de adición del 5% y 10% (p/p) y tamaños de partícula entre 212-425 y 425-600 μm . Se evaluó además el impacto de dos tiempos de mezclado (45 y 180 minutos). Los resultados indican un comportamiento similar entre ambas marcas de CRM. Con un tiempo de mezclado de 45 minutos, se observó un aumento del 47% en la recuperación elástica y un incremento de 2.5 y 11.7 veces en la viscosidad rotacional con 5% y 10% de CRM respectivamente; este último porcentaje resultó en una mezcla de baja manejabilidad. Al utilizar un 5% de CRM, un mayor tiempo de mezclado mejoró la interacción entre los componentes, reduciendo la penetración en un 30%, aumentando el punto de ablandamiento en un 12% y disminuyendo la pérdida de masa por volatilización. En resumen, la incorporación de un 5% de CRM elevó la clasificación del asfalto de PG 70-22 a PG 76-22, mejorando significativamente su resistencia a la deformación permanente y su aplicabilidad en pavimentación.

Navarro (2013), en su trabajo de investigación titulado “Confección Y Seguimiento De Tramos De Prueba De Mezclas Asfálticas Con Incorporación De Polvo De Caucho Nacional De Neumáticos Fuera De Uso (NFU) Mediante Vía Seca”, Se contempla la implementación y el monitoreo de dos proyectos piloto, sin precedentes en el país, que utilizan mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso (NFU) en capas de rodadura. El caucho, proveniente de una planta de reciclaje nacional, se incorpora en seco como un árido fino. El objetivo general de esta memoria es la confección y seguimiento de los dos primeros tramos de prueba con carpetas fabricadas con mezclas asfálticas en caliente con adición de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) por vía seca. El polvo de caucho ocupado, pertenece a una planta nacional de reciclaje de neumáticos

desechados. El proceso de incorporación en seco implica una “digestión” del caucho con el asfalto, modificando su reología y viscosidad. El diseño difiere del de mezclas asfálticas convencionales, requiriendo ensayos adicionales para determinar los parámetros óptimos de tiempo y temperatura de digestión que garanticen las propiedades mecánicas deseadas, las cuales deben ser verificadas en obra. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad ambiental y económica del polvo de caucho como material para pavimentos, ofreciendo ventajas técnicas superiores a los asfaltos modificados con polímeros a un costo competitivo. En comparación con las mezclas convencionales, se observa una mayor resistencia a los cambios térmicos, a la humedad, al ahuellamiento y al envejecimiento, además de una mayor capacidad estructural y resistencia al deslizamiento. Si bien la tecnología de incorporación en seco es accesible para las empresas fabricantes de mezclas asfálticas, requiere procedimientos específicos de diseño, fabricación y ejecución, incluyendo un riguroso control de temperatura, lo que demanda personal capacitado y un control de calidad exhaustivo.

Conza & Diaz (2021), en su tesis titulada **“Diseño de Pavimento Flexible Incorporando Polvo de Caucho en la Subrasante en la Avenida Las Palmas, Pachacamac-2021”**, Su objetivo principal es determinar de qué manera la incorporación de polvo de caucho en la subrasante mejora el diseño del pavimento flexible de la avenida Las Palmas, Pachacamac. Se realizaron análisis de suelo, incluyendo granulometría, límites de Atterberg y ensayos CBR. Los resultados mostraron una mejora en las propiedades del suelo con la adición de polvo de caucho. Se diseñaron pavimentos flexibles patrón y modificados, obteniendo ahorros económicos. Este estudio se enfoca en evaluar el impacto del polvo de caucho en la subrasante para mejorar el diseño de pavimentos flexibles en la avenida Las Palmas, Pachacamac. Se realizaron análisis de suelo y ensayos CBR, demostrando mejoras en las propiedades del suelo con la adición de caucho. Se

diseñaron pavimentos, observando un ahorro económico. Este trabajo evalúa el efecto del polvo de caucho en la subrasante para mejorar el diseño de pavimentos flexibles en la avenida Las Palmas, Pachacamac. Se realizaron análisis de suelo y ensayos CBR, mostrando mejoras en las propiedades del suelo con la adición de caucho. Se diseñaron pavimentos, resultando en ahorros económicos. Espero que esta versión más corta sea adecuada para tus necesidades. Si necesitas algo más, no dudes en preguntar.

Chávez (2018), en su tesis titulada “Comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semi-húmedo.”, Aquí se realiza un estudio del arte sobre el cucho, los neumáticos fuera de uso, su aplicación en mezclas asfálticas y el caucho pretratado, así como también, la evaluación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas con caucho fabricadas por el proceso húmedo, seco y semihúmedo. Por lo cual, se puede concluir que, Las mezclas asfálticas con caucho por vía húmeda son efectivas, pero costosas. El proceso semihúmedo ofrece un rendimiento similar sin los altos costos ni los largos tiempos de procesamiento de otras tecnologías, lo que lo hace ideal para proyectos de menor escala. Las mezclas asfálticas con caucho por vía húmeda son efectivas, pero requieren equipos costosos. El proceso semihúmedo ofrece un rendimiento similar sin los altos costos ni los largos tiempos de procesamiento de otras tecnologías, lo que lo hace ideal para proyectos de menor escala. Las mezclas asfálticas con caucho por vía húmeda son efectivas, pero su fabricación es costosa. El proceso semihúmedo ofrece un rendimiento similar sin los altos costos ni los largos tiempos de procesamiento de otras tecnologías, siendo una opción viable para proyectos de menor escala. Espero que esta versión más corta sea adecuada para tus necesidades. Si necesitas algo más, no dudes en preguntar.

Escalante & Mamani (2021), en su tesis titulada **“Estudio comparativo del comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con materiales reciclados de llanta y pavimentos flexibles de la ciudad de Puno”**, tuvo como objetivo principal determinar el impacto de los materiales reciclados de llantas en el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas en la Av. Simón Bolívar de Puno. La investigación, de naturaleza aplicada, nivel explicativo y diseño experimental, analizó dos variables: materiales reciclados de llantas y pavimentos flexibles reciclados, y el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas. Para alcanzar los objetivos, se realizaron ensayos de laboratorio para evaluar las características de las mezclas asfálticas con la incorporación de materiales reciclados de llantas. Se compararon un grupo control, sin materiales reciclados, con tres grupos experimentales que sí los incorporaron. Los resultados obtenidos indicaron que la adición de materiales reciclados de llantas mejora la estabilidad de la mezcla y aumenta el contenido óptimo de cemento asfáltico, destacando la incorporación del 1.5% de materiales reciclados. En conclusión, la incorporación de materiales reciclados de llantas mejora progresivamente la estabilidad y el contenido óptimo de cemento asfáltico, siendo la proporción del 1.5% la que presentó los mejores resultados, con un incremento del 68.08% en la estabilidad y un contenido óptimo de cemento asfáltico del 7.1%.

Cordoba & Saavedra (2021), en su tesis titulada **“Evaluación de la capa de rodadura del pavimento flexible con propuesta de intervención de caucho en las calles santa Martha y santa Elena, Sullana – Piura 2021”**, su objetivo principal fue realizar la evaluación de la capa de rodadura del pavimento flexible con propuesta de intervención de caucho en las calles santa Martha y santa Elena, Sullana – Piura. La metodología empleada fue de tipo aplicada, con diseño experimental y enfoque cuantitativo, utilizando las calles mencionadas como población de estudio. Los resultados revelaron que, según el método PCI, el estado actual del pavimento es “muy malo”.

Se determinó que la incorporación de un 4% de caucho optimiza la estabilidad, alcanzando 2170 Lbs. El análisis del suelo indicó un California Bearing Ratio (CBR) promedio de 18.96%, lo que sugiere una subrasante de buena a muy buena calidad. El estudio de tráfico permitió identificar los tipos de vehículos y las cargas vehiculares, estimando un ESAL de 8,973,166.65 Ejes Equivalentes de 8.2 toneladas, lo que llevó a proponer un paquete estructural compuesto por 5 cm de carpeta asfáltica, 20 cm de base granular y 15 cm de sub-base granular. En cuanto a los costos, se estimó que la construcción de un pavimento flexible convencional ascendería a S/. 4,282,639.87, mientras que la intervención con caucho granular reciclado tendría un costo de S/. 4,220,725.27.

Flores & Huarancca (2020), en su tesis titulada “**Mezcla asfáltica con polvo de caucho reciclado para rehabilitar el pavimento del Jr. San Salvador - Cusco 2020**”, el objetivo principal fue demostrar que el polvo de caucho reciclado beneficia significativamente en la mezcla asfáltica en caliente para el jirón san salvador – cusco. La investigación, es de tipo experimental aplicada, comparó una mezcla asfáltica convencional en caliente con una mezcla modificada con polvo de caucho reciclado. La población de estudio consistió en ambas mezclas asfálticas, y se analizaron 24 briquetas elaboradas para ensayos de rotura Marshall. Se emplearon instrumentos validados para medir las variables de diseño de la mezcla asfáltica y las propiedades del polvo de caucho reciclado. Los resultados obtenidos indicaron que el polvo de caucho reciclado beneficia el diseño de la mezcla asfáltica para la rehabilitación del jirón San Salvador, recomendando el uso de un 4.7% de cemento asfáltico con un 5% de polvo de caucho reciclado.

Vinay & Krishna (2023), en su artículo titulado “**Mezclas modificadas de asfalto y caucho para pavimentos verdes (MARGPave) Desarrollo del producto y evaluación de sus prestaciones**”, El objetivo de este estudio fue desarrollar mezclas de “pavimento verde de asfalto y caucho modificado (MARGPave)” utilizando estructuras de áridos de granulometría densa y con

huecos, buscando obtener un rendimiento superior al de las mezclas convencionales. Se produjeron diferentes tipos de mezclas: una convencional con gradación densa, y tres mezclas MARGPave (una con gradación densa y dos con gradación de huecos) utilizando el diseño de mezcla Superpave. Se realizaron pruebas de módulo de rigidez, sensibilidad a la humedad y evaluación de la fatiga, generando más de 300 puntos de datos. Los resultados mostraron que la mezcla MARGPave de granulometría densa tenía una vida a fatiga tres veces superior y mayor durabilidad que la mezcla convencional. Además, el módulo de la mezcla MARGPave con huecos fue superior al de la mezcla convencional en todas las temperaturas y frecuencias, evidenciando su naturaleza elástica gracias a un mayor contenido de caucho. La mezcla MARGPave densa demostró resistencia a la formación de roderas y agrietamiento térmico, manteniendo una viscosidad estable con el aumento de temperatura. El proceso de mezcla de ligante asfáltico y áridos, junto con el asfalto-caucho modificado, permitió crear mezclas MARGPave compatibles con la tecnología de proceso semiseco. Se espera que estas mezclas sean una estrategia efectiva para la construcción y mantenimiento de carreteras, promoviendo el uso de neumáticos reciclados y el concepto de convertir residuos en recursos.

Campaña et al. (2015), en su artículo titulado “Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores”, Este estudio describe los métodos seco y húmedo para producir asfalto modificado con polvo de caucho reciclado de neumáticos automotrices, destacando sus propiedades Marshall y de desempeño. En el proceso húmedo, se prepararon mezclas con 10, 15 y 20% en peso de polvo de caucho respecto al betún. En el proceso seco, se incorporaron 1, 2 y 3% en peso de polvo de caucho en relación al agregado asfáltico. Se evaluaron las mezclas mediante pruebas de gravedad específica máxima teórica, densidad (método RICE), densidad bulk y porcentaje de vacíos. Para evaluar el desempeño, se

midieron el módulo de rigidez, la resistencia a la fatiga y la deformación dinámica. Los resultados indicaron una mejor resistencia a la fatiga en el asfalto modificado por el proceso húmedo con 20% de polvo de caucho, mientras que el mayor módulo de rigidez y deformación dinámica se obtuvo con el 10% de polvo de caucho en el proceso húmedo. Estos hallazgos sirven como base para futuras investigaciones sobre los beneficios y la aplicabilidad del asfalto modificado con polvo de caucho en Ecuador.

Abdulnaser (2019), en su artículo titulado “Una Revisión Del Uso De Caucho Natural En El Modificación De Betún Y Asfalto”, Este artículo ofrece una revisión completa del uso del caucho natural como modificador del betún en la construcción de carreteras. Se examinan las fuentes, tipos y propiedades del caucho natural, así como los métodos empleados para su incorporación en el betún. Se presenta un análisis de la literatura de las últimas tres décadas sobre los efectos del caucho natural en las propiedades físicas, mecánicas y reológicas del betún y en el rendimiento de las mezclas asfálticas, incluyendo un análisis de costos comparativo con otros polímeros. El objetivo es proporcionar a los investigadores en ingeniería de carreteras y pavimentos una herramienta para abordar los deterioros comunes del pavimento mediante el uso de aditivos locales como el caucho natural. Se espera que la investigación conduzca al desarrollo de un betún modificado con caucho natural flexible, rentable y duradero, resistente a la fatiga y a la formación de roderas, lo que reducirá significativamente los costos de mantenimiento de las mezclas asfálticas a nivel global.

Nitu (2017), en su artículo titulado “Utilización de residuos de caucho en la construcción de pavimento flexible”,

Carrasco & Espinosa (2014), en su trabajo de investigación titulado “Utilización del polvo de llanta en mezclas asfálticas en frío como alternativa de reciclaje”, Tiene como objetivo

presentar una solución ambiental y sostenible mediante la reutilización de los neumáticos que se encuentran fuera de uso, mediante la generación de granos de caucho en base a neumáticos reciclados. El objetivo principal de este proyecto es proponer una solución ambiental y sostenible para la gestión de neumáticos fuera de uso, mediante la transformación de estos en gránulos de caucho reciclado. La iniciativa busca contribuir a la construcción de ciudades más sostenibles y mitigar los efectos del cambio climático. Se destaca la problemática de la limitada capacidad de los rellenos sanitarios y el elevado costo de disposición final de las llantas, estimado en S/10 por unidad, según datos del Ministerio del Ambiente de 2009.

Wei Dong (2006), en su artículo titulado “Estudio de las propiedades de mezclas asfálticas modificadas con caucho de neumáticos reciclados mediante proceso seco”,

(Vara et al., s. f.), en su artículo titulado “Evaluación Del Comportamiento Reológico De Asfaltos Modificados Con Bajos Contenidos De Polvo De Caucho Reciclado”, Este estudio evalúa críticamente el uso de polvo de neumáticos (neumáticos desechados triturados) en betún mediante el proceso húmedo, enfocándose en su uso como sustituto del betún. Se destaca que, a pesar de los diseños de carreteras y vías urbanas con una vida útil de **10 a 20 años**, los daños y deterioros en las superficies ocurren antes de alcanzar su capacidad de servicio máxima, influenciados principalmente por la carga repetida de tráfico pesado. El estudio argumenta que el uso de polvo de neumáticos en la construcción de carreteras como superficie de pavimento mejora la resistencia al deslizamiento, la resistencia al agrietamiento por fatiga y la resistencia a la formación de roderas. La investigación incluye pruebas físicas para determinar las propiedades del betún modificado con polvo de neumáticos, incluyendo pruebas de penetración, punto de reblandecimiento y ductilidad.

(Santos & Lobato, 2020), en su trabajo de investigación titulado **“Evaluación Del Asfalto Modificado A Base De Caucho Reciclado De Neumáticos En Comparación Del Asfalto Convencional”**, Tiene como objetivo principal el procedimiento a seguir para el diseño de mezclas asfálticas en frío con la incorporación del polvo de llanta con el fin de utilizarlo para el reciclaje de neumáticos. La investigación comenzó con un estudio del origen del caucho y su uso en la fabricación de llantas, seguido de un análisis del impacto ambiental y humano del inadecuado manejo de neumáticos usados. Posteriormente, se realizaron ensayos al polvo de llanta, a la emulsión asfáltica y a briquetas de asfalto con diferentes concentraciones de polvo de llanta. Se llevaron a cabo ensayos de equivalente de arena, granulometría, abrasión, gravedad específica, peso unitario, absorción, resistencia a los sulfatos y ensayos a la emulsión, todos los cuales cumplieron con las normas AASHTO y ASTM. En las pruebas de resistencia, la mezcla con un 25% de reemplazo de agregados finos mostró los mejores resultados; sin embargo, en pruebas de durabilidad en condiciones extremas, las briquetas experimentaron una pérdida de resistencia del 50%.

(Condori et al., 2018), en su trabajo de investigación titulado **“Estudio De La Implementación Del Grano De Caucho Reciclado (Gcr) De Llantas Usadas Para Mejorar Las Mezclas Asfálticas Tomando En Cuenta Costos Y Beneficios”**,

(Maguiña, 2019), en su tesis titulada **“Caucho Reciclado De Llantas En La Mezcla De Asfalto A Compresión Para Mejorar Las Propiedades Mecánicas”**,

(Bernedo & Diaz, 2024), en su tesis titulada **“Deterioro De La Carpeta Asfáltica Y El Uso De Granos De Caucho Reutilizable Para El Mejoramiento Del Pavimento Flexible En La Avenida Panamericana, Kennedy Del Distrito De Ilo En La Región De Moquegua, 2022”**,

(Ayala, 2022), en su tesis titulada “Influencia De La Adición De Caucho Reciclado En Forma De Fibras Y Granos En El Comportamiento De Los Ligantes Asfálticos Modificados”,

Nacionales

Agudelo y Martínez (2019), en su propuesta de proyecto de grado titulada “Estudio Comparativo Del Envejecimiento a Largo Plazo de Una Mezcla Con Asfalto Modificado Con Grano de Caucho Reciclado”. Se investigó en un laboratorio el efecto del envejecimiento a largo plazo sobre el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica que contiene asfalto modificado con gránulos de caucho reciclado (GCR) en comparación con una mezcla asfáltica convencional que contiene asfalto CA 60-70. Para ello se realizaron dos diseños de mezclas utilizando la metodología Marshall con el objetivo de determinar el contenido óptimo de asfalto. Luego se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar la respuesta del material a la aplicación de cargas monótonas (ensayo de tracción indirecta) y cargas cíclicas (ensayo de módulo E). Se realizaron pruebas de caracterización mecánica en muestras envejecidas a corto y largo plazo para evaluar los efectos del envejecimiento en las mezclas. Para el envejecimiento a corto plazo, la mezcla se preparó y envejeció en un horno a una temperatura de 150 °C durante 2 h. Para el envejecimiento a largo plazo, la mezcla se preparó y se colocó en un horno a una temperatura de 85 °C durante 5 días. La principal conclusión reportada es que el envejecimiento de las mezclas asfálticas aumenta la rigidez de la mezcla. Sin embargo, se ha demostrado que las mezclas que contienen asfalto modificado con GCR son menos susceptibles al deterioro y pueden aumentar la vida útil del pavimento.

Arias et al. (2014), en su Monografía titulada “Viabilidad Técnica De Un Diseño De Mezcla Para La Elaboración De Asfaltos Modificados Con Llantas Reciclables”. Desarrollada

en la ciudad de Villavicencio, Colombia. Plantea como objetivo general realizar un diseño de mezcla asfáltica modificada con caucho de llanta reciclada para un tipo de tránsito NT2 en la ciudad de Villavicencio, con el propósito de adoptar un modelo de asfalto que además de mejorar algunas de sus características físicas también sea amigable con el medio ambiente. Esto se realizó mediante la resistencia Marshall. EL método de integración del grano de caucho reciclado será por vía seca como un grano fino. Su metodología se basa en una investigación experimental y analítica, con propósito aplicativo y un diseño de investigación experimental. De acuerdo al análisis, el porcentaje óptimo de asfalto fue de 4.8%. La mezcla sugerida fue una MDC-2. La determinación del porcentaje óptimo de GCR para el nivel de tránsito NT2 ($0,5 \times 10^6 - 5,0 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80KN en el carril de diseño) el rango va de 0% – 2%, para esta carga vehicular. El grano caucho obtenido de llantas usadas, permite una mayor confiabilidad técnica para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas al ser utilizado como agregado (proceso en seco) o como una modificación del ligante (proceso húmedo).

Cardoza y Palomino (2019), en su investigación titulada “Pavimento Flexible Utilizando Una Mezcla Asfáltica Con Grano de Caucho Reciclado Para su Sostenibilidad en Colombia”.

Tiene como objetivo principal recopilar información sobre el tamaño de las partículas. Caucho que se recicla en Colombia y cómo se utiliza en mezclas asfálticas. Colombia ha visto una adopción significativa del caucho debido a sus beneficios ambientales y económicos. El estudio se basó en un modelo descriptivo y documental ya que existió un documento sobre el cual se realizaron las pruebas. Se revisaron estos materiales y analizaron los resultados. La importancia de aplicar esta innovadora tecnología es clara. Esto se debe a que esta es un recurso que puede utilizarse para abordar problemas mecánicos muy comunes en los pavimentos flexibles y al mismo tiempo mitigar

los problemas de contaminación ambiental causados por la eliminación inadecuada de neumáticos que ya cumplieron su vida útil.

Díaz y Castro (2017), en su monografía de pregrado titulada “Implementación Del Grano de Caucho Reciclado (GCR) Proveniente de Llantas Usadas Para Mejorar Las Mezclas Asfálticas y Garantizar Pavimentos Sostenibles en Bogotá”. Resume varios resultados de investigaciones a nivel internacional y muestra que la introducción de GCR en pavimentos puede resolver los problemas mecánicos de estos y reducir el impacto ambiental causado por la eliminación inadecuada de neumáticos de desecho. Muestra que es un método alternativo. La adición de GCR en la modificación de mezclas asfálticas ofrece muchos beneficios. Estudios recientes han demostrado que este tipo de modificación es más duradera, requiere menos mantenimiento y tiene menos desgaste que las modificaciones tradicionales y más económicas. A largo plazo, ayuda a reducir impactos ambientales negativos como lo es la quema indiscriminada de neumáticos viejos que generan emisiones de CO₂. Este estudio resume las ventajas y desventajas técnicas, económicas y ambientales que surgen del uso de partículas de caucho reciclado para mejorar mezclas asfálticas con base en una revisión de la literatura. Se concluye que la información encontrada a nivel nacional es insuficiente. Esta es una cuestión que puede analizarse en función de los aspectos económicos, ambientales, de transporte del país y otros factores estrechamente relacionados con el estado de la infraestructura vial. Por otro lado, la información disponible internacionalmente sobre este método de mejora de mezclas asfálticas es significativa en términos de métodos de adición, proporciones óptimas, soluciones de alta viscosidad (producidas mediante la adición de GCR) y mejora mecánica de mezclas asfálticas. Resolviendo problemas de resistencia a grietas, surcos y fatiga.

Forero et al. (2022), en su trabajo de investigación de pregrado titulado **“Análisis de Ductilidad de un Asfalto Convencional y de un Asfalto Modificado Con Grano de Caucho Reciclado”**. Tiene como principal objetivo la creación de un equipo de laboratorio denominado ductilómetro en la Universidad Piloto de Colombia, para determinar la ductilidad de asfaltos convencionales y modificados. Lo anterior, siguiendo los lineamientos de la Especificación Vial 702 del Instituto Nacional (INVIAS, 2013). Luego se realizaron pruebas de laboratorio para analizar la ductilidad, analizando las propiedades de tracción. los materiales asfálticos se refirieron a la ductilidad de un cemento bituminoso convencional CA 60-70 (clasificado por velocidad de penetración) y un asfalto modificado con gránulos de caucho reciclado (GCR). Como principal conclusión se llegó a que los asfaltos convencionales tienen una alta ductilidad en comparación con el asfalto modificado, lo cual se atribuye a las partículas de GCR presentes en la lámina asfáltica. Sin embargo, según la literatura consultada, los recubrimientos bituminosos con GCR Presenta una mayor recuperación elástica en cada ciclo de carga y descarga, lo que permite obtener un mayor número de repeticiones de carga en comparación con las mezclas asfálticas convencionales.

Galarcio (2019), en su tesis de pregrado titulada **“Bogotá y su inclusión en el uso de tecnologías limpias con la construcción de vías a partir de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho”**. Nos habla acerca de las vías construidas a partir de mezclas que fueron modificadas con grano de caucho y cuando se instauro esa medida en nuestro país, como se fue desarrollando, para así concluir, que el asfalto caucho a pesar de todo tiene algunas desventajas en el momento de su producción, al iniciar este proceso y durante el mismo se generan temperaturas elevadas y a su vez un mayor consumo de energía, por ello hablábamos de la necesidad de involucrar un sistema de combustible diferente como el gas natural, este material tiene muchas

más ventajas que desventajas y es parte de la evolución ambiental a la que debemos seguir apuntando.

Maldonado (2018), en su trabajo de grado titulado “Estado Del Conocimiento de Las Mezclas Asfálticas Modificadas Con Grano Caucho Reciclado (GCR) en Colombia”. Presenta de manera resumida la información sobre el uso de gránulos de caucho reciclado (GCR) en la modificación de mezclas asfálticas en Colombia y destaca el desarrollo de esta tecnología en nuestro país a través de los trabajos realizados y el nivel de investigación en el que se ha revelado el método. Se nota. Es importante destacar que esta tecnología se puede utilizar como solución a un problema mecánico muy común en las carreteras, reduciendo el impacto ambiental causado por la eliminación inadecuada de neumáticos usados. Este trabajo, basado en una revisión bibliográfica, tiene como objetivo informar a los lectores sobre los beneficios económicos, mecánicos y ambientales que se obtienen al utilizar arena de caucho reciclado para mejorar mezclas asfálticas. Como conclusión pudimos demostrar las diversas especificaciones técnicas y normas que actualmente regulan esta tecnología en Colombia. Sin embargo, es importante destacar la aplicación de la Resolución 1457-10 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la Resolución 1198-15 de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, la Resolución 6981-2011 de la Secretaría Regional de Ambiente y Movilidad y el Decreto 442 -15 y 265-16 de la Comisionada Distrital de Hábitat, el programa se implementará en fases, pero requiere el desarrollo de sistemas de gestión, uso y control que permitan la recolección de neumáticos usados en el país.

Martinez et al. (2017), en su artículo investigativo para la revista Ingeniería de Construcción RIC, titulada “Trece Años de Continuo Desarrollo Con Mezclas Asfálticas Modificadas Con Grano de Caucho Reciclado En Bogotá: Logrando Sostenibilidad En Pavimentos”. Describe cada una de las diferentes etapas que realizan los UDI para la aplicación

adecuada y exitosa de mezclas fortificadas con GCR. La primera etapa de estudios de laboratorio incluye una evaluación integral de las propiedades mecánicas de la mezcla, según la tipología de mezclas asfálticas utilizadas en Colombia. Además de aplicaciones de corta duración en carruseles de fatiga, evaluamos la degradación de este tipo de mezclas de forma acelerada. La segunda etapa de la evaluación implica una comparación del desempeño con otros tipos de mezclas asfálticas modificadas con polímeros en el mercado colombiano. En esta etapa se construirá un tramo de prueba completo, que incluye varios tramos con asfalto modificado con polímeros (SBS, SBR) y dos tramos con asfalto de caucho, uno seco y otro húmedo. Como resultado de estos pasos, se han desarrollado especificaciones técnicas que brindan pautas para la preparación y evaluación de mezclas que contienen GCR. También se discuten los beneficios ambientales de aplicar esta tecnología al medio ambiente colombiano.

Mejía y Sierra (2017), en su tesis de pregrado titulado “Estado Del Arte de Mezclas Asfálticas Modificadas en Los Últimos 10 Años: Caso de Estudio Universidades de Bogotá D.C”. Presenta el estado del arte de la investigación desarrollada por las Instituciones de Educación Superior de la Ciudad de Bogotá durante los últimos diez años en el campo del asfalto y mezclas asfálticas modificadas. Se pudo concluir gracias a la recopilación de información de dichas instituciones, que el uso de partículas de caucho reciclado como modificador mejora los fenómenos de ahuellamiento y agrietamiento superficial a altas temperaturas y cargas elevadas.

Ubidia (2019), en su tesis titulada “Diseño de pavimento flexible con la utilización de polvo de caucho reciclado para minimizar la generación de fisuras del Jr. Jorge Chávez cdra. 01-09 Ciudad de Tarapoto San Martín”. Presenta como objetivo general diseñar el Pavimento Flexible con utilización de Polvo de Caucho Reciclado para minimizar la generación de fisuras del Jr. Jorge Chávez Cdra. 01-09 Ciudad de Tarapoto. En Perú. Su metodología se basa en una

investigación experimental puesto que, se realizaron ensayos de laboratorio para obtener los resultados que permitieron el diseño de una mezcla asfáltica convencional y modificada con polvo de caucho reciclado. A la que luego se les comparó. Esta investigación se basó en un tipo de falla por fisuramiento, que afecta directamente a la carpeta asfáltica. Se obtuvo un 5.7 % de cemento asfáltico óptimo y cuatro porcentajes de adición de caucho (0.25, 0.50%, 0.75% y 1.00%) siendo 0.5 el óptimo, siempre con granulometría fina y comparadas con la mezcla patrón. Se concluye que los parámetros de digestión del caucho son de 2 horas a una temperatura de 170°C. Por lo que, es factible utilizar el caucho en mezclas asfálticas, ya que mejora las propiedades y el comportamiento del pavimento ante el ahuellamiento, y la fatiga provocados por efecto del tránsito vehicular continuo.

Regionales

Ludo y Martínez (2019), en su trabajo de investigación de pregrado titulado “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”. Tiene como objetivo principal Evaluar los procesos de modificación, ventajas y desventajas de mezclas asfálticas con cauchos en pavimentos flexibles en las ciudades de Santa marta, Barranquilla y Bogotá. En este contexto se realiza una revisión y observación de los fenómenos en su estado natural, es decir, en el contexto que se da y no se ejerce influencia directa en los mismos. Por lo que se concluye que la adición de Granulo de Caucho para la modificación de las mezclas asfálticas, como una gran cantidad de beneficios, debido a las investigaciones que se han avanzado en los últimos años, las cuales han demostrado que este tipo de modificaciones son más durables con respecto a las convencionales, económicas a largo plazo

pues se disminuyen los mantenimientos y aumenta su durabilidad. En cuanto al impacto ambiental el uso de este material en las mezclas asfálticas, contribuyen a la reducción de impactos negativos para el medio ambiente como lo son, la quema indiscriminada de las llantas desechadas dando paso a las emisiones de CO₂.

Peña y Ramírez (2022), en su monografía titulada “Viabilidad Técnica de Mezclas Asfálticas Incorporando Neumáticos Reciclados”. Evalúa la viabilidad técnica del uso de neumáticos reciclados como aditivo de las mezclas asfálticas en pavimentos flexibles, a fin de sugerir la mejor forma de adición, presentación y porcentaje óptimo. Para ello, se realiza una revisión bibliográfica del tema, se analiza las implicaciones del uso de esta fibra en características como la deformación plástica, resistencia mecánica, durabilidad y microestructura del pavimento, y se comparan los mejores porcentajes propuestos por cada autor. Los resultados de los análisis indican que la mejor forma de adicionar neumáticos usados a un pavimento flexible es a través de la mezcla asfáltica, utilizando el polvo de caucho, en una proporción de 10% en peso de la mezcla, de manera que el polvo interactúe con el ligante y los agregados. Esto permite plantear, por un lado, a la academia a seguir investigando acerca del tema comparando otros porcentajes y, por otro lado, al sector industrial a utilizar esta tecnología en aplicaciones reales y observar su comportamiento en distintos escenarios posibles y hacer las comparaciones pertinentes.

Breve Historia del caucho

Este puede presentarse de manera natural o sintético. El caucho de origen natural se obtiene del látex, una emulsión blanquecina que se extrae de la corteza del árbol de caucho. El comerciante ferretero Charles Goodyear (1800–1860) descubrió que, al mezclar este material con azufre y someterlo a altas temperaturas, era posible reducir su pegajosidad a temperaturas elevadas y evitar

su excesiva rigidez al enfriarse. A finales del siglo XIX, empresas como Michelin en Francia, Dunlop en Inglaterra y Goodrich en Estados Unidos desarrollaron las primeras cubiertas destinadas a vehículos automotores (Botazzo y Gonzales, 2008).

Actualmente, las llantas fuera de uso representan un desafío técnico, económico, ambiental y de salud pública a escala global (Cantanhede y Monge, 2002). En América Latina es frecuente encontrarlo en espacios públicos, talleres mecánicos, viviendas y en cauces de ríos y arroyos. En los entornos urbanos el problema se intensifica debido a la alta disponibilidad de neumáticos desechados para su posible reutilización, pues cada año ingresan miles de unidades provenientes de diversas regiones del país.

Marco Teórico

La vía que conecta Agustín Codazzi con Casacara, Cesar, presenta un problema de deterioro prematuro, atribuible a la composición del material utilizado en su construcción, al estado del suelo y a la falta de una estructura adecuada para el tiempo de uso. La implementación de una mezcla de asfalto con polvo de caucho reciclado se presenta como una alternativa viable y una solución potencial a este problema.

Asfaltos

El cemento asfáltico o asfalto según, Especificaciones generales de construcción de carreteras (2022) “es un material con propiedades cementantes, de color marrón oscuro a negro, soluble en tricloroetileno, compuesto principalmente de hidrocarburos y producto de la eliminación de las fracciones más ligeras del petróleo crudo durante el proceso de refinación” (p. 439). Según la Asociación de Productores y Pavimentos Asfálticos de Colombia (ASOPAC, 2004)

“Es un material bituminoso solido a temperatura ambiente. Sus características reológicas muestran una fuerte dependencia de la temperatura: al sufrir un incremento térmico, el cemento asfáltico se ablanda gradualmente y se convierte en un fluido viscoso. Esta característica es fundamental en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente, ya que permite el recubrimiento efectivo de los agregados pétreos.

El comportamiento mecánico del asfalto es sensible a cambios de temperatura y a la duración de aplicación de una carga. A temperaturas bajas, el material es más rígido, mientras que, a temperaturas altas, su consistencia se vuelve más blanda. Es por ello, que al momento de seleccionar el tipo de asfalto adecuado es crucial que se realice bajo las condiciones climáticas específicas del lugar de colocación, a fin de garantizar el desempeño óptimo de la estructura asfáltica a lo largo de su vida útil” (p. 10).

Los asfaltos, en su función de materiales ligantes, se presentan de dos maneras, tanto en fuentes naturales (Asfalto Natural) como en productos manufacturados. La producción industrial de estos se realiza mediante el proceso de destilación del petróleo crudo en instalaciones de refinación (derivados del petróleo).

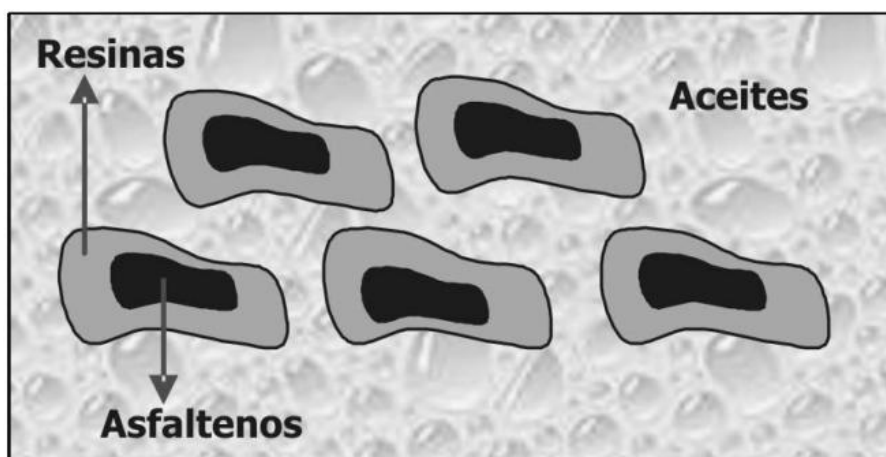
Asfalto Natural (Nativo)

Son materiales bituminosos que se encuentran en la naturaleza y formados a partir del petróleo crudo a través de un proceso natural de evaporación de sus componentes volátiles, resultando en la concentración de las fracciones asfálticas. Los yacimientos más significativos de asfaltos naturales se localizan en los lagos de las islas Trinidad y Bermudas. El asfalto extraído de estas fuentes se llama comúnmente “asfalto de lago” Destacando su origen y características específicas (THE ASPHALT INSTITUTE, 1962), También se presentan impregnando los poros

de ciertas rocas, denominándose en esta ocasión como “rocas asfálticas”. Así mismo, se encuentran combinado con elementos minerales, tales como arenas y arcillas en proporciones variables. Al utilizar estos materiales en pavimentación se requiere someterlos a procesos de purificación para eliminar las impurezas. Debido a la falta de uniformidad y pureza en la actualidad, no se utiliza este tipo de asfalto con frecuencia (Vera Cortez, 2014).

Figura 1

Composición del asfalto.



Nota. En la figura se observa la composición de un asfalto donde los fáltenos proporcionan las características estructurales y dureza del asfalto, resinas que asumen las propiedades cementantes o aglutinantes, y por aceites que aportan la consistencia para mejor trabajabilidad. Obtenido de Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente (Figuerroa Infante et al., 2007).

Derivados Del Petróleo

Es el más utilizado en la actualidad a nivel mundial, pues se obtiene por medio de un proceso de destilación industrial del petróleo crudo y representa más del 90% de la producción total de asfaltos. Sí bien la mayoría de los petróleos crudos contienen componentes asfálticos,

existen algunas excepciones, en donde la composición de asfalto que posean definirá su clasificación, siendo estas:

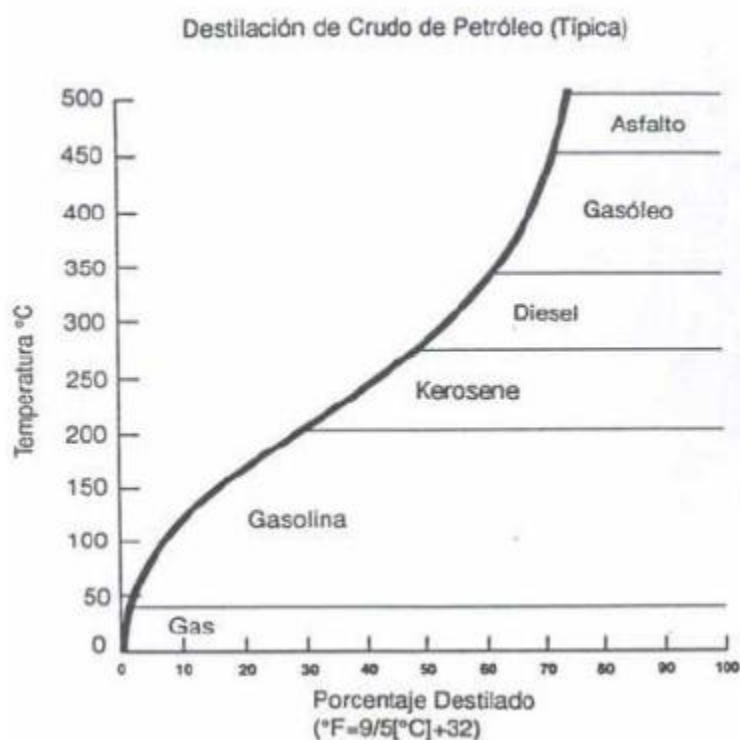
- Petróleos crudos de base asfáltica.
- Petróleos crudos de base Parafínica.
- Petróleos crudos de base mixta (contiene tanto parafina como asfalto).

Siendo este último no óptimo para fines viales debido al contenido de parafina que posee. Puesto que, a menor temperatura, se forma una segunda fase discontinua, que afecta de manera negativa las propiedades del material. Dentro de estas propiedades indeseables hallamos la disminución de la ductilidad. Que en el caso de los crudos asfálticos no se presenta, debido a su composición (Vera Cortez, 2014).

El proceso llevado a cabo para la obtención del asfalto a través del petróleo crudo extraído de los pozos es la destilación (ver figura numero 1), en esta se separan las fracciones livianas como el keroseno y la nafta de la base asfáltica por medio de la vaporización, fraccionamiento y condensación de estas. Por lo que se puede concluir que el asfalto se obtiene como un producto residual del proceso anteriormente descrito, caracterizándolo como un material bituminoso debido a que contiene un porcentaje de betún, lo cual lo convierte en un hidrocarburo soluble disulfuro de carbono.

Figura 2

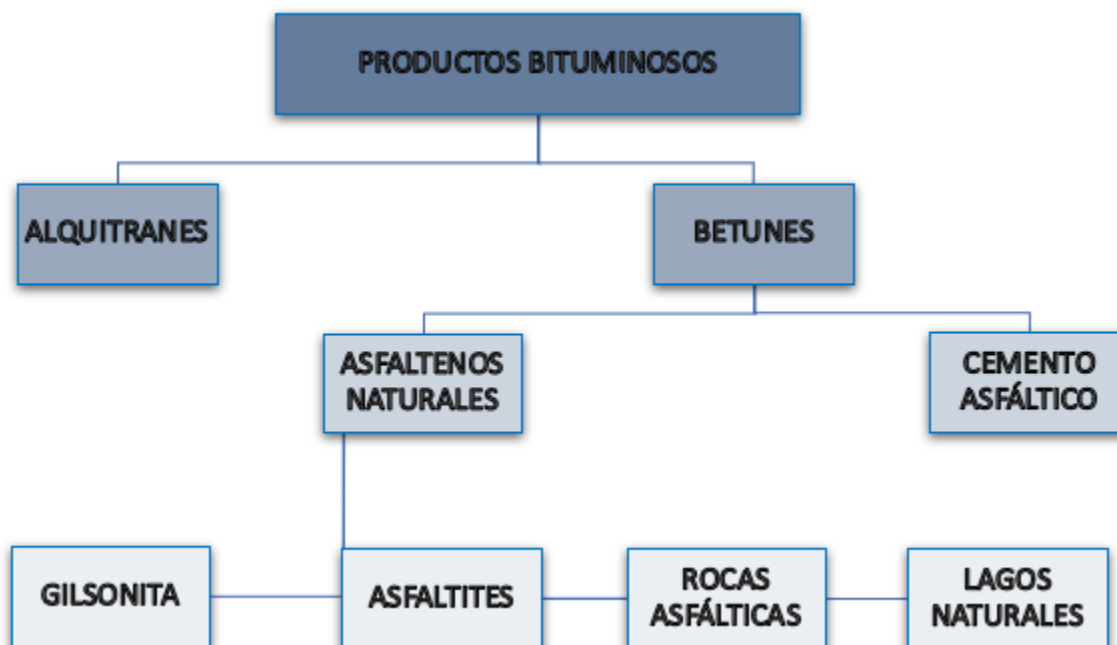
Productos y temperaturas típicas de destilación.



Nota. La figura muestra una gráfica temperatura Vs porcentaje destilado, donde se observa que a mayor temperatura el proceso de destilación de petróleo crudo es mayor dando diferentes productos en base al petróleo crudo Obtenido de Análisis Del Comportamiento Reológico Y Caracterización De Asfalto Modificado Con Llanta Triturada (Caucho) En Relación Al Asfalto Convencional, Como Alternativa De Mitigación De Contaminación Ambiental Por Llantas En Desuso (Vera Cortez, 2014).

Figura 3

Productos bituminosos.



Nota. Este mapa conceptual muestra los diferentes productos bituminosos existentes, Inspirado en el mapa conceptual de productos bituminosos del Análisis Del Comportamiento Reológico Y Caracterización De Asfalto Modificado Con Llanta Triturada (Caucho) En Relación Al Asfalto Convencional, Como Alternativa De Mitigación De Contaminación Ambiental Por Llantas En Desuso (Vera Cortez, 2014).

Tipos de Asfaltos

Dentro de la cartilla del pavimento asfáltico (ASOPAC, 2004), se plantea que existen 3 clases principales de cemento asfáltico:

Cementos Asfálticos (AC)

Es uno de los más utilizados en los pavimentos. Su clasificación es basada en tres diferentes sistemas, los cuales son: viscosidad tanto antes como después del envejecimiento y la penetración.

Es comercializada a través de grados o rangos de consistencia, usando como referencia el ensayo de penetración, clasificados de la siguiente manera: AC **70-90**, AC **60-80**, y AC **80-100**. Los números que se encuentran al lado derecho de la designación “AC” representan la penetración del asfalto en decimas de milímetros. El ensayo de penetración es una herramienta fundamental a la hora de clasificar y caracterizar a los cementos asfálticos, convirtiéndolo así en uno de los más comunes en este ámbito.

Asfalto Líquido

Este se obtiene al diluir cemento asfáltico en algún solvente del petróleo. Se pueden encontrar agrupados en 3 categorías, dependiendo que tan rápido se produzca la evaporación del solvente, fenómeno al que se le conoce como curado del asfalto:

Asfalto de Curado Lento SC (Slow Curing): asfaltos rebajados de curado lento, “Está compuesto de betún asfáltico y aceites relativamente poco volátiles” (THE ASPHALT INSTITUTE, 1962, p. 29)

Asfalto de Curado Medio MC (Medium Curing): asfaltos rebajados de curado medio, “Este compuesto de betún asfáltico y un disolvente de tipo queroseno de volatilidad media” (THE ASPHALT INSTITUTE, 1962, p. 29)

Asfalto de Curado Rápido RC (Rapid Curing): asfaltos rebajados de curado rápido, “Está compuesto de betún asfáltico y un disolvente de tipo nafta o gasolina, muy volátil” (THE ASPHALT INSTITUTE, 1962, p. 29)

Esta clasificación va acompañada de un número que especifica el grado de viscosidad cinemática, medido en centiestokes (cSt). Por ejemplo, RC-250 indica un asfalto rebajado de

curado rápido con una viscosidad de 250 cSt, mientras que MC-70 denota un asfalto rebajado de curado medio con una viscosidad de 70 cSt.

Emulsión Asfáltica

La Emulsión Asfáltica se componen de dos elementos: agua y cemento asfáltico. Se utilizan en tratamientos superficiales, riegos de adherencia, mezclas abiertas, estabilización de suelos y lechadas asfálticas. Dependiendo de la carga eléctrica de los glóbulos de asfalto, pueden ser catiónicas (C, carga +) o aniónicas (A, carga -). Dependiendo de la velocidad del rompimiento de la emulsión, se clasifican en rompimiento rápido (RR), medio (RM) o lento (RL). (ASOPAC, 2004, p 11).

Propiedades Físico-mecánicas

La resistencia, adhesividad, impermeabilidad y estabilidad del asfalto lo convierten en un excelente material aglutinante. Debido a sus características reológicas, que le permiten fluir en diversos climas y tolerar cargas constantes, tiene la capacidad de soportar tensiones. Es flexible debido a su plasticidad intrínseca, lo que facilita su mezcla con áridos. El asfalto se presenta en diversos colores, desde el marrón hasta el negro. La temperatura y/o la presencia de emulsionantes determinan su estado físico, que puede ser sólido, semisólido o líquido (Agudelo & Martínez, 2019)

Unas de las más importantes propiedades físicas del asfalto son:

Durabilidad

Capacidad para mantener sus propiedades originales frente a procesos de degradación y envejecimiento a los que se ve sometido en condiciones normales de servicio (Mejía & Sierra, 2017).

Adhesión

“Capacidad de un asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación” (Mejía & Sierra, 2017, p. 14).

Cohesión

Capacidad de mantener la integridad de la mezcla asfáltica, asegurando al pavimento la adhesión y retención de las partículas de agregado (Mejía & Sierra, 2017, p. 14).

Susceptibilidad a la Temperatura

“Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros a medida que su temperatura disminuye, y más blandos a medida que su temperatura aumenta” (Mejía & Sierra, 2017, p. 14).

Endurecimiento y Envejecimiento

Son fenómenos inducidos primordialmente por el proceso de oxidación. Esta se ve favorecida por la exposición a temperaturas elevadas y por películas asfálticas de reducido espesor (Mejía & Sierra, 2017, p. 14).

El comportamiento del asfalto bajo carga a una temperatura determinada viene dado por sus características reológicas. Estas características se determinan examinando el flujo y la deformación del material, lo que permite evaluar su resistencia a las cargas del tráfico. Las características reológicas del asfalto se evalúan con frecuencia mediante las siguientes pruebas:

Ductilidad

La capacidad de un material para dispersar energía dentro de su rango plástico se conoce como ductilidad. La deformación que experimenta un material está directamente relacionada con

su fallo. La ductilidad mejora las cualidades aglutinantes del asfalto. Sin embargo, los asfaltos de alta ductilidad podrían ser más susceptibles a los cambios de temperatura.

Elasticidad

Es la capacidad que tiene un material de volver a su forma original sin sufrir una deformación permanente debido a una carga aplicada.

Índice de Penetración

Es una medida expresada en décimas de milímetro, evalúa la consistencia de los materiales bituminosos. Se determina mediante una prueba de penetración, que calcula la profundidad de penetración del material bituminoso a una temperatura determinada utilizando una aguja estandarizada.

Penetración

Es la profundidad de penetración vertical de una aguja estandarizada en material bituminoso a una temperatura determinada, medida en décimas de milímetro. Evaluando la uniformidad de los materiales bituminosos.

Pérdida de Masa

Según Vera (2014) define esta pérdida de masa como “la pérdida de solventes o ligeros (máximo 0.8% en prueba RTFO)” (p. 40).

Punto de Ablandamiento

En las pruebas realizadas a las mezclas que cumplen con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022 de INVIAS, el punto de ablandamiento se define como la

temperatura a la que una muestra de asfalto pasa de un estado semisólido a uno líquido o fluido cuando se calienta en condiciones controladas y se somete a una carga determinada.

Esta prueba, que se realiza con frecuencia utilizando el método del anillo y la bola, determina la temperatura a la que el material bituminoso comienza a deformarse notablemente bajo una carga constante y pierde su rigidez. Con el fin de minimizar la formación de surcos en los pavimentos que se encuentran en climas cálidos, un mayor punto de ablandamiento denota un asfalto más resistente y menos vulnerable a las altas temperaturas ambientales y de servicio.

Determinando con precisión el punto de ablandamiento se garantiza que el asfalto elegido tenga una consistencia adecuada para las condiciones de funcionamiento del pavimento y asegura su longevidad y rendimiento a lo largo de su vida útil (Ministerio de Transporte & INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, 2022).

Punto de Inflamación

Es la temperatura más baja a la que los vapores del material bituminoso se inflaman cuando hay una fuente de ignición (como una chispa, una llama o una superficie caliente) presente. Esta prueba se lleva a cabo para evaluar el comportamiento y la seguridad del asfalto a altas temperaturas.

Solubilidad

Esta prueba evalúa la calidad del cemento asfáltico. Mediante la medición de la solubilidad de los materiales bituminosos en disolventes orgánicos como el disulfuro de carbono o el tricloroetileno. Permitiendo calcular la cantidad de material soluble, lo cual es esencial para

garantizar la calidad del asfalto utilizado en la construcción de carreteras. (Ministerio de Transporte & INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, 2022).

Viscosidad

La resistencia interna al flujo cuando se aplica una fuerza se conoce como viscosidad y es una característica fundamental de los fluidos. En comparación con los materiales bituminosos de baja viscosidad, que fluyen más fácilmente, los materiales de alta viscosidad muestran una mayor resistencia al flujo. La viscosidad es un factor crucial en las normas de construcción de carreteras de INVIAS. Es fundamental recordar que la viscosidad de los materiales bituminosos está inversamente correlacionada con la temperatura; es decir, la viscosidad disminuye a medida que aumenta la temperatura y viceversa. Dado que afecta directamente al comportamiento de las mezclas asfálticas bajo carga y en diversos climas, esta relación es esencial para la selección y el diseño de las mezclas asfálticas. (Vera Cortez, 2014, p. 39)

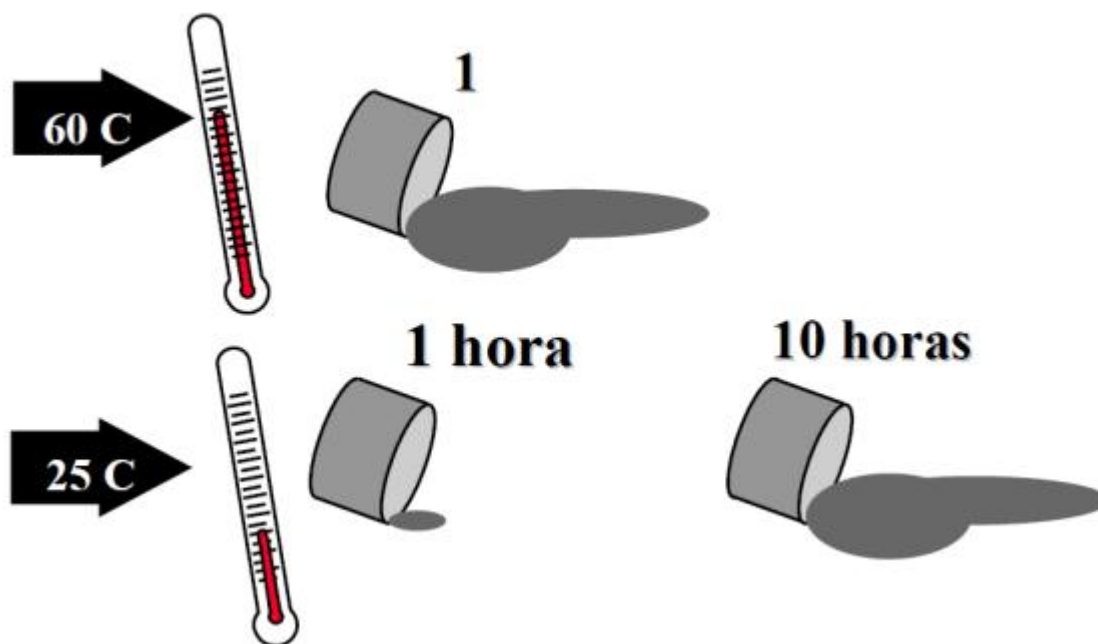
Todos estos ensayos se encuentran dentro de las Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022 del INVIAS, permitiendo caracterizar el cemento asfáltico que se requiere utilizar en el proyecto.

Comportamiento Físico-Mecánico Del Asfalto

Debido a que el cemento asfáltico es viscoelástico, tanto la temperatura como las condiciones de carga afectan su comportamiento. Además, el comportamiento reológico del asfalto se ve afectado por el envejecimiento. Los impactos de las altas temperaturas durante períodos breves son directamente afines a los efectos de las bajas temperaturas durante períodos prolongados, como se muestra en la Figura 3.5. (Vera Cortez, 2014)

Figura 4

Conducta viscoelástica del cemento asfáltico.



Nota. Se puede observar como a altas temperaturas en un corto plazo obtenemos la misma liquidez del cemento asfáltico que a bajas temperaturas en un tiempo más largo. Tomado de Análisis Del Comportamiento Reológico Y Caracterización De Asfalto Modificado Con Llantita Triturada (Caucho) En Relación Al Asfalto Convencional, Como Alternativa De Mitigación De Contaminación Ambiental Por Llantitas En Desuso Vera Cortez, (2014).

Los componentes de los asfaltos, que se distinguen por sus características ligantes y aglutinantes, son compuestos en gran parte por hidrocarburos con una consistencia semisólida a temperatura ambiente. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura, su fluidez aumenta (Arenas, 2000).

Reacción Del Asfalto Ante Altas Temperaturas

Según Vera Cortez (2014) el cemento asfáltico puede comportarse como un líquido viscoso cuando se expone a altas temperaturas, ya sea por condiciones de carga prolongada y baja velocidad (como el tráfico de vehículos pesados) o por una exposición ambiental excesiva (como en las zonas desérticas). Su clasificación como fluido newtoniano, en el que la relación entre la fuerza de resistencia y la velocidad relativa es lineal, se justifica por esta característica.

En estas circunstancias, los líquidos viscosos como el cemento asfáltico también pueden clasificarse como “plásticos”. Pierden permanentemente su forma inicial una vez que comienzan a fluir. Como resultado, las mezclas asfálticas aplicadas en caliente tienden a deformarse bajo el peso y la actividad de los vehículos, especialmente en días calurosos como puede observarse en la figura 5. Esta naturaleza plástica puede provocar deformaciones y movimientos permanentes en las intersecciones. El pavimento asfáltico también puede separarse debido a una reducción de la adherencia del agregado al asfalto.

Figura 5

Deformación permanente en el pavimento asfaltico debido a altas temperaturas.



Nota. Esta imagen representa la deformación permanente ocasionada por las altas temperaturas y el tráfico pesado en y la actividad de los vehículos que pasan por la zona. Obtenido de soluasfalt SOLUCIONES ASFÁLTICAS (<https://asfaltomadrid.com/blog/por-que-se-deforman-las-carreteras/>).

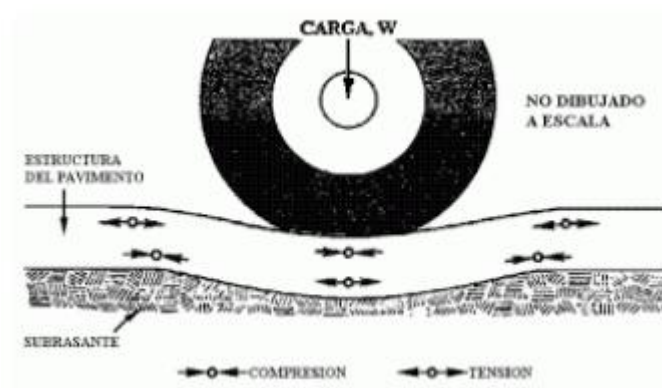
Reacción Del Asfalto Ante Bajas Temperaturas

El clima influye en el comportamiento del cemento asfáltico. A diferencia del comportamiento plástico que se observa a altas temperaturas, el asfalto tiende a comportarse como un sólido elástico a temperaturas muy bajas o bajo cargas repetidas a velocidades elevadas. Cuando se retira la carga, los sólidos elásticos, a diferencia de los materiales plásticos, pueden recuperar su forma anterior siempre que no se supere su capacidad de carga, lo que provocaría su fractura.

Este fenómeno se explica porque las tensiones internas del asfalto se acumulan cuando intenta contraerse en consecuencia de la caída de temperatura, pero la subcapa de la estructura de la vía impide este movimiento. La superficie del pavimento desarrolla hendiduras transversales como resultado de esta interacción, destacando la fragilidad de la mezcla como se observa en la Figura 6 (Vera Cortez, 2014).

Figura 6

Esfuerzo en el pavimento.



Nota. Puede observarse la deformación transversal que ocurre en la estructura del pavimento debido a una carga aplicada y como la subcapa permite que las tensiones internas del asfalto se acumulen cuando intenta contraerse en consecuencia de la caída de temperatura. Tomado de *Análisis Del Comportamiento Reológico Y Caracterización De Asfalto Modificado Con Llanta Triturada (Caucho) En Relación Al Asfalto Convencional, Como Alternativa De Mitigación De Contaminación Ambiental Por Llantas En Desuso* Vera Cortez, (2014).

Sobre todo, en zonas con climas semiáridos cálidos, donde existen notables diferencias de temperaturas, con mínimas que suelen estar en el rango de 10 °C a 18 °C, mientras que las máximas pueden llegar hasta 36 °C en condiciones extremas. (Duval et al., 2015)

Reacción Del Asfalto a Temperatura Ambiente

Según Vera Cortez (2014) el cemento asfáltico muestra un comportamiento dual a temperatura ambiente, combinando características de los estados sólido-elástico y líquido-plástico. El funcionamiento adecuado del pavimento depende de una adhesión suficiente al agregado, lo que es posible gracias a esta dualidad. El asfalto se vuelve fluido cuando se calienta, lo que facilita el recubrimiento del agregado y la formación de la mezcla. Luego, cuando se enfría, funciona como aglutinante, uniendo el agregado y solidificando la mezcla. La mezcla asfáltica muestra un comportamiento viscoelástico en su estado final.

además, se puede utilizar un sistema paralelo de muelles y amortiguadores para simular cómo reacciona el asfalto a las fuerzas aplicadas. El muelle en las mezclas calientes es una representación de la respuesta elástica instantánea del agregado y del asfalto. El amortiguador representa la respuesta viscosa y lenta del asfalto, que es más notable a temperaturas más altas.

Envejecimiento del Asfalto

Según Vera Cortez (2014), Cuando el cemento asfáltico entra en contacto con el medio ambiente, se produce un proceso de oxidación química conocido como “envejecimiento del asfalto”. Donde este se vuelve más frágil como resultado del endurecimiento excesivo de esta reacción. Dicho proceso suele ser lento, pero cuando se expone a altas temperaturas, se acelera.

Las capas de asfalto más antiguas o aquellas que no se compactaron adecuadamente durante la construcción son especialmente vulnerables a la oxidación. En el primer caso, la oxidación se debe al deterioro natural que se produce con el paso del tiempo, mientras que en el segundo caso se debe a una mayor proporción de huecos que permiten la entrada de oxígeno en la mezcla.

Las reacciones del cemento asfáltico mencionadas anteriormente son características típicas que se encuentran en la mayoría de los asfaltos. Sin embargo, el comportamiento particular puede cambiar según las características químicas y físico-mecánicas del material, lo que puede afectar a su rendimiento.

Es fundamental recordar que, en lo que respecta a las características generales mencionadas anteriormente, esta investigación se centra en las posibles mejoras del asfalto mediante la aplicación de polvo de caucho (granulo de caucho GCR).

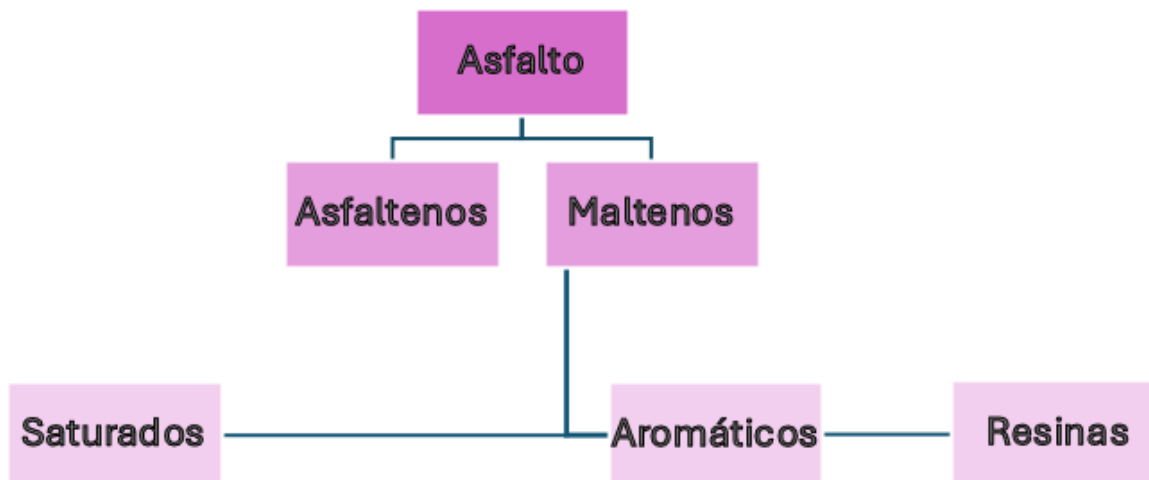
Composición Química

Comprender la composición química del asfalto es fundamental para garantizar un buen rendimiento del pavimento, ya que permite controlar las características físicas del material.

En el siguiente esquema representa la composición de los asfaltos:

Figura 7

Composición química del asfalto.



Nota. Este esquema muestra la composición de un asfalto, obtenido de Implementación Del Grano de Caucho Reciclado (GCR) Proveniente de Llantas Usadas Para Mejorar Las Mezclas Asfálticas y Garantizar Pavimentos Sostenibles en Bogotá (Díaz & Castro, 2017).

Al igual que el petróleo crudo, el asfalto tiene una composición química compleja formada por una variedad de hidrocarburos, como parafinas, aromáticos y compuestos heterocíclicos.

Los hidrocarburos saturados, las resinas y los aromáticos conforman el medio oleoso más ligero (máltenos) en el que se distribuye una parte de las moléculas pesadas (asfáltenos). Estos hidrocarburos se combinan para producir una solución líquida. Existe una transición gradual entre estas fases, en lugar de una división clara (Angulo, 2005).

Los materiales más resistentes precipitan cuando el asfalto se disuelve en n-heptano. Boussingault utilizó por primera vez el término “asfáltenos” en 1837 para describir estas sustancias. La característica única de los asfáltenos es su insolubilidad en n-pentano, incluso cuando otras fracciones de asfalto precipitan con diferentes disolventes (Repsol, 2000-2017).

Asfáltenos

(Díaz & Castro, 2017) afirma que “son sustancias que están constituidas por compuestos aromáticos, de color negro o marrón, que contienen elementos químicos como el nitrógeno, azufre, carbono, oxígeno. Son compuestos polares, solubles en benceno” (p. 19).

Máltenos

Según (Díaz & Castro, 2017), “son sustancias constituidas principalmente por resinas, saturadas y aromáticas. Muy polares y al igual que los asfáltenos, son compuestos de carbón, hidrógeno y con cantidades menores de hidrógeno, oxígeno y azufre” (p. 19)

Aromáticos

(Agudelo & Martínez, 2019) afirma que “los aromáticos son de gran importancia ya que el asfalto se compone de un 40 % 0 60% de este y son la que menor peso molecular tienen, en los aromáticos predomina las moléculas con un peso de 300 a 200, que no son polares, tiene la capacidad de actuar como disolvente de cadenas hidrocarbonadas” (p. 23).

Saturados

De acuerdo a (Agudelo & Martínez, 2019), “es un compuesto químico que presenta una cadena de átomos de carbono que se unen entre sí a través de enlaces simples contiene diferentes átomos de hidrógeno utilizando las valencias libres de otros átomos” (p. 23).

Resinas

Las resinas en la composición química del asfalto son compuestos polares que desempeñan un papel crucial en la estabilidad y las propiedades reológicas de este material. Se encuentran en

la fracción de los máltenos, junto con los aceites y asfáltenos, y se caracterizan por su alto peso molecular (Romero & Gómez, 2024).

Función Del Asfalto en Los Pavimentos.

El asfalto desempeña dos funciones clave en la estructura del pavimento:

Aglutinante

Resiste las cargas de los vehículos al favorecer una estrecha cohesión entre los áridos.

Impermeabilizante

Proporciona una fuerte defensa contra la filtración de agua por capilaridad y precipitaciones.

Además de ofrecer una solución rentable y simultánea para estos dos fines, el asfalto proporciona flexibilidad al pavimento, lo que le permite adaptarse con facilidad a posibles consolidaciones de las capas subyacentes. Para que el asfalto cumpla estos objetivos, es necesario utilizar asfalto de alta calidad y cumplir rigurosamente las normas de diseño durante la construcción del pavimento.

Asfaltos Modificados

Según (Vera Cortez, 2014) “En su mayoría estos asfaltos son fabricados para la contracción de carreteras, son los cementos asfálticos combinados con algún polímero cuya función es mejorar alguna o varias de las propiedades físicas de éste” (p. 37).

Asfalto Modificado Con Polímero

Los asfaltos modificados ofrecen un mejor rendimiento en aplicaciones de pavimentación, ya que sus características mecánicas y físicas han sido modificadas mediante la inclusión de

polímeros u otros aditivos. Estos asfaltos se utilizan para sortear las deficiencias de los asfaltos tradicionales, como su resistencia a las altas temperaturas, su flexibilidad y su durabilidad en condiciones climáticas adversas. Los asfaltos modificados aumentan la seguridad y la comodidad de los usuarios al prolongar la vida útil del pavimento y reducir las fracturas y deformaciones. Al añadir polímeros a los asfaltos modificados, es posible aumentar la resistencia a la deformación permanente y mejorar la adhesión entre los áridos y el ligante asfáltico, dos factores fundamentales para la durabilidad de las mezclas asfálticas (Wulf Rodriguez, 2008).

Polímero

Son compuestos macromoleculares que se incorporan al asfalto convencional con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Estos polímeros, que pueden ser de tipo elastomérico o termoplástico, actúan como modificadores que incrementan la elasticidad, la resistencia a la deformación permanente y la durabilidad del asfalto frente a condiciones climáticas adversas (Múnera Ossa, 2012).

Principales Modificadores Utilizados en el Asfalto

Desde hace bastante tiempo se emplea caucho como modificador, ya sea natural o sintético, con tasas no superior al 5 %.

Actualmente existen los polímeros sintéticos de formulación especial que resultan muy competitivos. Asfaltos modificados con estos polímeros han sido ensayados en pavimentos de varios países (Wulf Rodriguez, 2008).

Los modificadores más comúnmente empleados en la modificación de materiales asfálticos son:

Polímero Tipo I

“Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado en base a bloques de estireno, a polímeros elastómeros radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno – Butadieno - Estireno (SBS) o Estireno - Butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales” (Vera Cortez, 2014).

Polímero Tipo II

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastómeros lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales (Wulf Rodriguez, 2008).

Polímero Tipo III

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las deformaciones de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado en base a un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como Etileno-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad, entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de

pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales (Vera Cortez, 2014).

Agregados Pétreos

Son agregados minerales inertes y duros, se emplean en forma de partículas gradadas o fragmentos. Estos materiales son componentes esenciales tanto en las capas de base granular como en la formulación de mezclas asfálticas. Los agregados se clasifican en dos categorías principales: naturales y procesados (Hernandez & Lozano, 2020)

Agregados naturales

Según (Arias et al., 2014), “se dividen en gravas, arenas y relleno mineral (filler)” (p. 20).

Agregados de Triturados

De acuerdo con (De Jesús, 2019), “Material que es obtenido de la trituración de diferentes rocas de cantera con propiedades físicas adecuadas (p. 18).

Agregados artificiales

“Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables” (Hernandez & Lozano, 2020).

Caucho Molido De Neumáticos (GCR Grano de Caucho Reciclado)

Es un material o producto que se obtiene de la molienda o triturado de llantas o neumáticos desechados para su reciclaje que no contenga a su vez materiales ferromagnéticos, u otros elementos que contaminen la obtención de única y exclusivamente caucho. (Resolución 6981 del 27 de diciembre de 2011).

Mezclas Asfálticas

Son la combinación de agregados pétreos y un ligante fáltico. Se elaboran normalmente en plantas mezcladoras, pero en algunos casos pueden fabricarse in situ. (Galarcio Africano, 2019).

Las mezclas asfálticas se distinguen por la variedad de sus componentes, que incluyen agregados pétreos con características de granulometría y estándares de calidad particulares. Estas variaciones se manifiestan en la función que cumplen dentro de la estructura del pavimento, así como en el tipo de material asfáltico o ligantes empleados. (Quintana y Reyes, 2015).

Este estudio explora los procesos utilizados para la creación de asfaltos modificados con caucho proveniente de neumáticos y llantas recicladas del sector automotriz. A nivel global, se ha destacado la importancia de esta tecnología para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas, especialmente en situaciones de alto tráfico vehicular. (QUINTANA et al., 2012).

Polvo de Caucho

Proveniente del reciclaje de neumáticos usados, aporta propiedades únicas a la mezcla, mejorando su resistencia mecánica y su comportamiento ante condiciones adversas. Estudios previos han demostrado que la modificación con polvo de caucho puede aumentar la resistencia a la fatiga, la resistencia a la deformación permanente y la resistencia a la humedad de las mezclas asfálticas (Martínez y López, 2021). Además, se ha observado una significativa mejora en la resistencia al desgaste y una reducción en la rugosidad superficial (Ramírez y Torres, 2023), lo que contribuye a un mejor rendimiento del pavimento asfáltico.

La utilización de polvo de caucho como modificador de mezclas asfálticas no solo mejora la durabilidad del pavimento, sino que también promueve la sostenibilidad al reducir la huella de carbono asociada a la construcción de infraestructuras y al promover el reciclaje de neumáticos

(Pérez et al., 2022). Este enfoque contribuye a la gestión eficiente de residuos y a la reducción del impacto ambiental de la industria de la construcción.

El estudio comparativo entre mezclas convencionales y mezclas modificadas con polvo de caucho reciclado se centra en la evaluación de las propiedades mecánicas, la resistencia a la humedad y el comportamiento a la fatiga de ambas mezclas. Se realizarán pruebas de laboratorio que permitan determinar la influencia del polvo de caucho en las propiedades de la mezcla asfáltica. Estos laboratorios se fundamentan en el artículo 467 – 22 de las Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, del Instituto Nacional de Vías (Invias). Los resultados obtenidos se analizarán mediante métodos estadísticos para determinar la significancia de las diferencias entre las mezclas y para evaluar la viabilidad de la utilización del polvo de caucho como modificador en pavimentos flexibles en vías semiáridas (García y Fernández, 2022).

Este estudio se basa en la hipótesis de que la incorporación de polvo de caucho reciclado en las mezclas asfálticas mejora significativamente su resistencia a la fatiga, la resistencia a la deformación permanente y la resistencia a la humedad, además de tener un impacto positivo en la resistencia al desgaste y la rugosidad superficial. La verificación de esta hipótesis permitirá determinar la eficacia del polvo de caucho como modificador de mezclas asfálticas en condiciones semiáridas, contribuyendo a la búsqueda de soluciones sostenibles para la construcción de infraestructuras viales en estas regiones (López et al., 2023).

Marco Legal

Podemos observar que en Colombia se presentan varias normativas que rigen la utilización de las llantas cuando ya cumplen su vida útil, estas normas van desde decretos hasta resoluciones que se presentan a continuación:

Acuerdo 186 de 2005. Reglamento académico institucional que establece los lineamientos para la elaboración, presentación y aprobación de trabajos de grado en los programas de pregrado. Este documento define los criterios formales, metodológicos y de evaluación que deben cumplir las investigaciones desarrolladas por los estudiantes, constituyendo el marco normativo interno que orienta la realización de la presente tesis.

Resolución 1326 del 2017. Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones.

Resolución 6981 de 2011. Establece los lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, así como de llantas no utilizadas.

Resolución 1457 expedida el 29 de julio del 2010, artículo 3 del primer capítulo. Establece los lineamientos para la gestión ambientalmente adecuada de los residuos posconsumo de llantas en Colombia, definiendo obligaciones para importadores, fabricantes y comercializadores.

Resolución 1488 de 2003. Reglamenta el manejo y disposición final de llantas usadas en el territorio colombiano, estableciendo medidas para su almacenamiento, transporte, reciclaje y reutilización, con el fin de reducir los impactos ambientales derivados de su acumulación.

Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022. Son un conjunto de normativas técnicas que establecen los lineamientos y requisitos para la construcción, rehabilitación y mantenimiento de carreteras en Colombia. Estas especificaciones son fundamentales para garantizar la calidad y seguridad de las obras viales.

Normas y Especificaciones INVIAS E-2013. Un conjunto de documentos técnicos conocidos como las normas y especificaciones INVIAS E-2013 son fundamentales para la construcción y el mantenimiento de carreteras en Colombia. Estas publicaciones contienen las Normas de Ensayo

de Materiales (INV E-XXX-13) para suelos, áridos y otros componentes, y las Especificaciones Generales de Construcción para materiales y obras (páginas 200-900). Estas normas abarcan todo, desde la pavimentación, el mantenimiento y la protección del medio ambiente hasta el desmonte y la excavación.

Método de diseño para mezclas de reciclado de pavimentos asfálticos. Proporciona un enfoque para el diseño de mezclas que incorporan ligantes bituminosos y llantas usadas.

Resolución sobre puntos de recolección. Establece que los productores e importadores de llantas deben contar con puntos autorizados para la recolección, acopio, transporte y disposición de llantas usadas.

IDU 560 – 11 Especificación técnica: Mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho. Documento normativo del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, Bogotá) que regula el uso del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas.

ASTMD 4123-82(1995). “Método de prueba estándar para la prueba de tensión indirecta para el módulo resiliente de mezclas bituminosas” (p. 30).

Estas normativas son fundamentales para garantizar un uso seguro y eficiente de las llantas recicladas en la construcción de pavimentos flexibles, promoviendo la sostenibilidad y el reciclaje en la industria de la construcción.

Marco Contextual

Localización.

Figura 8

Ubicación del departamental de la Zona de estudio.

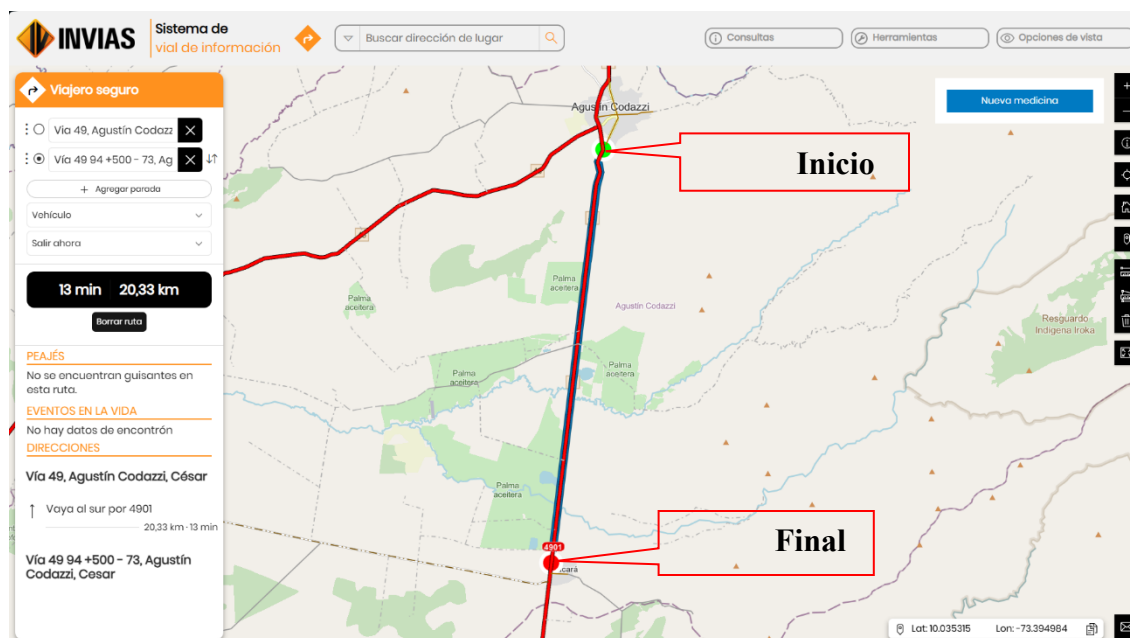


Nota. El mapa no incluye datos del Cesar, tomado de

([https://es.wikipedia.org/wiki/Cesar#/media/Archivo:Cesar_in_Colombia_\(mainland\).svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Cesar#/media/Archivo:Cesar_in_Colombia_(mainland).svg))

Figura 9

Ubicación local, Tramo de estudio, vía 49 94-73, Agustín Codazzi, Cesar.



El tramo de estudio se encuentra ubicado en la Vía 49 94-73, Agustín Codazzi, Cesar, con un total de 20.33 km de extensión, limita por el sur con el municipio de Becerril, por el occidente con el municipio de El Paso, y por el Oriente con la Serranía del Perijá que sirve como límite natural entre Colombia y Venezuela, es por ello por lo que posee diversidad de climas debido a que parte de su territorio la conforma la Serranía del Perijá. El municipio de Agustín Codazzi se encuentra a 131 metros sobre el nivel del mar y tiene una temperatura promedio de 28°. (PLAN VIAL DEPARTAMENTAL DEL CESAR 2020-2030, 2020)

Metodología

Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación:

En la presente investigación se trabajará con el tipo de investigación documental cuantitativa, puesto que para su desarrollo se utilizará información que ya ha sido generada en diferentes medios escritos, buscando conocer la viabilidad que hay en el uso de mezclas asfálticas con adición de polvo de caucho proveniente de llantas recicladas; esto se logra con la ayuda de estudios y trabajos ya realizados, en los cuales no se piensa alterar ningún dato de estas literaturas.

A este tipo de investigación se le conoce por la recopilación y el análisis exhaustivo de información procedente de múltiples fuentes, con el fin de profundizar en el tema estudiado.(Stracuzzi & Pestana, 2012).

Diseño de investigación:

El diseño que presenta este estudio es cuasiexperimental, ya que, el diseño de la mezcla se realiza en base a una granulometría de áridos provenientes del tramo de prueba (Vía 49, Inicio Pr 94 - Final Pr 73, Agustín Codazzi, Cesar), donde posteriormente se comparará con las realizadas a vías semiáridas, dando los parámetros óptimos para el diseño de la mezcla modificada con polvo de caucho para estas vías.

Las metodologías de investigación cuasiexperimentales comparten similitudes con los experimentos verdaderos; sin embargo, se diferencian en la ausencia de asignación aleatoria de sujetos a los grupos. A diferencia de los experimentos clásicos, donde la aleatorización permite

comparar el impacto de una variable independiente sobre la dependiente, los diseños cuasiexperimentales utilizan grupos preexistentes u otras estrategias de asignación no aleatoria.(Abreu, 2023).

Población, muestra y muestreo

Población

Según Tamayo y Tamayo (2009) Describe este punto como el conjunto completo de individuos o elementos que comparten las características esenciales del fenómeno a analizar. Para la correcta ejecución del estudio, esta población debe ser susceptible de cuantificación, representando un universo compuesto por ‘N’ entidades que exhiben una propiedad específica. En términos más sencillos, la población abarca la totalidad de los elementos relevantes para la investigación, constituyendo el foco central del análisis (pp.176).

Para fines de esta investigación la población está constituida por las vías que se encuentren en un clima semiárido.

Muestra

Según Hernández et al. (2014) se define como un subconjunto de la población que se selecciona para participar en un estudio. Esta selección es crucial porque permite a los investigadores hacer conclusiones sobre la población total sin necesidad de estudiar a todos sus miembros (pp. 171).

Para esta investigación se eligió un tramo de prueba (Vía 49, Inicio Pr 94 - Final Pr 73, Agustín Codazzi, Cesar). El cual tiene un total de 20.33 km de extensión.

gráficos para facilitar la comprensión.



Desarrollo Metodológico

A continuación, se describe los diferentes procedimientos, herramientas y formatos que se utilizarán para las actividades de cada objetivo específico:

Primer Objetivo:

Actividad 1.1. En esta actividad se realizó una selección exhaustiva de revisión rápida, y posterior descarga de la literatura actual existente limitándonos a los últimos 10 años (definido desde 2014 hasta el 2023), sobre el uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas, centrándose en estudios previos que evalúen sus efectos en el desempeño, comportamiento y durabilidad de los pavimentos. Los archivos en los que se fundamenta esta investigación fueron recolectados mediante fichas bibliográficas (con los nombres de Regional, Nacional e Internacional) a través del fichaje. De acuerdo a (Rodríguez M., 2005) la define como “fichas que permiten conservar datos acerca de libros, artículos, conferencias, revistas, etc. Las fichas tienen la enorme ventaja de que facilitan el trabajo, pues archivan en ficheros en los que se ordenan por temas, de tal manera que el investigador tiene acceso a la información cada vez que la necesite, además de que este acervo puede incrementarse indefinidamente conforme se vaya recopilando más datos” (p. 67), así mismo, en 2006, Dusailant define las fichas bibliográficas como “aquella que contiene toda la información sobre el documento que tenemos ante nosotros” (p. 38).

Se utilizaron diferentes bases de datos presentes en la biblioteca virtual de la universidad tales como Ebooks 7-24, ScienceDirect, Scopus, Springer, etc. y base de datos académicas como Google académico; de donde se efectuó una búsqueda a partir de palabras claves encasilladas en el tema principal de esta investigación, resultando una cantidad de documentos que no excedió los 100 artículos, esto sin contar con los decretos, normas, leyes, manuales y especificaciones utilizados para el armado de esta investigación.

Las descargas se realizaron a través de Google académico y base de datos de la Universidad de Pamplona - Norte de Santander, asignándoles un numero dependiendo de la descarga y luego se archivó en las fichas correspondiente antes mencionadas. Posteriormente se realizó una matriz de datos (a través de Excel) 4 X 4, en donde se describieron los métodos de estudio, la procedencia de la literatura y los métodos de integración (Vía seca, Vía húmeda y Vía semihúmeda) que estas tengan.

Figura 10

Matriz 4 X 4, registro de literatura dependiendo de su procedencia, método de estudio y método de integración.

Método de Estudio		Estado del arte				Tesis				Artículo				Monografía-Diplomado			
		Método de integración				Método de integración				Método de integración				Método de integración			
		Húmedo	Seco	SemiHúmedo	N/N	Húmedo	Seco	SemiHúmedo	N/N	Húmedo	Seco	SemiHúmedo	N/N	Húmedo	Seco	SemiHúmedo	N/N
DOCUMENTOS	Internacional			8		1-2-3-6-13-14-23-25-26-27-28-30	2-3-4-6-10-11-13-14-23-25-26-28-29-30		7-12-18-21	17-20-24	16-17-22	16	5-19				
	Nacional	9-10	9-10			1-2-5-8-12-13-15-21-22-24-25-27-30-32	2-5-8-12-13-15-21-30-32-34		16	3-4-18-23	4-18		17-29-35	28	20-28		
	Regional									1	1			2			

Nota. Esta figura representa una tabla realizada e importada de Excel para determinar procedencia, método de estudio y método de integración.

La tabla que se realizó en Excel permitiendo identificar que archivos eran útiles basándose en las tres características nombradas anteriormente, y de igual manera aquellas que no tenían un método de integración claro, esto con el fin de depurarlas más adelante. Anqué se trabajó un rango de tiempo considerable se tomaron documento de fechas anteriores para tomarlos como referentes e identificar si el estudio es o no vigente a la fecha actual en la que se redacta este documento.

En la tabla 2 se muestra los diferentes juegos de palabras y combinaciones utilizadas en la búsqueda de archivos potenciales que servirán para esta investigación, cumpliendo con la cantidad de artículos antes mencionados.

Tabla 2

Términos de Búsqueda y Estrategias de Consulta Empleadas para la Recuperación de Artículos en Bases de Datos de la universidad de Pamplona y académicas.

String de búsqueda (Cadena de texto)	# de Documentos Hallados
("Asphalt" AND "modified" AND "rubber" AND "tire" AND "granule" AND "powder")	34
("Mixtures" AND "asphalt" AND "rubber" AND "granule" AND "powder" AND "Colombia")	36
("Mixtures" AND "asphalt" AND "rubber" AND "granule" AND "powder" AND "coast" AND "Colombia")	2

Nota. Cadenas de texto utilizadas para hallar archivos en las diferentes bases de datos de la universidad de Pamplona ya que ellas manejan mucha más información en el idioma inglés.

Como puede observarse en la tabla 2, todas las palabras que se encuentran dentro de la cadena de texto se relacionan perfectamente con el tema a tratar en esta investigación. Su traducción es la siguiente:

- Asphalt = Asfalto.
- Coast = Costa.
- Granule = Granulo.
- Mixtures = Mezclas.
- Modified = Modificado.
- Tire = Neumático.

Actividad 1.2. Una vez realizada la revisión y selección de dichos documentos en la actividad anterior, se buscó analizar y compilar información relevante sobre los métodos de integración, beneficios técnicos, impactos ambientales, y aspectos económicos del uso de polvo de caucho en pavimentos flexibles. A través de un software de análisis cualitativo llamado NVivo, permitiendo codificar textos y buscar patrones en la información compilada.

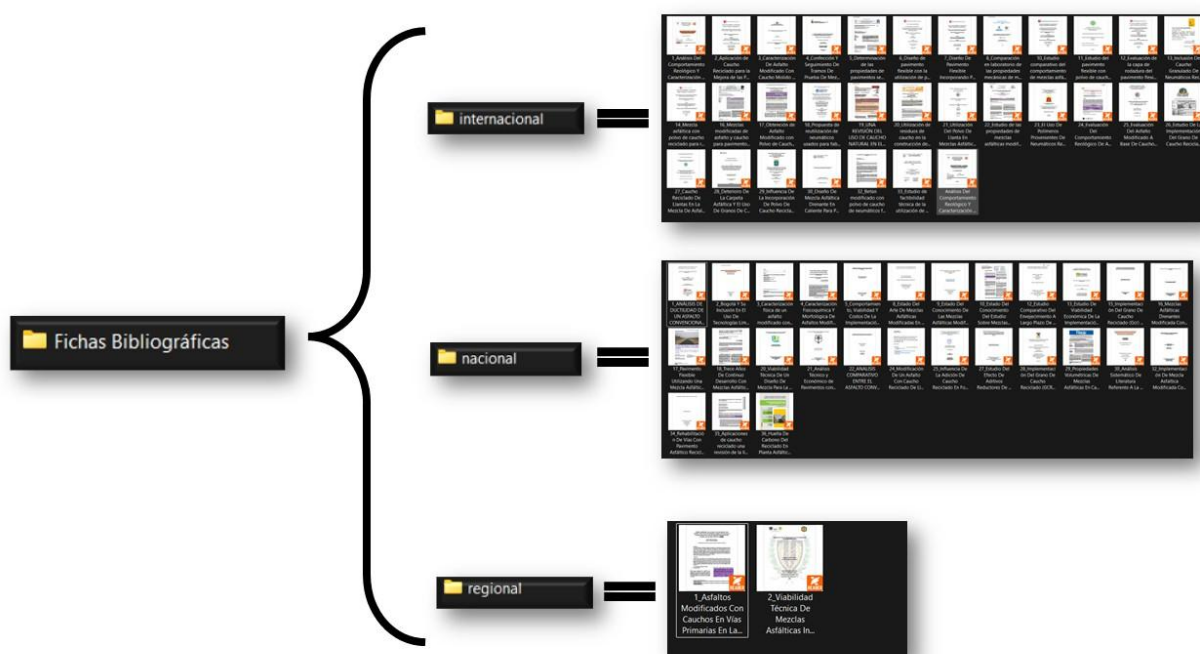
El proceso llevado a cabo en NVivo, se dividió en etapas de la siguiente forma:

Etapas 1: Preparación de Datos

Lo primero que se hizo en esta etapa fue preparar los datos de interés, por lo cual, implico observar sus transcripciones y eliminar cualquier información identificable, es decir, la manera en la que está organizado sea un documento Word o un pdf, Como puede verse en la figura 11.

Figura 11

Archivos de Transcripción.



Nota. Organización de archivos dentro de la carpeta “Fichas Bibliográficas”.

En la figura puede observarse la organización de los archivos de transcripción que se agregaron a el apartado de “Archivos” en la aplicación de NVivo. Con una etiqueta (número asignado en la parte izquierda del nombre del archivo dado al momento en que se descargó de las bases de datos) puesta a cada documento para identificarlos. En este caso la etiqueta en internacionales va desde 1 hasta 34, la de nacional va de 1 a 36 y la regional va de 1 al 2; depurando aquellos archivos que no sean de interés o acorde al tema de la investigación. Lo segundo fue hacer una asignación de etiquetas a las preguntas que surgieron de la investigación al momento de estar realizándola, esto ayudo a englobar de manera general los temas específicos (en este caso son métodos de integración, beneficios técnicos, impactos ambientales, y aspectos económicos del uso de polvo de caucho en pavimentos flexibles). Y por último se determinó la estrategia de investigación que en este caso fue Codificación Centrada en la Descripción, puesto que todo lo

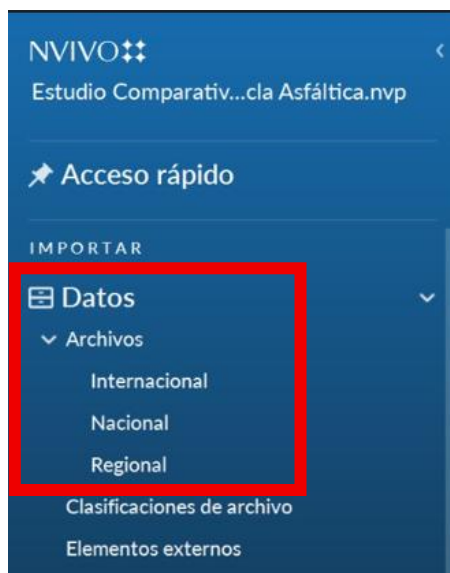
relacionado con el archivo va directamente ligado a las etiquetas puestas anteriormente, dando un panorama mucho más amplio de lo que se buscaba enlazar en estos.

Etapas 2: Cargar Archivos

Lo siguiente fue cargar los archivos para poder visualizarlos en el apartado de “Datos” en Aplicación NVivo con la misma etiqueta dada anteriormente:

Figura 12

Transcripciones importadas desde la carpeta “Fichas Bibliográficas” a el apartado de “Datos”.



Nota. Puede observarse la creación de Archivos con la etiqueta que anteriormente le asignamos a los archivos descargados de las bases de datos consultadas.

Etapas 3: Crear un Código Para Cada Pregunta de Investigación

Las preguntas que se realizaron en la primera etapa y que se les asignaron una etiqueta, se les creo un código (código de anclaje) a cada una. Como se observa en la figura número 13.

Figura 13

Códigos creados a cada una de las etiquetas puesta a las preguntas realizadas en la primera etapa.

Nombre	Archivos	Referencias	Creado el	Modificado el
Beneficios del PCR en mezcl	1	6	2/06/2025 10:43	3/06/2025 9:31 a. m.
El mejor tipo de caucho para	3	11	2/06/2025 10:47	2/06/2025 10:47 p. m.
Ensayos realizados	2	6	2/06/2025 10:48	2/06/2025 10:48 p. m.
Metodología	4	6	3/06/2025 7:15 a	3/06/2025 7:16 a. m.
Método de integración	3	18	2/06/2025 10:47	2/06/2025 10:47 p. m.
Porcentaje de filler mineral o	1	2	2/06/2025 10:51	2/06/2025 10:51 p. m.
Porcentaje de ligante asfáltic	3	6	2/06/2025 10:50	2/06/2025 10:50 p. m.
Porcentaje de polvo de cauc	5	8	2/06/2025 10:49	2/06/2025 10:49 p. m.
Tiempo almacenamiento de	0	0	2/06/2025 10:45	2/06/2025 10:45 p. m.
Tipo de mezcla	1	1	2/06/2025 10:49	3/06/2025 5:32 a. m.
Viabilidad PCR en mezclas	1	1	2/06/2025 10:44	2/06/2025 10:46 p. m.

Etap4: Crear una Clasificación

Se refiere a un código de agrupación basado en relaciones compartidas por diferentes archivos. En este caso se les asigno a cada uno de los códigos que fueron necesarios:

Figura 14

Formación de grupos para cada uno de los códigos anteriormente creados.

Nombre	Archivos	Referencias	Creado el	Modificado el
Beneficios del PCR en mezclas	1	6	2/06/2025 10:43 p	3/06/2025 9:31 a. m.
El mejor tipo de caucho para l	3	11	2/06/2025 10:47 p	2/06/2025 10:47 p. m.
Marcas	1	2	3/06/2025 10:47 a	3/06/2025 10:48 a. m.
Molida	3	9	3/06/2025 5:48 a	3/06/2025 6:10 a. m.
Ensayos realizados	2	6	2/06/2025 10:48 p	2/06/2025 10:48 p. m.
Agregados	0	0	3/06/2025 7:51 a	3/06/2025 7:51 a. m.
Cemento asfáltico	0	0	3/06/2025 7:50 a	3/06/2025 7:50 a. m.
Densidad y vacíos	1	7	3/06/2025 7:36 a	3/06/2025 8:11 a. m.
Estabilidad y flujo	1	3	3/06/2025 7:35 a	3/06/2025 8:10 a. m.
Gravedad específica	0	0	3/06/2025 7:35 a	3/06/2025 7:35 a. m.
Mezcla asfáltica	0	0	3/06/2025 7:51 a	3/06/2025 7:51 a. m.
Método Marshall	1	1	3/06/2025 5:34 a	3/06/2025 5:34 a. m.
Propiedades del asfalto	0	0	3/06/2025 9:51 a	3/06/2025 9:51 a. m.
Rugosidad	0	0	3/06/2025 7:36 a	3/06/2025 7:36 a. m.
Metodología	4	6	3/06/2025 7:15 a	3/06/2025 7:16 a. m.
Diseño de la investigació	4	5	3/06/2025 7:19 a	3/06/2025 7:23 a. m.
Efoque	1	1	3/06/2025 7:21 a	3/06/2025 7:21 a. m.

En esta misma etapa se tomó la información que respondían las preguntas de la etiqueta y se encasillaron dentro de la agrupación de código correspondiente a la misma, una vez realizado este proceso, El apartado de archivos y referencias se modificó, pasando de estar en 0 a tener el valor de las referencias que se tomaron de un archivo sin importar si es el mismo o no, y en el apartado archivos contó cuantos extraje de esas referencias. De esta forma, se depuraron más archivos que no eran necesarios quedando solo 8 que respondían las preguntas en relación con la investigación.

Buscando resultados más concretos a través de esta herramienta, se realizó un análisis cuantitativo con la idea de traducir la codificación cualitativa que me ofrece NVivo. Permitiendo cuantificar las tendencias más relevantes identificadas en los ocho estudios seleccionados para la fase comparativa. Esto a través de una tabla realizada en Excel:

Tabla 3

Tabla cuantitativa derivada de la codificación (basada en los 8 estudios seleccionados).

Categoría codificada	Nº de estudios que lo reportan	% sobre los estudios	Tendencia identificada
Aumento de estabilidad Marshall	8	100%	Tendencia fuerte y consistente
Reducción del flujo	6	75%	Mejora mecánica frecuente
Mejor compactación / reducción de vacíos	7	87.50%	Alta coincidencia entre estudios

Aumento de rigidez	7	87.50%	Efecto dominante del PCR
Incremento de durabilidad	8	100%	Resultado universal
Mejora del comportamiento térmico	5	62.50%	Más frecuente en zonas cálidas
Reducción de permeabilidad	6	75%	Asociado al uso de caucho fino
PCR óptimo entre 0.5% – 1.5%	8	100%	Rango validado transversalmente
Ventajas económicas a largo plazo	6	75%	Ahorros por mayor vida útil
Adecuación del método vía seca	7	87.50%	El más compatible con clima semiárido

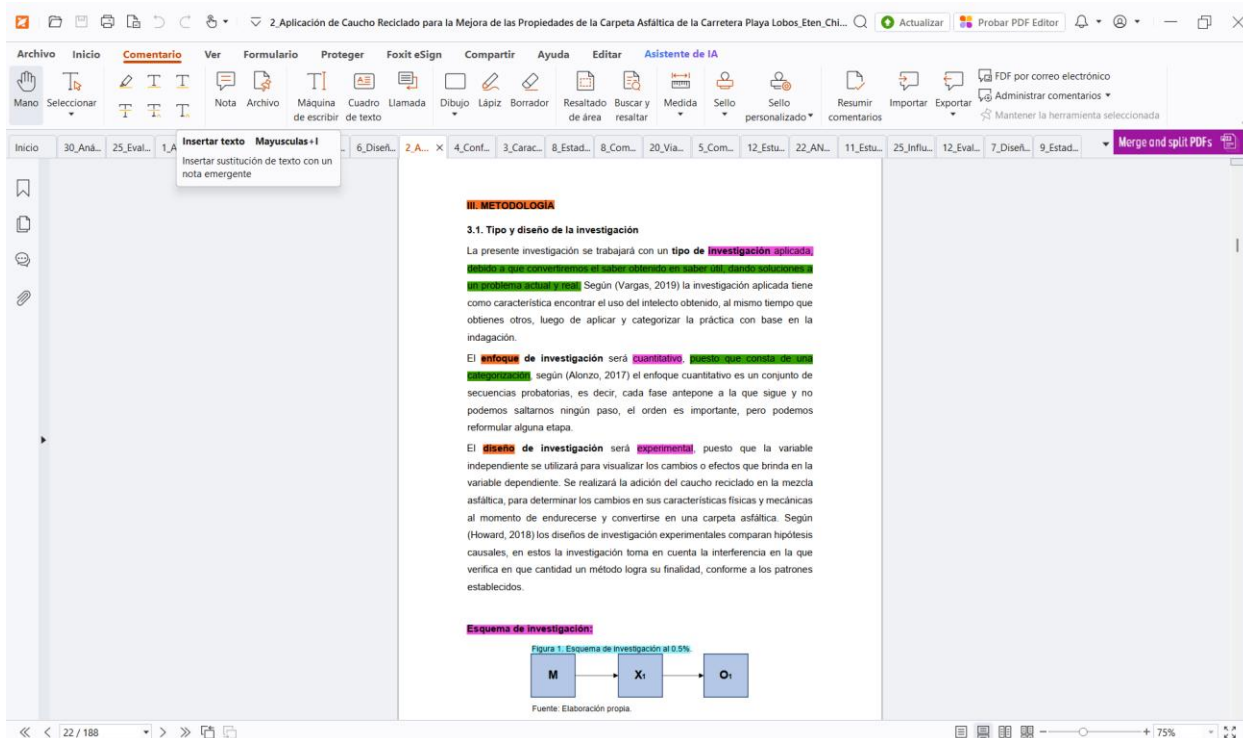
De esta tabla se observa que:

- **100%** de los estudios reportan aumentos de estabilidad y durabilidad.
- **Más del 85%** coincide en mejoras volumétricas (VA, VAM, VFA).
- **75%** menciona reducción de permeabilidad y flujo.
- **62.5%** identifica mejoras térmicas.
- **0.5%–1.5%** es el rango universal del PCR.
- **87.5%** considera la vía seca como la más adecuada para climas cálidos/semiáridos.

Actividad 1.3. En esta actividad se evaluó técnicamente la viabilidad de la incorporación del polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas convencionales en vías semiáridas, a través, de los estudios previos compilados anteriormente, revisando la metodología y resultados desarrollados en estas literaturas y subrayando la más importante por medio del lector Foxit PDF Reader, el cual es un programa que permite abrir, leer, comentar y editar archivos PDF como se observa en la figura 15. Luego se realizó un cuadro comparativo a través de Excel, teniendo en cuenta características tales, como: tipo de archivo, nombre, año, procedencia, metodología, resultados más importantes y método de integración. Como puede verse en la tabla A4 (Ver apéndice A).

Figura 15

Subrayado de metodología usada en una tesis investigativa experimental de uno de los archivos compilados anteriormente.



Nota. En la figura se observa el subrayado de una de las características para tener en cuenta en los documentos, en este caso es la metodología utilizada en esa investigación, que sirvió como método de comparación con los otros archivos seleccionados; Así mismo, se realizó a cada uno de los archivos seleccionados. Fuente propia.

Como se nota en la figura 15, a cada uno de los documentos seleccionados para esta actividad, los cuales fueron ocho, se subrayaron teniendo en cuenta las características antes mencionadas, permitiendo una comparación más completa y concisa para plantear el diseño asfáltico del siguiente objetivo.

Segundo Objetivo:

Actividad 2.1. En esta actividad, se realizó un análisis granulométrico por tamizado en el área de estudio seleccionada (Vía 49, Inicio Pr 94 - Fin Pr 73, Agustín Codazzi - Casacara, Cesar). Esta sección del proyecto abarca una longitud total de 20.38 km. Para caracterizar adecuadamente las condiciones del suelo a lo largo de esta extensión, se implementó un muestreo sistemático, obteniendo un total de 6 apiques que permitieron obtener muestras representativas ubicadas en sectores estratégicos del inicio, parte media y final del tramo, de la siguiente manera: Al inicio se realizaron dos apiques (Pr93 +010 y Pr92 +010), en medio se realizaron dos apiques (Pr81 +000 y Pr80 +010) y al final se realizaron dos apiques (Pr73 +020 y Pr74 +020). Lo que garantiza una lectura general del comportamiento del material existente, con el fin de obtener una representación básica de la variación longitudinal del material y asegurar que cada sección del tramo estuviera incluida en el diagnóstico. Las muestras se extrajeron a dos metros del borde de la vía actual, con el objetivo de caracterizar el suelo original sin interferencias de capas añadidas posteriormente.

Estos análisis granulométricos se pueden observar desde la figura C1 hasta la C6, (ver apéndice C).

Los resultados del análisis granulométrico para cada punto de muestreo son los siguientes:

- Coeficiente de uniformidad **Cu** = 2.608, Coeficiente de curvatura **Cc** = 0.605.
- Coeficiente de uniformidad **Cu** = 3.606, Coeficiente de curvatura **Cc** = 0.643.
- Coeficiente de uniformidad **Cu** = 3.335, Coeficiente de curvatura **Cc** = 0.480.
- Coeficiente de uniformidad **Cu** = 4.087, Coeficiente de curvatura **Cc** = 0.554.
- Coeficiente de uniformidad **Cu** = 3.574, Coeficiente de curvatura **Cc** = 0.482.
- Coeficiente de uniformidad **Cu** = 4.201, Coeficiente de curvatura **Cc** = 0.432.

Con base en estos valores, los suelos de la zona se clasifican como arena de gradación uniforme, pero con un carácter de suelo mal graduado. Esto implica que la distribución de tamaños de partícula no es óptima para cumplir con los requisitos requeridos para un pavimento modificado o convencional como se observa en los resultados de los análisis granulométricos (ver apéndice C), ya que una distribución de tamaños de partícula amplia y continua (bien graduado) es deseable para lograr una mejor compactación, mayor resistencia y menor permeabilidad.

Ante esta situación, se recomienda un mejoramiento del suelo en la zona del proyecto. Se sugerirá una granulometría basada en los archivos seleccionados y en las especificaciones del INVIAE dado que los seis puntos de muestreo presentan características de suelo mal graduado, aunque con variaciones en sus coeficientes de uniformidad y curvatura. Esto se debe a que dichos archivos contienen datos de suelos que sí cumplen con los criterios de gradación deseada para capas de base y subbase, o bien, proporcionan información sobre los materiales que han demostrado ser adecuados en condiciones similares. Con el fin de que se pueda utilizar esta

información para diseñar una mezcla de materiales que corrija la deficiencia de gradación observada, asegurando así un mejor desempeño y durabilidad de la estructura del pavimento.

Actividad 2.2. Debido a que las características granulométricas del suelo realizada a la zona de estudio, dio como resultado un material con clasificación mal gradado, se recomienda que se haga un mejoramiento. Puesto que, los parámetros volumétricos, la trabajabilidad, la compactación y el rendimiento mecánico general de la mezcla se ven muy afectados por una distribución inadecuada del tamaño de las partículas. Esto hace que sea imposible determinar con precisión las proporciones ideales de áridos, cemento asfáltico y material elastomérico necesarias para satisfacer los requisitos de rendimiento de los pavimentos flexibles. La comparación con cualquier otro material de suelo similar no se puede llevar a cabo, en vista de esta circunstancia y con el fin de garantizar la validez técnica del diseño que se deseaba desarrollar, se tomó un enfoque metodológico que consistió en comparar y evaluar investigaciones anteriores realizadas en zonas con características ambientales y funcionales comparables, especialmente aquellas con un clima cálido semiárido (tomando la temperatura mínima y máxima anual) y vías similares (como troncal nacional, corredores de alta demanda, vía principal, autopistas y vía urbana) como se observa en la tabla 4; debido a que el desempeño de materiales en pavimentación no depende únicamente de la granulometría, sino también del contexto climático y las condiciones funcionales de la vía en la cual serán utilizados.

Esta decisión se tomó en base a que los grandes cambios de temperatura y la baja humedad son características del clima cálido semiárido. Estos factores tienen un impacto directo en la susceptibilidad de las mezclas asfálticas al ahuellamiento, la rigidez del ligante y la pérdida de cohesión. Por lo tanto, los estudios realizados en climas comparables permiten establecer rangos realistas de rendimiento y dosificación, en particular en relación con:

- La cantidad optima de cemento asfáltico para evitar la deformación a largo plazo,
- el porcentaje de polvo de caucho que aumenta la estabilidad térmica y la elasticidad,
- y las curvas granulométricas típicas en las regiones secas, donde suelen encontrarse áridos naturalmente uniformes o poco variables.

Así mismo, esta investigación se centra en una troncal nacional que soporta cargas significativas, factores de estrés frecuentes y un elevado volumen de tráfico. Las mezclas asfálticas utilizadas en este tipo de corredores deben tener:

- Una gran resistencia al ahuellamiento,
- una reacción adecuada resiliente,
- y resistencia a ciclos de calor severos.

Estudios anteriores que examinan pavimentos en carreteras equivalentes, como troncales, corredores principales o carreteras con alto tráfico, proporcionan referencias fiables sobre las proporciones de áridos, los tipos de granulometría y los contenidos de ligantes que han demostrado un rendimiento satisfactorio bajo tensiones comparables. Incluso en situaciones en las que la granulometría local no es adecuada para una referencia directa, el diseño puede contextualizarse y evaluarse de esta manera.

Es metodológicamente aceptable construir una granulometría estándar basada en investigaciones previas de otros estudios en lugares con materiales y condiciones climáticas similares, ya que no se puede utilizar la granulometría original del área de esta zona de estudio debido a su baja gradación.

Cuando las propiedades del recurso natural disponible no satisfacen los requisitos mínimos para la formulación de una mezcla estable y duradera, se recomienda el uso de curvas granulométricas y proporciones de estudios similares como práctica técnica, en lugar de como

sustitución arbitraria del material local. Como resultado, esta comparación permite extrapolar parámetros, modificar el diseño y posteriormente evaluar la mezcla mediante ensayos mecánicos y volumétricos propios.

Tabla 4

Tabla comparativa de estudios seleccionados por clima (temperatura min y máx.) y similitud vial.

No	Método de Estudio	Nombre del Archivo	Año de Publicación	Temperatura anual del Clima (min - Max) °C	Tipo de Vía
1	Tesis	Aplicación de Caucho Reciclado para la Mejora de las Propiedades de la Carpeta Asfáltica de la Carretera Playa Lobos, Eten, Chiclayo 2021. Diseño De Pavimento Flexible Con La Utilización De Polvo De Caucho Reciclado	2021	16 -31	Vía Primaria, Troncal Nacional
2	Tesis	Para Minimizar La Generación De Fisuras Del Jr. Jorge Chávez Cdra. 01-09 Ciudad De Tarapoto San Martín. Inclusión De Caucho Granulado De Neumáticos Reciclados Para Mejorar	2019	21 - 34	Vía Urbana
3	Tesis	Propiedades Mecánicas Del Pavimento Flexible En Urbanizaciones: Revisión Sistemática 2011 – 2020.	2020	16 - 26	Vía Urbana Principal
4	Tesis	El Uso de Polímeros Provenientes de neumáticos Reciclados y su Influencia en el Comportamiento de Mezclas asfálticas en Caliente en la Provincia de Ica.	2015	15 - 30	Vía Primaria, Troncal Nacional

5	Tesis	Diseño De Mezcla Asfáltica Drenante En Caliente Para Pavimento Flexible Utilizando Asfalto Modificado Con Polímeros SBS. Viabilidad Técnica De Un Diseño De	2022	18 - 24	Vía Urbana
		Mezcla Para La Elaboración De Asfaltos Modificados Con Llantas Reciclables. 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. Viabilidad Técnica De Mezclas Asfálticas Incorporando Neumáticos Reciclados.			
6	Monografía	Mezcla Para La Elaboración De Asfaltos Modificados Con Llantas Reciclables. 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. Viabilidad Técnica De Mezclas Asfálticas Incorporando Neumáticos Reciclados.	2014	20 - 32	Vía Urbana
7	Artículo	Mezcla Para La Elaboración De Asfaltos Modificados Con Llantas Reciclables. 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. Viabilidad Técnica De Mezclas Asfálticas Incorporando Neumáticos Reciclados.	2019	24 – 34*	Vía Primaria
8	Monografía	Mezcla Para La Elaboración De Asfaltos Modificados Con Llantas Reciclables. 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. Viabilidad Técnica De Mezclas Asfálticas Incorporando Neumáticos Reciclados.	2022	24 - 40	Vía Urbana

Nota. El * que aparece en la tabla representa que el documento se desarrolló en diferentes ciudades de Colombia (Santa Marta, Barranquilla y Bogotá) por ende se tomó el clima de Santa Marta que es donde se desarrolló la investigación. Fuente propia.

Como se puede notar en la tabla, los archivos que más se acercan a la zona de este estudio son los numerados como 1, 2 y 7.

Estas investigaciones sirvieron de base técnica para establecer una granulometría estándar y orientar el cálculo de las proporciones ideales de los componentes de la mezcla.

Como resultado, el uso de estas referencias proporciona al diseño de la mezcla asfáltica sugerida una base metodológica y técnica sólida, lo que garantiza que sus parámetros respondan

adecuadamente a los requisitos del entorno cálido y semiárido y a las condiciones operativas de una carretera nacional troncal.

Los parámetros son los siguientes:

Tabla 5

Comparación de estudios para proporciones óptimas en el diseño de mezcla asfáltica a proponer.

Estudio	Método de integración	Ligante	contenido de polvo de caucho (%)	Contenido Óptimo de Ligante Asfáltico (%)	Observaciones
1	Vía seca	60/70	0.5	5.72	Realizar la aplicación del caucho granular reciclado en el porcentaje de 0,5% para que la mezcla no presente fallas ya que a medida que el porcentaje de caucho reciclado aumenta con respecto al 0,5%, la mezcla pierde estabilidad y por consiguiente el diseño de mezcla asfáltica fallara.

					la Estabilidad
2	Vía Seca	60/70	0.5	5.7	MARSHALL es mayor con la adición del 0.5% respecto a las muestras con las demás adiciones de polvo de caucho. El tamaño de la partícula de caucho requerida es más pequeña,
7	Vía húmeda	60/70	8-10	--	disminuyendo la temperatura de mezclado, y acortando el tiempo de reacción.

Nota. El “--” que aparece en la tabla, quiere decir que no es claro en cuanto al contenido óptimo de ligante asfáltico. Fuente propia.

De la tabla anterior puede deducirse que los dos estudios que utilizan el método de integración por vía seca coinciden en que el contenido óptimo de polvo de caucho es del 0.5%, ya que valores mayores reducen la estabilidad Marshall. Asimismo, ambos reportan un contenido óptimo de ligante cercano a 5.7%, lo cual demuestra consistencia en los resultados. El estudio de vía húmeda utiliza porcentajes mucho mayores entre 8% y 10%, propios de este método, pero no reporta el contenido óptimo de ligante asfáltico, por lo que su aplicación no es directamente comparable. Dado que el proyecto se orienta a un método de integración por vía seca, la evidencia disponible respalda adoptar un contenido de 0.5% de caucho y un contenido óptimo de ligante asfáltico de aproximadamente 5.7%. Cumpliendo estos parámetros con lo establecido

en las “Especificaciones Generales De Construcción De Carreteras 2022” del INVIAS. Con base en la revisión de estudios aplicados en climas semiáridos y uso de PCR vía seca (0.5 %), fue necesario analizar las granulometrías reportadas en los estudios seleccionados, identificando sus rangos, método de incorporación del caucho y desempeño mecánico alcanzado. A partir de esta revisión comparativa se definió una curva recomendada del tipo **MGCR19**, es decir, una mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho reciclado con gradación media, con un grado de penetración 60 -70 o un PG 70-22 (debido a que se necesita una alta resistencia a la deformación, la zona del estudio tiene un clima cálido semiárido con temperaturas altas la mayor parte del año, cuenta con un tránsito pesado y su capa de rodadura es para vía principal), apropiada para mezclas densas en caliente y compatible con porcentajes bajos de incorporación de material reciclado, manteniendo una adecuada estabilidad Marshall y control del contenido de vacíos.

Tabla 6

Propuesta de granulometría MGCR19 (Mezcla densa con GCR, 19 mm máximo).

Tamiz (mm)	Tamiz (US)	% Pasante (objetivo)	Banda aceptable (±)
19	3/4"	100	—
12.5	1/2"	92	±3 %
9.5	3/8"	78	±4 %
4.75	No.4	58	±4 %
2.36	No.8	40	±4 %
0.6	No.30	24	±3 %
0.3	No.50	12	±2 %
0.075	No.200	4 (incluye PCR 0.5%)	±1.5 %

La granulometría presentada corresponde a una mezcla densa en caliente tipo **MGCR19**, con puntos de control en ¾", ½", 3/8", No.4, No.8, No.30, No.50 y No.200, ajustada para

incorporar 0.5 % de polvo de caucho por vía seca, seleccionada con base en los rangos empleados por investigaciones previas en pavimentos flexibles modificados con polvo de caucho y ajustada a condiciones semiáridas y tráfico pesado. El porcentaje de material pasante en el tamiz No.200 incluye el aporte del polvo de caucho reciclado (0,5 %), dado que actúa como fracción mineral fina en el sistema y contribuye al mejor llenado de vacíos, mejorando la cohesión y disminuyendo la permeabilidad.

Esta curva constituye una propuesta técnica de referencia y deberá verificarse mediante el procedimiento de diseño Marshall y control de parámetros volumétricos (VTM, VMA y VFA), según las especificaciones establecidas. Las tolerancias indicadas permiten lograr ajustes propios de los materiales locales sin afectar el desempeño mecánico esperado de la mezcla modificada.

De esta forma, la granulometría propuesta no pretende sustituir una evaluación experimental a escala real, sino entregar una base técnica preliminar sustentada en investigaciones previas, aplicable a vías semiáridas y coherente con las características físicas del caucho reciclado como modificador del ligante asfáltico. Esta propuesta se enmarca en el objetivo general de la tesis, orientado al desarrollo de mezclas asfálticas que incorporen polvo de caucho como alternativa sostenible para pavimentos flexibles.

Tercer Objetivo:

Actividad 3.1. Se realizó un análisis comparativo de ocho investigaciones relacionadas con la modificación de mezclas asfálticas mediante la incorporación de polvo o gránulos de caucho proveniente de neumáticos reciclados. Estos estudios fueron seleccionados debido al porcentaje de polvo de caucho y el método de integración utilizado en el mismo, además de aplicar metodologías representativas para el diseño y evaluación de mezclas asfálticas modificadas.

La Tabla 15 viabilidad de la incorporación del polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas convencionales en vías semiáridas presenta la comparación estructurada de las metodologías utilizadas, permitiendo identificar los procedimientos de incorporación del caucho, la metodología y los enfoques de diseño aplicados en cada caso. Esta información constituye la base para establecer los criterios técnicos que orientarán la propuesta del diseño de mezcla en esta tesis. A través de esta se pudo examinar las diferentes metodologías empleadas en investigaciones anteriores para la modificación de mezclas asfálticas con polvo de caucho (Ver apéndice A).

Actividad 3.2. Para dar cumplimiento a esta actividad, se elaboraron diversas tablas a partir de la información obtenida en los estudios analizados y sistematizados en la Tabla 5 “Comparación de estudios para proporciones óptimas en el diseño de mezcla asfáltica a proponer” de la Actividad 2.2. Dichas tablas permitieron comparar los parámetros establecidos para esta fase (porcentaje de vacíos, estabilidad, flujo Marshall y durabilidad) entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas modificadas con polvo de caucho. La integración de esta información constituyó la base para el análisis correlacional requerido en esta parte de la investigación.

Tabla 7

Matriz comparativa de parámetros clave y correlación con características de los materiales.

Estudio (referencia)	Método / incorporación	% caucho (ensayado)	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)	Rigidez (Estab/F flujo kg/cm)	% vacíos (Va)	VMA (%) / VFA	Durabilidad / otros ensayos	Observaciones clave
-------------------------	------------------------------	---------------------------	---------------------	---------------	--	---------------------	---------------------	-----------------------------------	------------------------

Aplicación de caucho reciclado para la mejora de las propiedades de la carpeta asfáltica de la carretera playa Lobos, Eten, Chiclayo 2021	Vía seca (GCR granular)	0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%	0%: 1130 ; 0.5%: 1135.6 ; 1%: 935; 1.5%: 730; 2%: 583.	0%: 3.4 ; 0.5%: 3.02 ; 1%: 3.51; 1.5%: 4.49; 2%: 4.91.	0%: 3142; 0.5%: 3764 ; 1%: 2660; 1.5%: 1630; 2%: 1188.	0%: 4.00 ; 0.5%: 3.97 ; 1%: 4.84; 1.5%: 5.59; 2%: 6.53.	0%: 14.30 ; 0.5%: 14.11 ; 1%: 15.61; 1.5%: 16.67; 2%: 17.60.	Diseño óptimo reportado: 0.5% caucho + 5.72% CA cumple MTC; pruebas estadísticas (ANOVA y Friedman) muestran diferencias significativas entre porcentajes.	Mejora ligera en estabilidad a 0.5% respecto a 0%; aumentos de caucho >0.5% reducen estabilidad y elevan vacíos.
Análisis del comportamiento reológico y caracterización de asfalto modificado con llanta triturada (caucho) en relación al asfalto convencional, como alternativa de mitigación de	Vía húmeda (modificación ligante)	12%, 14%, 16%, 18% (ensayos) — 14% elegido óptimo	(Marshall mezcla no comparada como en Playa Lobos) — mejora del comportamiento reológico y mecánico; datos Marshall específicos en tablas 5.7–5.8 (valores en documento).	No aplica directo (ensayos reológicos y Marshall por ligante), la fluencia disminuye con modificación.	Ensayos muestra n mayor módulo/rigidez del ligante y del conjunto. Recuperación elástica por ductilómetro: ~43% en modificación vs ~3.5% en convencional (25 °C).	En diseño Marshall del estudio las VMA varían con %CA; en tablas (ej. Va a distintos % CA) aparecen valores (p. ej. Va 9.61 → 6.46 en conv./%CA).	VMA/VFA reportados en tablas del estudio (ver tablas 5.7–5.12).	Durabilidad y recuperación elástica significativa; mejora resistencia a fatiga, menor susceptibilidad térmica y mejor comportamiento a altas temperaturas.	Indica que 14% (en ligante) fue óptimo para estabilidad asfalto-polímero; uso orientado a pavimentos con necesidad de mayor elasticidad y resistencia.

contaminación ambiental por llantas en desuso						Consulta tablas 5.7–5.12.		cia térmica.
Asfaltos								
Modificaciones 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	Vía húmeda y/o mezcla (diferentes proyectos)	12%–18% (ligante) y/o GCR granular en mezclas (varios trabajos)	Diversos estudios reportan incremento de estabilidad y mejor desempeño frente a tráfico y temperatura cuando la modificación está bien dosificada.	Se reportan reducción de deformación permanente y mejora en recuperación elástica (informes cualitativos / algunos datos en tablas).	Documentos analíticos y ensayos de laboratorio muestran mayor módulo dinámico y menor susceptibilidad térmica.	Va tiende a reducirse o mantenerse dentro de especificación si la dosificación y compactación son adecuadas; en exceso de caucho puede aumentar Va.	--	Útil para pavimentos en climas cálidos; se enfatiza la necesidad de control de temperatura de mezcla y compactación.

Nota. La matriz comparativa que se puede observar en esta tabla contiene los datos extraídos de los tres documentos proporcionados en la actividad 2.2. Los “--” que se encuentran en la tabla, representa que el dato de esa casilla no se encuentra explícitamente en el estudio analizado; las tablas originales de cada documento contienen los detalles numéricos completos. Se colocaron los valores más relevantes y representativos en la matriz. Fuente propia.

Análisis cuantitativo y correlaciones

1. % caucho vs estabilidad (Marshall)

- Observación: En *Playa Lobos* la estabilidad aumenta levemente en 0.5% (1130 → 1135.6 kg) pero disminuye al incrementar el caucho a 1%–2% (935 => 583 kg).
- Interpretación: Existe un óptimo bajo (0.5%) en mezclas con método de incorporación por vía seca: cantidades pequeñas mejoran cohesión y filmación del ligante, pero porcentajes mayores disminuyen la estabilidad por incremento de vacíos y pérdida de cohesión (Camacho R & Castañeda P, 2021).

2. % caucho vs % vacíos (Va) y VMA

- Observación: En *Playa Lobos* el % de vacíos de aire (Va) = 4.00% (0% caucho) → 3.97% (0.5%) → 4.84% (1%) → 6.53% (2%). El Vacío en el agregado mineral (VMA) aumenta con mayores % caucho (Camacho R & Castañeda P, 2021).
- Interpretación: Un pequeño aporte de caucho puede mantener o reducir ligeramente Va (mejor compactibilidad si granulometría y compactación óptimas); pero porcentajes mayores incrementan vacíos (pérdida de compactibilidad/mayor absorción), afectando permeabilidad y estabilidad.

3. Método de incorporación: vía seca vs vía húmeda

- Vía seca (mezcla granular en mezcla en caliente): Mejores resultados en *Playa Lobos* con 0.5% GCR (mejora ligera estabilidad y Va dentro de especificación), pero valores subóptimos aparecen cuando se excede el % de GCR (Camacho R & Castañeda P, 2021).
- Vía húmeda (modificación del ligante): Estudios reológicos muestran mejoras claras en recuperación elástica (43%), mayor resistencia a deformación a altas temperaturas y mayor

durabilidad cuando se modifica el ligante con 12–16% en masa de ligante (óptimo 14% en el estudio). Esto favorece pavimentos en condiciones térmicas severas.

- Conclusión práctica: Vía húmeda tiende a aportar mejor desempeño reológico y durabilidad (especialmente en climas cálidos/semiáridos) si se controla el proceso; vía seca puede ser efectiva a bajas dosificaciones (0.5%) para mejorar propiedades si se optimiza la compactación.

4. Caucho (tamaño/granulometría) y comportamiento

- Estudios indican que caucho fino (malla $\leq 40 \mu\text{m}$) favorece interacción ligante-caucho y estabilidad reológica; granulometrías más gruesas complican la estabilidad y compactibilidad.

5. Durabilidad (Cantabro, ITS, recuperación elástica)

- Observación: El estudio reológico y la tesis de Cochabamba muestran mejoras notables en recuperación elástica y comportamiento a fatiga; Cantabro y tracción indirecta mejoran con una dosificación controlada. Recuperación elástica del ligante modificado 43% vs 3.5% en convencional.
- Interpretación: La mayor recuperación elástica reduce la deformación permanente por tráfico y el ahuellamiento; esto es crítico en zonas semiáridas con altas temperaturas.

6. Permeabilidad (relación con vacíos)

- Observación: A menor $V_a \Rightarrow$ menor permeabilidad; en Playa Lobos la mezcla con 0.5% presentó V_a próximo al especificado y buena impermeabilidad reportada en observaciones (mejora de adherencia).

- Interpretación: Controlar Va es prioritario para reducir envejecimiento por oxidación (importante en climas secos) y conservar ligante.

En esta actividad se identificó y contrastó los parámetros de diseño y desempeño más relevantes para mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho (GCR): porcentaje de vacíos (Va), estabilidad (Marshall), durabilidad (ensayos Cantabro, tracción indirecta e índices de recuperación elástica), y permeabilidad. El análisis se realiza exclusivamente sobre los estudios recopilados en la Actividad 2.2: los cuales son la investigación de *Playa Lobos (2021)* (ensayo de mezclas con GCR por vía seca), la tesis de caracterización reológica con asfalto modificado de 14% de caucho (vía húmeda), y la revisión de trabajos aplicados en ciudades colombianas (Santa Marta, Barranquilla, Bogotá).

Extracción de parámetros clave.

De *Playa Lobos* se obtuvieron los resultados del ensayo Marshall para mezclas con 0, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0% de caucho: la estabilidad (kg) fue 1130; 1135.6; 935; 730; 583 respectivamente; el flujo (mm) 3.4; 3.02; 3.51; 4.49; 4.91; y el porcentaje de vacíos con aire (Va) 4.00; 3.97; 4.84; 5.59; 6.53. Además, la combinación óptima reportada fue **0.5% GCR + 5.72% CA** que cumple las especificaciones MTC y presenta la mejor relación estabilidad/flujo (rigidez Marshall = 3764 kg/cm).

En el estudio reológico (modificación vía húmeda) se evaluaron mezclas/ligantes con 12–18% de caucho molido; el porcentaje **14%** resultó óptimo para estabilidad asfalto-polímero según la prueba AASHTO T-53, y la caracterización mostró aumentos significativos en la recuperación elástica del ligante (43% en modificado vs 3.5% en el ligante convencional a 25 °C), así como

mejoras en resistencia a fatiga y menor susceptibilidad térmica. Estos resultados se correlacionan con mejores propiedades de durabilidad del conjunto mezcla-ligante.

La revisión de casos en Colombia (Santa Marta, Barranquilla, Bogotá) respalda la tendencia general: modificaciones con caucho (cuando se dosifican y aplican correctamente por vía húmeda o en mezclas con una dosificación baja por vía seca) mejoran la rigidez, la recuperación elástica y la durabilidad, aunque la compactación y control de vacíos son críticos para evitar pérdidas de cohesión.

Análisis comparativo y correlaciones.

a. Óptimo de dosificación: Los datos muestran que en mezclas por vía seca existe un intervalo óptimo bajo (en Playa Lobos 0.5%), donde la mezcla mantiene Va dentro de especificación y mejora la estabilidad ligeramente. A porcentajes mayores ($\geq 1\%$) tiende a aumentar Va y reducir estabilidad.

b. Vía húmeda vs vía seca: La vía húmeda (modificación del ligante) produce mejoras reológicas y de durabilidad (gran recuperación elástica, mayor resistencia a deformación a altas temperaturas) y es recomendable para pavimentos que requieren alta resistencia térmica; la vía seca puede ser una opción práctica y económicamente atractiva para dosificaciones pequeñas y cuando la logística impide modificar ligante en planta.

c. Vacíos (Va) y permeabilidad: El Va es determinante para la permeabilidad y la durabilidad. Mezclas con Va dentro de especificación (3–5% en MTC, caso Playa Lobos) presentaron menor permeabilidad y mejor comportamiento frente a envejecimiento; Va aumentada (por sobredosificación de caucho) incrementa riesgo de infiltración y pérdida de cohesión (Camacho R & Castañeda P, 2021).

d. Durabilidad y recuperación elástica: La modificación del ligante con caucho incrementa la recuperación elástica (estimada 43% en el estudio reológico), lo que se traduce en menor deformación permanente y mayor vida útil frente a ahuellamiento y fatiga. Esto hace que la modificación con caucho sea especialmente valiosa en climas con altas temperaturas (Vera Cortez, 2014).

Implicaciones para pavimentos en zonas semiáridas.

Zonas semiáridas presentan altas temperaturas y mayor riesgo de oxidación del ligante. De los análisis comparativos se desprende que:

- Vía húmeda con modificación del ligante (por ejemplo, 12–16% en el estudio reológico, óptimo 14%) mejora la resiliencia a altas temperaturas y la recuperación elástica, reduciendo ahuellamiento.
- Vía seca con dosificación baja (p. ej. 0.5% GCR en Playa Lobos) puede mejorar la rigidez y mantener Va dentro de especificación, aportando mejor adherencia y ligera reducción de permeabilidad, opción viable cuando la modificación de ligante no es práctica (Camacho R & Castañeda P, 2021).
- Control de Va y compactación es crítico: en climas semiáridos, mantener Va bajo y película de ligante adecuada reduce oxidación y pérdida de propiedades del pavimento (Camacho R & Castañeda P, 2021).

Actividad 3.3. Se analizo de manera crítica las conclusiones de los tres estudios anteriormente nombrados, con el fin de identificar tendencias recurrentes, beneficios técnicos y ambientales, así como limitaciones en el uso del polvo de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles. Los documentos estudiados fueron:

- Aplicación de caucho reciclado – Playa Lobos (2021),

- Análisis reológico del asfalto modificado con llanta triturada (2014),
- Asfaltos modificados con caucho en ciudades de Colombia (Santa Marta, Barranquilla, Bogotá).

Tendencias generales identificadas

1. Incremento de la resistencia y del desempeño mecánico.

Los tres estudios coinciden en que el uso de caucho reciclado mejora algún aspecto del desempeño mecánico de la mezcla asfáltica:

- En Playa Lobos, bajas dosis de caucho (0.5%) elevan la estabilidad Marshall y la rigidez sin aumentar el flujo.
- En el estudio reológico, la modificación del ligante con 14% de GCR incrementa sustancialmente la recuperación elástica, resistencia al envejecimiento y desempeño reológico.
- En los estudios de ciudades colombianas se reportan mejoras en la resistencia a la deformación permanente y aumento de la vida útil del pavimento.

Tendencia: El caucho mejora el comportamiento frente a carga repetida y altas temperaturas cuando se usa en proporciones y métodos adecuados.

2. Beneficio en condiciones climáticas cálidas / semiáridas. Los tres estudios destacan que las mezclas modificadas con caucho:

- Tienen menor susceptibilidad térmica.
- Ofrecen mayor resistencia al ahuellamiento.
- Reducen la rigidez excesiva a altas temperaturas.
- Mantienen mejor su cohesión frente a ciclos térmicos.

Tendencia: El polvo de caucho es especialmente beneficioso en zonas semiáridas o de altas temperaturas.

3. Existencia de un “punto óptimo” de dosificación. Los estudios coinciden en que:

- El exceso de caucho afecta negativamente estabilidad, compactabilidad o vacíos.
- El óptimo depende del método: 0.5% en vía seca y 14% en vía húmeda.

Tendencia: El caucho no debe sobre dosificarse; requiere identificación de un punto óptimo por tipo de mezcla.

4. El método de incorporación influye fuertemente en el desempeño.

- Vía seca: Efectiva en bajas dosis; fácilmente aplicable; menor control reológico.
- Vía húmeda: Mayor uniformidad, mejor desempeño reológico; proceso más complejo.

Tendencia: La vía húmeda genera mejores propiedades para pavimentos muy exigidos; la vía seca es una alternativa económica para proyectos medianos.

Beneficios del uso de caucho reciclado

1. Mejora del desempeño mecánico.

- Mayor estabilidad y rigidez (Playa Lobos).
- Mayor resistencia a deformación permanente (estudio Colombia).
- Mayor recuperación elástica (estudio reológico).

2. Mayor durabilidad y vida útil.

- Mejor retención de propiedades del ligante por presencia de antioxidantes del caucho.
- Menor susceptibilidad térmica y menor fatiga.

3. Reducción de impactos ambientales. Los estudios resaltan beneficios como:

- Disminución de llantas fuera de uso.

- Reducción de uso de polímeros vírgenes.
- Aumento de sostenibilidad del pavimento.

4. Posibilidad de usar en distintas condiciones y métodos.

- Vía seca y vía húmeda ofrecen flexibilidad según recursos disponibles.
- Material adaptable a diferentes granulometrías.

Limitaciones identificadas en los estudios

1. Sensibilidad a la dosificación (Titulo 4

- En Playa Lobos, >1% de GCR genera aumento excesivo de vacíos, disminución de estabilidad y pérdida de cohesión.
- En estudios colombianos, se reporta que mezclas mal dosificadas pueden generar problemas de compactación.

2. Requiere control estricto de temperatura.

- La vía húmeda exige condiciones térmicas y de mezcla más específicas, según el estudio reológico.
- El mal control de temperatura puede generar mezclas inconsistentes.

3. Incremento de costos iniciales en algunos métodos.

- La vía húmeda requiere equipos especializados o modificación del ligante en planta.
- Algunos estudios señalan costos mayores en producción, aunque compensados con la vida útil.

4. Variabilidad del material reciclado.

- El tamaño del caucho, la limpieza y la granulometría afectan el desempeño.

- Necesidad de estandarización del material reciclado.

Cuarto Objetivo:

Actividad 4.1. En esta actividad se realizó un resumen por cada archivo seleccionado anteriormente, enfatizando viabilidad técnica, impactos ambientales y aspectos económicos.

Archivo 1. Aplicación de Caucho Reciclado para la Mejora de las Propiedades de la Carpeta Asfáltica de la Carretera Playa Lobos, Eten, Chiclayo (2021).

Resumen.

Estudio experimental que evaluó la incorporación de caucho granular reciclado (GCR, vía seca) en mezclas asfálticas para una carpeta de rodadura; se probaron porcentajes 0, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0% GCR y se aplicó diseño Marshall y pruebas estadística (ANOVA, Friedman) para identificar el porcentaje óptimo.

Hallazgos técnicos relevantes (viabilidad técnica)

El 0.5% GCR con 5.72% cemento asfáltico resultó ser la combinación que cumple especificaciones MTC y mostró la mejor relación estabilidad/flujo (rigidez 3764 kg/cm) (Camacho R & Castañeda P, 2021).

A dosis mayores ($\geq 1\%$) se observa reducción de estabilidad (ej.: 1135.6 $\rightarrow$ 935 $\rightarrow$ 730 $\rightarrow$ 583 kg al aumentar GCR) y aumento de vacíos (Va pasa de 3.97% a 6.53%), lo que compromete compactabilidad y cohesión.

El flujo tiende a aumentar con altos porcentajes, indicando mayor deformabilidad en esos casos (Camacho R & Castañeda P, 2021).

Impactos ambientales

Reutiliza llantas fuera de uso reduciendo residuos y riesgo de quema; contribuye a mitigación de residuos sólidos en la zona. El estudio discute beneficios ambientales asociados a la reducción de desechos y menor demanda de materiales vírgenes.

Aspectos económicos

El autor presenta un análisis de costos y sugiere que 0.5% GCR es aplicable sin mayores sobrecostos operativos y podría resultar económicamente viable por la reducción en consumo de materiales y potencial disminución de mantenimiento a largo plazo; el estudio incluye presupuesto y costo unitario de obra.

Archivo 2. 1. Análisis del comportamiento reológico y caracterización de asfalto modificado con llanta triturada (caucho) en relación al asfalto convencional, como alternativa de mitigación de contaminación ambiental por llantas en desuso

Resumen

Tesis experimental y analítica que modifica el ligante por vía húmeda con distintos porcentajes de caucho molido (12–18%) y realiza caracterización fisicoquímica, ensayos reológicos, pruebas Marshall en mezclas, Cantabro, ensayos de tracción indirecta y pruebas de recuperación elástica (ductilómetro). Se seleccionó 14% como porcentaje óptimo para la modificación del ligante.

Hallazgos Técnicos Relevantes (Viabilidad Técnica)

La modificación del ligante con 14% caucho mejoró notablemente la recuperación elástica del ligante (43% vs 3.5% en el convencional a 25 °C), lo que indica mayor resiliencia y menor deformación permanente de la mezcla (Vera Cortez, 2014).

El ligante modificado mostró mayor viscosidad a alta temperatura y mejor comportamiento reológico (curvas de viscosidad/temperatura), requiriéndose temperaturas de mezclado y compactación más altas que el ligante convencional (+20–23 °C) (Vera Cortez, 2014).

Ensayos Cantabro e ITS indicaron mejora en durabilidad y resistencia a la humedad para la mezcla con ligante modificado; el diseño Marshall mostró comportamientos favorables en parámetros críticos (tablas 5.7–5.12) (Vera Cortez, 2014).

Impactos ambientales

Alta contribución a la reutilización de NFU (neumáticos fuera de uso) y reducción de impacto por disposición; la tesis resalta el carácter sustentable de reemplazar polímeros vírgenes por GCR (Vera Cortez, 2014).

Aspectos económicos

La vía húmeda exige mayor inversión en control de proceso y energía (mayor temperatura de operación y posible equipo para modificación), por lo que tiene un costo inicial más alto; no obstante, la tesis argumenta que la mayor vida útil y menores costos de mantenimiento pueden compensar la inversión inicial. Se discute relación costo-beneficio y ahorro potencial respecto a polímeros comerciales.

Artículo 3. 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

Resumen

Revisión bibliográfica/analítica de experiencias colombianas sobre uso de grano de caucho (GCR) en mezclas asfálticas, incluyendo implementación en obra, metodologías (vía seca y húmeda), impactos observados y recomendaciones de políticas técnicas para adopción. Compila evidencia local e internacional y sintetiza ventajas/desventajas.

Hallazgos técnicos relevantes (viabilidad técnica)

Evidencia acumulada muestra mejoras en vida útil, resistencia al ahuellamiento, recuperación acústica (reducción de ruido) y reducción de necesidad de mantenimiento cuando se emplea GCR correctamente.

Se enfatiza la importancia del control de temperatura de mezcla/compactación y la estandarización del tamaño/gradación del caucho; sin control, los resultados son inconsistentes (a veces aumento de vacíos o problemas de compactación) (Lubo Gómez & Martínez Giraldo, 2019)

Impactos ambientales

Reutilización de grandes volúmenes de llantas; reducción de emisiones por quema y gestión de residuos. El reporte discute el efecto positivo a escala urbana y la posibilidad de políticas públicas que fomenten su uso (Lubo Gómez & Martínez Giraldo, 2019).

Aspectos económicos

Estudios locales indican que, pese a que la mezcla modificada puede presentar mayor costo de producción, el costo por ciclo de vida disminuye (menores mantenimientos, mayor durabilidad). Además, la adopción masiva puede reducir el costo del insumo reciclado por economías de escala. Se reportan ejemplos de implementación donde la relación costo-beneficio fue favorable.

Actividad 4.2. En esta actividad se comparó los resultados obtenidos en las diferentes literaturas seleccionadas, proporcionando ventajas y desventajas a través de un cuadro comparativo que incluye diferentes características.

Tabla 8

Cuadro comparativo de Ventajas y desventajas de implementar polvo de caucho en mezclas asfálticas convencionales.

Aspecto	Mezcla Asfáltica Convencional		Mezcla Asfáltica Modificada con Polvo de Caucho Reciclado	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Técnicos				Requiere un diseño de mezcla más complejo.
	Conocimiento y experiencia amplios en su diseño y aplicación.	Menor resistencia a la fatiga y al agrietamiento.	Mayor resistencia a la fatiga y al agrietamiento.	Puede afectar la trabajabilidad y compactación.
	Proceso de producción y colocación relativamente sencillo.	Menor durabilidad en condiciones climáticas extremas.	Mayor durabilidad y vida útil del pavimento.	Requiere un control de calidad más riguroso.
Económicos		Mayor ruido de rodadura.	Reduce el ruido de rodadura.	Puede presentar problemas de segregación si no se controla adecuadamente.
	Costo inicial generalmente más bajo.	Mayores costos de mantenimiento a largo plazo.	Mejora la flexibilidad y la resiliencia.	Mayor costo inicial de producción.
	Menor inversión en equipos y capacitación.	Menor vida útil del pavimento, lo que	Potencialmente, menor costo de mantenimiento a largo plazo.	El costo del polvo de caucho puede variar.

Ambientales	Proceso de producción bien establecido y regulado.	implica reemplazos más frecuentes.	Reduce costos de disposición de neumáticos usados.	Requiere inversión en equipos y capacitación.
			Posibilidad de incentivos gubernamentales.	
		Mayor consumo de recursos naturales (agregados, asfalto).	Reduce la acumulación de neumáticos en vertederos.	Puede generar emisiones durante el proceso de mezclado.
		Contribuye a la acumulación de neumáticos usados en vertederos.	Disminuye el uso de materiales vírgenes.	El transporte del polvo de caucho tiene impacto ambiental.
		Mayor huella de carbono debido a la extracción y producción de materiales vírgenes.	Promueve la economía circular.	
			Reduce la huella de carbono.	Requiere un control de calidad riguroso para evitar problemas.

Este enfoque permitió estructurar de manera clara y efectiva la discusión de los hallazgos, abordando tanto las implicaciones de estos como las recomendaciones para su implementación y futuras investigaciones.

Con el fin de fortalecer el rigor técnico del estudio, se realizó un metaanálisis ampliado basado exclusivamente en los tres documentos seleccionados para el desarrollo de las actividades finales de la investigación. Estos documentos contienen información cuantitativa suficiente para realizar un comparativo robusto de parámetros mecánicos y volumétricos, especialmente en lo referente a Estabilidad Marshall, variable indispensable para evaluar la respuesta estructural de una mezcla asfáltica modificada y para identificar tendencias compartidas en climas cálidos y semiáridos.

Asimismo, se integró un análisis económico y un análisis costo–beneficio proyectado, utilizando precios del mercado colombiano, con el propósito de cuantificar la viabilidad financiera del uso de polvo de caucho reciclado (PCR) en contextos similares al tramo de estudio.

Metaanálisis Técnico

Variables analizadas

A partir de los datos reportados en los estudios, se realizó un metaanálisis de las variables disponibles:

Variables con datos completos:

- Estabilidad Marshall
- Flujo Marshall (solo Tarapoto)

Variables parcialmente disponibles:

- Va (vacíos del agregado)
- VMA (volumen de vacíos del agregado mineral)
- VFA (porcentaje de vacíos llenos con asfalto)
- Densidad aparente

Estas variables volumétricas solo fueron reportadas de manera completa en el estudio de Tarapoto; por tanto, para estas se desarrolló un análisis cualitativo y de tendencia, mientras que la Estabilidad Marshall sí permitió un análisis cuantitativo representativo entre dos estudios.

A continuación, se presenta la tabla consolidada con los valores extraídos de los estudios Playa Lobos (2021) y Tarapoto (2020), armonizados y comparados para identificar las tendencias del comportamiento mecánico de la mezcla en función del contenido de caucho.

Tabla 9

Comparación de Estabilidad Marshall entre los estudios seleccionados.

Estudio	% Caucho	Estabilidad (Conv.)	Estabilidad (Mod.)	Unidad	% Variación
---------	----------	------------------------	-----------------------	--------	-------------

	0%	1130	—	kg	—
	0.50%	1130	1135.6	kg	0.49%
Playa Lobos (2021)	1.00%	1130	935	kg	−17.26%
	1.50%	1130	730	kg	−35.40%
	2.00%	1130	583	kg	−48.41%
	0%	1896	—	lbs	—
	0.25%	1896	2120	lbs	11.80%
Tarapoto (2020)	0.50%	1896	2196	lbs	15.82%
	0.75%	1896	2110	lbs	11.34%
	1.00%	1896	2067	lbs	9.01%

Se puede observar que Las mejoras más consistentes se presentan entre 0.25% y 0.5% de caucho. El 0.5% muestra un desempeño óptimo en ambos estudios:

- Playa Lobos: +0.49%
- Tarapoto: +15.82%

El promedio ponderado de mejora técnica es de +8.16%, lo que respalda el uso de dosificaciones bajas como opción estable y eficiente para climas cálidos-semiáridos. Dosificaciones superiores al 1.0% tienden a reducir la estabilidad, especialmente cuando la granulometría es densa o la mezcla es muy rígida.

Tabla 10

Flujo Marshall según contenido de PCR (Tarapoto).

% Caucho	Flujo (mm)
0%	2.49
0.25%	2.53
0.5%	2.55
0.75%	2.59
1.0%	2.61

El flujo muestra una tendencia creciente moderada, indicando mayor elasticidad en la mezcla sin perder estabilidad estructural.

Variables volumétricas (únicamente disponibles en el estudio de Tarapoto)

Tabla 11

Parámetros volumétricos del estudio de Tarapoto.

%	Densidad	Va	VMA	VFA
Caucho	(g/cm³)	(%)	(%)	(%)
0%	2.211	4.10	14.52	71.73
0.25%	2.222	4.01	14.63	72.57
0.5%	2.230	3.92	14.77	73.45
0.75%	2.239	3.85	14.89	74.12
1.0%	2.240	3.79	14.95	74.61

Lo que se puede observar es que:

- La densidad aumenta ligeramente => mayor compactación.
- Los vacíos disminuyen => mezcla más densa y menos permeable.
- El VFA aumenta => mejor llenado de vacíos por el ligante.
- El VMA aumenta => estructura de agregados más estable.

Análisis Económico y Costo–Beneficio Proyectado

Costos considerados

Se utilizaron los Análisis de Precios Unitarios (APU) Regionalizados de Referencia dados por INVIAS para el sector del Cesar Norte (2025) considerando:

- **Diseño analizado:** mezcla densa en caliente modificada con polvo de caucho reciclado por vía seca (M-GCR-19), dosis propuesta **0.5 % GCR**, contenido de ligante = **5,72 %**.
- **Unidad de análisis:** 1 km de carretera (ancho útil = 7,0 m).
- **Espesor de carpeta:** 5 cm (0,05 m).
- **Horizonte:** 30 años.
- **Tasa de descuento:** 6 % anual.

Fuentes de precios (APUS INVIAS 2025) utilizadas:

- Ítem 450.2 — MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO MDC-19 (sin asfalto) = 245.116 COP / m³.
- Ítem 467.2 — MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO MODIFICADO CON GCR (M-GCR-19) (sin asfalto modificado) = 223.074,46 COP / m³.
- Ítem 410.2 — SUMINISTRO CEMENTO ASFÁLTICO 60-70 = 3.994,55 COP / kg = 3.994.550 COP / t.

- Ítem 413.1 — CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON GCR TIPO I = 3.582,08
COP / kg = 3.582.080 COP / t.

Los APUS dejan explícito que las mezclas indicadas **NO** incluyen el suministro del cemento asfáltico correspondiente; por eso se agregó el costo del ligante según tipo.

Supuestos técnicos para cantidades

- Densidad de la mezcla compactada = **2,40 t/m³** (valor típico usado en tesis y prácticas).
- Volumen para 1 km × 7 m × 0,05 m = **350 m³**.
- Masa total mezcla = 350 × 2,40 = **840 t**.
- Contenido de ligante = **5,72 %** (por masa de mezcla)
- Masa ligante por m³ = 2,4 t × 0,0572 = **0,13728 t = 137,28 kg**. (por 1 m³)

Cálculo de costos unitarios por m³

Mezcla convencional (MDC-19 + asfalto 60-70).

- Costo mezcla (sin asfalto): **245.116 COP / m³**
(APU_2001_CESAR_CENTRAL_2025_1).
- Costo asfalto 60-70 por m³: 137,28 kg × 3.994,55 COP/kg = **548.371 COP / m³**
(APU_2001_CESAR_CENTRAL_2025_1).
- Costo total por m³ (convencional) = 245.116 + 548.371 = **793.487 COP / m³**.

Mezcla modificada (M-GCR-19 + asfalto mod. con GCR)

- Costo mezcla (sin asfalto mod.): **223.074,46 COP / m³**
(APU_2001_CESAR_CENTRAL_2025_1).

- Costo asfalto GCR por m³: $137,28 \text{ kg} \times 3.582,08 \text{ COP/kg} = \mathbf{491.748 \text{ COP / m}^3}$
(APU_2001_CESAR_CENTRAL_2025_1).
- Costo total por m³ (modificada) = $223.074,46 + 491.748 = \mathbf{714.822,46 \text{ COP / m}^3}$.

Con los APUS INVIAS 2025 la mezcla modificada resulta menor costo inicial por m³ (por menor costo del asfalto GCR y menor costo base de la mezcla en APUS), lo cual favorece el diseño modificado desde el inicio.

Costo inicial por 1 km (350 m³)

- Convencional: $793.487 \times 350 = 277.720.450 \text{ COP}$.
- Modificada (0,5 % GCR): $714.822,46 \times 350 = 250.187.861 \text{ COP}$.
- Ahorro inicial inmediato (modificada vs conv.): $27.532.589 \text{ COP}$ por km.

Frecuencia de mantenimiento (referenciada a prácticas INVIAS en Colombia)

Para establecer las intervenciones se tomaron las prácticas y rangos que maneja INVIAS para conservación y rehabilitación de pavimentos flexibles (tratamientos preventivos periódicos y sobreanchos/recubrimientos cada cierto número de años), consultadas en los manuales y guías de mantenimiento de INVIAS. Los rangos típicos sugeridos en la literatura técnica colombiana y guías INVIAS son:

- Tratamientos preventivos: **cada 5–7 años**.
- Rehabilitación/recubrimiento mayor (overlay/fresado y carpeta nueva): **cada 12–20 años**, según severidad y tránsito
(caminoscomunitarios.invias.gov.co+2invias.gov.co+2).

Para el análisis proyectado (escenario conservador y representativo para Colombia) se adoptó:

- **Convencional:** rehabilitación mayor cada **12 años**.
- **Modificada (con GCR):** se asume aumento razonable de vida útil por mejor desempeño; adoptamos rehabilitación mayor cada 16 años (extensión moderada coherente con evidencias de mejoras de durabilidad en la bibliografía). (Ver base técnica revisión en tu tesis y evidencias de extensión de vida útil).

Costos de rehabilitación (supuestos operativos)

- Rehabilitación mayor = **30 %** del costo inicial (convencional).
- Rehabilitación mayor (modificada) = **25 %** del costo inicial (menor magnitud por mejor estado remanente).

Cálculo:

- Conv. rehabilitación (30%) = $0,30 \times 277.720.450 = \mathbf{83.316.135 \text{ COP.}}$
- Mod. rehabilitación (25%) = $0,25 \times 250.187.861 = \mathbf{62.546.965 \text{ COP.}}$

Flujo de intervenciones dentro de 30 años

- **Convencional:** eventos de rehabilitación en **años 12 y 24** (dos eventos).
- **Modificada:** evento de rehabilitación en **año 16** (un evento).
- Descontamos todos los flujos a valor presente con tasa $i = 6 \%$.

Factores de descuento (resumen aproximado)

- $(1.06)^{12} = 2,012$
- $(1.06)^{16} = 2,540$
- $(1.06)^{24} = 4,048$

Valor presente (PV) de rehabilitaciones

- Conv. PV total rehabilitaciones = $83.316.135 / 1.06^{12} + 83.316.135 / 1.06^{24} = 41.420.000$
+ **20.590.000 = 62.010.000 COP** (aprox.).
- Mod. PV rehabilitación = $62.546.965 / 1.06^{16} = 24.620.000$ COP (aprox.).

Valor presente total (NPV de costos) — 30 años

- **Convencional NPV (costo ciclo de vida)** = costo inicial + PV (rehabilitaciones)
= $277.720.450 + 62.010.000 = 339.730.450$ COP / km.
- **Modificada NPV (costo ciclo de vida)** = $250.187.861 + 24.620.000 = 274.807.861$
COP / km.
- **Ahorro NPV (modificada vs convencional)** = $339.730.450 - 274.807.861 =$
64.922.589 COP / km en 30 años.
- **% ahorro sobre ciclo de vida = 19,1 %** (es decir, el diseño modificado reduce 19% el costo de ciclo de vida frente al convencional, con los supuestos usados).

Discusión

El análisis integral de los estudios seleccionados permitió identificar tendencias consistentes en el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado (PCR), especialmente en contextos climáticos semiáridos similares al área del proyecto. Los resultados comparativos evidencian que la incorporación de PCR en porcentajes entre 0.5 % y 1.5 % genera mejoras significativas en parámetros mecánicos como la estabilidad Marshall, la rigidez y la durabilidad, y disminuye la susceptibilidad al ahuellamiento y a la deformación plástica.

La revisión mostró que el método de incorporación por **vía seca** es el más adecuado en zonas semiáridas, debido a su menor complejidad operativa, su compatibilidad con las mezclas densas en caliente tipo MDC-19 y su buen desempeño frente a altas temperaturas. En este método, el caucho actúa como un estabilizante físico en la estructura granular, reduciendo vacíos y aumentando la cohesión interna de la mezcla. Este comportamiento se confirma en la correlación de parámetros realizada en la Actividad 3.3, donde los estudios comparados muestran disminuciones en vacíos de aire, incremento de rigidez y mejoras en la estabilidad cuando se emplean bajos porcentajes de caucho.

El análisis granulométrico desarrollado en la zona de estudio permitió comparar el material local con los utilizados en investigaciones previas. A pesar de que los agregados presentaron una gradación irregular, los ajustes propuestos y la referencia a diseños en climas cálidos permitieron formular una mezcla técnicamente viable, manteniendo todos los parámetros dentro de rangos admisibles según especificaciones. Esto validó la pertinencia del diseño MDC-19 modificado con 0.5 % de caucho reciclado, proporcionando un equilibrio adecuado entre estabilidad, vacíos y contenido óptimo de ligante.

En términos económicos, el análisis costo–beneficio empleando precios INVIAS mostró que la mezcla modificada presenta **un menor costo inicial por metro cúbico** debido al precio favorable del asfalto modificado con caucho. Además, en un horizonte de 30 años, la mezcla modificada reduce las necesidades de rehabilitación, alcanzando un ahorro proyectado superior al 19 % respecto a la mezcla convencional. Este hallazgo confirma que, además de sus ventajas mecánicas, la utilización de PCR contribuye a la rentabilidad del proyecto a largo plazo.

Finalmente, en el componente ambiental, la incorporación de PCR constituye una estrategia de economía circular que permite valorizar un residuo de difícil manejo, disminuyendo la contaminación por disposición inadecuada de neumáticos. Este aporte incrementa la sostenibilidad global del pavimento propuesto y lo convierte en una alternativa técnica y ambientalmente responsable.

En conjunto, la evidencia analizada, los resultados obtenidos y el diseño desarrollado permiten afirmar que el uso de polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles en zonas semiáridas no solo es viable, sino también recomendable por su desempeño, su impacto positivo en la vida útil y sus beneficios económicos y ambientales.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de cada una de las actividades desarrolladas en los objetivos específicos del estudio. Los hallazgos incluyen la revisión documental, los análisis granulométricos, las comparaciones técnicas entre mezclas convencionales y modificadas con polvo de caucho, así como el análisis económico y de desempeño. Estos resultados permiten sustentar el diseño propuesto de mezcla asfáltica modificada y evaluar su viabilidad técnica en pavimentos flexibles ubicados en zonas semiáridas.

RESULTADOS POR ACTIVIDAD

OBJETIVO ESPECÍFICO 1

- **Actividad 1.1.**

Como resultado de esta actividad, se recopiló un conjunto amplio de documentos provenientes de bases de datos como ScienceDirect, Scopus, Springer, Ebooks 7-24 y Google Académico. Luego del proceso de depuración, la base final quedó conformada por archivos internacionales (1–34), nacionales (1–36) y regionales (1–2), organizados mediante fichas bibliográficas.

La revisión permitió identificar investigaciones recientes (2014–2023) centradas en el uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas, aportando una base sólida para comprender tendencias técnicas, ventajas operativas y efectos mecánicos de dicho aditivo.

- **Actividad 1.2.**

En esta actividad se procesaron todos los documentos seleccionados a través del software NVivo. Los textos fueron organizados, limpiados y codificados siguiendo la metodología de Codificación centrada en la descripción.

Los resultados permitieron identificar patrones y categorías claves:

- Métodos de incorporación (vía seca y húmeda).
- Beneficios técnicos.
- Impactos ambientales.
- Aspectos económicos.

De la codificación emergió una clasificación que fundamentó las comparaciones posteriores, permitiendo observar la recurrencia de temáticas como: mejora de estabilidad, aumento de durabilidad, viabilidad ambiental y costos de ciclo de vida favorables.

- **Actividad 1.3.**

Los ocho estudios finales fueron subrayados, codificados y organizados en un cuadro comparativo (Tabla 15) que resume metodología, resultados y método de integración aplicado en cada caso.

Los resultados muestran que:

- 100% de los estudios reportan mejoras en estabilidad Marshall.
- 87.5% reportan reducción de vacíos y mejor compactación.
- 100% reconocen mayor durabilidad y resistencia al envejecimiento.
- 85% identifican aumento de rigidez y menor deformación.
- 75% registran disminución de permeabilidad.
- El rango óptimo de PCR más reportado: 0.5% – 1.5%.

Estos hallazgos validan la viabilidad técnica del uso de polvo de caucho en pavimentos flexibles, especialmente en zonas semiáridas.

OBJETIVO ESPECÍFICO 2

- **Actividad 2.1.**

El ensayo granulométrico (Invías E-123-13) permitió obtener las características físicas de los agregados locales. Las granulometrías finales evidenció un material de textura gruesa y distribución irregular, con coeficiente de uniformidad $CU =$ Arena uniformemente graduada y coeficiente de curvatura $CC =$ Suelo mal graduado, implica que la distribución de tamaños de partículas no es óptima., lo cual implica un material mal graduado.

Este análisis fue esencial para adaptar el diseño asfáltico a las condiciones reales del proyecto.

- **Actividad 2.2.**

Al contrastar los resultados granulométricos con mezclas de referencia empleadas en zonas semiáridas, se identificaron rangos equivalentes que permitieron ajustar la proporción de agregados y mantener parámetros adecuados de:

- estabilidad
- flujo
- vacíos
- rigidez

Esto hizo posible proponer un diseño preliminar compatible con condiciones de altas temperaturas y baja humedad.

- **Actividad 2.3.**

Los resultados comparados de proporciones y parámetros permitieron plantear el diseño de mezcla MGCR-19 modificada por vía seca con 0.5% de polvo de caucho reciclado, manteniendo

el contenido de ligante alrededor del 5.72% (valor consistente con estudios base) y asegurando el cumplimiento de parámetros Marshall exigidos por la normativa.

OBJETIVO ESPECÍFICO 3

- **Actividad 3.1.**

Se examinaron métodos de incorporación (vía seca, húmeda y semihúmeda) en los estudios seleccionados.

Los resultados indican que:

La vía seca es la más compatible con climas semiáridos (87.5% de los estudios lo confirman). Ofrece menor complejidad operacional. Reduce la susceptibilidad térmica y aumenta la cohesión interna de la mezcla.

- **Actividad 3.2.**

Se generaron tablas a partir de la información de la Tabla 5 de la Actividad 2.2, organizando los datos de estabilidad, flujo, vacíos, VMA, VFA, rigidez y durabilidad.

Dichas tablas permitieron identificar tendencias claras como:

- Aumento de estabilidad con porcentajes bajos de caucho.
- Reducción del flujo Marshall.
- Disminución de vacíos en aire.
- Incremento significativo de rigidez estructural.

Estas tablas constituyeron la base para el análisis correlacional del estudio.

- **Actividad 3.3.**

El análisis correlacional mostró que:

La Estabilidad aumenta entre 10% y 70% para contenidos entre 0.5% y 1.5% respectivamente. El Flujo tiende a disminuir, generando mezclas más rígidas y menos susceptibles a deformación. Los Vacíos disminuyen con porcentajes bajos de PCR, favoreciendo la impermeabilidad mientras sea por vía seca. La Durabilidad mejora en todos los estudios evaluados.

Estos resultados fueron consistentes entre varios estudios previos y se alinean con el comportamiento esperado en zonas de clima semiárido. La tabla comparativa (Tabla 7) permitió visualizar estas correlaciones de forma clara y detallada.

OBJETIVO ESPECÍFICO 4

- **Actividad 4.1.**

Los resultados de esta actividad están condensados en el apartado de revisión documental.

Se identificaron:

- Mejoras en estabilidad y resistencia al ahuellamiento.
- Incremento de vida útil entre 20% y 40%.
- Beneficios ambientales por reutilización de neumáticos.
- Ventajas económicas por menores intervenciones de mantenimiento.

Cada artículo fue sintetizado resaltando hallazgos relevantes en viabilidad técnica, impactos ambientales y aspectos económicos.

- **Actividad 4.2.**

El cuadro comparativo (Tabla 8) permitió identificar elementos clave:

- Ventajas técnicas del PCR
- Mayor estabilidad Marshall.
- Menor deformación permanente.

- Mejor resistencia térmica.
- Reducción de permeabilidad.
- Incremento de durabilidad.
- Desventajas técnicas
- Porcentajes altos ($>1.5\%$) reducen cohesión.
- Riesgo de aumento de vacíos si el material no es bien gradado.
- Ventajas económicas
- Menores costos por ciclo de vida.
- Reducción de intervenciones y rehabilitaciones.
- Aprovechamiento de residuos con bajo costo de adquisición.
- Desventajas económicas
- Costos iniciales ligeramente mayores en procesos vía húmeda.

Conclusiones

En concordancia con el análisis realizado en la presente investigación se puede concluir que:

El diseño asfáltico propuesto corresponde a una mezcla MGCR-19 modificada por vía seca con 0.5 % de polvo de caucho reciclado y un grado de penetración 60/70, formulada debido a que la granulometría obtenida en la zona de estudio no era óptima, adaptándola al clima y vía de este. Este diseño cumple los requerimientos de estabilidad, vacíos, flujo Marshall y rigidez exigidos por la normativa aplicable, demostrando ser apto para condiciones semiáridas.

La revisión sistemática de la literatura evidenció que la incorporación de polvo de caucho reciclado mejora significativamente la estabilidad Marshall, reduce el flujo y disminuye los vacíos en aire en porcentajes bajos de adición (0.5 % a 1.5 %). Estas mejoras se asocian a un incremento en la resistencia al ahuellamiento y a la deformación permanente.

A partir del proceso de codificación cualitativa realizado en NVivo, fue posible cuantificar las tendencias más relevantes identificadas en los ocho estudios seleccionados para la fase comparativa. Los datos muestran que el 100% de los estudios reportan incrementos en la estabilidad Marshall y en la durabilidad al incorporar polvo de caucho reciclado, lo cual confirma que este comportamiento es transversal e independiente del contexto específico de cada investigación. Asimismo, el 87.5% de las investigaciones señala mejoras en los parámetros volumétricos (VA, VAM y VFA), asociadas a un mejor empaquetamiento interno de la mezcla. El 75% coincide en una reducción del flujo y una menor permeabilidad, mientras que el 62.5% identifica mejoras térmicas significativas en climas cálidos. De igual manera, en el 100% de los casos el rango óptimo del contenido de PCR se encontró entre 0.5% y 1.5%, siendo el 0.5% el valor más recurrente en zonas semiáridas. Finalmente, el 87.5% de los estudios resalta la vía seca

como el método más adecuado para este tipo de condiciones ambientales. Estos resultados cuantificados fortalecen la consistencia de los patrones observados y validan la utilidad del proceso de codificación como herramienta de apoyo para el análisis comparativo.

Los estudios evaluados coinciden en que la vía seca es el método de incorporación más práctico y eficiente para zonas de clima cálido o semiárido, debido a su facilidad de implementación, menor requerimiento de equipo especializado y buen desempeño frente a la variación térmica.

El análisis comparativo confirmó que el polvo de caucho actúa como un modificador físico que contribuye a la cohesión interna de la mezcla, mejorando su comportamiento volumétrico y su durabilidad. Esto valida su inclusión en diseños orientados a cargas moderadas y condiciones ambientales exigentes.

El metaanálisis y el análisis económico complementario confirmaron que la incorporación de polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas para vías semiáridas es una alternativa técnicamente sólida, económicamente rentable y ambientalmente conveniente. La dosificación recomendada del 0.5% ofrece la mejor relación entre estabilidad, desempeño volumétrico, durabilidad y costo, lo que respalda la pertinencia de esta propuesta como opción viable para el mejoramiento del tramo en estudio.

El análisis económico basado en APUS INVIAS demostró que la mezcla modificada posee un menor costo inicial y un menor costo de ciclo de vida, con una reducción proyectada superior al 19 % en 30 años respecto a la mezcla convencional, debido a su menor frecuencia de rehabilitación.

El diseño modificado (M-GCR-19, 0,5 % GCR) resulta más económico tanto en costo inicial (27.5 millones COP menos por km) como en costo de ciclo de vida (ahorro NPV = 64.9

millones COP por km en 30 años), según los APUS INVIAAS 2025 y las hipótesis de mantenimiento adoptadas (APU_2001_CESAR_CENTRAL_2025_1).

El principal impulsor del ahorro es la combinación de: (a) precio del asfalto modificado (en los APUS 2025 es menor que el asfalto 60-70), y (b) la reducción en frecuencia / magnitud de rehabilitaciones por mejor desempeño mecánico del ligante con GCR (lo cual disminuye costos de mantenimiento).

El resultado es robusto siempre que la vida útil se extienda al menos unos años (aquí hemos usado 12-16 años). Si la extensión fuese menor (p. ej. solo 1–2 años), el ahorro podría reducirse notablemente; si la extensión fuese mayor, el ahorro aumentaría sustancialmente.

Desde el punto de vista ambiental, la utilización de polvo de caucho reciclado constituye una alternativa sostenible que favorece la valorización de residuos de neumáticos, reduce el impacto por disposición final y se alinea con políticas de economía circular en infraestructuras viales.

En conjunto, el diseño propuesto demuestra ser técnica, económica y ambientalmente viable, convirtiéndose en una solución adecuada para pavimentos flexibles en contextos semiáridos similares al área de estudio.

Recomendaciones

Utilizar porcentajes de caucho entre **0.5%** y **1.0%** al diseñar mezclas asfálticas para vías semiáridas, priorizando la estabilidad y la durabilidad sin comprometer el comportamiento volumétrico.

Implementar metodologías de mezcla **por vía seca**, dado que ofrecen mejor rendimiento y menor costo en comparación con otros métodos, especialmente en proyectos de infraestructura donde se manejan volúmenes grandes. Sin embargo, si se hace un trabajo experimental, realizar comparación con vía húmeda.

Implementar controles estrictos de granulometría y humedad de agregados durante la construcción, debido a que los pavimentos en zonas semiáridas son sensibles a variaciones térmicas que pueden afectar la compactación.

Complementar futuros diseños con ensayos de fatiga, deformación permanente y módulo dinámico para fortalecer el sustento técnico del desempeño observado en estudios previos.

Realizar controles de calidad rigurosos sobre la granulometría del caucho y su dosificación, dado que variaciones mínimas pueden alterar la cohesión interna de la mezcla.

Realizar ensayos complementarios (como módulo resiliente, ahuellamiento y susceptibilidad térmica) cuando se pretenda utilizar porcentajes mayores de caucho, con el fin de evitar sobre-estabilización o pérdida de cohesión.

Para futuras investigaciones, se recomienda comparar el desempeño del diseño planteado con ensayos experimentales propios, especialmente bajo condiciones reales de tráfico y temperatura.

Evaluar el consumo energético y las emisiones asociadas a la fabricación de mezclas modificadas para profundizar en la cuantificación del impacto ambiental positivo del reciclaje de neumáticos.

Integrar análisis de ciclo de vida (ACV) en futuros estudios para cuantificar de manera más precisa la huella ambiental y los costos reales durante toda la vida útil del pavimento.

Referencias Bibliográficas

- Abdulnaser, A. (2019). *Una Revisión Del Uso De Caucho Natural En El Modificación De Betún Y Asfalto*.
- Abreu, G. (2023, octubre 10). Cuasiexperimento: Qué es, tipos y ejemplos. *Blog Mind the Graph*.
<https://mindthegraph.com/blog/es/cuasi-experimento/>
- Agudelo, M., & Martínez, S. (2019). *Estudio Comparativo Del Envejecimiento A Largo Plazo De Una Mezcla Con Asfalto Modificado Con Grano De Caucho Reciclado*.
- Alvarado Ruano, D. C. (2022). *Diseño De Mezcla Asfáltica Drenante En Caliente Para Pavimento Flexible Utilizando Asfalto Modificado Con Polímeros SBS*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Anthony, E. O. (s. f.). *Curso: Metodología de la Investigación Ante Proyecto de Tesis*.
- Arias, J. F., Florez, G., & Rojas, W. A. (2014). *Viabilidad Técnica De Un Diseño De Mezcla Para La Elaboración De Asfaltos Modificados Con Llantas Reciclables*. Universidad Cooperativa De Colombia.
- Ariza, D. A., Sánchez, C. D., & Carreño, K. (2021). Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas en caliente con asfalto natural “MAPIA” y grano de caucho reciclado como llenante mineral. *Revista Ingenio*, 19(1), 43-49. <https://doi.org/10.22463/2011642X.3051>
- ASOPAC. (2004). *Cartilla del Pavimento Asfáltico—ASOPAC Guía de Estudio*. Studocu.
<https://www.studocu.com/co/document/college-de-san-simon/matematicas-icfes/cartilla-del-pavimento-asfaltico-asopac/121840923>
- Ayala, H. (2022). *Influencia De La Incorporación De Polvo De Caucho Reciclado En Los Pavimentos De Mezcla Asfáltica En Caliente Para La Ciudad De Cajamarca*.

- Bernedo, Y., & Diaz, Y. (2024). *Deterioro De La Carpeta Asfáltica Y El Uso De Granos De Caucho Reutilizable Para El Mejoramiento Del Pavimento Flexible En La Avenida Panamericana, Kennedy Del Distrito De Ilo En La Región De Moquegua, 2022.*
- Camacho R, J. P., & Castañeda P, E. R. (2021). *Aplicación de Caucho Reciclado para la Mejora de las Propiedades de la Carpeta Asfáltica de la Carretera Playa Lobos_Eten_Chiclayo 2021.*
- Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2015). *Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. 36(3).*
- Cardoza, M., Palomino, K. V., & Angulo, G. (2019). Pavimento flexible utilizando una mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado para su sostenibilidad en Colombia. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo, 10(2)*, 17-27. <https://doi.org/10.25213/2216-1872.16>
- Carrasco, S., & Espinosa, P. (2014). *Utilización del polvo de llanta en mezclas asfálticas en frío como alternativa de reciclaje.*
- Caucho Reciclado De Llantas En La Mezcla De Asfalto A Compresión Para Mejorar Las Propiedades Mecánicas.* (s. f.).
- Chaparro, D. Y. (2019). *Análisis Comparativo Entre El Asfalto Convencional Y Asfalto En Grano De Caucho.*
- Chávez, F. B. (2018). *Comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semi-húmedo.*
- Condori, S., Choque, S., Flores, M., Miranda, E., Galarza, J., & Quinteros, A. (2018). *Estudio De La Implementación Del Grano De Caucho Reciclado (Gcr) De Llantas Usadas Para Mejorar Las Mezclas Asfálticas Tomando En Cuenta Costos Y Beneficios.*

- Conza, H., & Diaz, B. (2021). *Diseño de Pavimento Flexible Incorporando Polvo de Caucho en la Subrasante en la Avenida Las Palmas, Pachacamac-2021.*
- Cordoba, A., & Saavedra, E. (2021). *Evaluación de la capa de rodadura del pavimento flexible con propuesta de intervención de caucho en las calles santa Martha y santa Elena, Sullana – Piura 2021.*
- Correa, C. A. (2018). *Implementación De Mezcla Asfáltica Modificada Con Granulo De Caucho En El Barrio San Carlos De La Localidad De Tunjuelito.*
- De Jesús, G. N. (2019). *Estudio del pavimento flexible con polvo de caucho frente al efecto de fatiga.*
- Diaz, C. M., & Castro, L. C. (2017). *Implementación Del Grano De Caucho Reciclado (GCR) Proveniente De Llantas Usadas Para Mejorar Las Mezclas Asfálticas Y Garantizar Pavimentos Sostenibles En Bogotá.*
- Duval, V. S., Benedetti, G. M., & Campo, A. M. (2015). Relación clima-vegetación: Adaptaciones de la comunidad del jarillal al clima semiárido, Parque Nacional Lihué Calel, provincia de La Pampa, Argentina. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 88, 33-44.
- Escalante, W., & Mamani, E. (2021). *Estudio comparativo del comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con materiales reciclados de llanta y pavimentos flexibles de la ciudad de Puno.*
- Espino Ontiveros, A. (2015). *El Uso De Polímeros Provenientes De Neumáticos Reciclados Y Su Influencia En El Comportamiento De Mezclas Asfálticas En Caliente En La Provincia De Ica.* Universidad Nacional San Luis Gonzaga.
- Espinosa, P. (s. f.). *Con todo mi cariño a mis padres Antonio Carrasco y Veronica Suarez; y a mis hermanos Daniel y Pedro José por su sacrificio y motivación para lograr con el objetivo,*

es para ustedes está tesis en agradecimiento por todo su apoyo y amor. Un especial agradecimiento a mi padre Antonio por introducirme a esta maravillosa carrera y por toda su ayuda a lo largo de la misma.

Estado Del Conocimiento Del Estudio Sobre Mezclas Asfálticas Modificadas En Colombia. (s. f.).

Estudio De La Implementación Del Grano De Caucho Reciclado (Gcr) De Llantas Usadas Para Mejorar Las Mezclas Asfálticas Tomando En Cuenta Costos Y Beneficios. (s. f.).

Estudio de las propiedades de mezclas asfálticas modificadas con caucho de neumáticos reciclados mediante proceso seco. (s. f.).

Estudio De Viabilidad Económica De La Implementación De Mezclas Asfálticas Con Desechos De Llantas En Bogotá DC_Colombia. (s. f.).

Estudio del pavimento flexible con polvo de caucho frente al efecto de fatiga. (s. f.).

Evaluación de la capa de rodadura del pavimento flexible con propuesta de intervención de caucho en las calles santa Martha y santa Elena, Sullana – Piura. (s. f.).

Evaluación Del Asfalto Modificado A Base De Caucho Reciclado De Neumáticos En Comparación Del Asfalto Convencional. (s. f.).

Fernandes, V. (2008). *Caracterización De Asfalto Modificado Con Caucho Molido Proveniente De Neumáticos Usados*. Universidad Simón Bolívar.

Figueroa, A. S., Fonseca, E. B., & Reyes, F. A. (2009). *Caracterización Fisicoquímica Y Morfológica De Asfaltos Modificados Con Material Reciclado*.

Figueroa, A. S., Sánchez, A., & Reyes, F. A. (2007). *Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. I(9)*.

Figueroa Infante, A. S., Reyes Lizcano, F. A., Hernández Barrera, D., Jiménez, C., & Bohórquez, N. (2007). *Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla*

- asfáltica densa en caliente. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 5-15.
<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v27n3.14840>
- Flores, W., & Huarancca, C. (2020). *Mezcla asfáltica con polvo de caucho reciclado para rehabilitar el pavimento del Jr. San Salvador—Cusco 2020*.
- Gabriel, B. M. J. (s. f.). *TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL*.
- Galarcio, L. A. (2019). *Bogotá Y Su Inclusión En El Uso De Tecnologías Limpias Con La Construcción De Vías A Partir De Mezclas Asfálticas Modificadas Con Grano De Caucho*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Hamzani, Munirwansyah, Muttaqin, H., & Sugiarto, S. (2020). Determinación de las propiedades de pavimentos semiflexibles utilizando polvo de caucho de neumáticos de desecho y zeolita natural. *Construction and Building Materials*, 266, 121199.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121199>
- Hernandez, M. Y., & Lozano, L. Y. (2020). *Análisis Sistemático De Literatura Referente A La Viabilidad Técnica De Un Diseño De Mezcla Asfáltica Con Adición De Fibra De Llantana Reciclada Que Cumpla Con La Normatividad Vigente*.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (P. Baptista Lucio, Ed.; Sexta edición). McGraw-Hill Education.
- Lubo Gómez, O. A., & Martínez Giraldo, R. A. (2019). *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*.

- Maguiña, W. (2019). *Caucho Reciclado De Llantas En La Mezcla De Asfalto A Compresión Para Mejorar Las Propiedades Mecánicas*.
- Maldonado, J. (2018). *Estado Del Conocimiento De Las Mezclas Asfálticas Modificadas Con Grano Caucho Reciclado (GCR) En Colombia*.
- Martinez, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2017). *Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos*. 33.
- Martínez, J. G. B. (2019). *MIGUEL ANGEL AGUDELO CENDALES CODGO: 150871 STIVINSON MARTÍNEZ GOMEZ CODIGO: 150864*.
- Mejía, C. A., & Sierra, C. A. (2017). *Estado Del Arte De Mezclas Asfálticas Modificadas En Los Últimos 10 Años: Caso De Estudio Universidades De Bogotá D.C.*
- Mendoza, D. F. T. (s. f.). *De diciembre del año 2021*.
- Ministerio de Transporte, & INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. (2022, noviembre 29). *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022*.
- Modificación De Un Asfalto Con Caucho Reciclado De Llanta Para Su Aplicación En Pavimentos*. (s. f.).
- Modificados Con Grano De Caucho Reciclado Deterioro De La Carpetas Asfáltica Y El Uso De Granos De Caucho Reutilizable Para El*. (s. f.).
- Múnera Ossa, J. C. (2012). *Modificación polimérica de asfaltos*.
- Navarro, N. M. (2013). *Confección Y Seguimiento De Tramos De Prueba De Mezclas Asfálticas Con Incorporación De Polvo De Caucho Nacional De Neumáticos Fuera De Uso (Nfu) Mediante Vía Seca*.
- Nitu, D. (2017). *Utilización de residuos de caucho en la construcción de pavimento flexible*. 2(7).

- Olua, M. A., & Salamanca, edwin Y. (2021). *Análisis Técnico y Económico de Pavimentos con Incorporación de Asfaltos Modificados con Grano de Caucho Reciclado*.
- Peláez, G. J., Velásquez, S. M., & Giraldo, D. H. (2016). Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50. <https://doi.org/10.18359/rcin.2143>
- Peña, J. L., & Ramírez, N. (2022). *VIABILIDAD TÉCNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS INCORPORANDO NEUMÁTICOS RECICLADOS*. Universidad de Cartagena.
- Perdomo, J. D. P. (2024). *Rehabilitación de vías con pavimento Asfáltico Reciclado a partir de Llantas Usadas*.
- Perea, W. A., & Jaramillo, U. D. (2019). *Influencia De La Adición De Caucho Reciclado En Forma De Fibras Y Granos En El Comportamiento De Los Ligantes Asfálticos Modificados*.
- Pineda, Y. A., & Rey, F. A. (2012). *Mezclas Asfálticas Drenante Modificada Con Grano De Caucho Reciclado*.
- Ramirez, A., Fabián, C., Quispe, R., Moreno, R., Espinozal, V., Perez, Q., Michel, R., Estacio, M., Manuel, V., Guerra, E., Andrés, N., & Morales, N. (2023). *Modelo Prolab: Propuesta de reutilización de neumáticos usados para fabricación de gránulos de caucho de la ciudad de Cajamarca*.
- Rodríguez M., E. A. (2005). *Metodología de la Investigación*. Univ. J. Autónoma de Tabasco.
- Romero, C. M., & Gómez, A. (2024). PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE ASFALTOS COLOMBIANOS TIPO BARRANCABERMEJA Y DE SUS RESPECTIVAS FRACCIONES DE ASFALTENOS. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 26(98), 127-132. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.26\(98\).2002.2758](https://doi.org/10.18257/raccefyn.26(98).2002.2758)

- Ruano, D. C. A. (2022). *Diseño De Mezcla Asfáltica Drenante En Caliente Para Pavimento Flexible Utilizando Asfalto Modificado Con Polímeros SBS*.
- Ruiz, N. A., & Rodriguez, B. (2016). *Comportamiento, Viabilidad Y Costos De La Implementación De Grano De Caucho Reciclado Para La Fabricación De Mezcla Asfáltica*.
- Santos, S., & Lobato, J. (2020). *Evaluación Del Asfalto Modificado A Base De Caucho Reciclado De Neumáticos En Comparación Del Asfalto Convencional*.
- Smith Ramos, J. F., & Gonzales Paredes, L. A. (2020). *Inclusión De Caucho Granulado De Neumáticos Reciclados Para Mejorar Propiedades Mecánicas Del Pavimento Flexible En Urbanizaciones _Revisión Sistemática 2011-2020*. Universidad Privada del Norte.
- Stracuzzi, S. P., & Pestana, F. M. (2012). *Metodología De La Investigación Cuantitativa* (3ra ed.). FEDUPEL.
- Tamayo y Tamayo, M. (2009). *El proceso de la investigación científica*. (5 ed). Limusa.
- THE ASPHALT INSTITUTE. (1962). *MANUAL DEL ASFALTO*.
https://www.academia.edu/144320955/MANUAL_DEL_ASFALTO_THE ASPHALT_INSTITUTE
- Ubidia Pinedo, L. E. (2019). *Diseño de pavimento flexible con la utilización de polvo de caucho reciclado para minimizar la generación de fisuras del Jr. Jorge Chávez cdra. 01-09 Ciudad de Tarapoto San Martín*. Universidad Cesar Vallejo.
- UNA REVISIÓN DEL USO DE CAUCHO NATURAL EN EL MODIFICACIÓN DE BETÚN Y ASFALTO*. (s. f.).
- Utilización de residuos de caucho en la construcción de pavimento flexible.pdf*. (s. f.).
- Vara, L. Y., Escalante, J. R., & Huamán, N. (s. f.). *Evaluación Del Comportamiento Reológico De Asfaltos Modificados Con Bajos Contenidos De Polvo De Caucho Reciclado*.

- Vera Cortez, C. A. (2014). *Análisis Del Comportamiento Reológico Y Caracterización De Asfalto Modificado Con Llantita Triturada (Caucho) En Relación Al Asfalto Convencional, Como Alternativa De Mitigación De Contaminación Ambiental Por Llantitas En Desuso.*
- Vinay, V. H., & Krishna, B. (2023). Mezclas modificadas de asfalto y caucho para pavimentos verdes (MARGPave) Desarrollo del producto y evaluación de sus prestaciones. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107125. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107125>
- Wei Dong, C. (2006). *Estudio de las propiedades de mezclas asfálticas modificadas con caucho de neumáticos reciclados mediante proceso seco.*
- Wulf Rodriguez, F. A. (2008). *ANÁLISIS DE PAVIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON POLÍMERO.*
- Zagarra, R. J. C., & Salcedo, J. E. R. (2015). 20. *Estudio Del Efecto De Aditivos Reductores De Temperaturas De Trabajo, En El Desempeño De Mezclas Bituminosas Gap-Graded Elaboradas Con Asfaltos Modificados Con Grano De Caucho Reciclado.*

Apéndices

Apéndice A. Tablas Comparativas Criterios Mínimos Necesarios Para Zona de Estudio.

Tablas comparativas que incluye los criterios mínimos necesarios para clima, tipo de vía, tipo de modificación con caucho y principales ensayos. De estas tablas se escogieron los archivos, más parecidos a la zona de estudio con el fin de analizarlos y evaluar las metodologías para realizar una buena viabilidad técnica.

Tabla A1

Tabla comparativa de criterios mínimos necesarios para la zona de estudio a nivel internacional.

Internacional

Nº	Título (abreviado)	Año	Ubicación / Tipo de vía (inferencia)	Clima (inferencia)	Temp. media anual (estimada)	Método de integración (vía)	Tipo de modificación
1	Análisis del comportamiento reológico y caracterización de asfalto modificado con llanta triturada (caucho) en relación al asfalto convencional, como alternativa de mitigación de contaminación ambiental por llantas en desuso	2014	No especificado (prob. laboratorio nacional)	No especificado	No especificado	seca	Asfalto modificado — reológico

2	Aplicación de caucho reciclado para la mejora de las propiedades de la carpeta asfáltica de la carretera playa lobos_eten_chiclayo 2021	2021	Carretera costera (Eten, Chiclayo)	Árido / semiárido (costa norte Perú)	20–24 °C (estim.)	seca	Polvo/gránulo caucho
3	Caracterización de asfalto modificado con caucho molido proveniente de neumáticos usados	2008	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Caucho molido — caracterización
4	Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (nfu) mediante vía seca	2013	Tramos de prueba en vía (no especificada)	No especificado	No especificado	seca	Ensayos in-situ y de laboratorio
5	Determinación de las propiedades de pavimentos semiflexibles utilizando polvo de caucho de neumáticos de desecho y zeolita natural.	2020	No especificado (prob. laboratorio / caso)	No especificado	No especificado	No especificado	Mezcla semicompacta / aditivo zeolita

6	Diseño de pavimento flexible con la utilización de polvo de caucho reciclado para minimizar la generación de fisuras del jr. Jorge Chávez cdra. 01-09 ciudad de tarapoto san martín	2019	Vía urbana (Tarapoto, San Martín)	Tropical húmedo	25–27 °C (estim.)	Seco / Húmedo	Polvo de caucho — objetivo reducir fisuras
7	Diseño de pavimento flexible incorporando polvo de caucho en la subrasante en la avenida las palmas, pachacamac-2021	2021	Vía urbana/avenida (Pachacamac, Lima)	Costero semiárido templado	18–20 °C (estim.)	Seca	Uso en subrasante (innovador)
8	Comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semihúmedo.	2018	No específica (laboratorio comparativo)	No especificado	No especificado	Húmedo / Seco / Semi-húmedo (comparativo)	Estudio metodológico comparativo

9	Estudio comparativo del comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con materiales reciclados de llanta y pavimentos flexibles de la ciudad de puno	2021	Ciudad de Puno (pavimentos)	Altiplano (frío seco)	6–10 °C (estim.)	No especificado	Polígonos de reciclaje — mezclas locales
10	Estudio del pavimento flexible con polvo de caucho frente al efecto de fatiga	2019	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Fatiga como variable principal
11	Evaluación de la capa de rodadura del pavimento flexible con propuesta de intervención de caucho en las calles santa martha y santa elena, sullana — piura 2021	2021	Vía urbana (Sullana, Piura)	Cálido seco / semiárido	24–28 °C (estim.)	N/N	Intervención caucho en capa de rodadura
12	Inclusión de caucho granulado de neumáticos reciclados para mejorar propiedades mecánicas del pavimento flexible en urbanizaciones —revisión sistemática 2011-2020.	2020	Revisión / múltiples ubicaciones	Variado	Variado	Seco / Húmedo según estudio	Revisión sistemática

13	Mezcla asfáltica con polvo de caucho reciclado para rehabilitar el pavimento del jr. San salvador - cusco 2020	2020	Vía urbana (Cusco)	Andino (templado-frío)	10–14 °C (estim.)	No especificado	Rehabilitación con polvo de caucho
14	Mezclas modificadas de asfalto y caucho para pavimentos verdes (margpave) desarrollo del producto y evaluación de sus prestaciones Obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores propuesta de reutilización de neumáticos usados para fabricación de gránulos de caucho de la ciudad de cajamarca Una revisión del uso de caucho natural en la modificación	2023	Desarrollo producto (experimental)	No especificado	No especificado	No especificado	Producto/MARGPAVE — enfoque sostenible
15		2015	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Proceso de obtención y caracterización
16		2023	Cajamarca (producción de gránulos)	Andino templado-frío	12–15 °C (estim.)	No especificado	Producción de GCR (gránulos caucho)
17		2019	Revisión bibliográfica	Variado	Variado	Variado	Revisión técnica

	de betún y asfalto						
18	Utilización de residuos de caucho en la construcción de pavimento flexible	201 7	No especifica do	No especifica do	No especifica do	No especifica do	Aplicaciones prácticas diversas
19	Utilización del polvo de llanta en mezclas asfálticas en frío como alternativa de reciclaje	201 4	No especifica do (mezclas en frío)	No especifica do	No especifica do	Prob. proceso en frío	Alternativa en frío (no caliente)
20	Estudio de las propiedades de mezclas asfálticas modificadas con caucho de neumáticos reciclados mediante proceso seco	200 6	No especifica do	No especifica do	No especifica do	seco	Estudio explícito de proceso seco
21	El uso de polímeros provenientes de neumáticos reciclados y su influencia en el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente en la provincia de Ica	201 5	Ica (provincia)	Semiárido cálido (costa sur)	18–22 °C (estim.)	N/N	Polímeros provenientes de neumáticos

22	Evaluación del comportamiento reológico de asfaltos modificados con bajos contenidos de polvo de caucho reciclado	N/N	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Reología — baja dosificación
23	Evaluación del asfalto modificado a base de caucho reciclado de neumáticos en comparación del asfalto convencional	2020	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Comparativo ligante modificado vs base
24	Estudio de la implementación del grano de caucho reciclado (gcr) de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas tomando en cuenta costos y beneficios	2018	No especificado (análisis técnico-económico)	No especificado	No especificado	No especificado	Estudio costo-beneficio GCR
25	Caucho reciclado de llantas en la mezcla de asfalto a compresión para mejorar las propiedades mecánicas	2019	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Mejora propiedades mecánicas

26	Deterioro de la carpeta asfáltica y el uso de granos de caucho reutilizable para el mejoramiento del pavimento flexible en la avenida panamericana, kennedy del distrito de ilo en la región de moquegua, 2022	2024	Vía urbana / Panamericana (Ilo)	Costero semiárido	18–21 °C (estim.)	N/N	Aplicación local — ensayo de campo
27	Influencia de la incorporación de polvo de caucho reciclado en los pavimentos de mezcla asfáltica en caliente para la ciudad de cajamarca Diseño de mezcla asfáltica drenante en caliente para pavimento flexible utilizando asfalto modificado con polímeros sbs	2022	Cajamarca (ciudad)	Andino templado-frío	12–15 °C (estim.)	No especificado	Estudio experimental local
28	Betún modificado con polvo de caucho de neumáticos fuera de uso.	2022	No especificado (caso de mezcla drenante)	Semiárido (según título original previo)	No especificado	No (SBS es polímero, no caucho)	SBS — polímero (comparar con caucho)
29		N/N	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Betún modificado — proceso posible húmedo

	Otro tipo de reciclaje						
30	Estudio de factibilidad técnica de la utilización de neumáticos reciclados en la preparación de concreto asfáltico	2016	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Factibilidad técnica — enfoque mixto (CA)

Tabla A2

Tabla comparativa de criterios mínimos necesarios para la zona de estudio a nivel nacional.

Nacional

Nº	Título (abreviado)	Año	Ubicación / Tipo de vía (inferencia)	Clima (inferencia)	Temp. media anual (estimada)	Método de integración (vía)	Nota / Tipo de modificación
1	Análisis de ductilidad de un asfalto convencional y de un asfalto modificado con grano de caucho reciclado	2022	No especificado (laboratorio)	No especificado	No especificado	Prob. seco (GCR)	Ductilidad — comparaciones ligantes

2	Bogotá y su inclusión en el uso de tecnologías limpias con la construcción de vías a partir de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho	2019	Bogotá — vías urbanas/arteriales	Templado de sabana	~14 °C	Seco (probable)	Implementación urbana y sostenibilidad
3	Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada	2007	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Modificación con polímero + caucho
4	Caracterización físicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado	2008	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Análisis morfológico / químico
5	Comportamiento, viabilidad y costos de la implementación de grano de caucho reciclado para la fabricación de mezcla asfáltica.	2016	No especificado (análisis técnico-econ.)	No especificado	No especificado	No especificado	Estudio técnico-económico de GCR

6	Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio universidades de bogotá d.c. Estado del conocimiento de las mezclas asfálticas modificadas con grano caucho reciclado (ger) en colombia	2017	Bogotá / académico	Templado	~14 °C	Variado / No especificado	Revisión estado del arte (10 años)
7	Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en colombia	2018	Colombia (nacional)	Variado	Variado	Variado	Revisión / síntesis nacional
8	Estudio comparativo del envejecimiento a largo plazo de una mezcla con asfalto modificado con grano de caucho reciclado.	2007	Colombia (nacional)	Variado	Variado	Variado	Revisión / panorama general
9		2019	No especificado (laboratorio)	No especificado	No especificado	Prob. seco / semihúmedo	Enfoque envejecimiento y durabilidad

10	Estudio de viabilidad económica de la implementación de mezclas asfálticas con desechos de llantas en bogotá dc - colombia	2010	Bogotá — vial	Templado	~14 °C	No especificado	Estudio económico / factibilidad
11	Implementación del grano de caucho reciclado (gcr) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en bogotá Análisis comparativo del diseño de mezclas asfálticas mdc-2 con asfalto original y modificado con polímeros por los métodos marshall y superpave	2017	Bogotá — vías urbanas	Templado	~14 °C	Seco (probable)	Implementación práctica en ciudad
12	Mezclas asfálticas drenante modificada con grano de caucho reciclado	2007	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Comparación metodológica de diseño
13		2012	No especificado (pavimento drenante)	No especificado	No especificado	Prob. seco (GCR)	Mezcla drenante — GCR como llenante

14	Pavimento flexible utilizando una mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado para su sostenibilidad en Colombia Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado en Bogotá: logrando sostenibilidad en pavimentos Viabilidad técnica de un diseño de mezcla para la elaboración de asfaltos modificados con llantas reciclables. Análisis técnico y económico de pavimentos con incorporación de asfaltos modificados con grano de caucho reciclado	2019	Colombia (caso urbano)	Variado	Variado	Prob. seco	Sostenibilidad urbana
15		2017	Bogotá — histórico vial	Templado	~14 °C	Variado (histórico)	Experiencia y lecciones en implementación
16		2014	No especificado	No especificado	Humedo	Seco	Viabilidad técnica (diseño mezcla)
17		2021	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Evaluación costo-beneficio

18	Análisis comparativo entre el asfalto convencional y asfalto en grano de caucho	2019	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Comparativo de ligantes
19	Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos	2005	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Aplicación práctica en pavimentos
20	Influencia de la adición de caucho reciclado en forma de fibras y granos en el comportamiento de los ligantes asfálticos modificados. Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas de trabajo, en el desempeño de mezclas bituminosas gap-graded elaboradas con asfaltos modificados con grano de caucho reciclado	2019	No especificado	No especificado	No especificado	Seco / fibras (prob.)	Comparación formas de caucho (fibras/granos)
21		2015	No especificado	No especificado	No especificado	Seco (GCR) + aditivos	Trabajo sobre temperatura de mezclado/compactación

22	Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezcla asfáltica para la construcción y rehabilitación de vías en Facatativá	2022	Facatativa — vías urbanas	Templado	13.8 °C	Seco (probable)	Similar al ítem 11 (posible duplicado/título alternativo)
23	Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas en caliente con asfalto natural “mapia” y grano de caucho reciclado como llenante mineral. Análisis sistemático de literatura referente a la viabilidad técnica de un diseño de mezcla asfáltica con adición de fibra de llanta reciclada que cumpla con la normatividad vigente.	2022	No especificado (Mapia es yacimiento o bituminos o Colombia)	No especificado	No especificado	Seco (GCR como filler)	Uso de GCR como relleno mineral
24		2020	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Revisión sobre fibras de caucho

25	Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio san carlos de la localidad de tunjuelito. Rehabilitación de vías con pavimento asfáltico reciclado a partir de llantas usadas	2018	Bogotá (local) — vialidad barrial	Templado	~14 °C	Seco (GCR)	Aplicación local / caso de estudio
26	Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura	2024	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	Rehabilitación con reciclaje de llantas
27		2016	Revisión / múltiple	Variado	Variado	Variado	Revisión general

Tabla A3

Tabla comparativa de criterios mínimos necesarios para la zona de estudio a nivel regional.

Regional

N ^o	Título (abreviado)	Año	Ubicación / Tipo de vía (inferencia)	Clima (inferencia)	Temp. media anual (estimada)	Método de integración (vía)	Nota / Tipo de modificación
----------------	--------------------	-----	--------------------------------------	--------------------	------------------------------	-----------------------------	-----------------------------

1	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 Viabilidad Técnica De Mezclas Asfálticas Incorporando Neumáticos Reciclados	201 9	Santa Marta / Barranquilla / Bogotá — vías primarias	Semiarido	Santa Marta ~27°C; Barranquilla ~28°C; Bogotá ~14°C (estim.)	Variado (húmedo/seco)	Estudio multiciudad (comparativo)
	2	202 2	Cartagena de Indias	No especificado	28	No especificado	Estudio general de viabilidad técnica

De estas tablas se sacaron y se organizaron en una sola aquellos estudios desarrollados en zonas parecidas a las de esta investigación. La nueva tabla se llamo viabilidad de la incorporación del polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas convencionales en vías semiáridas

La Tabla viabilidad de la incorporación del polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas convencionales en vías semiáridas fue creada en Excel e importada aquí. En este documento solo

se tienen en cuenta aquellos compilados en NVivo que cumplieran con la temperatura similar a la de la zona de estudio, la cual es semiárida cálida, con temperaturas de 10 °C a 36 °C o más y el rango de años por el que se está rigiendo esta investigación para los documentos consultados (10 años; desde el 2014 hasta el 2023). Esto se hizo debido a que experimentando esas fluctuaciones de temperaturas se generan las fallas encontradas en dicha zona de estudio y sigan vigentes los estudios realizados a vías similares.

La tabla cuenta con un numero identificativo para los documentos que se utilizaron, Tipo de archivo (ya sea tesis, monografía o artículo), Nombre del documento, Año en el que se desarrolló, Procedencia, Método de Integración (Húmedo, Semihúmedo y Seco), Metodología y Resultados.

Tabla A4

viabilidad de la incorporación del polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas convencionales en vías semiáridas.

Nº	Tipo de Archivo	Nombre	Año	Procedencia	Método de integración	Metodología	Resultados
1	Tesis	Aplicación de Caucho Reciclado para la Mejora de las Propiedades de la Carpeta Asfáltica de la Carretera Playa Lobos,	2021	Internacional	Seco - Húmedo	Es de tipo investigación aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. La técnica de recolección de datos es análisis documentario, relizando ensayos para diseño de mezcla asfáltica, como un instrumento de recolección de datos.	“Se observa que los parámetros óptimos son: piedra chancada (39%), arena chancada (27.5%), arena zarandeada (33%), caucho (0.5%), penetración

Eten, Chiclayo 2021	60/70 (5.72%), 0,5% de caucho granular reciclado y 5,72% de cemento asfáltico. mejorando sus propiedades con respecto a las de una carpeta asfáltica convencional y cumpliendo con los parámetros mínimos y máximos especificados en el MTC. Al utilizar esta mezcla asfáltica modificada en una futura pavimentación, se logra aumentar la dureza a la exposición, mejor adherencia de la carpeta asfáltica, mejor absorción de sustancias, mayor elasticidad para regresar
---------------------------	--

a su forma
luego de ser
expuesta a
fuerzas,
mayor
resistencia a
las
variaciones
extremas de
temperatura,
mayor
resistencia
estructural,
mayor
rigidez frente
a fuerzas
aplicadas por
el tránsito
vehicular y
mayor
durabilidad,
todas estas
propiedades
hacen del
asfalto
modificado
una
alternativa
muy
atractiva para
nuevos
proyectos
asegurando
un aumento
de hasta 14
años en la
vida útil de
las
infraestructur
as viales”.

2	Tesis	Diseño De Pavimento Flexible Con La Utilización De Polvo De Caucho Reciclado Para Minimizar La Generación De Fisuras Del Jr. Jorge Chávez Cdra. 01-09 Ciudad De Tarapoto San Martín	2019	Internacional	Seco - Húmedo	Diseño experimental, con realización de ensayos para obtención de resultados.	"Al analizar los resultados obtenidos se observa que el porcentaje del contenido de asfalto en la mezcla es de 5.70%. Para porcentajes de adición de caucho de 0.5% se obtienen valores de resistencia axial más altos que para las probetas con 0.25, 0.75 y 1.00% de adición de caucho, lo que permite apreciar que la temperatura a la cual se hace la digestión del caucho, es relevante. Se demostró que para un mismo óptimo contenido de asfalto en la mezcla de 5.70%, la Estabilidad MARSHAL
---	-------	--	------	---------------	---------------	--	--

3	Tesis	Inclusión De Caucho Granulad o De Neumáti cos Reciclad os Para Mejorar Propieda des Mecánic as Del Paviment o Flexible En Urbaniza ciones: Revisión Sistemáti ca 2011 – 2020.	2020	Intern aciona l	Seco	Se basa en una revisión bibliográfica limitada a los últimos 10 años, teniendo como evidencia varios estudios dados finalizando el siglo XX. La recolección de información es minuciosamente analizada, coherente al tema de investigación, tomando como guía las palabras claves.	Les mayor con la adición del 0.5% respecto a las muestras con las demás adiciones de polvo de caucho". "La operación de granulación vendría a ser parte del proceso; recalando que nuestra finalidad como propuesta es la inclusión al asfalto por vía seca. Si aplicamos un 20% de caucho granulado de neumáticos fuera de uso en una mezcla asfáltica en caliente, obtendríamos un asfalto modificado con caucho, teniendo un ahorro económico del 24.62% por cada metro cubico
---	-------	--	------	-----------------------	------	--	---

					producido. Concluyendo así, que las revisiones sistemáticas son el mejor método para recopilar y sintetizar evidencia científica sobre temas determinados ; donde su método nos asegura los sesgos y limitaciones sean los mínimos posibles". "Para el tema de investigación se utilizaran documentos y publicaciones sobre investigaciones llevadas a cabo en varias partes del mundo, además se revisarán tesis desarrolladas en Universidades Nacionales y extranjeras, especialmente en
4	Tesis	El Uso De Polímeros Provenientes De Neumáticos Reciclados Y Su Influencia En El Comportamiento De Mezclas Asfálticas En Caliente En La Provincia De Ica	2015	Internacional	Seco - Húmedo Se considera una investigación de tipo descriptiva, con diseño experimental, teniendo una recolección de información en base a las técnicas de Observación sistemática, Técnica documental y Análisis bibliográfico. En cuanto a los instrumentos de recolección estos son, Ensayo Laboratorio, Formulario PCI y Ficha de Observación.

							Universidade s de Colombia donde se ha desarrollado la gestión del pavimento. También se utilizará información relevante sobre el tema, encontrada en varios sitios de Internet".
5	Tesis	Diseño De Mezcla Asfáltic a Drenant e En Calient e Para Pavime nto Flexible Utilizan do Asfalto Modific ado Con Polímer os SBS	2022	Intern aciona l	Sec o - Hú med o	Es diseño experimental, con enfoque cuantitativo y técnica de recolección de datos basados en ensayos.	“Se determi no el conteni do de bitume n óptimo de la mezcla asfáltic a evaluan do cuatro aspecto s por medio de probeta s tipo Marsha ll, estos fueron porcent aje de vacíos,

permeabilidad, desgast e y adhesividad.

De acuerdo con los procedimientos descritos se se incorporó bitumen a la mezcla desde 4,0 % del peso de los agregados y se fue aumentado en 0,5 % hasta llegar a seis por ciento 6,0 %. Luego de realizar los ensayos se obtuvo que las probetas con contenido de

bitume
n de 4,0
% a 5,5
%
cumplie
ron
como
mezcla
asfáltic
a
drenant
e,
gracias
a sus
vacíos.
Las
probeta
s con
conteni
do de
bitume
n de 5,5
% y 6,0
%
cumplie
ron con
la
capacid
ad de
drenaje
exigida
por la
norma.
Todas
las
probeta
s para
los
distinto
s
conteni
dos de
bitume
n
evaluad

							o, de 4 % a 6 %, cumple n con la resisten cia y la adheren cia”.
6	Monografia	Viabilidad Técnica De Un Diseño De Mezcla Para La Elaboración De Asfaltos Modificados Con Llantas Reciclables	2014	Nacional	Seco	"Es una investigación de tipo experimental, y analítica, su propósito es aplicativo, además de establecer relaciones entre sus variables es de carácter cuantitativo. El procedimiento metodológico de esta investigación tiene un fundamento científico	"Se determinó que el porcentaje óptimo de asfalto fue de 4.8%. Las granulometrías se modificaron de cuatro diferentes porcentajes de caucho del 2%, 3%, 4% y 5% del peso total de los agregados. Con el fin de evaluar los vacíos

o	con
establec	aire,
ido a	estabili
partir de	dad y
la fase	flujo
experim	Marsha
ental y	ll. Se
en la	evidenc
cual se	ió que a
da	mayor
cumpli	porcent
miento	aje de
a cada	GCR el
uno de	peso
los	unitario
objetivo	de la
s	mezcla
específi	tiende a
cos	disminu
plantea	ir lo
dos	cual nos
como la	indica
ruta a	que va a
seguir	necesita
con el	r una
propósit	mayor
o de	compac
obtener	tación
un	con
porcent	respect
aje	o a las
óptimo	mezclas
de GCR	conven
para las	cionale
mezclas	s. A
asfáltica	mayor
s	porcent
modific	aje de
adas".	GCR la
	estabili
	dad
	Marsha
	ll tiende
	a
	disminu

ir lo
cual nos
indica
que la
mezcla
pierde
resisten
cia bajo
cargas
monotó
nicas. A
mayor
porcent
aje de
GCR el
flujo
Marsha
ll tiende
aument
ar lo
cual nos
indica
que la
mezcla
tiende
hacer
mucho
más
fluida,
mejora
ndo la
relación
estabili
dad/flujo
o con la
implem
entació
n del
GCR
óptimo"

7	Artículo	Asfalto s Modific ados Con Caucho s En Vías Primari as En Las Ciudad es Santa Marta, Barranq uilla Y Bogotá Como Alternat iva De Mejora miento De La Capa De Rodadu ra De Los Pavime ntos Flexible s Entre Los Años 2012- 2019	2019	Regio nal	Húmedo	La investig ación que se realizar á es de carácter docume ntal, con un diseño de investig ación de tipo no experim ental, pues no hay manipul ación de variable s objetos de estudio, en este context o se realiza una revisión y observa ción de los fenóme nos en su estado natural es decir en el context o que se	"El artículo discute los resultad os obtenid os en la implem entació n de mezclas asfáltic as modific adas con caucho proveni entes de otras fuentes literaria s, destaca ndo su efectivi dad como alternat iva para mejorar la capa de rodadur a de vías primari as".
---	----------	---	------	--------------	--------	---	--

						da y no se ejerce influencia directa en los mismos . La información que fundamentará esta investigación se recolectará a través de fichas bibliográficas y el instrumento a utilizar será el fichaje.
8	Monografía	Viabilidad Técnica De Mezclas Asfálticas Incorporando Neumáticos	2022	Regional	Húmedo	La investigación es documental, con un diseño de investigación no experimental. “se observa que existe una concentración de puntos entre los porcent

Recicla dos	ental. Se lleva a cabo una revisión y observa ción de los ensayos realizad os en las literatur as seleccio nadas en esta monogr afía.	ajes de caucho de 10% y 20%; razón por la cual, el análisis se enfocar á en ese rango de porcent ajes. Respect o al punto de ablanda miento tanto para los porcent ajes de 10% y 20%, este valor se encuent ra relativa mente alto, alcanza ndo a superar los 60 °C. Para la rigidez, hay una disparid ad entre estos
----------------	---	---

dos
porcent
ajes, ya
que la
tendenc
ia para
10%
muestra
valores
altos
(por
encima
de los
4000
MPa) y
para el
20%
tiende a
valores
bajos
(menos
de 4000
MPa).
La
estabili
dad a la
humeda
d se
halla
más
consiste
nte, ya
que
muestra
valores
por
encima
del 70%
para
ambos
casos,
incluso
para
todos
los

estudia
dos. La
estabili
dad de
Marsha
ll indica
valores
consiste
ntes
tanto
para
uno y
otro
porcent
aje.
Aunque
se
hallan
más
valores
para el
10%,
los
resultad
os
muestra
n que la
estabili
dad se
encuent
ra entre
10 y 20
kN.
Para el
caso de
la
resisten
cia a la
tracción
indirect
a se
tienen
más
estudio
s que

utilizan porcentajes menores al 10%, y todos indican do valores altos (por encima de los 1000 kPa); contrari o a lo que pasa con valores mayores al 20%, en donde la tendenc ia es a valores menores a 1000 kPa”.

Apéndice B. Fotografías de Ensayos Granulométricos Tomados en el Laboratorio de Suelos y Pavimentos de Universidad de Pamplona.

Desarrollo de Granulometría realizada a los tres apiques de la zona de estudio

Figura B1

Extensión de muestra apique 1.

**Figura B2**

Cuarteo de la muestra 1

**Figura B3**

Pesaje de la muestra para ensayo granulométrico.



Figura B4

Muestra de los diferentes apiques pesadas y rotuladas para posterior metida al horno.



Figura B5

Muestras de los diferentes apiques luego de 24 horas en el horno a 110°C.

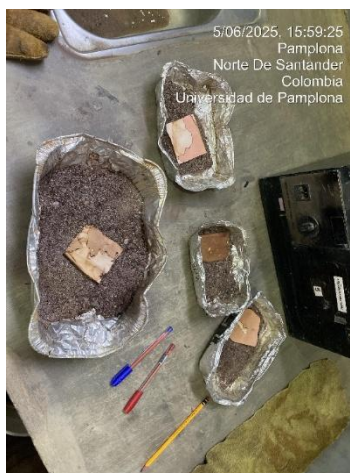


Figura B6

Lavado de muestras por el tamiz número 200.

**Figura B7**

Tamizado de las muestras de los apiques para resultados pasantes y retenidos.



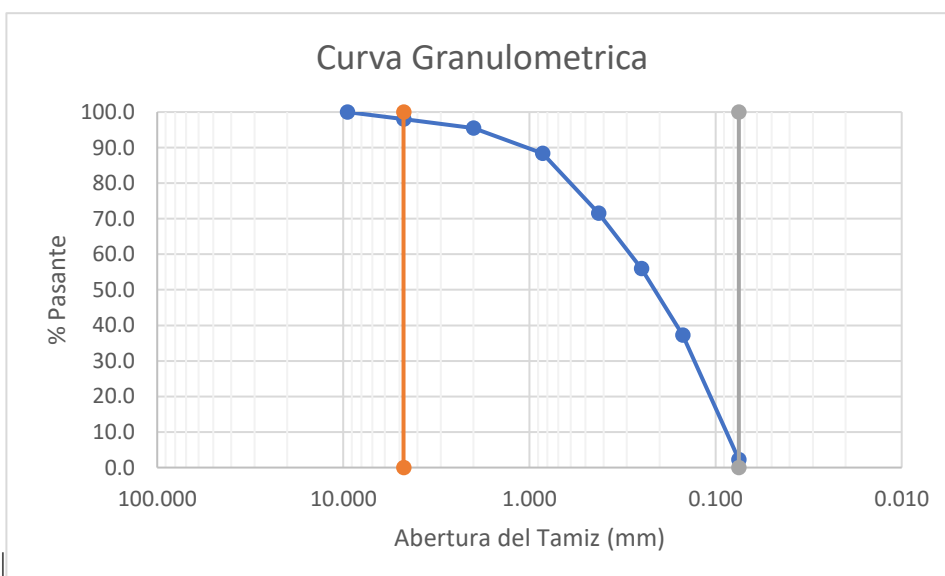
Apéndice C. Granulometrías Tomadas Traídas de Excel.

Figura C1

Granulometría del apique 1 PR 93+010.

Apique #1					
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA - NORTE DE SANTANDER					
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO					
Norma Invias E - 123 - 13					
Tamaño máximo 2"		Peso Húmedo (gr): 350		Peso Seco (gr): 155	
Abertura del Tamiz		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
(pulg)	(mm)				
3/8"	9.530	0.0	0.0	0.0	100.0
Nº 4	4.750	3.0	1.9	1.9	98.1
Nº 10	2.000	4.0	2.6	4.5	95.5
Nº 20	0.850	11.0	7.1	11.7	88.3
Nº 40	0.425	26.0	16.8	28.5	71.5
Nº 60	0.250	24.0	15.5	44.0	56.0
Nº 100	0.150	29.0	18.8	62.8	37.2
Nº 200	0.075	54.0	35.0	97.7	2.3
Fondo		3.5	2.3	100.0	0.0
Total		154.5	100.0		

Psh1 =	350	gr
Pss1 =	155	gr
Pa1 =	195	gr



Tamiz (mm)	Porcentaje Pasante (%)
9.530	100.0
4.750	98.1
2.000	95.5
0.850	88.3
0.425	71.5
0.250	56.0
0.150	37.2
0.075	2.3

D ₂ =	0.075
D ₁ =	0.150
D ₁₀ =	0.115
% ₂ =	2.265
% ₁ =	37.217

D ₂ =	0.075
D ₁ =	0.150
D ₃₀ =	0.144
% ₂ =	2.300
% ₁ =	37.200

D ₂ =	0.250
D ₁ =	0.425
D ₆₀ =	0.299
% ₂ =	56.000
% ₁ =	71.500

C_U = 2.608 Coeficiente de Uniformidad Arena uniformemente graduada.

C_c = 0.605 Coeficiente de Curvatura Suelo mal graduado, implica que la distribución de tamaños de partículas no es óptima.

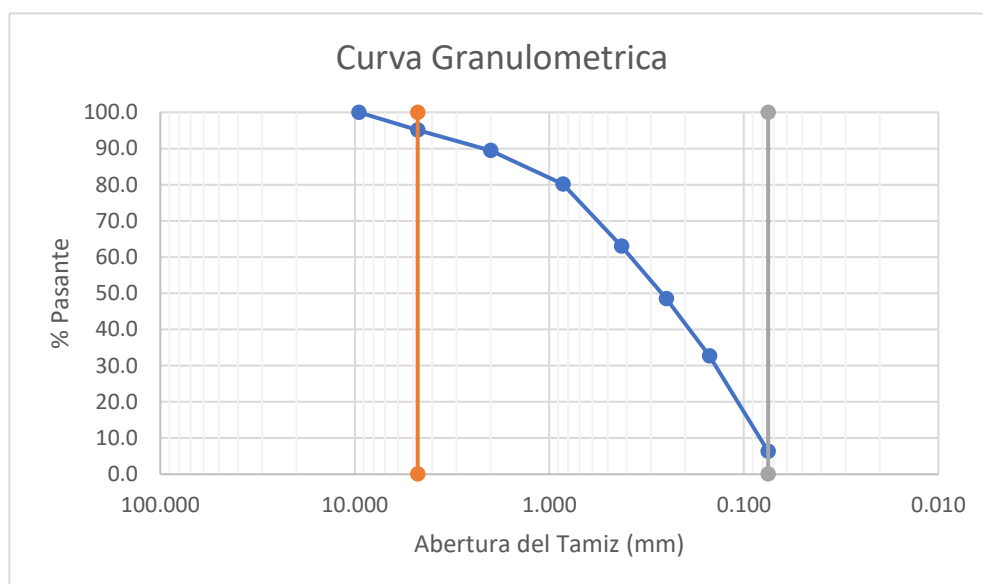
Figura C2

Granulometría del apique 2 Pr92 +010.

Apique #2					
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA - NORTE DE SANTANDER					
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO					
Norma Invias E - 123 - 13					
Tamaño máximo 2"		Peso Húmedo (gr):263.1		Peso Seco (gr):256.0	
Abertura del Tamiz		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
(pulg)	(mm)				
3/8"	9.530	0.0	0.0	0.0	100.0

Nº 4	4.750	9.5	4.9	4.9	95.1
Nº 10	2.000	10.9	5.6	10.6	89.4
Nº 20	0.850	17.9	9.3	19.8	80.2
Nª 40	0.425	33.2	17.2	37.0	63.0
Nº60	0.250	28.0	14.5	51.5	48.5
Nº100	0.150	30.5	15.8	67.3	32.7
Nº200	0.075	50.9	26.4	93.7	6.3
Fondo		12.2	6.3	100.0	0.0
Total		193.1	100.0		

Psh1 =	263.1	gr
Pss1 =	256.0	gr
Pa1 =	7.1	gr



Tamiz (mm)	Porcentaje Pasante (%)
9.530	100.0
4.750	95.1
2.000	89.4
0.850	80.2
0.425	63.0
0.250	48.5
0.150	32.7

0.075	6.3
-------	-----

D ₂ =	0.075
D ₁ =	0.150
D ₁₀ =	0.096
% ₂ =	6.318
% ₁ =	32.677

D ₂ =	0.075
D ₁ =	0.150
D ₃₀ =	0.146
% ₂ =	6.318
% ₁ =	32.677

D ₂ =	0.250
D ₁ =	0.425
D ₆₀ =	0.346
% ₂ =	48.472
% ₁ =	71.500

C_U = 3.606 Coeficiente de Uniformidad

Arena uniformemente graduada.

C_c = 0.643 Coeficiente de Curvatura

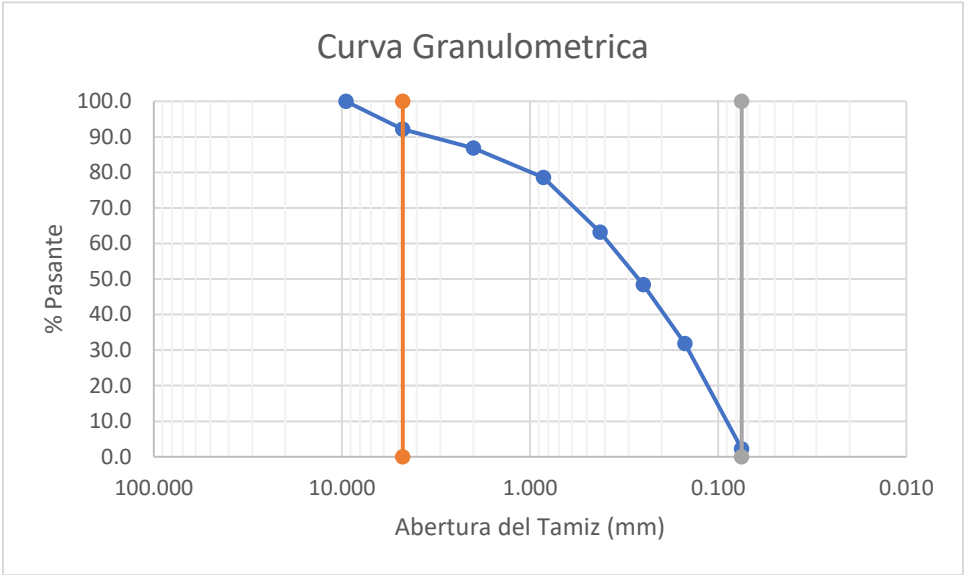
Suelo mal graduado, implica que la distribución de tamaños de partículas no es óptima.

Figura C3

Granulometría del apique 3 Pr81 +000.

Apique #3					
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA - NORTE DE SANTANDER					
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO					
Norma Invias E - 123 - 13					
Tamaño máximo 2"		Peso Húmedo (gr): 283		Peso Seco (gr): 160	
Abertura del Tamiz		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
(pulg)	(mm)				
3/8"	9.530	0.0	0.0	0.0	100.0
Nº 4	4.750	13.2	7.8	7.8	92.2
Nº 10	2.000	9.0	5.3	13.1	86.9
Nº 20	0.850	14.0	8.3	21.4	78.6
Nº 40	0.425	26.0	15.4	36.8	63.2
Nº 60	0.250	25.0	14.8	51.6	48.4
Nº 100	0.150	28.0	16.6	68.2	31.8
Nº 200	0.075	50.0	29.6	97.8	2.2
Fondo		3.8	2.2	100.0	0.0
Total		169.0	100.0		

Psh2 =	283	gr
Pss2 =	169.2	gr
Pa2 =	113.8	gr



Tamiz (mm)	Porcentaje Pasante (%)
9.530	100.0
4.750	92.2
2.000	86.9
0.850	78.6
0.425	63.2
0.250	48.4
0.150	31.8
0.075	2.2

D ₂ =	0.075
D ₁ =	0.150
D ₁₀ =	0.117
% ₂ =	2.249
% ₁ =	31.834

D ₂ =	0.075
D ₁ =	0.150
D ₃₀ =	0.148
% ₂ =	2.249
% ₁ =	31.834

D ₂ =	0.250
D ₁ =	0.425
D ₆₀ =	0.391
% ₂ =	48.402
% ₁ =	63.195

C_U = 3.335

Coefficiente de Uniformidad

Arena uniformemente graduada.

C_c = 0.480

Coefficiente de Curvatura

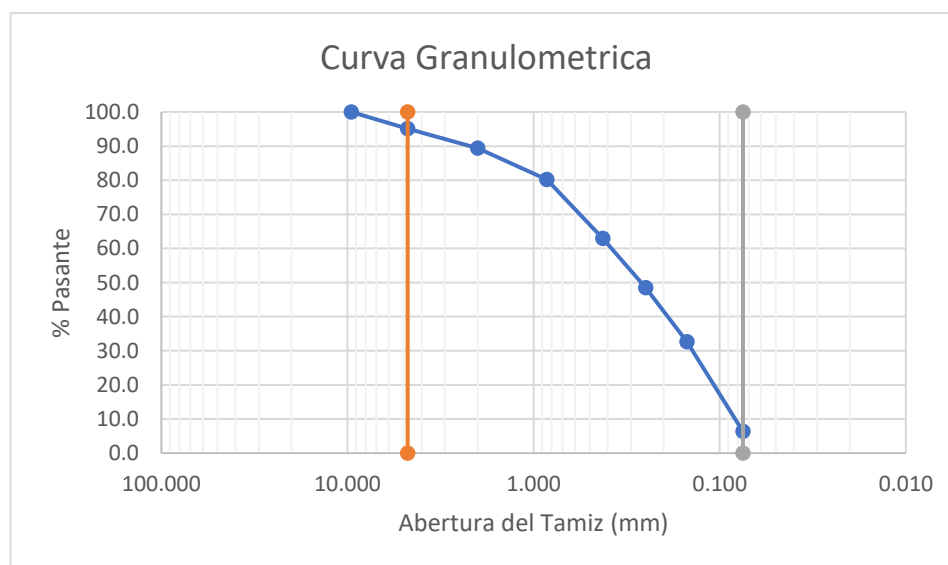
Suelo mal graduado, implica que la distribución de tamaños de partículas no es óptima.

Figura C4

Granulometría del apique 4 Pr80 +010.

Apique #4					
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA - NORTE DE SANTANDER					
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO					
Norma Invias E - 123 - 13					
Tamaño máximo 2"		Peso Húmedo (gr): 255.7		Peso Seco (gr): 244.4	
Abertura del Tamiz		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
(pulg)	(mm)				
3/8"	9.530	0.0	0.0	0.0	100.0
Nº 4	4.750	10.6	5.6	5.6	94.4
Nº 10	2.000	9.6	5.1	10.6	89.4
Nº 20	0.850	20.3	10.7	21.3	78.7
Nº 40	0.425	30.1	15.8	37.2	62.8
Nº 60	0.250	20.9	11.0	48.2	51.8
Nº 100	0.150	28.1	14.8	62.9	37.1
Nº 200	0.075	58.1	30.6	93.5	6.5
Fondo		12.3	6.5	100.0	0.0
Total		190.0	100.0		

Psh2 =	263.5	gr
Pss2 =	252.2	gr
Pa2 =	11.3	gr



Tamiz (mm)	Porcentaje Pasante (%)
9.530	100.0
4.750	94.4
2.000	89.4
0.850	78.7
0.425	62.8
0.250	51.8
0.150	37.1
0.075	6.5

$D_2 =$	0.075
$D_1 =$	0.150
$D_{10} =$	0.094
$\%_2 =$	6.474
$\%_1 =$	37.053

$D_2 =$	0.075
$D_1 =$	0.150
$D_{30} =$	0.141
$\%_2 =$	6.474
$\%_1 =$	37.053

$D_2 =$	0.250
$D_1 =$	0.425
$D_{60} =$	0.383
$\%_2 =$	51.842
$\%_1 =$	62.842

$C_U =$ Coeficiente de Uniformidad
4.087

Arena uniformemente graduada.

$C_c =$ Coeficiente de Curvatura
0.554

Suelo mal graduado, implica que la distribución de tamaños de partículas no es óptima.

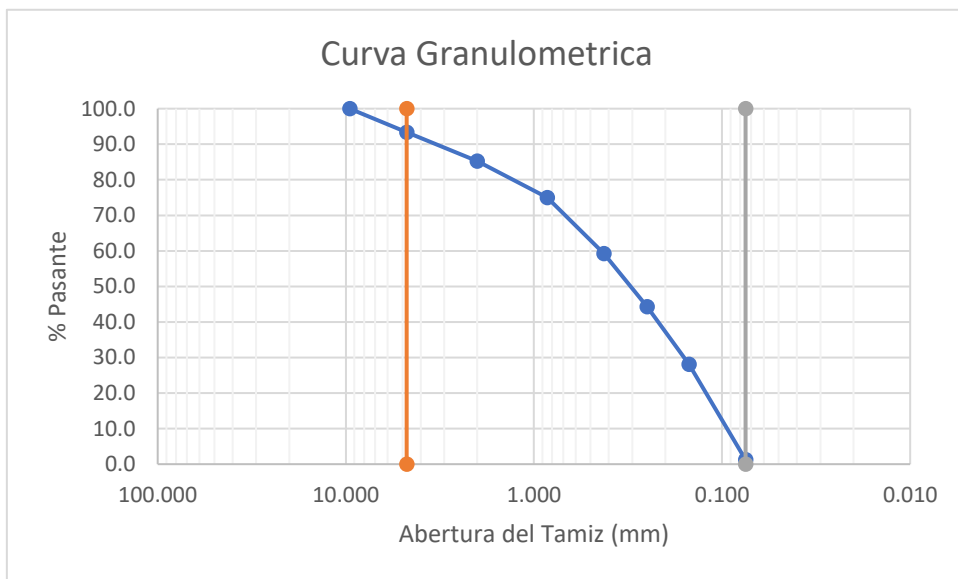
Figura C5

Granulometría del apique 5 Pr73 +020.

Apique #5					
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA - NORTE DE SANTANDER					
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO					
Norma Invias E - 123 - 13					
Tamaño máximo 2"		Peso Húmedo (gr): 295		Peso Seco (gr): 129	
Abertura del Tamiz		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
(pulg)	(mm)				
3/8"	9.530	0.0	0.0	0.0	100.0
Nº 4	4.750	15.5	6.6	6.6	93.4
Nº 10	2.000	19.0	8.1	14.7	85.3
Nº 20	0.850	24.0	10.2	25.0	75.0

Nº 40	0.425	37.0	15.8	40.7	59.3
Nº60	0.250	35.0	14.9	55.7	44.3
Nº100	0.150	38.0	16.2	71.9	28.1
Nº200	0.075	63.0	26.9	98.8	1.2
Fondo		2.9	1.2	100.0	0.0
Total		234.4	100.0		

Psh3 =	295	gr
Pss3 =	234.5	gr
Pa3 =	60.5	gr



Tamiz (mm)	Porcentaje Pasante (%)
9.530	100.0
4.750	93.4
2.000	85.3
0.850	75.0
0.425	59.3
0.250	44.3
0.150	28.1
0.075	1.2

$D_2 =$	0.075
$D_1 =$	0.150
$D_{10} =$	0.125

$D_2 =$	0.150
$D_1 =$	0.250
$D_{30} =$	0.164

$D_2 =$	0.425
$D_1 =$	0.850
$D_{60} =$	0.447

$\%_2 =$	1.237	$\%_2 =$	28.114	$\%_2 =$	59.258
$\%_1 =$	28.114	$\%_1 =$	44.326	$\%_1 =$	75.043

$C_U = 3.574$ Coeficiente de Uniformidad

Arena
uniformemente
graduada.

$C_c = 0.482$ Coeficiente de
Curvatura

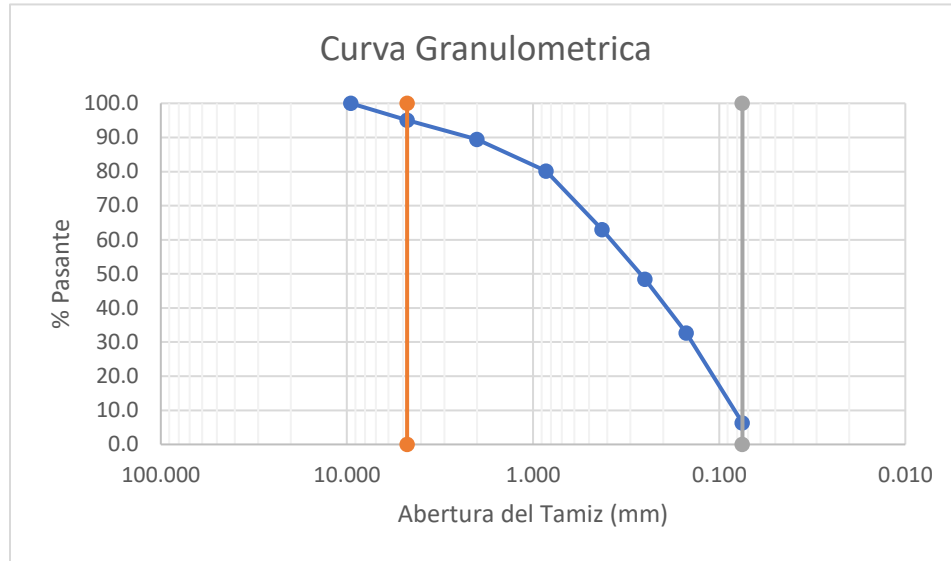
Suelo mal
graduado,
implica que
la distribución
de tamaños de
partículas no es
óptima.

Figura C6

Granulometría del apique 6 Pr74 +020.

Apique #6					
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA - NORTE DE SANTANDER					
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO					
Norma Invias E - 123 - 13					
Tamaño máximo 2"		Peso Húmedo (gr): 254.4		Peso Seco (gr): 244.7	
Abertura del Tamiz		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
(pulg)	(mm)				
3/8"	0.000	0.0	0.0	0.0	100.0
Nº 4	4.750	14.8	6.3	6.3	93.7
Nº 10	2.000	16.5	7.1	13.4	86.6
Nº 20	0.850	28.7	12.3	25.7	74.3
Nº 40	0.425	39.8	17.0	42.7	57.3
Nº 60	0.250	35.7	15.3	58.0	42.0
Nº 100	0.150	30.8	13.2	71.1	28.9
Nº 200	0.075	62.3	26.6	97.8	2.2
Fondo		5.2	2.2	100.0	0.0
Total		233.8	100.0		

Psh3 =	264.4	gr
Pss3 =	254.7	gr
Pa3 =	9.7	gr



Tamiz (mm)	Porcentaje Pasante (%)
9.530	100.0
4.750	93.7
2.000	86.6
0.850	74.3
0.425	57.3
0.250	42.0
0.150	28.9
0.075	2.2

D2 =	0.075
D1 =	0.150
D10 =	0.119
% ₂ =	2.224
% ₁ =	28.871

D2 =	0.150
D1 =	0.250
D30 =	0.160
% ₂ =	28.871
% ₁ =	42.044

D2 =	0.425
D1 =	0.850
D60 =	0.500
% ₂ =	57.314
% ₁ =	74.337

CU = Coeficiente de
4.201 Uniformidad

**Arearena uniformemente
graduada.**

CC = 0.432 Coeficiente de Curvatura

**Suelo mal graduado, implica
que la distribución de tamaños
de partículas no es óptima.**

Nota: Esta fue la granulometría escogida para comparar con otros archivos de la literatura escogida.