

“ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ZEOLITAS COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO”

JUAN DAVID ZULUAGA PIEDRAHITA

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos Que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.



KATHLEEN SALAZAR SERNA
Directora



MARÍA FERNANDA GARCÍA ALADÍN
Jurado



JAVIER ALEXANDER PEREZ
Co-director




FERNEY QUIÑÓNEZ SINISTERRA
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister en Ingeniería Civil.



HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias



JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, 02 de marzo de 2021

Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 02 de marzo de 2021

Autor: JUAN DAVID ZULUAGA PIEDRAHITA

Título del Trabajo de Grado: “ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ZEOLITAS COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO”

Director: KATHLEEN SALAZAR SERNA

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.

Kathleen Salazar Serna

Kathleen G. Salazar Serna

DATOS ACTUALES DEL ESTUDIANTE:

- **NOMBRE COMPLETO:** JUAN DAVID ZULUAGA PIEDRAHITA
- **DIRECCIÓN:** Calle 8ª # 8-35, Florida Valle
- **TELÉFONOS DE CONTACTO:** 3043769784 – 2640328
- **CORREO ELÉCTRÓNICO:** juan000_0295@hotmail.com
- **PROFESIÓN:** Ingeniero Civil.
- **EMPRESA:** Alcaldía Municipal de Florida Valle.
- **CARGO:** Apoyo técnico a la supervisión de obras civiles.



Maestría en Ingeniería
Facultad de Ingeniería y Ciencias

FICHA RESUMEN

TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

TITULO: “ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ZEOLITAS COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO”

1. ÉNFASIS: Construcciones
2. ÁREA DE INVESTIGACIÓN: Construcción
3. ESTUDIANTE: Juan David Zuluaga Piedrahita
4. CORREO ELECTRÓNICO: juan000_0295@hotmail.com
5. DIRECTOR: Kathleen Salazar Serna
6. CODIRECTOR: Javier Alexander Pérez
7. PALABRAS CLAVE: Vías terciarias, Zeolitas,
8. CÓDIGOS UNESCO CIENCIA Y TECNOLOGÍA: 3312.12, 5304.01, 3308.01
9. FECHA DE INICIO: 1 de febrero de 2020 DURACIÓN: 4 Meses
10. RESUMEN.

Resumen

El presente documento comprende el trabajo de grado de maestría en ingeniería civil basado en un análisis técnico y económico para alternativas de solución en la construcción de vías de bajos volúmenes de tránsito. Se realizó un estudio acerca de la zeolita como alternativa de solución, realizándose una comparación frente a una alternativa de solución convencional como lo es la instalación de capas de afirmado. El análisis comparativo será respecto el aspecto técnico estudiando el comportamiento de los materiales ante los factores propios de una vía determinada en un caso de estudio y el aspecto económico realizando la proyección financiera para un periodo de vida útil con el fin de establecer el valor presente neto de cada alternativa, en donde se incluyan los costos de construcción, mantenimiento y operación, además de los impactos ambientales generados, determinándose la huella de carbono para cada una de las alternativas estudiadas.

Abstract

This document comprises the master's degree work in civil engineering based on a technical and economic analysis for alternative solutions in the construction of roads with low volumes of traffic. A study was carried out on zeolite as an alternative solution, making a comparison with an alternative conventional solution such as the installation of affirmed layers. The comparative analysis will be regarding the technical aspect, studying the behavior of the materials in the face of the factors inherent to a certain path in a case study, and the economic aspect, carrying out the financial projection for a period of useful life in order to establish the net present value. of each alternative, where the construction, maintenance and operation costs are included, as well as the environmental impacts generated, determining the carbon footprint for each of the alternatives studied

**ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ZEOLITAS COMO MATERIAL
ALTERNATIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO**

TRABAJO DE GRADO

PRESENTADO POR:

ING. JUAN DAVID ZULUAGA PIEDRAHITA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI

FACULTAD DE INGENIERÍA.

SANTIAGO DE CALI 2020

**ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ZEOLITAS COMO MATERIAL
ALTERNATIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRANSITO.**

POR:

ING. JUAN DAVID ZULUAGA PIEDRAHITA

DIRECTORA:

ING. KATHLEEN SALAZAR SERNA

CODIRECTOR:

ING. JAVIER ALEXANDER PEREZ

FACULTAD DE INGENIERÍA.

SANTIAGO DE CALI 2020

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	9
2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	11
3.	OBJETIVOS.....	12
3.1.	Objetivo general.....	12
3.2.	Objetivos específicos.....	12
4.	ALCANCE	13
5.	JUSTIFICACIÓN	14
6.	MARCO DE REFERENCIA	16
6.1	Técnicas aprobadas para mejoramiento en vías con bajos volúmenes de tránsito	16
6.2	Metodología de diseño de estructuras de pavimentos en afirmado.....	22
6.3	Casos de implementación de pavimentos no convencionales	30
6.3.1	San Pablo – Cañabral, Departamento de Bolívar Colombia.....	30
6.3.2	Programa piloto de concreto sintético en el corregimiento de Guabitas, municipio de Guacarí.....	32
6.3.3	Programa de caminos básicos de Chile	32
6.4	Generalidades de las zeolitas.....	34
6.5	Evaluación económica en proyectos viales.....	39
6.6	Fuentes de emisión de CO₂ , para la determinación de la huella de carbono en proyectos viales.....	39
7.	METODOLOGÍA	44
7.1	FASE 1 (ANÁLISIS TÉCNICO).....	46
7.2	FASE 2 (ANÁLISIS FINANCIERO)	47
7.3	FASE 3 (ANÁLISIS AMBIENTAL).....	47
8.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	48
8.1	FASE 1 (ANÁLISIS TÉCNICO):.....	48
8.1.1	MATERIAL GRANULAR DE AFIRMADO	48
8.1.2	ZEOLITAS	59
8.1.2.2	Análisis de los efectos de la zeolita como inclusión en un material granular tipo afirmado.....	77
8.1.2.3	Análisis de Proctor modificado para afirmado con inclusión de zeolitas	78

8.1.2.4 Ensayo de CBR para material granular tipo afirmado con inclusión de zeolitas (INV- E -148)82	
8.2 FASE 2 (ANÁLISIS FINANCIERO):.....	89
8.2.1 Costos de construcción alternativas de mejoramiento.....	90
8.2.3 Costos de mantenimiento	96
8.2.4 Costos de operación	102
8.3 FASE 3 (ANÁLISIS AMBIENTAL):.....	103
8.3.1 Fase de construcción	103
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS	109
9.1 Evaluación técnica.....	109
9.2 Evaluación financiera	115
9.3 Evaluación ambiental	123
10. CONCLUSIONES	126
11. RECOMENDACIONES	128
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1. INTRODUCCIÓN

La comunicación terrestre entre las poblaciones rurales de las diferentes entidades territoriales bien sea municipios, distritos o departamentos de los países latinoamericanos, se está viendo afectada negativamente debido al estado de la infraestructura vial, en donde las carreteras sufren grandes deterioros a causa de diversos factores que afectan y no permiten el adecuado funcionamiento y desarrollo de la red. Las vías atienden a una clasificación según su grado de importancia, el cual este definido de acuerdo con los volúmenes de vehiculares que circulan; dicho volumen se establece de acuerdo con el tránsito promedio diario semanal (TPDs) que transita sobre la sección de la vía; las vías objeto de estudio del presente documento se categorizan como vías terciarias.

Las vías terciarias son la infraestructura de transporte con mayor extensión en todo el país y representan un factor clave para el desarrollo económico de las poblaciones rurales en cuanto a la comunicación entre los lugares de producción agrícola e industrial con los centros urbanos como destinos comerciales. Con el objetivo de garantizar el desarrollo de estas poblaciones, se invierten recursos de manera periódica para la adecuación y rehabilitación de estas vías, las cuales sufren mayores afectaciones en las temporadas invernales debido a que son vías que se encuentran sobre superficies en tierra, con diversas clases de suelos y materiales que no cumplen con las propiedades adecuadas, y que sumado a la carencia de obras de drenaje sufren estas afectaciones por las escorrentías superficiales.

Las técnicas de solución a esta problemática que se manejan generalmente, atienden a las rectificaciones de los ejes viales, así como la instalación de material granular proveniente de canteras cercanas al sitio; estas soluciones carecen de planificación y fundamentación técnica lo cual se ve reflejado en una baja durabilidad que no garantiza las condiciones óptimas de servicio de la vía; es por esta razón que actualmente se realizan incentivos para el uso de alternativas de solución que conlleven al mejoramiento de las condiciones químicas y físicas del suelo de subrasante, lo cual permita obtener una mejor respuesta estructural similar a las capas que conforman un pavimento o implementaciones de superficies selladas que impermeabilicen la superficie de rodadura, garantizando el aprovechamiento de recursos existentes y que puedan brindar una mayor durabilidad a un menor costo, generando así una sostenibilidad económica y

también ambiental que conlleven a mejorar la infraestructura vial en pro al desarrollo económico de las poblaciones rurales.

En el desarrollo del presente documento se estudiará el caso de un mineral denominado como zeolita como posible alternativa de solución, realizándose su caracterización según las normas del instituto nacional de vías y de acuerdo con las gradaciones que se comercializan en la región se realizará una inclusión en las franjas granulométricas del afirmado para analizar su comportamiento y desempeño ante los factores de carga interpuestos según la normativa vigente y el análisis financiero proyectando los costos de construcción, operación y mantenimiento en un periodo de vida útil determinado.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El alto grado de deterioro de la malla vial categorizada como red terciaria, y siendo la de mayor extensión en el país, equivalente al 69.4% del total de la malla vial nacional (DNP, 2016) y del cual solo el 2.7% de los 142.284 km totales se encuentran en buenas condiciones de servicio, ha llevado al planteamiento de nuevas alternativas de solución para el programa de construcción y mantenimiento de carreteras, las cuales garanticen una durabilidad mayor en relación a un costo de inversión menor en cuanto a la construcción y mantenimiento de las vías.

Optimizar las inversiones en las vías terciaria, implica encontrar los mejores procesos que garanticen los niveles de servicio aceptables para la circulación, con relación a las necesidades que atienden estas vías, generando un impacto mayor con las inversiones realizadas, algo que no se ve reflejado actualmente, en donde las inversiones se realizan en soluciones a corto plazo. Priorizar las intervenciones a las vías terciarias requiere la identificación de las características de la vía existente, dado que existen diferentes tipos de condiciones que hacen que las soluciones varíen. Estas intervenciones van ligadas al estado de la vía y a las necesidades que esta atiende y las causas del deterioro de estas que están ligadas a diversos factores, debido a que en el territorio nacional existe una gran variabilidad de suelos en consecuencia a las características geomorfológicas, de las regiones del país, así como climas y volúmenes vehiculares.

Las demandas vehiculares en las vías terciarias son bajas, sin embargo, un porcentaje importante de estos volúmenes corresponden a vehículos pesados, los cuales poseen un factor de daño considerable sobre la vía; por lo que las soluciones de ingeniería deben estar orientadas al análisis de técnicas para la estabilización de los suelos, la calidad de la capa de rodadura de las vías y el uso de obras de arte que garanticen un correcto manejo de las aguas de escorrentía superficial, lo cual llevaría a mitigar los principales obstáculos que afectan el estado de las vías.

En un estudio realizado en el año 2016, los resultados arrojaron que una mejora vial incrementa la velocidad de desplazamiento del hogar cerca de 12 kilómetros por hora; reflejado en aumentos del 9.6% en ingresos, 8.9% en el consumo de los hogares rurales, así como en la posibilidad de reemplazar los niveles de autoconsumo por consumo comprado y de fortalecer la especialización en los hogares agrícolas. En el resultado de esta investigación mostró que dichos incrementos

reducen los niveles de pobreza en un 2.2 puntos porcentuales (DNP, 2016). El estudio de caso descrito en el presente documento busca responder la pregunta de investigación ¿Qué ventajas técnicas, económicas y ambientales representa el uso de zeolitas en combinación con el afirmado convencional, como tecnología alternativa para la construcción y mejoramiento de vías con bajos volúmenes de tránsito?

3. OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos que pretende desarrollar el trabajo de grado.

3.1. Objetivo general

Analizar técnica y económicamente el uso de materiales alternativos para la construcción de vías terciarias, estudio de caso de la zeolita.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar y comparar el comportamiento de la zeolita y el afirmado a fatiga en el laboratorio, para una estructura de pavimento.
- Determinar la viabilidad financiera de la construcción de vías terciarias con la implementación de zeolitas.
- Calcular y comparar la huella de carbono de la producción y construcción de vías terciarias con zeolita y afirmado.

4. ALCANCE

El presente trabajo de grado obedece a un trabajo de investigación aplicada, que combina un estudio experimental con viabilidad financiera, en donde se busca mitigar las problemáticas presentadas en las vías terciarias de Colombia en los aspectos técnicos, económicos, sociales, ambientales y de gestión, ampliando el campo de materiales alternativos de la construcción.

Actualmente alrededor del 70% de la red terciaria del país, se encuentra en capas de superficies en grava, esto bajo el supuesto de que estos materiales que conforman la estructura de la vía y la capa de rodadura cumplen con los requisitos establecidos por las especificaciones generales de construcción de carreteras, establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Dicha suposición no es consecuente con la realidad, debido a que la utilización de grava como superficie de rodadura, dichos materiales en un alto porcentaje no cumplen con los estándares de calidad establecidos, por lo cual esto se ve reflejado en un bajo desempeño y una corta vida útil del pavimento o superficie de rodadura.

La investigación a nuevas alternativas de solución para las vías terciarias busca garantizar unos óptimos niveles de servicio y acceso para los vehículos que circulan por estas carreteras, lo cual se vea reflejado en menores costos del ciclo de vida, en donde estos corresponden al valor presente neto de una superficie para un periodo de análisis específico, teniendo en consideración los costos iniciales de construcción, los costos de los usuarios y los costos esperados de mantenimiento y de cualquier rehabilitación requerida.

5. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la definición del problema planteado anteriormente, la relevancia de realizar el proyecto de investigación radica, en un análisis comparativo que lleve a establecer una alternativa de solución a la problemática del deterioro de la infraestructura vial terciaria, la cual garantice menores costos de inversión frente a una durabilidad mayor, teniendo en cuenta que si bien la zeolita implementada para el proyecto es importada desde Ecuador, diversas investigaciones afirman que en múltiples zonas de Colombia existen fuentes donde se pueda explotar este mineral.

Una vía terciaria en óptimos niveles de servicio permite incrementar la velocidad de desplazamiento, así como un aumento en los ingresos de los productores agrícolas y el consumo de los hogares, reduciendo los niveles de pobreza de estas poblaciones, cabe resaltar que actualmente se ha incrementado el interés en la red terciaria del país, dentro de los planes de desarrollo de infraestructura del país, contemplado en las acciones a realizar frente a la naciente era del post conflicto, lo cual representa una gran ventaja en los aspectos que enmarcan el contexto social frente a las intervenciones a realizar en dichas vías.

La débil infraestructura vial, los elevados costos de transporte y de logística tienen un efecto negativo sobre la competitividad del país. Según una encuesta realizada por el departamento nacional de planeación en el año 2016, los prestadores de servicio logísticos indicaron que la insuficiencia en las infraestructuras viales es la segunda mayor dificultad en la ejecución de operaciones logísticas, después de la carencia de zonas adecuadas de cargue y descargue, de igual manera los usuarios de estos servicios logístico indicaron que los altos costos del transporte son para ellos la mayor dificultad en cuanto a operaciones logísticas, lo cual se ve claramente reflejado en el porcentaje de participación en el costo total de la logística del país, en donde representa el 37% del total; según el informe *Doing Business* en el año 2016 realizado por el banco mundial, Colombia a nivel latinoamericano es el país con mayores costos asociados al transporte doméstico para el comercio internacional, en donde a manera de ejemplo se toman en promedio 44 horas para transportar una mercancía desde el principal centro económico hasta el principal puerto, representando el doble del tiempo frente a países como México y Argentina (DNP, 2016).

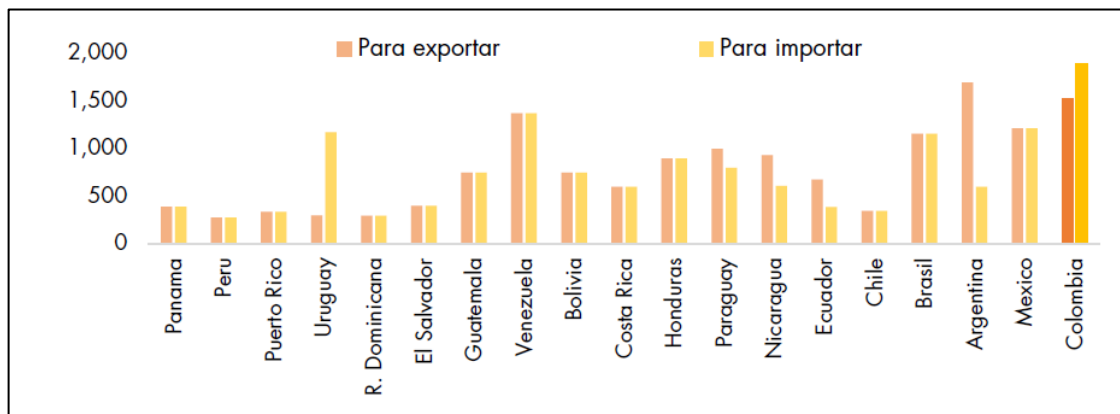


Figura 1- Costo en dólares del transporte en países latinoamericanos

Fuente: Doing Business Report (Banco mundial,2016)

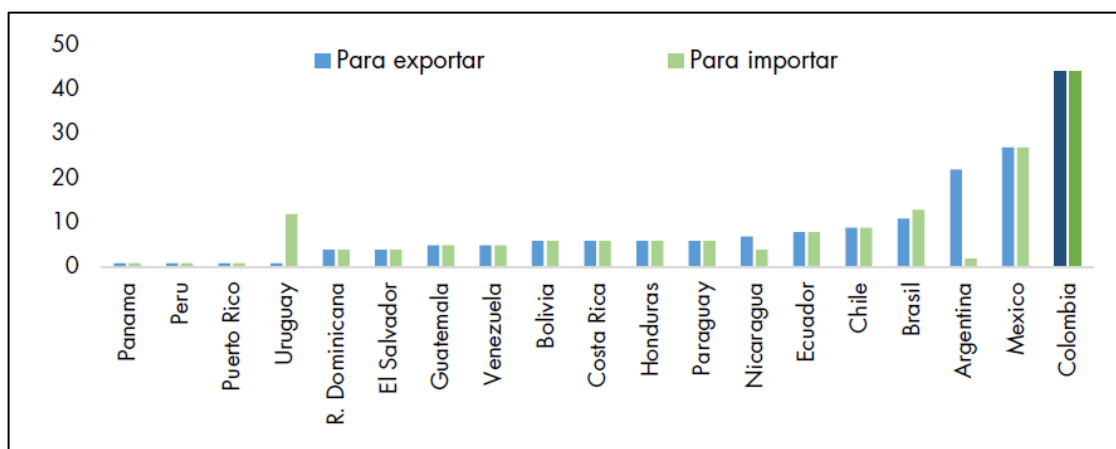


Figura 2- Tiempo de Transporte Domestico Requerido en Horas, en Países Latinoamericanos.

Fuente: Doing Business Report (Banco mundial,2016)

Sumado a lo anterior, cabe resaltar que el déficit de infraestructura vial, también se asocia a la presencia del conflicto armado en el territorio, evidenciando que gran parte de este se ha desarrollado en regiones con déficit en infraestructura vial, donde debido a esto se ha retrasado

su inserción económica y social. La consolidación de la paz a nivel nacional y la naciente era del post conflicto, dentro de las dimensiones institucionales, económicas y políticas, tiene como condición necesaria el desarrollo de una infraestructura de transporte que reduzca las barreras de accesos a las diferentes poblaciones (DNP, 2016).

Los materiales alternativos de construcción de pavimentos también buscan encontrar nuevas metodologías de aplicación que generen menores impactos ambientales en su fabricación como en su aplicación, en comparación a las técnicas de pavimentación tradicionales, como lo son los pavimentos en concreto y las mezclas asfálticas.

6. MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica, la cual comprende los siguientes elementos: i) Técnicas aprobadas en vías de bajos volúmenes de tránsito; ii) caracterización de materiales para pavimentos; iii) implementación de pavimentos no convencionales en diferentes lugares; iv) evaluación financiera de proyectos viales v) metodología para la determinación de la huella de carbono en proyectos viales.

6.1 Técnicas aprobadas para mejoramiento en vías con bajos volúmenes de tránsito

Estas vías denominadas como terciarias, están a cargo de las administraciones públicas de diferentes niveles gubernamentales y generalmente sus calzadas son superficies en tierra, producto de explanaciones y movimientos de tierra realizados para la construcción del camino o con una capa de grava o material granular para proteger la superficie y garantizar la circulación permanente (CAF & Garavito, 2010). Los objetivos principales cuando se realizan intervenciones en este tipo de vías atienden a proveer un acceso a los vehículos circulantes, los cuales, a pesar de estar en un rango de volumen inferior a los 200 vehículos por día, en donde un gran porcentaje de estos corresponden a vehículos con grandes valores de carga. Los proyectos de mejoramiento que se implementan se basan en técnicas tradicionales como lo es la colocación de material granular para mejorar la capa de rodadura, también cabe resaltar que en la gran mayoría de casos

los estudios y diseños no son realizados y se recurre a mano de obra artesanal, por lo cual no se realiza un efectivo control de calidad en los materiales y procesos constructivos que garantice una durabilidad de la vía intervenida. En muchos de estos casos, el análisis de los costos en el ciclo de vida de los pavimentos ha demostrado que las superficies de rodadura en grava tienen menores costos iniciales y los costos para su mantenimiento y rehabilitación oscilan entre los más bajos y los más altos, dependiendo principalmente de las distancias del transporte. Por otro lado, los costos de mantenimiento más reducidos de otras alternativas de superficie pueden aventajar rápidamente el menor costo inicial que presenta la grava, dando lugar a menores costos locales durante todo el ciclo de vida, en definitiva, un mejor estándar relativo. (CAF & Garavito, 2010)

Dentro de las nuevas alternativas de mejoramiento de estas vías, la viabilidad de la utilización de grava como superficie de rodadura se está reduciendo (CAF & Garavito, 2010). Lo que se busca con las nuevas alternativas es sellar las superficies, con el fin de disminuir la permeabilidad de la capa de rodadura y evitar así los fallos por afectación de las estructuras de la vía (subbase, subrasante). Dentro de dichas alternativas se pueden analizar dos tipos de intervenciones; la primera atiende al incremento del estándar funcional de la superficie de rodadura existente, es decir, dichas intervenciones son del orden funcional de la vía puesto que su objetivo no es contribuir al mejoramiento de la capacidad estructural de esta; la segunda si hace referencia a una intervención de tipo estructural, donde el principal objetivo es aumentar la capacidad de la vía ante las solicitaciones de carga interpuesta por los vehículos por medio del aporte de capas de nuevo material o por medio de la incorporación de elementos estructurales externos al suelo; estos procesos se basan en la transformación de las propiedades del suelo, mediante procesos de incorporación y mezclado de algún agente externo dentro de su composición, para que factores como su desempeño mecánico, el comportamiento en presencia de agua y la durabilidad presenten valores aceptables para que el suelo estabilizado pueda soportar los estados de esfuerzos y deformaciones a los cuales estará sometido por las acciones del tránsito y del medio ambiente. Las intervenciones en muchos casos pueden combinar las dos situaciones, ya que el objetivo principal es brindar una capacidad estructural garantizando una funcionalidad que permita la adecuada circulación de los vehículos; las tecnologías más comunes para la intervención a las vías terciarias se pueden resumir de la siguiente manera

Tabla 1- Soluciones generales de mantenimiento

Grado de conocimiento y nivel de uso	Soluciones estructurales	Soluciones funcionales
Tecnologías universales	<p data-bbox="743 495 943 522"><i>Estabilizaciones</i></p> <p data-bbox="716 548 971 575">Estabilización con cal</p> <p data-bbox="678 600 1008 627">Estabilización con cemento</p> <p data-bbox="678 653 1008 716">Estabilización con emulsión asfáltica.</p> <p data-bbox="656 741 1031 768"><i>Adición de capas estructurales</i></p> <p data-bbox="662 793 1024 856">Adición de capa estructural de material granular</p> <p data-bbox="630 882 1057 945">Hormigones asfálticos y hormigones de cemento portland.</p> <p data-bbox="630 970 1057 1033">Adoquines de hormigón o de arcilla cocida.</p>	<p data-bbox="1105 495 1349 600"><i>Tratamientos superficiales y sellos asfálticos</i></p> <p data-bbox="1133 625 1321 653">Sellos de arena.</p> <p data-bbox="1110 678 1344 705">Lechadas asfálticas.</p> <p data-bbox="1089 730 1365 793">Tratamiento superficial simple.</p> <p data-bbox="1089 819 1365 882">Tratamiento superficial doble.</p> <p data-bbox="1089 907 1365 970">Tratamiento superficial múltiple.</p> <p data-bbox="1101 995 1354 1022"><i>Supresores de polvo.</i></p> <p data-bbox="1089 1047 1365 1075">Fog seal (riego neblina)</p>
Tecnologías innovadoras	<p data-bbox="743 1241 943 1268"><i>Estabilizaciones</i></p> <p data-bbox="695 1293 992 1356">Estabilización con asfalto espumado.</p> <p data-bbox="646 1381 1040 1409">Estabilización con sales/cloruros.</p> <p data-bbox="646 1434 1040 1461">Estabilización con sales/cloruros.</p> <p data-bbox="688 1486 998 1514">Estabilización con cenizas.</p> <p data-bbox="634 1539 1052 1602">Utilización de escorias de procesos industriales.</p> <p data-bbox="683 1627 1003 1690">Refuerzos con geomallas o geotextiles, geocedas.</p> <p data-bbox="630 1715 1057 1743">Material de reciclaje de pavimentos.</p>	<p data-bbox="1149 1241 1305 1304"><i>Tratamientos superficiales</i></p> <p data-bbox="1143 1329 1312 1356">Sello del cabo.</p> <p data-bbox="1143 1381 1312 1409">Sello de Otta.</p> <p data-bbox="1105 1486 1349 1514"><i>Supresores de polvo</i></p> <p data-bbox="1192 1539 1263 1566">Sales.</p> <p data-bbox="1154 1591 1300 1619">Empedrado.</p> <p data-bbox="1154 1644 1300 1671">Placa huella.</p>

Tabla 1.

Soluciones generales de mantenimiento

Grado de conocimiento y nivel de uso	Soluciones estructurales	Soluciones funcionales
Tecnologías experimentales	<p><i>Estabilización</i></p> <p>Estabilizaciones químicas con aditivos especiales.</p> <p>Utilización de materiales no estándar (Bagazo de caña de azúcar, fibra de cascara de coco, celulosa, etc.)</p> <p>Otras: Refuerzo de hormigón no tradicional (ej: Bambú)</p>	<p><i>Supresores de polvo</i></p> <p>Crudos pesados y productos</p>

Nota: Fuente: Soluciones e innovaciones tecnológicas de mejoramiento de vías de bajo tránsito, (2010).

En Colombia el departamento nacional de planeación desarrolló un proyecto tipo, el cual contiene aspectos metodologías y técnicos para realizar de manera correcta y eficiente la formulación de proyectos tipo para el mejoramiento de vías terciarias, el cual consiste en el planteamiento de intervenciones lineales relacionadas con soluciones estructurales y funcionales e intervenciones puntuales en sitios críticos con medidas de estabilización de taludes y obras de drenaje las cuales cuentan con especificaciones y normativa técnica aprobada por el instituto nacional de vías, y son aplicadas mediante una matriz multicriterio que toma en consideración una serie de aspectos a los cuales se les asignan puntajes que permitan determinar la solución más idónea a implementar en un lugar determinado (INVIAS).

Dichas técnicas aprobadas para mejoramiento de vías terciarias hacen parte de los proyectos tipo del departamento nacional de planeación (DNP), los cuales cuentan con herramientas para realizar la formulación y estructuración de proyectos de inversión pública, y se resumen a continuación:

- Soluciones estructurales:
 1. Estabilización con cemento
 2. Estabilización con materiales bituminosos
 3. Estabilización mecánica
- Soluciones funcionales:
 1. Lechada asfáltica
 2. Tratamiento superficial doble

De acuerdo con las herramientas adoptadas para la selección de alternativas de solución se enmarcan 9 alternativas, las cuales se resumen a continuación:

Tabla 2

Propuestas de mejoramiento de vías terciarias DNP

ALTERNATIVA	DESCRIPCIÓN SOLUCIÓN	ESPECIFICACIÓN INVIAS
Alternativa 1	<i>Base estabilizada con cemento + lechada asfáltica</i>	<i>Base estabilizada con cemento articulo 341-07 Lechada asfáltica articulo 433-13</i>
Alternativa 2	<i>Base estabilizada con cemento + tratamiento superficial doble</i>	<i>Base estabilizada con cemento articulo 341-07 Tratamiento superficial doble articulo 431-13</i>

Alternativa 3	<i>Base estabilizada con emulsión asfáltica + Lechada asfáltica</i>	<i>Base estabilizada con emulsión asfáltica artículo 340-13, lechada asfáltica artículo 433-13</i> <i>Base estabilizada con una mezcla asfáltica natural. (Especificación particular INVIAS Resolución 10099 del 27 de diciembre de 2017).</i>
Alternativa 4	<i>Base estabilizada con emulsión asfáltica + Tratamiento superficial doble</i>	<i>Base estabilizada con emulsión asfáltica artículo 340 – 13 tratamiento superficial doble artículo 431 – 13 Base estabilizada con una mezcla asfáltica natural. (Especificación particular INVIAS Resolución 10099 del 27 de diciembre de 2017).</i>
Alternativa 5	<i>Base estabilizada mecánicamente + Lechada asfáltica</i>	<i>Base granular artículo 330 – 13 lechada asfáltica artículo 433 – 13</i>

Alternativa 6	<i>Base estabilizada mecánicamente + Tratamiento superficial doble</i>	<i>Base granular artículo 330 – 13 tratamiento superficial doble artículo 431 – 13</i>
Alternativa 7	<i>Vía existente + Lechada asfáltica</i>	<i>Lechada asfáltica artículo 433 – 13</i>
Alternativa 8	<i>Vía existente + Tratamiento superficial doble</i>	<i>Tratamiento superficial doble artículo 431 – 13</i>
Alternativa 9	<i>Placa huella</i>	<i>Guía de diseño de pavimentos con placa huella. (Resolución INVIAS 04401 del 17 de octubre de 2017).</i>

Nota: Fuente: Mejoramientos de vías terciarias Vías de tercer orden, (2020).

6.2 Metodología de diseño de estructuras de pavimentos en afirmado

Para el diseño de estructuras de pavimento con capas de rodadura compuestas por material de afirmado en su totalidad, las cuales tienen su aplicación en vías de bajos volúmenes de tránsito, se considera la metodología de diseño de la AASHTO, realizándose las consideraciones de acuerdo con los parámetros de diseño en carreteras secundarias, terciarias o caminos rurales.

Como primera medida se realiza el cálculo del número estructural (SN) para el diseño generado por las cargas de tránsito, este valor se determina de acuerdo con una serie de parámetros adoptados para el diseño de los modelos de estructuras de carreteras en afirmado: El nivel de confianza del diseño $R=75\%$, la desviación normal estándar $Z_r = -0.674$, el error normal combinado $S_o=0.49$, el nivel de serviciabilidad final $P_t = 1.5$ y la pérdida de serviciabilidad $\Delta PSI=2.7$,

posteriormente se limitan las categorías del tránsito a contemplar en el diseño, convirtiéndose en número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en carril de diseño durante el periodo de diseño, efectuándose de la misma manera y con los mismos parámetros implementados en el diseño de pavimentos flexibles, también se limitan rangos de clasificación para la resistencia de la subrasante, y a través de correlaciones se expresa en términos del módulo resiliente (Mr); una vez establecidos estos parámetros se reemplazan en la ecuación básica de diseño de la AASHTO y mediante iteraciones se obtiene el número estructural para el tránsito y las condiciones de resistencia de la subrasante (Higuera, 2008). La expresión para determinar el número estructural es la siguiente:

$$\log(N) = Z_r * S_o + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\log\left(\frac{\Delta IPS}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \left(\frac{1,094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 * \log(Mr) - 8.07$$

Hallado el número estructural para cada intervalo de resistencia de la subrasante y nivel de tránsito, se diseñan los espesores de la estructura de afirmado, cumpliendo la condición en que el número estructural del tránsito ($SN_{Tránsito}$) sea menor o igual que el número estructural de la estructura propuesta ($SN_{Estructura}$).

$$SN_{Tránsito} \leq SN_{Estructura}$$

Para la cual:

$$SN_{Tránsito} = a_1 d_1 + a_2 d_2 m_2 + a_3 d_3 m_3 + \dots a_n d_n m_n$$

Donde:

SN: Número estructural del pavimento

d_1, d_2, \dots, d_n : Espesores de las capas de pavimento, pulgadas.

a_1, a_2, \dots, a_n : Coeficientes estructurales de las capas de pavimento, /pulgada.

m_2, \dots, m_n : Coeficientes de drenaje de las capas granulares.

Estos coeficientes estructurales y de drenaje son determinados basados tanto en las características de resistencia de los materiales como en la calidad del drenaje y se reemplazan en la ecuación; asumiendo espesores se diseña la estructura cumpliendo con la condición para el numero estructural mencionado previamente. El Invias ha establecido una matriz de numero estructural adoptado donde se resumen los parámetros de categoría de la vía junto con el numero estructural (SN) para cada combinación.

Categoría	Mr Lb/pulg ²	CBR %	N _{8.2 ton} carril diseño/periodo diseño		
			T1 < 85.000	T2 < 210.000	T3 < 425.000
S1	< 3.000	< 2	2,83	3,22	3,55
S2	4.500 – 7.500	3 – 5	2,47	2,82	3,12
S3	9.000 – 15.000	6 – 10	1,92	2,22	2,47
S4	16.500 – 30.000	11 – 20	1,51	1,77	1,98
S5	> 30.000	> 20	1,17	1,39	1,57

Figura 3- Matriz de número estructural adoptada, SN

Nota: **Fuente:** Diseño de estructuras de pavimento en afirmado (INVIAS,1997)

El ábaco de diseño para vías en afirmado se obtiene asumiendo que la condición del número estructural para el tránsito de diseño se cumplirá colocando como capa de rodadura un espesor integral de concreto asfáltico, por lo cual para esta condición se reemplazan las variables en la siguiente ecuación:

$$SN_{Estructura} = a_1 d_1$$

Donde:

d_1, d_2, \dots, d_n : Espesores de las capas de pavimento, pulgadas.

a_1, a_2, \dots, a_n : Coeficientes estructurales de las capas de pavimento, /pulgada.

La capa de concreto asfáltico se reemplaza por material granular, que se emplea como capa de afirmado, a través de factores de equivalencia; para la conversión, el espesor de concreto asfáltico se da en centímetros y en el presente caso 2.7 es el factor de equivalencia entre el concreto asfáltico y el material granular por emplear en el diseño de capas de afirmado. (Higuera, 2008)

$$e = e_{Con} * 2.5 * FE$$

Donde:

e = Espesor de la capa de afirmado, cm.

e_{Con} = Espesor de la capa en concreto asfáltico, pulgadas.

2.5 = Factor de conversión de pulgadas a centímetros.

FE = Factor de equivalencia entre el concreto asfáltico y el material de afirmado.

El procedimiento anteriormente descrito, se realizó implementando un ábaco de diseño de afirmados, el cual se obtuvo a partir de la obtención de información que se relaciona en la siguiente matriz de número estructural:

CBR %	Número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas/carril de diseño/periodo de diseño									
	42.500	85.000	127.500	170.000	210.000	255.000	297.500	340.000	382.000	425.000
2	39	44	46	48	50	51	52	53	54	54
3	34	38	40	42	43	45	45	46	47	48
4	30	34	37	38	39	40	41	42	43	43
5	28	32	34	35	36	37	38	39	40	40
6	26	30	32	33	34	35	36	37	37	38
7	24	28	30	31	32	33	34	35	35	36
8	23	26	28	30	31	32	32	33	34	34
9	22	25	27	28	29	30	31	32	32	33
10	21	24	26	27	28	29	30	30	31	31
12	19	22	24	25	26	27	28	28	29	29
14	18	21	23	24	25	26	26	27	27	28
16	17	20	21	23	23	24	25	25	26	26
18	16	19	20	22	22	23	24	24	25	25
20	15	18	19	21	21	22	23	23	24	24

Figura 4- Matriz de espesores de afirmado para elaborar el ábaco de diseño en centímetros,

Nota. **Fuente:** Diseño de estructuras de pavimento en afirmado (2008)

Finalmente, para la obtención del ábaco de diseño de espesores de afirmado, se expresa en un parámetro de resistencia de fácil determinación, el cual hace referencia al CBR, obteniéndose así el ábaco de diseño:

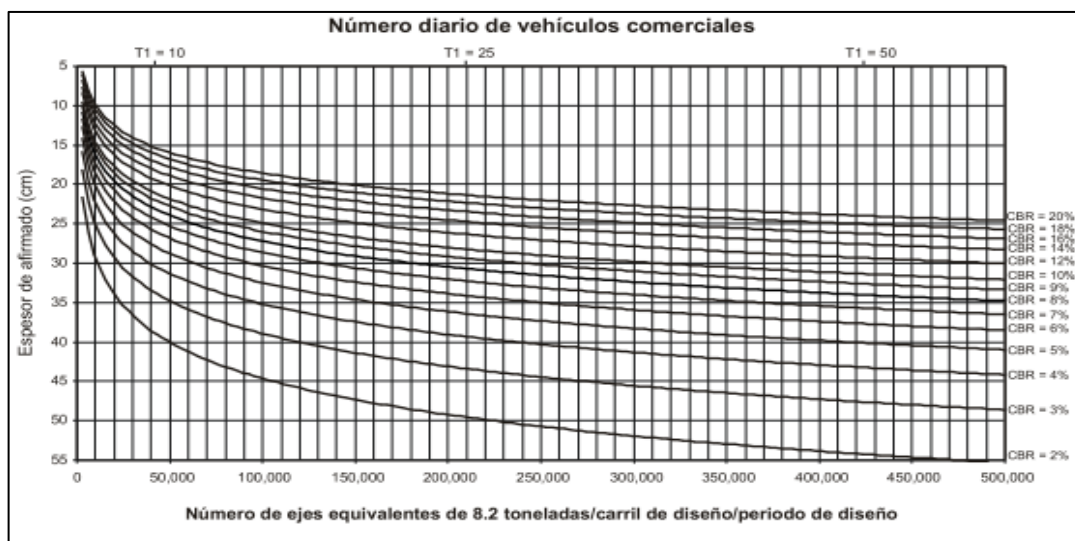


Figura 5-Abaco para el diseño de afirmados,

Nota: **Fuente:** Diseño de estructuras de pavimento en afirmado (2008)

En función de los niveles de tránsito de la zona donde se desarrollará el proyecto y en la capacidad de soporte de la subrasante se pueden considerar diversos números de estructura, cuya selección dependerá de los materiales disponibles, por lo cual se presenta la cara básica de diseño para la selección de los diferentes tipos de estructuras disponibles para implementar, la implementación de los diagramas estructurales como de los catálogos de estructuras, son herramientas gráficas que permiten analizar las posibles configuraciones de la estructura del pavimento, pero se recomienda realizar el respectivo diseño y análisis de sensibilidad para determinar el diseño óptimo en cada uno de los casos específicos que se puedan presentar. (Higuera, 2008)

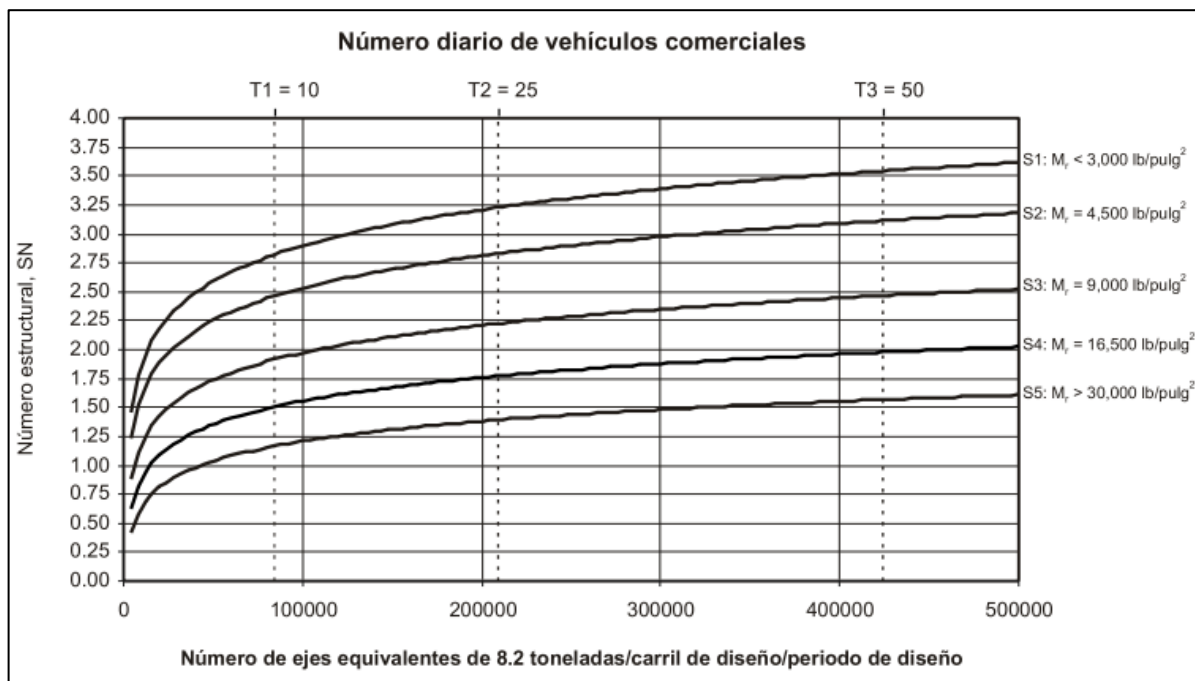


Figura 6- Diagrama estructural

Nota: Fuente: Diseño de estructuras de pavimento en afirmado (2008)

De acuerdo con el capítulo 3, artículo 311-13 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS, los requisitos que debe cumplir un material para implementarse como afirmado son los siguientes: (ver tabla 3)

Tabla 3

Requisitos de agregados para afirmado

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de los ángeles (gradación A), máximo 500 revoluciones	E-218	50
Durabilidad (O)		
Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) -Sulfato de sodio -Sulfato de magnesio	E-220	50
Limpieza (F)		
Limite líquido, máximo (%)	E-125	40
Índice de plasticidad (%)	E-125 Y E-126	4-9
Característica	Norma de ensayo INV	Requisito
Limpieza (F)		
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2
Contracción lineal	E-127 o E-129	Tabla 311-3
Resistencia del material (F)		
CBR (%): Porcentaje asociado al grado de compactación mínimo específico, el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión	E-148	>=15

Nota. Fuente: Capítulo 3, artículo 311, Especificaciones generales de construcción de carreteras (INVIAS, 2013)

Tabla 3

Franjas granulométricas del material de afirmado

Tipo de gradación	Tamíz (mm/u. s standard)							
	37.5	25	19	9.5	4.75	2	0.425	0.075
	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% Pasa								
A-38	100	-	80-100	60-85	40-65	30-50	13-30	9-18
A-25	-	100	90-100	65-90	45-70	35-55	15-35	10-20
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (+/-)	0%		7%			6%		3%

Nota. Fuente: Capítulo 3, artículo 311, Especificaciones generales de construcción de carreteras (INVIAS, 2013).

Tabla 4

Relaciones que debe cumplir el material de afirmado

Relación	Requisito
<u>%pasa tamiz No 200</u>	0.25 a 0.45
% pasa tamiz No.10	
<u>%pasa tamiz No 200</u>	$\leq 2/3$
% pasa tamiz No.40	
{(% pasa tamiz de 1") - (% pasa tamiz No. 10)} x {% pasa tamiz No. 4}	16 a 34
(% de contracción lineal) x (% pasa tamiz No 40)	100 a 240

Nota. Fuente: Capítulo 3, artículo 311, Especificaciones generales de construcción de carreteras (INVIAS, 2013).

Con el objetivo de evitar segregaciones y garantizar unos adecuados niveles de compactación y resistencia de la estructura de pavimento, el material implementado para la construcción del afirmado deberá tener una curva granulométrica uniforme y sensiblemente paralela a los límites de la franja, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior de un tamiz adyacente y viceversa. (Orobio, 2013), se recomienda para el tamaño máximo nominal de los agregados, no exceder en 1/3 del espesor de la capa compactada.

6.3 Casos de implementación de pavimentos no convencionales

6.3.1 San Pablo – Cañabral, Departamento de Bolívar Colombia

Considerado uno de los municipios con mayores afectaciones por parte del conflicto armado, se encuentra ubicado en el Magdalena Medio, donde goza de un clima cálido con la temperatura media anual de 28.4°C y una precipitación media anual de 2651 mm.

En el año 2002 se realizó un estudio para la optimización de la estabilización de un tramo de 23 km de afirmado, realizando comparativas entre cemento y 5 aditivos comerciales de los cuales 3 aceleran y activan los procesos de cristalización del cemento, en donde se forman largas agujas conectoras cristalinas, por lo que su aplicación debe estar acompañada de porcentajes altos de este producto, del orden del 4 al 6.5% respecto al peso seco de los agregados; los otros dos aditivos funcionan como un agente tensoactivo aniónico y una emulsión polimérica respectivamente, este último como sustituto del asfalto. Los materiales de las capas granulares existentes en la carretera correspondían a gravas y arenas de ríos o a depósitos de terrazas aluviales de gravas en matriz areno-arcillosa con índices de plasticidad del orden del 10 al 26%. (Campagnoli, 2017)

La comparativa entre las alternativas se realizó tomando los valores de resistencia a la compresión simple para tiempos de curado correspondientes a los 7 y 28 días para probetas de ensayo fabricadas con las mezclas entre los materiales pétreos y los aditivos, también se realizaron pruebas de durabilidad de acuerdo al método de la PCA (Portland Cement Association), en donde se realizan ciclos de inmersión, secado y cepillado para las probetas, esto debido a que al ser una

estabilización y no existir un sello o capa de protección debe analizarse el comportamiento del material cuando hay presencia de agua con la abrasión, para así poder establecer criterios para la selección de la metodología de la estabilización más apropiada. Los análisis de los resultados mostraron que el cemento era el agente estabilizador más apropiado técnica y económicamente, debido a que las probetas que contenía cemento arrojaron valores adecuados en las pruebas de durabilidad. Para las pruebas de resistencia, también se obtuvieron los mejores resultados en las probetas en donde se implementó cemento, llevando a consideración que el costo por m³ del material estabilizado con la inclusión de los aditivos 1 y 2 es aproximadamente igual al costo de añadir un 5% más de cemento a la mezcla, se concluyó que el cemento fue el agente estabilizador más apropiado, una vez analizados y comparados los factores técnicos y económicos de cada una de las alternativas tal como se observa a continuación:

Tabla 5

Comportamiento de los Materiales Estabilizados en las Pruebas de Laboratorio.

Agente estabilizador	Fuente de materiales	RANGO Contenidos Cemento aditivo	RANGO Resistencias 7 días (kg/cm³)	RANGO Resistencias 28 días (kg/cm³)	Durabilidad pérdidas (%)
Cemento		3.0%-9.0%	2.60-15.1	2.7-21.4	4.00-22.0
Cemento + Aditivo 1	Casa de Tabla	4.0% - 6.5% 0.4%-0.65%	12.6-27.0	12.7-38.5	4.20-15.5
Cemento + Aditivo 2	Carigua	4.0%-6.0% 0.5%	10.8-25.0	20.0-34.7	6.70-12.5
Cemento + Aditivo 3	Lorenza	0.0-50(Km/m ³) 0.35 l/m ³	0.00-13.9	0.00-11.9	Desintegración
Aditivo 4	Casa de Tabla	0.33-0.49 (l/m ³)	-	5.9-6.7	Desintegración
	Carigua	0.33-0.49 (l/m ³)	9.0-11.3	8.10-10.2	Desintegración

*Tabla 6**Comportamiento de los Materiales Estabilizados en las Pruebas de Laboratorio.*

Aditivo 5	Lorenza	1.0-1.6 (l/m ³)	8.3-9.1	7.7-8.9	Altas en el 2do ciclo
-----------	---------	--------------------------------	---------	---------	--------------------------

Nota.Fuente: Doing Business Report (Banco mundial,2016)

6.3.2 Programa piloto de concreto sintético en el corregimiento de Guabitas, municipio de Guacarí.

En el año 2016 se realizaron pruebas sobre una vía Inter veredal del municipio de Guacarí, se realizó una estabilización del suelo con un producto denominado RoadCem, proveniente de Holanda, el cual es un producto químico granulado compuesto de metales alcalinos, alcalinotérreos y zeolitas, el cual mejora la respuesta del terreno y transforma sus propiedades, obteniendo un concreto zeolitico sintético con nanotecnología que compacta el suelo y actúa como un impermeabilizante, protegiendo las capas del terreno de las filtraciones, lo cual es uno de los principales factores de daño en las vías terciarias del país.

La prueba se realizó en un tramo de 200 metros, en donde se realizaron unas pruebas iniciales para determinar la dosificación adecuada del material con el material del terreno, posterior a esto se llevó a cabo la aplicación del producto en combinación con el material del terreno y cemento, y realizándose la conformación y compactación del material con una motoniveladora. Las pruebas iniciales fueron satisfactorias, a la espera de analizar el comportamiento de la vía a largo plazo, realizando ensayos de densidad y observando la respuesta física sobre el terreno.

6.3.3 Programa de caminos básicos de Chile

Con el propósito de establecer un programa para la realización del mantenimiento de las vías terciarias, mejorando los niveles de servicio y reduciendo los costos de mantenimiento; la dirección nacional de vialidad del ministerio de obras públicas de Chile adelanta dentro de las

actividades de conservación el programa denominado “caminos básicos”, el cual corresponde a vías de bajos volúmenes de tránsitos, entre 40 y 250 vehículos por día.

El programa aglutina soluciones técnicas para el mejoramiento y conservación de las vías:

- Aplicación de sales y productos ligantes para la estabilización de capas granulares.
- Aplicación de sellos asfálticos o tratamientos superficiales para la protección de capas granulares,
- Combinación de las dos alternativas anteriores, en donde se establezca el material existente como base o subbase y se construya una protección asfáltica como superficie de rodadura.

Posterior a la aplicación de este programa se llegó a la conclusión que se debía redefinir como un programa de mejoramiento y no de conservación, para así poder anualmente destinar recursos estableciendo metas de ejecución y hacer del programa una política de estado, lo cual sucedió en el año 2011 al observarse el buen desarrollo del programa, logrando mantener los caminos ya intervenidos bajo esta modalidad con los estándares ya establecidos para los mismos (Campagnoli, 2017).

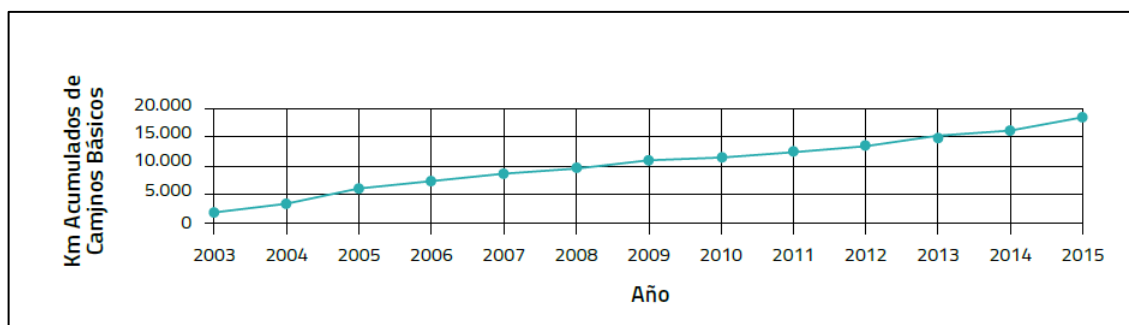


Figura 7- Evolución del Programa “Caminos Básicos”

Fuente: Doing Business Report (Banco mundial, 2016)

6.4 Generalidades de las zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos hidratados, las cuales pueden ser de origen natural o sintético. Se forman como resultado de las erupciones volcánicas mediante reacciones hidrotérmicas de rocas volcánicas de silicio y ricas en álcalis.

De manera general, las zeolitas están compuestas por aluminio, silicio, sodio, calcio, magnesio, potasio y agua; cuyas propiedades físicas las proveen de aspectos únicos para una amplia variedad de aplicaciones prácticas. Las propiedades físicas de una zeolita se pueden considerar de dos formas, primero desde el punto de vista de sus propiedades naturales, las cuales incluyen la morfología, tipos del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión; y segundo desde el punto de vista de su desempeño físico como producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características de brillantez, color, área superficial, tamaño de la partícula, dureza, resistencia al desgaste, entre otras. (Jimenez, 2004)

Las zeolitas inicialmente se clasificaron de acuerdo con su apariencia externa, para luego clasificarse en función de sus características estructurales y de las propiedades fisicoquímicas. En la naturaleza se han encontrado aproximadamente 40 zeolitas, pero se han desarrollado también más de 130 estructuras sintéticas. (*ver figura 8*)

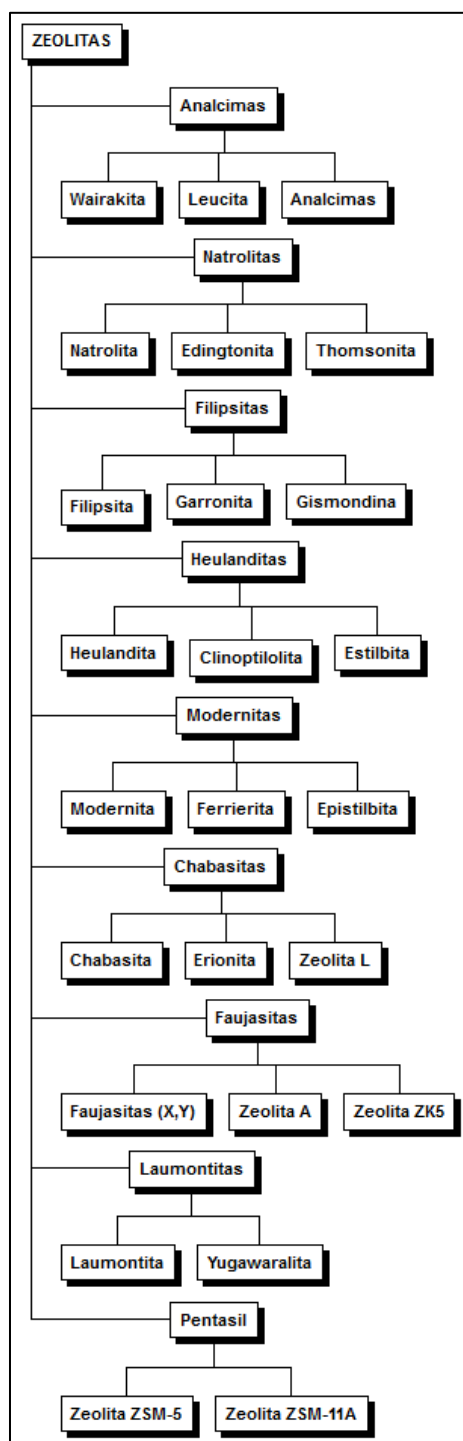


Figura 8-Clasificación Zeolitas Naturales

Nota. Fuente: Caracterización de minerales zeolíticos mexicanos, M. Jiménez (2004)

Colombia posee un muy buen potencial en cuanto a la formación de zeolitas clinoptilolita, la cual tiene la mayor capacidad de absorción, de intercambio iónico y de mayor porosidad. En varias regiones del país como el Valle del Cauca, Cauca y Antioquia se cuenta con ambientes geológicos idóneos para su formación, no obstante, el país no cuenta con ninguna cantera que realice la explotación de zeolitas, por lo que es importada desde países como Ecuador. No obstante, las investigaciones realizadas son fuente de información que permitan abrir nuevos campos de aplicaciones y la explotación de este material en Colombia. Los países que se caracterizan por la formación y explotación de zeolitas son Japón, Ecuador, Cuba y Brasil; en la industria también se producen de manera artificial, pero su costo es muy elevado (Tobón, Bello, & Alvarez, 2013).

Algunas de las aplicaciones de las zeolitas en la industria se pueden encontrar gracias a sus propiedades adsorbentes, como intercambiadores iónicos y como catalizadores o soporte de catalizadores, tal como se resume a continuación, donde destaca como un factor ambiental positivo la captura de NOx y Sox proveniente de combustibles fósiles presentes en las carreteras:

Tabla 7

Aplicación industrial de las zeolitas

Adsorbente	Tamices moleculares	Intercambios Iónico
Endulzamiento de gases (remoción de azufre del gas natural)	Separación de parafinas lineales de ramificadas Xilenos	Ablandamiento de aguas industriales y domésticas (remoción de Ca ⁺² y Mg ⁺²)
Purificación de gases industriales (adsorción de CO ₂ y agua)	Olefinas	Almacenamiento de desechos radioactivos (Cs ⁺ y Sr ⁺²)
Ayuda ambientalmente a la adsorción de NOx y SOx provenientes de la combustión de gasolinas		Catalizadores y soportes de catalizadores, entre otros

Nota. Fuente: Caracterización de materiales zeolíticos Mexicanos.(Jimenez, 2004)

En Colombia, la empresa ZEOCOL S.A.S ubicada en la ciudad de Armenia, Quindío desde el año 2009 comercializa las zeolitas, en productos agropecuarios, promoviendo el uso de este mineral. Dicha empresa cuenta con minas y una planta propia en Guayaquil, Ecuador y actualmente distribuye sus productos en gran parte del territorio colombiano impulsando la productividad del agro, el cual es su principal fuerte para usos agrícolas, animales y mejoramientos del suelo en cuanto a su fertilización. Las propiedades de este mineral, comercializado por esta empresa se resumen a continuación, siendo este un tipo de zeolita clinoptilolita:

Tabla 8

Composiciones de la Zeolita Producida por Zeocol S.A.S.

Elemento	Norma de ensayo	Resultado
Potasio total (K₂O)	NTC 202 EMISIÓN	(0.15-3.17) %
Calcio total (CaO)	NTC 1369 ABSORCIÓN ATOMICA	(1.5-2.75) %
Magnesio Total (Mgo)	NTC 1369 ABSORCIÓN ATOMICA	(0.5-0.83) %
Hierro Total (Fe)	NTC 1369 ABSORCIÓN ATOMICA	(1-2.0) %
Aluminio (Al₂O₃)	LBC 89 COLORIMETRÍA	(1-15.8) %
Sodio Total (Na)	NTC 1146 EMISIÓN	(1.02-1.16) %
Silicio Total (SiO₂)	LBC 89 COLORIMETRÍA	(63.13-78.2) %

Nota. Fuente: Zeocol SAS, Zeolitas de Colombia.

Tabla 9

Parámetros de la Zeolita Producida por Zeocol S.A.S.

Parámetro evaluado	Norma de ensayo	Concentración
PH	NTC 5167 POTENCIO METRICO	7.5 %
Humedad	NTC 35 GRAVIMETRÍA	(0.3-5.0) %
Retención de humedad	NTC 5167 GRAVIMETRÍA	(30-45) %
Capacidad de intercambio iónico	NTC 5167 VOLUMETRÍA	(50-89) me/100g

Clinoptolita	DIFRACCIÓN DE RX	(43-69) %
---------------------	-------------------------	------------------

Nota. Fuente: Zeocol SAS, Zeolitas de Colombia

Tabla 10

Propiedades Físicas de la Zeolita Producida por Zeocol S.A.S.

Parámetro evaluado	Concentración
Estabilidad acida	0-7 (pH)
Estabilidad alcalina	7-13(pH)
Densidad de mena	1390 kg/m ³
Capacidad de intercambio catiónico (CEC)	1.0-2.2
Color blanco	Reflectancia óptica 85
Resistencia a la trituración	176 kg/m ³
Dureza	3.5-4.0 Mohs
Índice de abrasión	24
Radio molecular	5.1 (Si/Al)
pH (natural)	8.0
Tamaño de poro	4.0 Å
Volumen de poros	52% max
Resistividad	9000 omhs/cm
Gravedad específica	2.2-2.4
Área superficial	40 m ² /g

Nota. Fuente: Zeocol SAS, Zeolitas de Colombia

6.5 Evaluación económica en proyectos viales.

Los costos de mejoramiento son uno de los aspectos más relevantes e importantes en la mayoría de los proyectos viales. Las superficies tienen un amplio rango de costos unitarios que varían desde superficies no pavimentadas y no ligadas de bajo costo, hasta superficies pavimentadas con materiales manufacturados. El costo del ciclo de vida corresponde al valor presente neto de una superficie para un periodo de análisis específico, teniendo en consideración los costos iniciales de construcción, los costos de los usuarios y los costos esperados de mantenimiento y de cualquier rehabilitación requerida (CAF & Garavito, 2010).

La proyección del flujo de caja constituye uno de los elementos más importantes del estudio de un proyecto, ya que la evaluación de este se efectuará sobre los resultados que se determinen en ella. Al proyectar el flujo de caja será necesario incorporar información adicional relacionada principalmente con los efectos tributarios de la depreciación, de la amortización del activo nominal, del valor residual, de las utilidades y pérdidas (Sapag Chain, 2008). El flujo de caja de cualquier proyecto está compuesto por elementos tales como: los egresos iniciales de costos (costos de construcción), ingresos y egresos de operación, momentos en los que ocurren estos ingresos y egresos y el valor de desecho salvamento del proyecto.

6.6 Fuentes de emisión de CO₂, para la determinación de la huella de carbono en proyectos viales.

Los impactos ambientales generados en la construcción y rehabilitación de carreteras, se asocia con el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales están relacionados con el cambio climático. En línea con la dedicación dada anteriormente, la huella de carbono de una carretera se puede definir como la cantidad total de CO₂ y otra (directa e indirecta) emitida durante el ciclo de vida completo de una carretera. Dicho ciclo de vida incluye las fases de construcción, operación y mantenimiento.

En general, las emisiones de carbono se calculan a nivel nacional, a menudo utilizando metodologías y valores por defecto sugeridos por un panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC). Estas estimaciones nacionales incluyen estimaciones sectoriales, que se basan en un análisis sectorial detallado. Algunas naciones han realizado inventarios de carbono para el

sector vial, analizando su contribución al total de las emisiones de GEI generadas por el sector de transporte (Asian Development Bank, 2010).

Muchos cálculos de la huella de carbono se basan en el comportamiento de consumo del hogar o individual con el fin de influir en los cambios en el comportamiento hacia un estilo de vida más eficiente de la energía. Por lo general, estas calculadoras de huella simplemente requieren que el usuario ingrese la marca y el modelo de su automóvil y una estimación de los kilómetros recorridos durante un mes o año. Las estimaciones más detalladas se basan en la eficiencia de combustible del vehículo y las variaciones se basan en el comportamiento de conducción. Otros factores identificados, pero normalmente no se incluyen en las calculadoras, son la carga útil del vehículo, las estanterías de viaje u otros accesorios que aumentan la resistencia aerodinámica, el mantenimiento, la presión incorrecta de las llantas, los factores del terreno, el clima o el estilo de manejo agresivo y el frenado fuerte.

La federación internacional de carreteras (IRF) afirma que mejorar la fluidez del tráfico, reducir la congestión y, por lo tanto, reducir el consumo de combustible es una forma eficaz de reducir las emisiones de GHG. Las medidas específicas y su potencial para reducir las emisiones de GEI incluyen (i) ampliar la red de carreteras (40%), (ii) reemplazar cruces con puentes (30%), (iii) construir puentes (25%), (iv) eliminar pasos a nivel (13.5%), (v) preselección en semáforos (15%), (vi) gestión de flujo de tráfico (30%), (vii) luces de tráfico sincronizadas (40%), (viii) reducción de atascos de tráfico (22%), (ix) gestión del tráfico urbano (40%), (x) gestión del tráfico ex urbano (30%) y (xi) gestión del tráfico en autopistas (20%) (Asian Development Bank, 2010).

Se han identificado las siguientes fuentes de emisión de CO_2 , directas e indirectas asociadas a las fases de construcción, mantenimiento y operación de proyectos viales:

Fase de construcción de carreteras

(i) Materiales de construcción

Carbono incorporado en materiales de construcción: las emisiones de CO_2 se liberan durante la producción de materiales de construcción. El proceso de producción incluye la extracción o

extracción de materias primas, transporte, procesamiento y distribución. Estas emisiones son emisiones indirectas ya que no se liberan en el sitio de construcción sino en otros lugares.

En lo sucesivo, estas emisiones indirectas se denominarán "carbono incorporado". El carbono incorporado se refiere a las emisiones de CO_2 en todas las etapas del proceso de producción de un bien, desde la extracción de materias primas hasta la distribución del producto terminado al consumidor (Asian Development Bank, 2010).

(ii) Combustibles fósiles

(a) Las emisiones directas debidas a la combustión de combustibles fósiles: Combustibles fósiles como diésel, aceite de horno y diésel ligero (LDO), entre otros, se utilizan en sitios de construcción de carreteras en diferentes tipos de maquinaria y vehículos de construcción. La combustión de estos combustibles fósiles en los motores produce emisiones directas de CO_2 (Asian Development Bank, 2010).

(b) Carbono incorporado en combustibles fósiles: los combustibles fósiles utilizados en los sitios de construcción también tienen ciclo de vida, emisiones de CO_2 o emisiones de CO_2 incorporadas liberadas durante la producción y distribución de estos combustibles fósiles. La producción de combustibles fósiles involucra etapas de extracción, transporte, procesamiento y distribución de combustible crudo, cada uno de los cuales emite CO_2 (Asian Development Bank, 2010).

(iii) Eliminación de vegetación.

(a) Pérdida potencial de secuestro de carbono: La construcción de caminos requiere la limpieza de la vegetación, lo que puede ocasionar que se pierda una cierta cantidad de potencial de secuestro de carbono. Sin embargo, a los contratistas de caminos generalmente se les exige que planten nuevos árboles para compensar las pérdidas, por lo tanto, compensan el potencial de secuestro perdido debido a los árboles cortados durante la construcción. Por lo tanto, no se incluye el potencial de secuestro de CO_2 perdido debido a la eliminación de la vegetación en la huella de carbón (Asian Development Bank, 2010).

(b) Emisiones directas debidas a la combustión de leña: los árboles retirados del sitio de construcción pueden utilizarse para diferentes usos finales, como madera, leña de combustible, etc. Si los árboles o sus partes se utilizan como leña para combustible en unidades de fabricación,

hogares, campamentos de construcción, etc., la combustión de leña contribuiría a las emisiones directas de CO_2 . Se incluye esta pérdida de CO_2 debido a la quema de madera en la huella de carbono de la sección de la carretera que se está construyendo (Asian Development Bank, 2010).

(iv) Maquinaria y vehículos de construcción.

Carbono incorporado en maquinaria y vehículos: se utilizan diferentes tipos de maquinaria y vehículos durante las fases de construcción y mantenimiento de carreteras; la producción de estas máquinas y vehículos produce emisiones de CO_2 . Estas emisiones, sin embargo, no se tienen en cuenta en la huella de carbono de la carretera, ya que la misma maquinaria y vehículos de construcción se utilizarían para construir una serie de carreteras. La contabilización del carbono incorporado de estos en la huella de carbono de todos los caminos puede resultar en un conteo múltiple, por lo tanto, el carbono incorporado en la maquinaria y los vehículos de construcción se excluye de la huella de carbono de la carretera. Teóricamente, sin embargo, calculando los kilómetros de caminos construidos por cada pieza de maquinaria en su vida útil y la atribución de una parte del carbono incorporado a la carretera en cuestión son posibles (Asian Development Bank, 2010).

Fase de Operación Vial

(i) combustibles fósiles

(a) Emisiones directas debido a la combustión de combustibles fósiles: la fase de operación de la carretera implica el movimiento de vehículos motorizados que emiten CO_2 debido a la combustión del combustible. El CO_2 emitido por los vehículos que se mueven en la carretera se incluye en la huella de carbono de la carretera.

(b) Carbono incorporado en combustibles fósiles: los combustibles fósiles utilizados en los vehículos tienen un ciclo de vida de emisiones de CO_2 , o emisiones de CO_2 incorporadas liberadas durante la producción y distribución de estos combustibles fósiles. Estas emisiones incorporadas se incluyen en la huella de carbono de la carretera.

(ii) Vehículos

Carbono incorporado en los vehículos: los vehículos que se mueven en carreteras también tienen carbono incorporado que se emite durante la producción de vehículos. Esto, sin embargo, no se tiene en cuenta en la huella de carbono de la carretera para evitar el conteo múltiple. El mismo vehículo se moverá en diferentes caminos y si su carbono incorporado se incluyera en la huella de carbono de todos los tramos de carreteras, se produciría un conteo múltiple. A pesar de que el carbono incorporado en los vehículos no está incluido en la huella de carbono de la carretera, debe incluirse en la huella de carbono de todo el sector vial nacional.

En cuanto a los equipos de construcción, sería teóricamente posible calcular el número promedio de kilómetros que cubre cada tipo de vehículo y calcular la proporción gastada en la carretera que se está examinando. Sin embargo, esto implicaría múltiples suposiciones y una considerable incertidumbre (Asian Development Bank, 2010).

Fase de Mantenimiento Vial (Rutina y Periódica)

(i) Materiales de construcción

Carbono incorporado en materiales de construcción: los trabajos de mantenimiento de carreteras requieren materiales de construcción, todos los cuales tienen carbono incorporado debido a su proceso de producción y extracción (Asian Development Bank, 2010).

(ii) combustibles fósiles

(a) Emisiones directas debidas a la combustión de combustibles fósiles: el mantenimiento vial requiere el uso de combustibles fósiles en diferentes tipos de maquinaria de construcción y vehículos. La combustión de estos combustibles fósiles produce emisiones directas de CO_2 (Asian Development Bank, 2010).

(b) Carbono incorporado en combustibles fósiles: los combustibles fósiles utilizados durante los trabajos de mantenimiento han incorporado el contenido de carbono debido a su proceso de producción y distribución, y esto está incluido (Asian Development Bank, 2010). Las fuentes de emisiones de CO_2 incluidas en la huella de carbono de todo el ciclo de vida de una carretera se resumen en a continuación:

Tabla 11

Huella de Carbono de una Carretera y Fuentes de Emisiones de CO₂.

CO ₂ Sources	Construction materials	Fossil Fuels		Removal of vegetation	Machinery/Vehicles	
Road Life Cycle Stages	Embodied Carbon	Embodied Carbon	Direct CO ₂ Emissions	Carbon Sequestration Potential Lost	Direct CO ₂ Emissions	Embodied Carbon
Road Construction	√	√	√	√	√	X
Road Operation	X	√	√	X	X	X
Road Maintenance	√	√	√	X	X	X

Nota. Fuente: Methodology for estimating carbon footprint of road projects (Asian Development Bank, 2010)

7. METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo tres fases durante la metodología realizada para efectuar los análisis en los aspectos técnicos, financieros y ambientales de las zeolitas como material alternativo para la construcción de estructuras de pavimento en afirmado en vías de bajos volúmenes de tránsito, en donde se llevaron a cabo una serie de pasos para la identificación de parámetros que pudiesen determinar puntos de comparación entre las zeolitas y el material de afirmado usado de manera convencional el cual se rige a unos parámetros de calidad y aceptación por parte del INVIAS y en contraste con los factores económicos y ambientales ampliar su rango de aplicaciones a la construcción de vías con bajos volúmenes de tránsito.

Así pues, se planteó la siguiente metodología de análisis y comparación la cual se resume a continuación (*ver figura 9*).

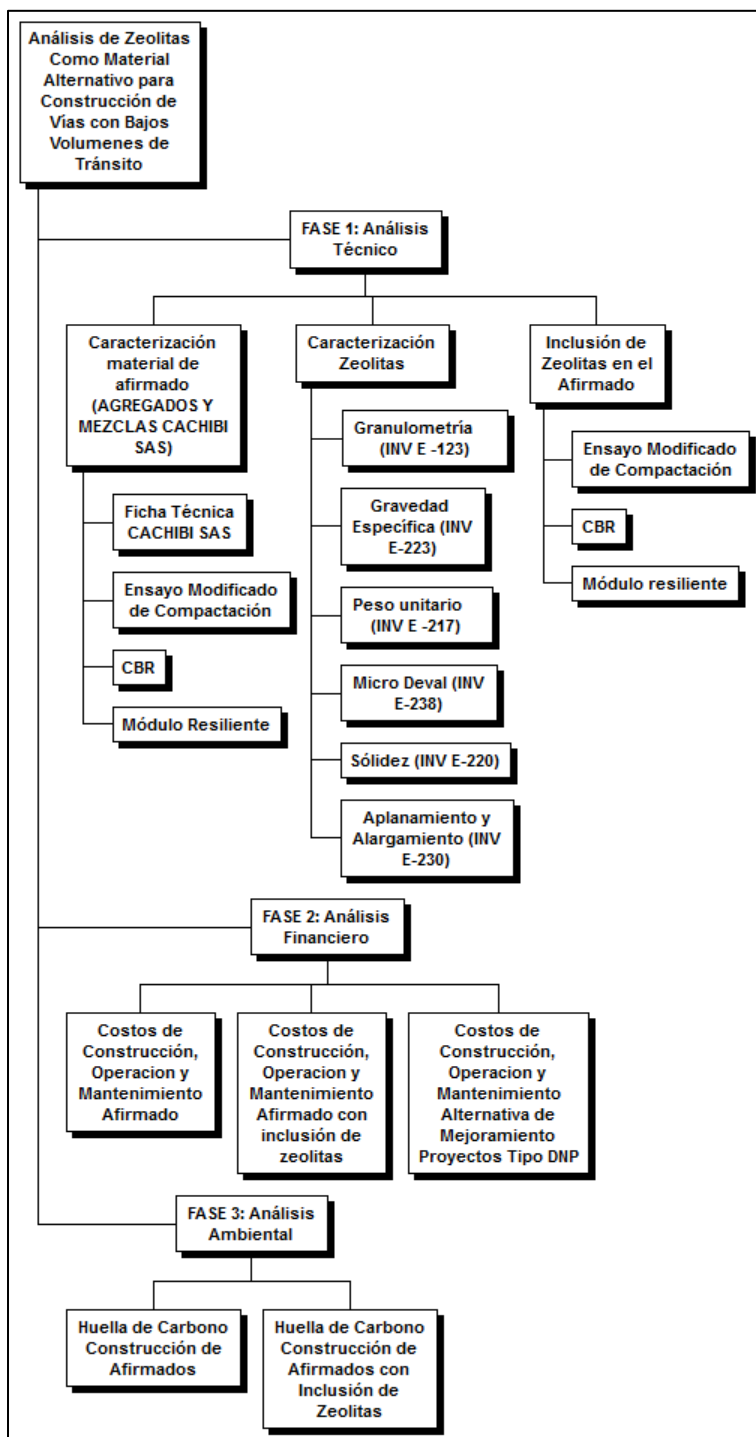


Figura 9 - Metodología para Análisis Técnico, Económico y Ambiental de las Zeolitas Como Material Alternativo en la Construcción de Vías con Bajos Volúmenes de Tránsito

Nota. Fuente: Elaboración propia

7.1 FASE 1 (ANÁLISIS TÉCNICO)

Se contempla el análisis de los factores y propiedades de un material de afirmado A25 de acuerdo con los parámetros establecidos por el INVIAS, inicialmente como punto de comparación se analizó un material granular proveniente de la cantera AGREGADOS Y MEZCLAS CACHIBI SAS, el cual cuenta con una ficha técnica que permite conocer las características físicas de este material; posteriormente mediante el proceso de tamizado se clasificaron las partículas para la construcción de la curva granulométrica correspondiente de un afirmado A25, una vez este fue obtenido, se realizó el ensayo modificado de compactación que permitió conocer la máxima densidad del material y su humedad óptima. Posteriormente, obtenidos estos parámetros se realizó el ensayo para determinar el valor del CBR del material, y conocer así, la capacidad de soporte del afirmado A25 para emplearse en una estructura de pavimento, dicho valor mediante correlaciones permitió conocer el valor del módulo resiliente del afirmado como superficie de rodadura en las vías de tercer orden. Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento con las zeolitas, en donde inicialmente se realizó la caracterización para determinar las propiedades físicas de este material como agregado para la construcción de carreteras; al determinarse la granulometría del material suministrado por ZEOCOL SAS, se pudo constatar que los tamaños de estas partículas no satisfacían los requeridos para la construcción de la curva del afirmado A25, por ende se analizó su desempeño mediante su inclusión en el material de afirmado analizado inicialmente, reemplazándose las franjas granulométricas correspondientes a los tamices #4 y #10, en donde se retuvieron los mayores porcentajes de zeolita, y validando si dicha mezcla cumple con todos los parámetros de aceptación estipulados para las mezclas de afirmado.

Después de obtener la mezcla de afirmado con inclusión de zeolitas se realizó el ensayo modificado de compactación para determinar la máxima densidad y la humedad óptima de compactación de este material, además de los ensayos de CBR y la obtención del valor del módulo resiliente.

7.2 FASE 2 (ANÁLISIS FINANCIERO)

Para este análisis se tomaron como referencia los costos de cada uno de los materiales implementados, su procedencia y posteriormente como solución para mejoramiento de vías terciarias, con el fin de poder aplicar los criterios y metodologías de diseño; se analizó un caso de aplicación para un tramo de vía de 300 metros en el municipio de Florida Valle del Cauca, en donde de acuerdo con las características de la zona se realizó un diseño de una estructura de afirmado, implementando así el afirmado convencional y el afirmado con inclusión de zeolitas. Por otro lado, se tuvo en cuenta las soluciones convencionales que se seleccionan en el país, bajo la modalidad de proyectos tipo del DNP, en donde se cuenta con 9 alternativas que se seleccionan a partir de una matriz multicriterio que se basa en datos de la zona y se diseñan a partir de la herramienta de cálculo presentada por la comunidad virtual de caminos rurales (DNP, USAID, & RURALES, n.d.). Definidas las tres alternativas de diseño, se determinaron los costos de construcción, mantenimiento y operación de cada una de estas alternativas, que permiten establecer las ventajas y desventajas económicas de cada una de estas. Se proyectó el flujo de caja a un periodo de 10 años con la inflación y se calcularon el valor presente neto (VPN), el costo anual equivalente y el costo por kilómetro, descontando los flujos de caja según la tasa indicada por el DNP para este tipo de proyectos (9,5% + inflación) (Departamento Nacional de Planeación, 2019). Finalmente, se realizó una simulación empleando el software Risk simulator, para evaluar el riesgo del proyecto y las variaciones en costos, como resultado de las variaciones en los volúmenes de tránsito y espesores de la estructura de pavimento.

7.3 FASE 3 (ANÁLISIS AMBIENTAL)

Se realizó la evaluación de la huella de carbono para cada una de las alternativas evaluadas correspondientes a la construcción de una estructura de pavimento en afirmado, afirmado con inclusión de zeolitas y una base granular estabilizada con emulsión asfáltica más un tratamiento superficial doble como alternativa convencional establecida por los proyectos tipo del DNP, esto con el fin de poder establecer si las zeolitas presentan ventajas en el aspecto ambiental, en comparación con la metodología tradicional del afirmado como punto de referencia de la investigación. Para ello, se analizaron la fases constructivas en el caso de aplicación

correspondiente al mejoramiento de 300 metros de vía, el cual se ha planteado según las variables de la zona, tales como la capacidad de soporte de la subrasante y el número total de ejes equivalentes para el periodo de diseño de 10 años.

8. RESULTADOS OBTENIDOS

8.1 FASE 1 (ANÁLISIS TÉCNICO):

8.1.1 MATERIAL GRANULAR DE AFIRMADO

8.1.1.1 Caracterización material granular de afirmado

Como afirmado se implementó un material granular proveniente de la cantera de AGREGADOS Y MEZCLAS CACHIBI SAS en el municipio de Yumbo, el cual se obtiene a partir de la mezcla de distintos materiales, producto de la trituración de roca sólida; estos agregados son de origen volcánico y se encuentran constituidos por diabasas y basaltos, cumpliendo con los parámetros de calidad para ser implementados en proyectos de infraestructura vial. Dicho material de acuerdo con la cantera que lo produce cuenta con las siguientes características: (*ver tabla 12*)

Tabla 12

Propiedades Físicas del agregado producido por MEZCLAS Y AGREGADOS CACHIBI S.A.S.

MATERIAL GRANULAR AGREGADOS Y MEZCLAS CACHIBI S.A.		
Ensayo	Unidad	Valor
Masa unitaria	Tn/m ³	1.9
Sanidad sodio	%	2.5
Desgaste micro deval	%	21
Partículas largas	%	18.7
Partículas planas	%	21.1

Nota. Fuente: Mezclas y agregados CACHIBI SAS

De acuerdo con los parámetros establecidos en la tabla 311-2 del capítulo 3 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS, se establece la siguiente granulometría para un afirmado A25, sobre el cual se realizarán los análisis para el comparativo objeto del trabajo de grado. (ver tabla 13)

Tabla 13

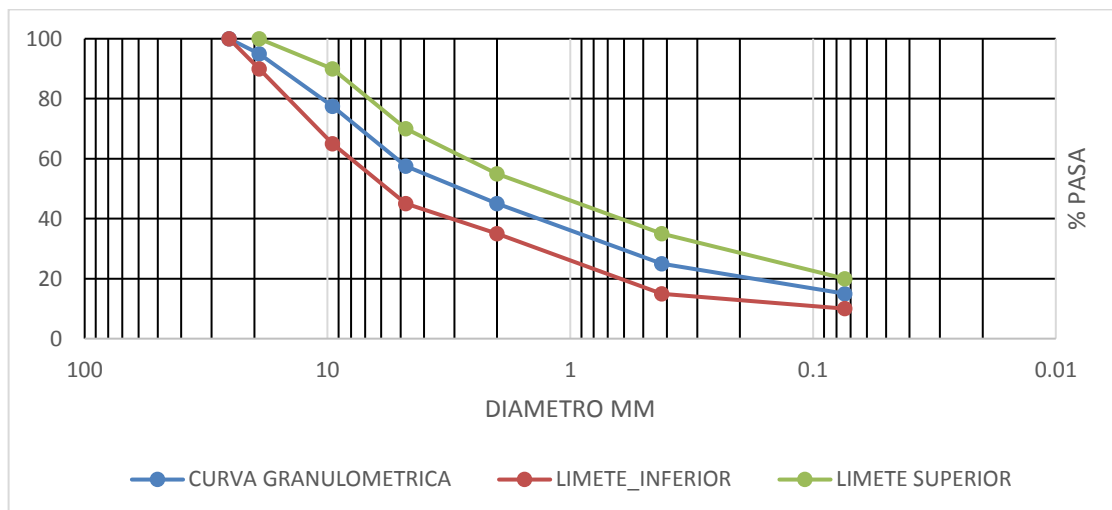
Granulometría afirmado A25.

TAMIZ	ABERTURA	%PASA	FRANJAS A25	
1"	25.4	100	100	
3/4"	19.1	95	90	100
3/8"	9.52	77.5	65	90
#4	4.75	57.5	45	70
#10	2	45	35	55
#40	0.42	25	15	35
#200	0.074	15	10	20

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 1

Curva granulométrica afirmado A25.



Nota. Fuente: Elaboración propia

8.1.1.2 Análisis de Proctor modificado para material de afirmado (INV E -142-13)

Se realizó el ensayo modificado de compactación, para poder establecer en un rango de humedades, la curva de compactación del material y lograr determinar su humedad óptima y el peso unitario seco máximo. De acuerdo con la granulometría a emplear asociada con un afirmado A25, para preparar las muestras se seleccionó una muestra de 50 kg de afirmado, obteniéndose las siguientes dosificaciones por tamiz para la construcción de la curva granulométrica A25 presentada previamente.

Tabla 14

Pesos para construcción de granulometría afirmado A25.

TAMIZ	ABERTURA	%PASA	%RETENIDO	% RETENIDO		PESO	
				ACUMULADO	RETENIDO	FRANJAS A25	
1"	25.4	100	0	0	0	100	
3/4"	19.1	95	5	5	2.5	90	100
3/8"	9.52	77.5	22.5	17.5	8.75	65	90
#4	4.75	57.5	42.5	20	10	45	70
#10	2	45	55	12.5	6.25	35	55
#40	0.42	25	75	20	10	15	35
#200	0.074	15	85	10	5	10	20
			100	15	7.5		

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 10- Construcción de curva granulométrica afirmado A25

Nota. Fuente: Elaboración propia

Se realizó el ensayo bajo la metodología de 5 capas compactadas a 56 golpes cada una de ellas, repitiéndose el proceso para 4 humedades de moldeo, con el fin de determinar la curva de compactación que asocia las humedades de moldeo con sus respectivos pesos unitarios, determinándose así la humedad óptima y el peso unitario seco para el afirmado en estudio. Obteniéndose así los siguientes resultados:

Tabla 15

Humedades de moldeo ensayo Proctor modificado.

Prueba	W molde (g)	W molde + muestra húmeda (g)	Volumen molde (cm ³)	W tara (g)	W tara + muestra húmeda (g)	W tara + muestra seca (g)
1	3267	8298	2185	116.1	473.3	462.7
2	3267	8602	2185	106.2	763.9	730.3
3	3267	8792	2185	66.5	513	481.2
4	3267	8656	2185	116.8	875.5	814.6

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez compactadas las muestras, se determinaron las humedades de cada una y su respectivos pesos unitarios, en sus condiciones secas y húmedas, valores con los cuales se determinó la curva de compactación del material de afirmado.



Figura 11 - Humedades de moldeo para construcción de curva de compactación

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 16

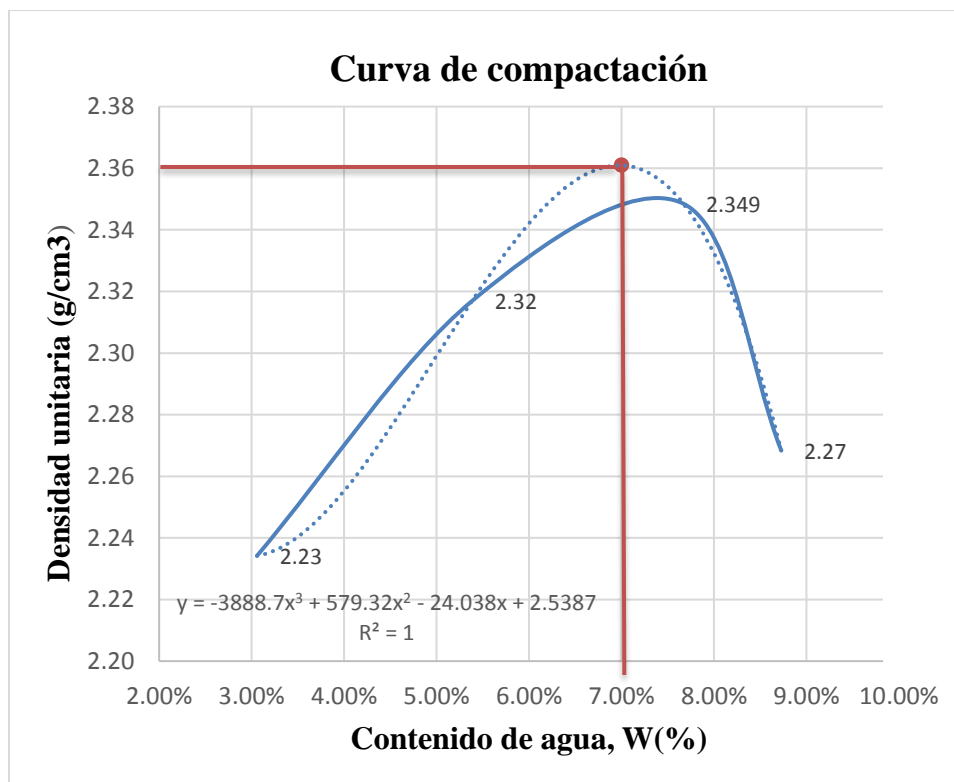
Pesos unitarios ensayo Proctor modificado

Prueba	Humedad %	Densidad húmeda (g/cm ³)	Densidad seca (g/cm ³)	Peso unitario seco teórico (kN/m ³)	Peso unitario húmedo (kN/m ³)	Peso unitario seco (kN/m ³)
1	3.06%	2.30	2.23	2.23	22.58	21.91
2	5.38%	2.44	2.32	2.28	23.94	22.72
3	7.67%	2.53	2.349	2.35	24.80	23.03
4	8.73%	2.47	2.27	2.21	24.19	22.25

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2

Curva de compactación afirmado A25.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Determinándose así la humedad óptima del afirmado del 7.00% y un peso unitario seco máximo de 2.36 g/cm³.

8.1.1.3 Determinación de CBR para afirmado

Con el fin de evaluar la resistencia potencial del material de afirmado, se determinará el CBR con el contenido óptimo de agua, hallado en el ensayo de compactación modificado descrito previamente. Partiendo de un valor de humedad óptimo correspondiente al 7.0%, se prepararon 3 especímenes con dicho contenido de agua, una vez se conoció la humedad natural del material, y posteriormente se realizó el proceso de compactación el cual consistió en aplicar 5 capas iguales de material por molde, a diferencia que a las capas de cada molde se les aplicó un número diferente de golpes, correspondiente a 56, 25 y 10 golpes respectivamente, a continuación se resume la información inicial con la preparación de cada uno de los moldes.

Tabla 17

Preparación de muestras ensayo CBR

Preparación de las Muestras y Ensayo de CBR				
Espécimen (N.º)		1	2	3
N.º de Golpes		56	25	10
Humedad (%)	Deseada	7.0	7.0	7.0
	Natural	2.0	2.0	2.0
	Adicional	5.3	5.3	5.3
	Obtenida	7.3	7.3	7.3
Peso de la Muestra (g)	Húmeda	6,000	6,000	6,000
	Seca	5,882	5,882	5,882
Volumen de Agua Adicional (cm³)		312	312	312

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez preparadas las muestras con la adición de agua para garantizar su humedad óptima, se realizó la compactación de los moldes en donde se obtuvieron los pesos unitarios de cada uno de los moldes.

Tabla 18

Preparación de muestras ensayo CBR

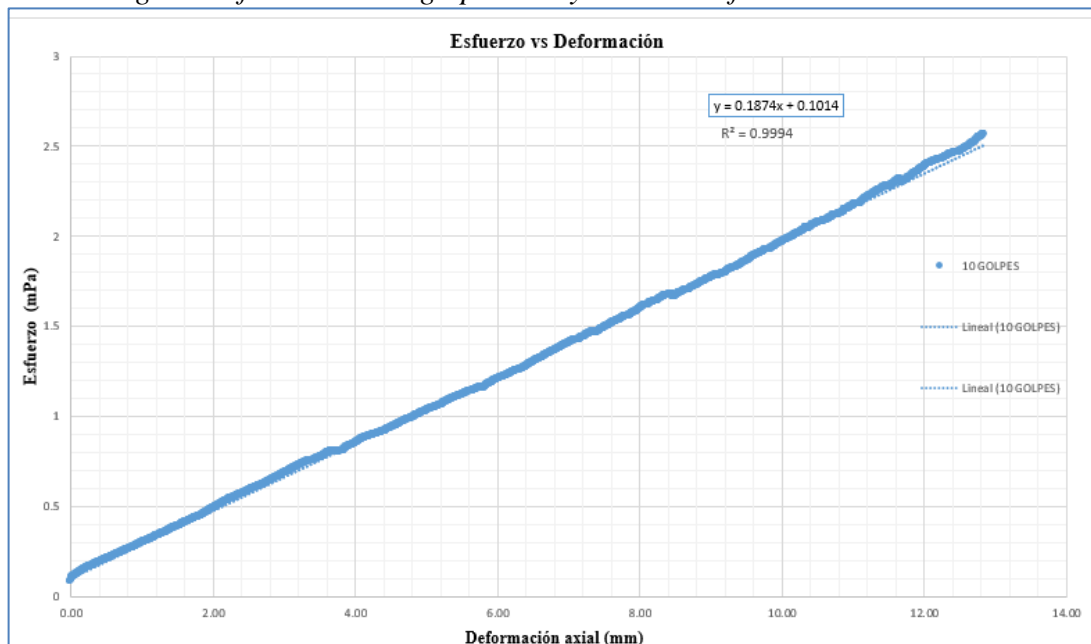
Compactación de moldes para ensayo de CBR				
Molde	1	2	3	
Peso del Molde (g)	4,076	4,880	4,029	
Peso de la Muestra (g)	Húmeda + Molde	9,327	9,972	8,812
	Compacta	5,251	5,092	4,783
	Seca	4,894	4,746	4,458
Volumen del Molde (cm³)	2,055	2,085	2,043	
Densidad Seca (kg/m³)	2,381	2,276	2,182	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Posterior a esto se realizó el periodo de inmersión en agua por 4 días para garantizar que las partículas del material se saturen completamente, finalmente se realizó la penetración de las probetas compactadas y con los datos obtenidos en este proceso se obtuvieron las curvas de deformación vs esfuerzo (*ver gráfica 3,4 y5*).

Gráfica 3

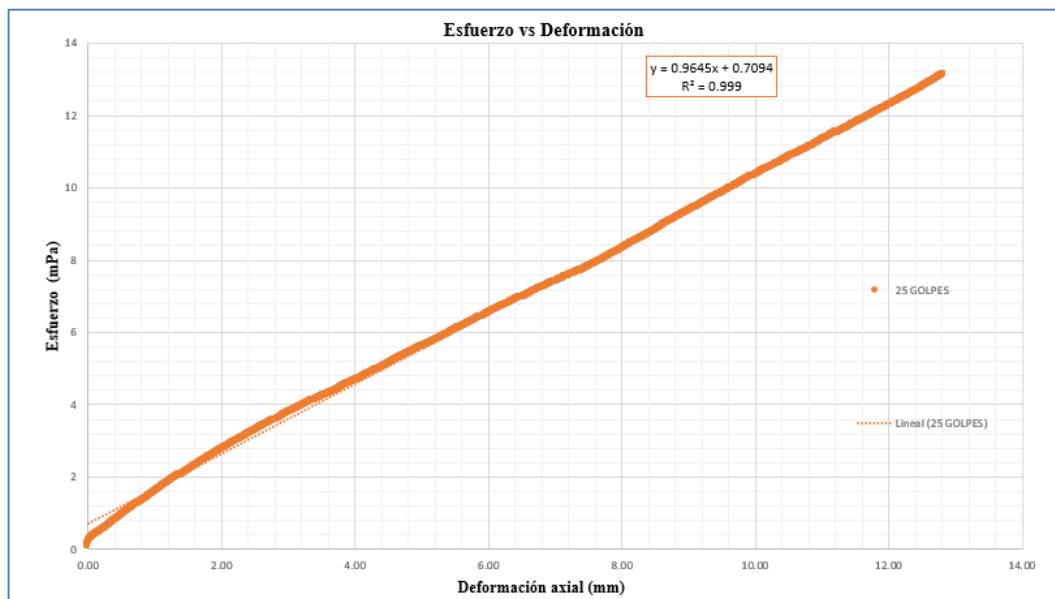
Curva carga vs deformación 10 golpes ensayo de CBR afirmado



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4

Curva carga vs deformación 25 golpes ensayo de CBR afirmado

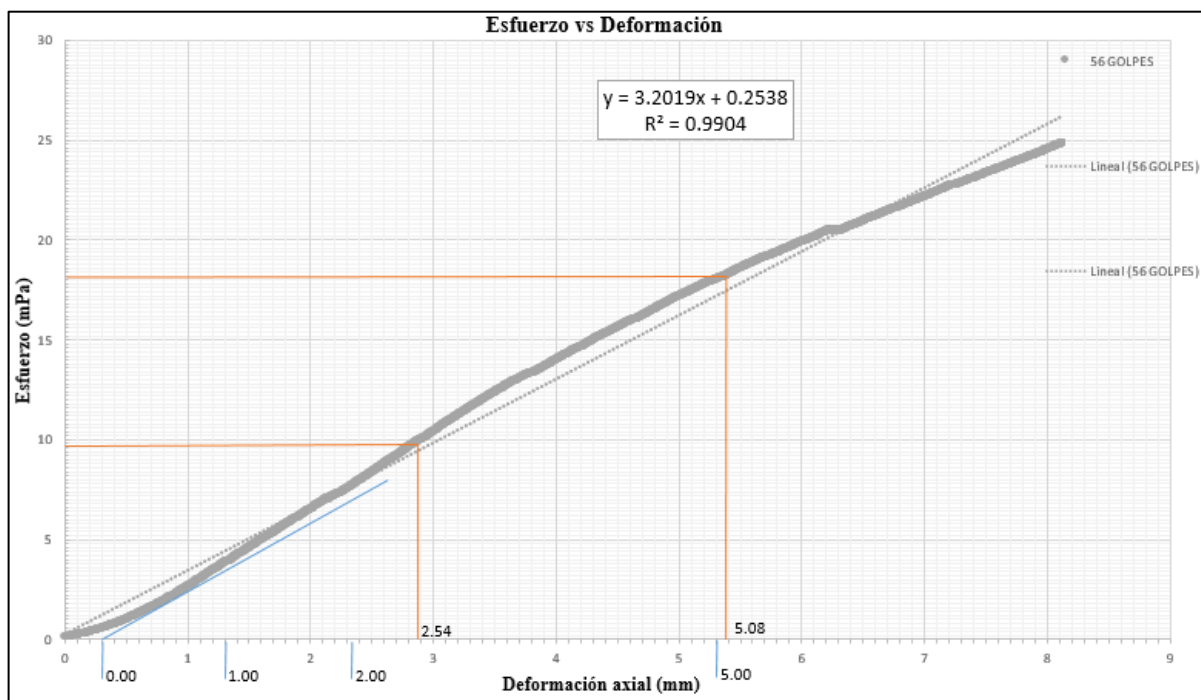


Nota. Fuente: Elaboración propia

Para la gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a la muestra sometida a 56 golpes se realizó la corrección de la curva, la cual presentaba una concavidad hacia arriba en su parte inicial debido a irregularidades en la superficie del espécimen o a otras causas, por tales razones se ajustó el punto cero, trazándose una línea tangente a la curva en el punto de inflexión, como se logra evidenciar a continuación:

Gráfica 5

Curva carga vs deformación 56 golpes ensayo de CBR afirmado



Nota. Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de la relación de soporte CBR, se hizo uso de los esfuerzos corregidos, tomadas de la curva deformación vs esfuerzo, para penetraciones de 2.54 y 5.08 mm, para los cuales se calculan las relaciones de soporte correspondientes dividiéndose estos esfuerzos por los esfuerzos de referencia de 6.9 y 10.3 mPa y multiplicándose por 100.

Tabla 19

Determinación de valores de esfuerzo para las penetraciones a 2.54 y 5.08 mm

Penetración (mm)	Cargas de Referencia (kN)	Valores de carga para penetraciones de 0.1" y 0.2"		
		$y = 0.1874x + 0.1014$	$y = 0.9645x + 0.7094$	56
		10	25	
2.54	6.9	0.58	3.16	9.60
5.08	10.3	1.05	5.61	18.20

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 20

Valores de CBR definitivos y pesos unitarios secos asociados

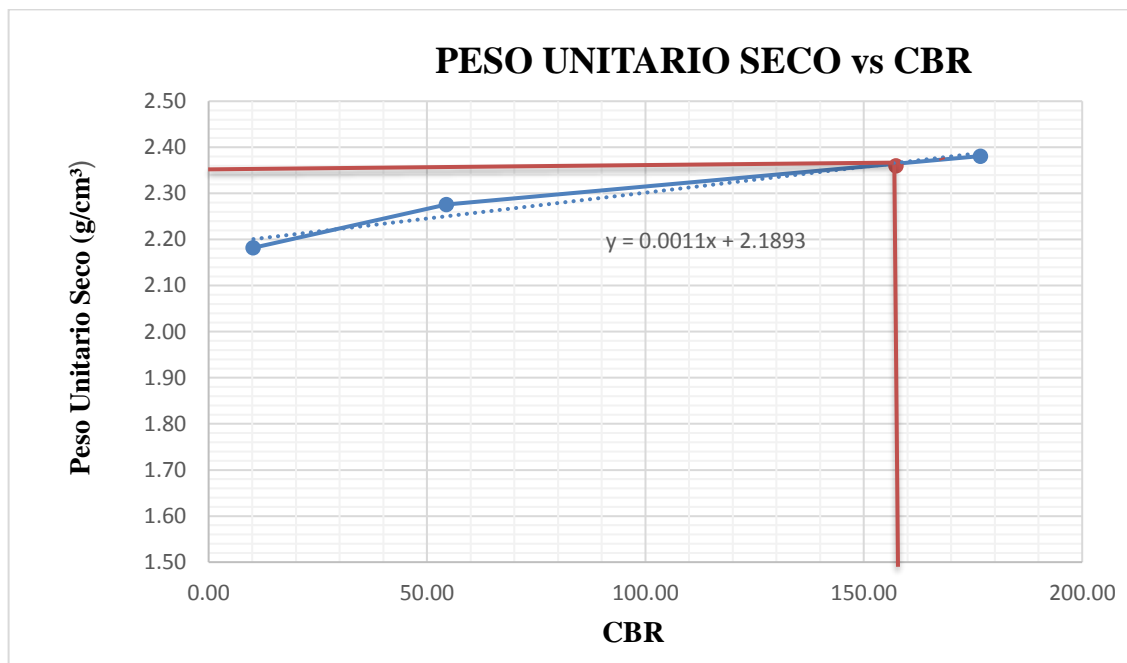
Número de golpes	CBR definitivo (%)	Peso Unitario Seco (g/cm ³)
10	10.23	2.18
25	54.46	2.28
56	176.70	2.38

Nota. Fuente: Elaboración propia

Para obtener el CBR de diseño para el contenido de humedad óptimo del material, se construyó la curva que relaciona el peso unitario vs CBR, determinándose así el CBR de diseño al porcentaje deseado del peso unitario seco máximo (ver gráfica 6).

Gráfica 6

Peso unitario seco vs CBR



Nota. Fuente: Elaboración propia

Para el máximo peso unitario seco del material correspondiente a 2.36 g/cm³, se obtiene un CBR de diseño de 157%.

8.1.2 ZEOLITAS

8.1.2.1 Caracterización material granular de zeolita

Se realizó la caracterización del material zeolita Clinoptilolita en laboratorio, donde se realizó una serie de ensayos para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, acerca de las zeolitas que se comercializan en la región, las cuales son explotadas e importadas desde Ecuador por la empresa ZEOCOL S.A.S., las cuales son implementadas en gran parte del territorio colombiano fortaleciendo la industria agrícola, en donde se le da su mayor uso; para analizar la viabilidad de las zeolitas como un material alternativo para la construcción de superficies de rodadura en vías

de bajos volumen de tránsito se realizó una caracterización inicial, en donde se contemplaron los siguientes ensayos:

- 1) Granulometría por tamizado (INV E-123).
- 2) Gravedad específica y absorción de agregados (INV E-223).
- 3) Densidad Bulk "Peso unitario" (INV E-217).
- 4) Micro- Deval (INV E-238).
- 5) Solidez (INV E-220)
- 6) Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras (INV E-230)

Granulometría por tamizado (INV E-123)

Descripción

Inicialmente se realizó un cuarteo de 2 kilogramos de la muestra para realizar el tamizado, con el fin de obtener una muestra representativa del material de zeolita. Posteriormente se tamizó el material a través de las aberturas: 3/4", 3/8", N°4, N°10, N°40, y N°200. Concluido esto, se realizó su respectivo análisis granulométrico, obteniendo los porcentajes de pasa y retenidos de material en cada tamiz, como a su vez el tamaño máximo de partícula de la muestra recuperada.

Equipos: Dos balanzas, tamices de malla cuadrada, horno, envases, cepillo y brocha



Figura 12-Cuarteo de muestra zeolita.

Resultados

A partir de los datos obtenidos en el ensayo, se procede al cálculo de los porcentajes retenido, acumulado y de pasa, relacionado con la abertura del tamiz, tal como se resume a continuación (ver tabla 21).

Tabla 21

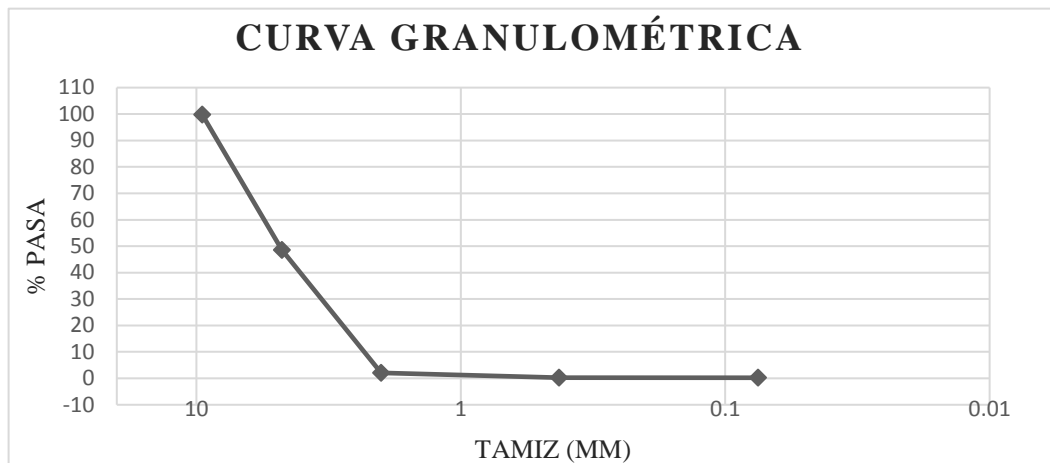
Recopilado de resultados de granulometría por tamizaje

Tamiz (N°)	Tamiz (mm)	Retenido (gr)	Ret. %	Ret. Acum (gr)	% Pasa
3/8	9,5	5	0,3	0,3	100
#4	4,75	960	51,2	51,5	49
#10	2	871	46,5	98,0	2
#40	0,425	33	1,8	99,7	0
#200	0,075	1	0,1	99,8	0
Pasa 200	Pasa 200	4	0,2	100,0	0

Nota. Fuente: Elaboración propia

Con los datos relacionados en la Tabla 19, se realizó la gráfica de abertura de tamiz y el porcentaje que pasa (Curva granulométrica), donde se puede interpretar de manera gráfica la distribución del tamaño de las partículas de zeolita, según la muestra analizada y la cual es comercializada de acuerdo con los usos en el sector agrícola donde se implementa. (Ver grafica 7)

Gráfica 7 Curva granulométrica de material Zeolita



Nota. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se realizó el cálculo de la humedad del material, tomando una fracción y determinando su peso en condiciones de humedad natural, posteriormente se lleva a un proceso de secado al horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas, para determinar el peso del material en condición seca, y finalmente conocer el porcentaje de humedad natural de las zeolitas, tal como se describe a continuación:

Tabla 22

Porcentaje de humedad para una fracción del material

% HUMEDAD	
Peso tara (gr)	256
Peso suelo húmedo neto (gr)	2000
Peso suelo seco + Tara (gr)	2130
Humedad (%)	6,30%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gravedad específica y absorción del agregado grueso (INV E -223)

Descripción

Se determinó mediante este ensayo la densidad relativa promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso, la densidad relativa y la absorción del agregado grueso. La densidad relativa (gravedad específica) es una cantidad adimensional la cual se expresa como seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS) o aparente (gravedad específica aparente); la densidad relativa seca al horno (SH) se determinan luego del secado del agregado y la densidad relativa superficialmente seca (SSS) y la absorción se determinaron luego de sumergir el agregado igual o mayor a 4.75 mm (tamiz N°4) durante un periodo de tiempo.

Para la obtención de muestra se utiliza el mecanismo de cuarteo a una porción considerada de zeolita hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, eliminando el material inferior a 4.75 mm mediante tamizado en seco y realizando un proceso de lavado para remover los finos adheridos a la superficie.

Equipos:

- Balanzas, Canastillas metálicas, tanque de agua, dispositivo de suspensión, tamices.



Figura 13 - Sumergido del agregado.

Nota. Fuente: Elaboración propia

Resultados

De acuerdo con el ensayo se obtuvieron 3 muestras representativas por medio del cuarteo y lavado como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23

Muestras de ensayo para obtención de gravedad específica Bulk

Ensayo de gravedad específica		
1	Tara #2 (gr)	105,4
2	Tara #3 (gr)	107,7
3	Tara #4 (gr)	101,9
1	Peso seco+ tara #2(gr)	329,8
2	Peso seco+ tara #3(gr)	348
3	Peso seco+ tara #4(gr)	364,4
1	Peso con superficie seca (gr)	245,8
2	Peso con superficie seca (gr)	265,2
3	Peso con superficie seca (gr)	289,8
1	Muestra sumergida (gr)	128,5
2	Muestra sumergida (gr)	136,6
3	Muestra sumergida (gr)	149,1

Nota. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los datos obtenidos en el ensayo se procede a calcular las gravedades específicas con las siguientes expresiones:

$Gsb_{23^{\circ}C/23^{\circ}C} = \frac{A}{B - C}$	<i>Gravedad específica bulk, 23°C/23°C</i>
$Gsb_{sss\ 23^{\circ}C/23^{\circ}C} = \frac{B}{B - C}$	<i>Gravedad específica bulk sss, 23°C/23°C</i>
$Gsa_{23^{\circ}C/23^{\circ}C} = \frac{A}{A - C}$	<i>Gravedad específica aparente, 23°C/23°C</i>
$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100$	

Figura 14- Expresiones para determinar valores de gravedad específica

Nota. Fuente: INV E -223 (INVIAS,2013)

Donde:

A = masa en el aire de la muestra seca en gramos.

B = masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca, en gramos.

C = masa sumergida en agua de la muestra saturada, en gramos.

Los resultados calculados se presentan a continuación:

Tabla 24

Gravedades específicas y porcentaje de absorción en la zeolita

Muestra	Gsb	Gsb (sss)	Gsa	%A
1	1,91	2,10	2,34	9,54
2	1,87	2,06	2,32	10,36
3	1,87	2,06	2,31	10,40
Promedio	1,88	2,07	2,32	10,10

Nota. Fuente: Elaboración propia

Densidad Bulk “Peso Unitario” (INV E-217).**Descripción**

Este ensayo permitió determinar la masa del volumen unitario de la zeolita, considerando el volumen de las partículas individuales y el volumen de vacíos entre las partículas, expresado en kg/m³. De acuerdo con este ensayo se obtuvo una muestra representativa de zeolitas aproximadamente del 125 a 200 % de la cantidad requerida para llenar el recipiente o molde de medida y se manejó de forma adecuada para evitar la segregación del material. El molde calibrado tiene un volumen de 2780 cm³ y un peso aproximado de 1863 gr, de acuerdo con el ensayo se tomaron tres muestras de material suelto y a su vez compactado el material mediante proceso de varillado.

Equipos:

- Balanzas, Varilla compactadora, recipiente de medida, pala o cuchara, equipo de calibración.

Resultados

Los pesos obtenidos se presentan en la siguiente tabla (*ver tabla 26*):

Tabla 25

Pesos obtenidos para obtención de gravedad Bulk (peso unitario)

Ensayo de peso unitario	
Volumen del molde (cm ³)	2780
Peso molde (gr)	1863
Muestra suelta	Peso + molde (gr)
1	4815
2	4814
3	4807
Muestra compacta	Peso + molde (gr)
1	5097
2	5137
3	5167

Nota. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, se calcularon las densidades de acuerdo con la siguiente expresión:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

Donde:

M= densidad bulk del agregado (kg/m³)

G = masa del agregado más la del recipiente de medida, kg (lb)

T = masa del recipiente de medida, kg (lb)

V = volumen del recipiente de medida, m³ (pie³).

- **Densidad bulk material compactado**

$$M1 = \frac{5.097 \text{ kg} - 1.863 \text{ kg}}{0.00278 \text{ m}^3} = 1163.31 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M2 = \frac{5.137 \text{ kg} - 1.863 \text{ kg}}{0.00278 \text{ m}^3} = 1177.69 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M3 = \frac{5.167 \text{ kg} - 1.863 \text{ kg}}{0.00278 \text{ m}^3} = 1188.49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad Bulk compactado promedio} = 1176.50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Densidad bulk material suelto**

$$M1 = \frac{4.815 \text{ kg} - 1.863 \text{ kg}}{0.00278 \text{ m}^3} = 1061.87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M2 = \frac{4.814 \text{ kg} - 1.863 \text{ kg}}{0.00278 \text{ m}^3} = 1061.51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M3 = \frac{4807 \text{ kg} - 1.863 \text{ kg}}{0.00278 \text{ m}^3} = 1058.99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad Bulk material suelto promedio} = 1060.79 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Los vacíos en los agregados se determinaron empleando la densidad bulk obtenida mediante apisonado, vibrado o simplemente, mediante el llenado a paladas

$$\% \text{Vacíos} = \frac{S * W - M}{S * W} * 100$$

Donde:

S = gravedad específica bulk determinada según las normas INV E – 222 (agregados finos) o INV E – 223. (agregados gruesos),

M = densidad bulk de los agregados, en kg/m³ (lb/pie³)

W = densidad del agua, 998 kg/m³

$$\%Vacíos compactada = \frac{1.88 * 998 \frac{kg}{m^3} - 1176.590 \frac{kg}{m^3}}{1.88 * 998 \frac{kg}{m^3}} * 100\% = 37.29 \%$$

$$\%Vacíos suelta = \frac{1.88 * 998 \frac{kg}{m^3} - 1060.79 \frac{kg}{m^3}}{1.88 * 998 \frac{kg}{m^3}} * 100\% = 43.46 \%$$

Resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, aparato Micro- Deval (INV E-238).

Descripción

Este ensayo permitió determinar la resistencia a la abrasión y durabilidad de agregados gruesos de zeolita, el procedimiento de este ensayo consistió en someter el material a la acción de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua.

Para el ensayo se tomó una muestra representativa de zeolita de 1500 gr la cual fue lavada y secada al horno aproximadamente a 110°C separados por fracciones individuales de 750 gr y luego se las coloca en el aparato micro-deval con las esferas de acero para correr la máquina. Terminado el tiempo de rotación de dos horas, se vierte la muestra cuidadosamente sobre dos tamices superpuestos de 4.75 mm y 1.18 mm.

Equipos:

- Balanza, horno, tamices, máquina de micro- deval, esferas de acero para carga abrasiva.



Figura 15 - Muestra con carga abrasiva.

Nota. Fuente: Elaboración propia

Al finalizar el tiempo de rotación, siguiendo con el proceso se combina el material retenido y se finalizó secando la muestra, a continuación, se presentan los datos obtenidos:

Tabla 26

Resultados Micro-deval

Ensayo Micro-deval			
Tamiz (N°)	Peso (gr)	Masa inicial (gr)	Masa Final (gr)
#1/4	750	1500	1324

Nota. Fuente: Elaboración propia

Para determinar la abrasión del agregado de lo calcula con la siguiente expresión:

$$\%p\acute{e}rdida = \frac{mi - mf}{mt} * 100$$

$$\% p\acute{e}rdida = \frac{1500 \text{ gr} - 1324 \text{ gr}}{1500} * 100\% = 11.73 \%$$

Solidez de la zeolita frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio (INV E-220).

Descripción

El procedimiento realizado mediante este ensayo permitió determinar la resistencia de los agregados de zeolita en condiciones de intemperie, se realizó la simulación de esta condición sometiendo las zeolitas a inmersiones repetidas en soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, seguido del secado al horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros permeables de las partículas de zeolita. La fuerza de expansión interna derivada de la rehidratación de la sal después de re-inmersión permitió simular la expansión del agua por congelamiento. Mediante este método se logró obtener una información útil para calificar la calidad de las zeolitas bajo la acción de los agentes atmosféricos, en especial cuando no se disponen datos sobre el comportamiento de los materiales que se van a emplear, en las condiciones climatológicas de la zona donde se van a implementar. Los resultados a obtener en este ensayo según menciona la norma INV E-220-13 varían según el contenido de sulfato de sodio (sal) que se emplee, por tal razón hay que tener cuidado al fijar los límites en las especificaciones en que se incluya este ensayo como un criterio de aceptación o rechazo.

Equipos:

- Tamices, Recipiente para muestras, Regulación de la temperatura, Termómetro, Balanzas, Horno, Medidores de gravedad específica.



Figura 16-Muestra inicial para ensayo de solidez.

Nota. Fuente: Elaboración propia

Resultados

La muestra que se empleó en este laboratorio es de agregado grueso, por lo tanto, se clasificó y se retiraron todas las fracciones inferiores al tamiz de 4,75 mm (No 4). La muestra deberá tener una masa de 300gr. Su procedimiento consta en sumergir la muestra en la solución de sulfato de sodio entre 16 a 18 horas, con un secado al horno de 4 horas en el cual se debe validar que su pérdida en masa no varíe en más del 0,1%, alcanzando una masa constante. Este proceso se repitió durante 5 ciclos. Finalmente, la fracciones que se han secado y enfriado fueron lavadas para quedar exentas de sulfatos y se tamizaron por el tamiz posterior al que fueron tamizadas inicialmente (No 6) donde se logra calcular el peso final de la muestra recolectada.

Los cálculos recolectados en el laboratorio son los siguientes entre el tamiz 3/8" y #4

Tabla 27

Resultados ensayo de solidez.

Ensayo Solidez			
Tamiz (N°)	Peso inicial(gr)	Tamiz (N°)	Peso final(gr)
3/8" - #4	300	#6	168,85

Nota. Fuente: Elaboración propia

Para determinar el porcentaje de pérdida de masa ante el ataque de sulfatos se usó la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de Pérdida de Masa} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa inicial}} * 100$$

Porcentaje de Pérdida de Masa
44%

El porcentaje de pérdida de masa es muy superior al esperado, durante los primeros 3 ciclos se obtuvieron buenos resultados, sin embargo, en los últimos dos se evidenciaron agrietamientos y desgaste en la muestra lo cual no le permitió al material alcanzar una resistencia adecuada a lo establecido. Por lo tanto, se puede afirmar que las zeolitas no presentan una resistencia adecuada ante ataques de sulfatos, y por ende no puede implementarse como una composición de 100% zeolitas para un material granular de afirmado, puesto que el porcentaje máximo permisible de pérdidas por sulfatos para afirmados es del 12%; por dichas razones la zeolita se debe implementar como un agregado en donde de acuerdo con las proporciones de adición, la suma de pérdidas no supere dicho valor máximo permisible.

Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras (INV E-230)

Descripción

Se homogenizó la muestra a ensayar, cuarteándose el material de las muestras obtenidas y se fraccionó mediante el uso de tamices, se utiliza el material retenido en los tamices 1/4", 3/8", 1/2". Después se determinó el peso de la muestra a ensayar y se extendió en un área suficientemente grande, para visualizar las partículas alargadas y planas del agregado.

Se mide el largo de la partícula con un pie de rey o con un calibrador de alargamientos se hace pasar por la separación entre barras correspondiente de la fracción, también se mide el espesor de la partícula o se usa un calibrador de aplanamiento, luego se toma los pesos correspondientes al material que paso y no pasó por dichas rejillas.

Equipos:

- Tamices de Barras, calibradores metálicos, tamices, balanza, horno, equipo misceláneo
-



Figura 17 - Muestra con calibrador metálico.

Nota. Fuente: Elaboración propia

Resultados

El ensayo de aplanamiento y alargamiento se ejecuta mediante un método manual, se realiza dos operaciones, en primer lugar, se tamiza las muestras y se separa, segundo por medio de los calibradores se pasan las partículas para realizar la respectiva clasificación.

Se implementan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Indice de aplanamiento (IA)} = \frac{\text{Masa de todas las partículas que pasa}}{\text{masa de total de la muestra}} * 100$$

$$\text{Indice de alargadas (IP)} = \frac{\text{Masa de todas las partículas que pasa}}{\text{masa de total de la muestra}} * 100$$

Tabla 28

Resultado de partículas planas

Tamiz (N°)	Masa muestra (gr)	Masa que pasa	
		(gr)	Índice aplanamiento (IA)
#1/4	18,7	0	0
#3/8	31	13	41,9
#1/2	5,7	2	35,1

Nota. Fuente: Elaboración propia

El índice de aplanamiento global IL, se calculó de acuerdo con la siguiente expresión:

$$IA = \frac{M3}{M1 \text{ o } M2} X 100$$

Donde:

M1 o M2: Masa total de la muestra empleada en la determinación del índice de aplanamiento.

M3: Masa de todas las partículas que pasaron las barras de los tamices las ranuras del calibrador de aplanamiento.

Obteniéndose un índice de aplanamiento global del 27%.

Tabla 29

Resultado de partículas alargadas

Tamiz (N°)	Masa muestra (gr)	Masa que pasa(gr)	Índice alargamiento (ILi)
#1/4	52,4	25	47,7
#3/8	3	1	33,3

Nota. Fuente: Elaboración propia

El índice de alargamiento global IL, se calculó de acuerdo con la siguiente expresión:

$$IL = \frac{M3}{M1 \text{ o } M2} \times 100$$

Donde:

M1 o M2: Masa total de la muestra empleada en la determinación del índice de alargamiento.

M3: Masa de todas las partículas que pasaron las barras de los tamices las ranuras del calibrador de alargamiento.

Obteniéndose un índice de alargamiento global del 47%.

La ejecución de este ensayo posibilita aprendizaje para el uso adecuado de los calibradores de alargamiento y aplanamiento, se puede concluir que los índices no son tan altos entonces tiene una resistencia adecuada para la construcción de una vía o una mezcla asfáltica.

8.1.2.2 Análisis de los efectos de la zeolita como inclusión en un material granular tipo afirmado

Los resultados presentados previamente lograron determinar las características propias de las zeolitas para su implementación como agregado en la construcción de carreteras. De acuerdo con la disponibilidad de material que se comercializa actualmente, y en relación con los tamaños de trituración de las partículas debido al uso y comercio en el sector agrícola, lo cual se evidenció en la curva granulométrica que se construyó, hace que el análisis de resistencia para un material granular con los parámetros de evaluación del afirmado se deba realizar analizando la influencia de la inclusión de zeolitas sobre el CBR del material granular combinado, reemplazando las franjas granulométricas en los tamaños correspondientes a los tamices #4 y #10, en los cuales se retuvo la mayor cantidad de zeolitas, sumado a que la resistencia al desgaste por sulfatos de las zeolitas limita su uso al de un agregado a una mezcla de afirmado.

Sobre el afirmado A25 descrito previamente, construyó la siguiente granulometría considerando la inclusión de zeolitas en los tamices mencionados, generando un afirmado con una proporción 67% afirmado – 33% zeolitas.

Tabla 30

Franjas para construcción de granulometría afirmado A25 con inclusión de zeolitas

TAMIZ	ABERTURA	%PASA	FRANJAS A25	
1"	25.4	100	100	
3/4"	19.1	95	90	100
3/8"	9.52	77.5	65	90
#4	4.75	57.5	45	70
#10	2	45	35	55
#40	0.42	25	15	35
#200	0.074	15	10	20

Nota. Fuente: Elaboración propia

8.1.2.3 Análisis de Proctor modificado para afirmado con inclusión de zeolitas

Se realizó el ensayo modificado de compactación de la misma manera que se realizó para el material de afirmado, con el fin de establecer en un rango de humedades, la curva de compactación del material y lograr determinar su humedad óptima y el peso unitario seco máximo. De acuerdo con la granulometría a emplear asociada con un afirmado A25, para preparar las muestras se seleccionó una muestra de 50 kg de afirmado con inclusión de zeolitas en los tamices #4 y #10, obteniéndose las siguientes dosificaciones por tamiz para la construcción de la curva granulométrica A25 presentada previamente.

Tabla 31

Pesos retenidos por tamiz para inclusión de zeolitas

TAMIZ	ABERTURA	%PASA	%RETENIDO	% RETENIDO	PESO
				ACUMULADO	RETENIDO
1"	25.4	100	0	0	0
3/4"	19.1	95	5	5	2.5
3/8"	9.52	77.5	22.5	17.5	8.75
#4	4.75	57.5	42.5	20	10
#10	2	45	55	12.5	6.25
#40	0.42	25	75	20	10
#200	0.074	15	85	10	5
			100	15	7.5

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 18-Materiales para construcción de afirmado con inclusión de zeolitas A2
Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 19- Material de afirmado A25 con inclusión de zeolitas mezclado
Nota. Fuente: Elaboración propia

Se seleccionaron cuatro muestras de 6000 gramos de material de afirmado con inclusión de zeolita con las que se establecieron las humedades de moldeo, colocándose dentro de un molde en 5 capas iguales y sometiendo a compactación cada una de estas a 56 golpes. Los resultados de este ensayo se resumen a continuación:

Tabla 32

Humedades de moldeo ensayo Proctor modificado, afirmado con inclusión de zeolitas

Prueba	W molde (g)	W molde + muestra húmeda (g)	Volumen molde (cm ³)	W tara (g)	W tara + muestra húmeda (g)	W tara + muestra seca (g)
1	3261	7665	2145	66.7	563.2	539.9
2	3261	7745	2145	65.5	553.8	523.4
3	3267	8067	2185	60.3	691.9	636.8
4	3267	7996	2185	63.2	560.7	502.6

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez compactadas las muestras, se determinaron las humedades de cada una y sus respectivos pesos unitarios, en sus condiciones secas y húmedas, valores con los cuales se determinó la curva de compactación del material de afirmado.



Figura 20-Ensayo modificado de compactación

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 21 - Determinación de humedades de moldeo para elaborar curva de compactación

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 33

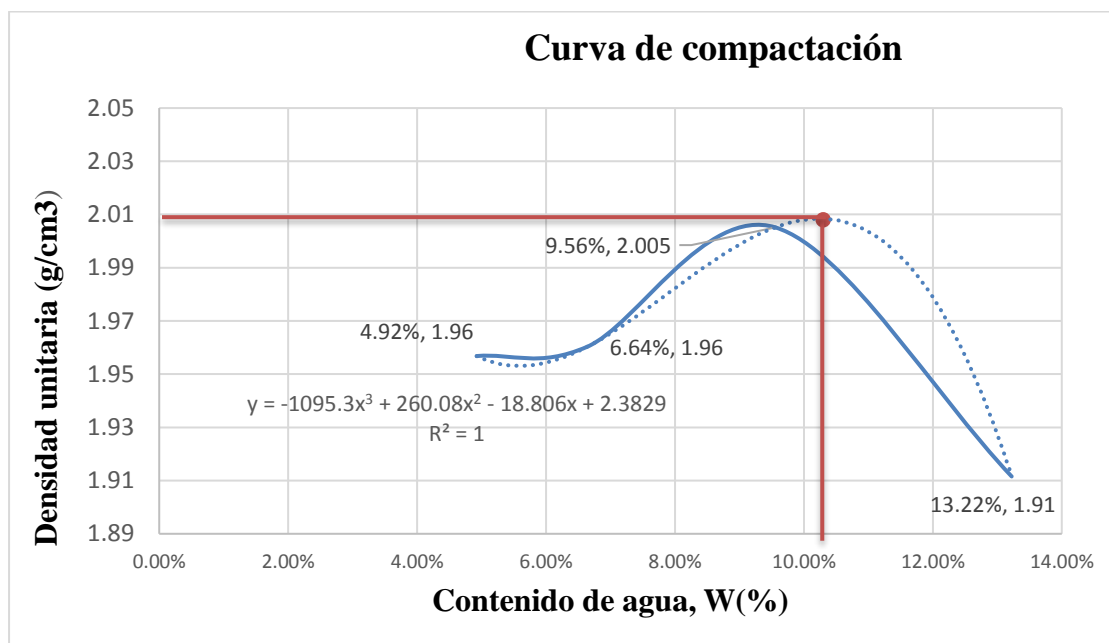
Humedades y pesos unitarios secos afirmado con inclusión de zeolitas

Prueba	Humedad %	Densidad húmeda (g/cm ³)	Densidad seca (g/cm ³)	Peso unitario seco teórico (kN/m ³)	Peso unitario húmedo (kN/m ³)	Peso unitario seco (kN/m ³)
1	4.92%	2.05	1.96	2.23	20.13	19.19
2	6.64%	2.09	1.96	2.28	20.50	19.22
3	9.56%	2.20	2.005	2.35	21.54	19.66
4	13.22%	2.16	1.91	2.21	21.22	18.75

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8

Curva de compactación afirmado con adición de zeolitas



Nota. Fuente: Elaboración propia

Determinado así para este material una densidad máxima seca de 2.008 g/cm³ para una humedad óptima de compactación de 10.3%.

8.1.2.4 Ensayo de CBR para material granular tipo afirmado con inclusión de zeolitas (INV-E -148)

Con el fin de evaluar la resistencia potencial del material de afirmado con inclusión de zeolitas, se determinará el CBR con el contenido óptimo de agua, hallado en el ensayo de compactación modificado descrito previamente. Partiendo de un valor de humedad óptimo correspondiente al 10.3%, se prepararon 3 especímenes con dicho contenido de agua, una vez se conoció la humedad natural del material, y posteriormente se realizó el proceso de compactación el cual consistió en aplicar 5 capas iguales de material por molde, a diferencia que a las capas de cada molde se les aplicó un número diferente de golpes, correspondiente a 56, 25 y 10 golpes respectivamente, a continuación se resume la información inicial con la preparación de cada uno de los moldes.

Tabla 34

Muestras para ensayo de CBR material de afirmado con inclusión de Zeolitas

Preparación de las Muestras y Ensayo de CBR				
Espécimen (N.º)		1	2	3
N.º de Golpes		56	25	10
Humedad (%)	Deseada	10.3	10.3	10.3
	Natural	2.8	2.8	2.8
	Adicional	8.0	8.0	8.0
	Obtenida	10.8	10.8	10.8
Peso de la Muestra (g)	Húmeda	6,000	6,000	6,000
	Seca	5,838	5,838	5,838
Volumen de Agua Adicional (cm ³)		466	466	466

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez preparadas las muestras con la adición de agua para garantizar su humedad óptima, se realizó la compactación de los moldes en donde se obtuvieron los pesos unitarios de cada uno de los moldes.

Tabla 35

Pesos unitarios muestras compactas, ensayo de CBR afirmado con inclusión de zeolitas

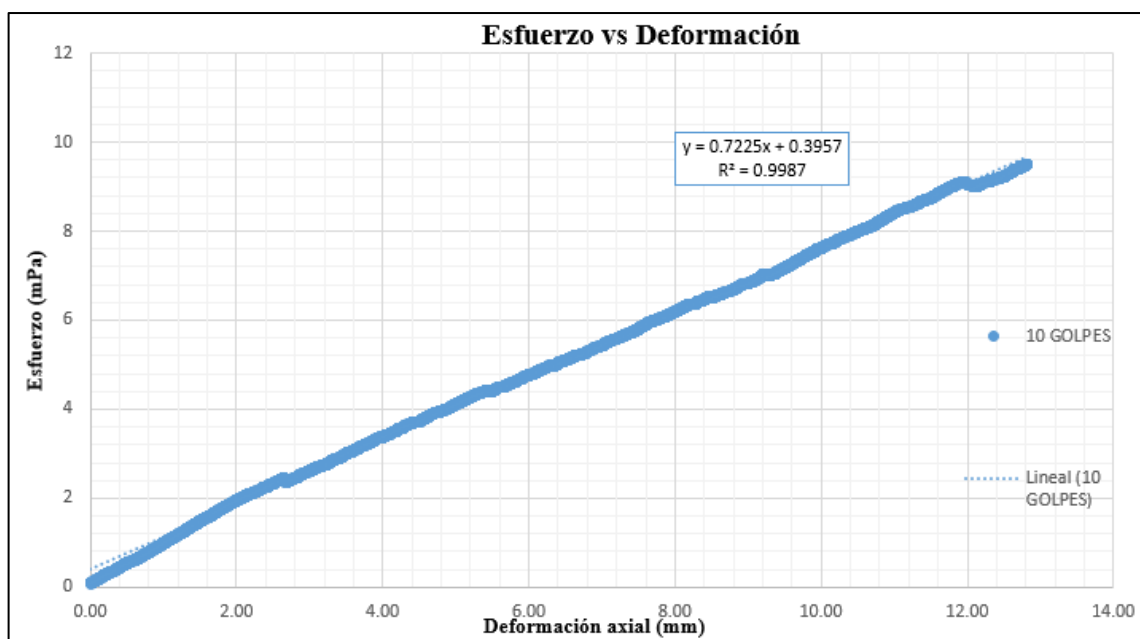
Compactación de moldes para ensayos de CBR				
Molde N.º		1	2	3
Peso del Molde (g)		4,795	4,815	4,028
Peso de la Muestra (g)	Húmeda + Molde	9,523	9,432	8,409
	Compacta	4,728	4,617	4,381
	Seca	4,269	4,169	3,956
Volumen del Molde (cm ³)		2,097	2,159	2,105
Densidad Seca (kg/m ³)		2,036	1,931	1,879

Nota. Fuente: Elaboración propia

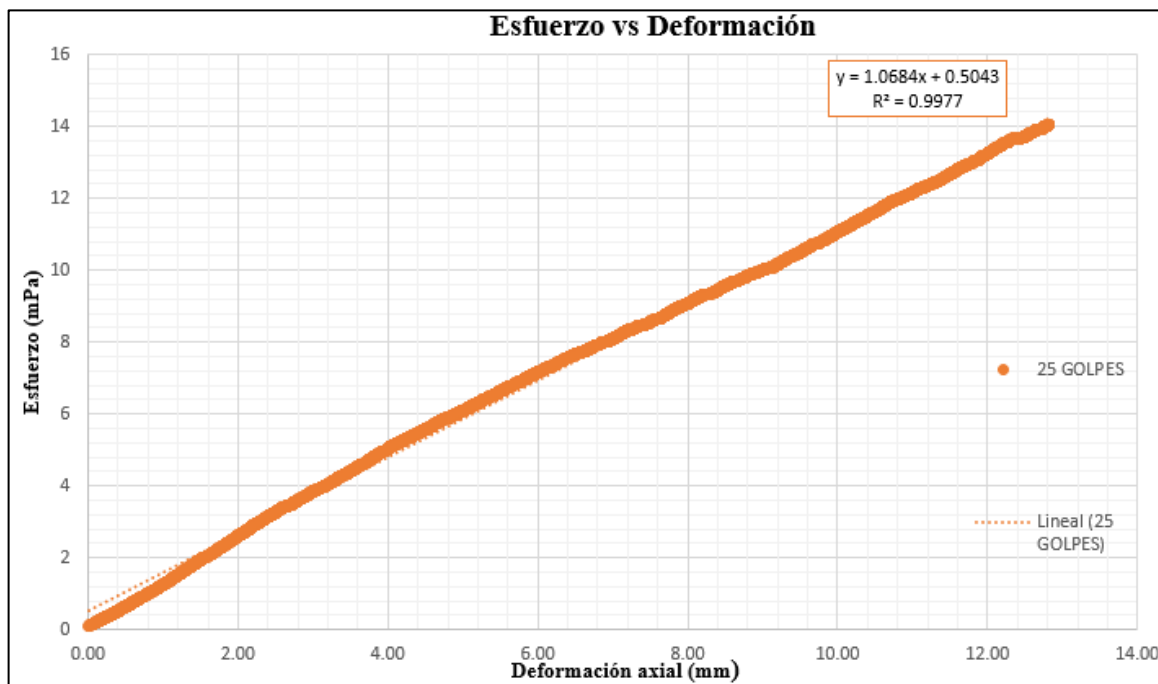
Posterior a esto se realizó el periodo de inmersión en agua por 4 días para garantizar que las partículas del material se saturen completamente, finalmente se realizó la penetración de las probetas compactadas y con los datos obtenidos en este proceso se obtuvieron las curvas de deformación vs esfuerzo (ver gráfica 9,10 y11).

Gráfica 9

Esfuerzo vs deformación ensayo CBR Afirmado con Inclusión de Zeolitas 10 golpes



Nota. Fuente: Elaboración propia

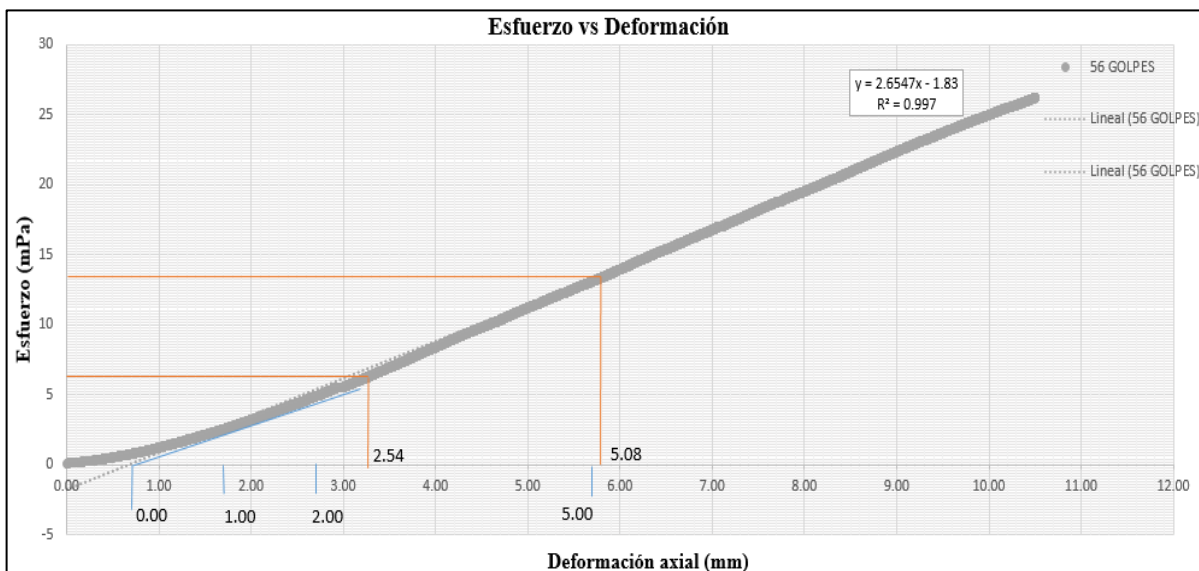
*Gráfica 10**Esfuerzo vs deformación ensayo CBR Afirmado con Inclusión de Zeolitas 25 golpes*

Nota. Fuente: Elaboración propia

Para la gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a la muestra sometida a 56 golpes se realizó la corrección de la curva, la cual presentaba una concavidad hacia arriba en su parte inicial debido a irregularidades en la superficie del espécimen o a otras causas, por tales razones se ajustó el punto cero, trazándose una línea tangente a la curva en el punto de inflexión, como se logra evidenciar a continuación:

Gráfica 11

Esfuerzo vs deformación ensayo CBR Afirmado con Inclusión de Zeolitas 56 golpes



Nota. Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de la relación de soporte CBR, se hizo uso de las cargas corregidas, tomadas de la curva deformación vs esfuerzo, para penetraciones de 2.54 y 5.08 mm, para los cuales se calculan las relaciones de soporte correspondientes dividiéndose estos esfuerzos por los esfuerzos de referencia de 6.9 y 10.3 mPa y multiplicándose por 100.

Tabla 36

Valores de esfuerzo para penetraciones de referencia

Penetración (mm)	Esfuerzos de referencia (mPa)	Valores de esfuerzos para penetraciones de 0.1" y 0.2"		
		10	25	56
2.54	6.9	2.23	3.22	6.30
5.08	10.3	4.07	5.93	13.40

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 37

Valores de CBR correspondientes a las cargas de referencia

Penetración (mm)	Esfuerzos de Referencia (mPa)	Valores de CBR a partir de las Cargas de Referencia		
		10 golpes	25 golpes	56 golpes
6.9	32.33	46.64	91.30	6.9
10.3	39.48	57.59	130.10	10.3

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 38

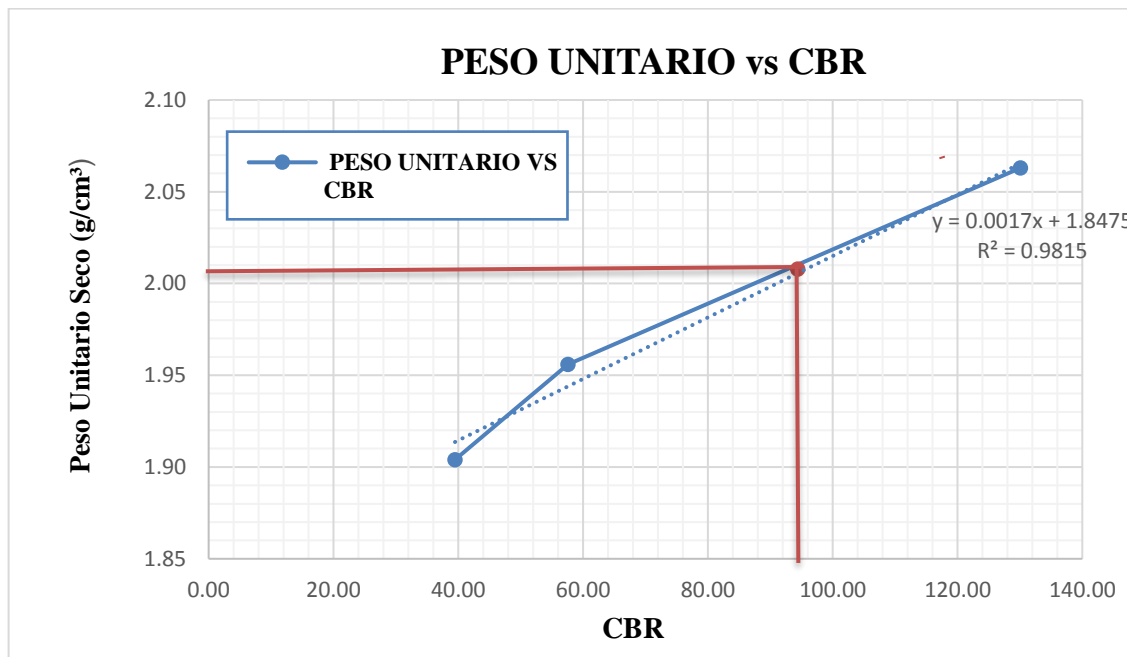
Valores de CBR, peso unitario seco asociado

Número de golpes	CBR definitivo (%)	Peso Unitario Seco (g/cm ³)
10	39.48	1.90
25	57.59	1.96
56	130.10	2.06

Nota. Fuente: Elaboración propia

Para obtener el CBR de diseño para el contenido de humedad óptimo del material, se construyó la curva que relaciona el peso unitario vs CBR, determinándose así el CBR de diseño al porcentaje deseado del peso unitario seco máximo (*ver gráfica 12*).

Gráfica 12 - Peso unitario vs CBR



Nota. Fuente: Elaboración propia

Para el máximo peso unitario seco del material correspondiente a 2.008 g/cm³, se obtiene un CBR de diseño de 94%.

Una vez comparados los parámetros obtenidos tanto para el afirmado, como para el afirmado con inclusión de zeolitas, se constató que la adición de zeolitas en el afirmado bajo la proporción 67% afirmado – 33% zeolitas cumple con los parámetros de calidad estipulados por el INVIAS para afirmados, a excepción del desgaste por sulfatos; por lo que se estimó la máxima adición de zeolitas a un 23% para dar cumplimiento a los requisitos de calidad del material de afirmado.

8.2 FASE 2 (ANÁLISIS FINANCIERO):

Tomando como caso de aplicación un tramo de 300 metros en la zona rural del municipio de Florida Valle, el cual mediante el convenio interadministrativo N° 001 de 2020 con objeto “AUNAR ESFUERZOS TECNICOS, ECONOMICOS Y ADMINISTRATIVOS PARA DESARROLLAR E IMPLEMENTAR UNA ESTRATEGIA DEL SECTOR DE LA INFRAESTRUCTURA PARA LA REACTIVACIÓN ECONÓMICA, EN EL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA” suscrito con la fundación universidad del valle, permitió conocer las características y propiedades de dicho tramo para realizar una comparación económica entre las técnicas de mejoramiento avaladas por el INVIAS y el caso de estudio del afirmado con inclusión de zeolitas, objeto de estudio del presente documento. Así pues, las características del tramo en estudio se resumen a continuación:

Tabla 39

Datos de tramo de vía para caso de aplicación

Tramo Villa Pinzón - Los Caleños, Municipio de Florida Valle del Cauca	
Longitud (m)	300
CBR natural (%)	17.2
	13.4
CBR saturado (%)	7.8
	4.4
TPD (Veh/día)	26
Número anual acumulado de ejes equivalentes a 80 kN en el carril de diseño (Periodo de diseño 10 años)	1402
	8

Nota. **Fuente:** Convenio interadministrativo N° 001 de 2020 Municipio de Florida Valle- Fundación universidad del Valle.

8.2.1 Costos de construcción alternativas de mejoramiento

Inicialmente se consideraron los factores económicos con los cuales se implementaron los mejoramientos en las redes terciarias con materiales de afirmado proveniente de la zona, en dónde se considera el costo de las zeolitas las cuales son producidas por Zeocol SAS, de acuerdo con la metodología AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos en afirmado, se obtiene la siguiente estructura de pavimento para el caso de aplicación. De acuerdo con las características del tramo de estudio, en el cual se adoptó un CBR de diseño para la subrasante de 4.4%, un nivel de tránsito T1 para un acumulado de 14028 ejes equivalentes de 80 kN en un periodo de diseño de 10 años, se selecciona el número estructural para el tránsito $SN_{Tránsito}$, tal como se relaciona a continuación (ver figura 22):

Categoría	Mr Lb/pulg ²	CBR %	N _{8.2 ton} carril diseño/periodo diseño		
			T1 < 85.000	T2 < 210.000	T3 < 425.000
S1	< 3,000	< 2	2,83	3,22	3,55
S2	4.500 – 7.500	3 – 5	2,47	2,82	3,12
S3	9.000 – 15.000	6 – 10	1,92	2,22	2,47
S4	16.500 – 30.000	11 – 20	1,51	1,77	1,98
S5	> 30.000	> 20	1,17	1,39	1,57

Figura 22-Matriz de número estructural adoptada, SN

Nota. Fuente: Diseño de estructuras de pavimento en afirmado (INVIAS,1997)

Para obtener el número estructural para las condiciones de resistencia de la subrasante ($SN_{Estructura}$), se implementó la expresión en donde se estimó un espesor de 6 pulgadas, para verificar si es un modelo estructural adecuado al obtener un numero estructural mayor al que se estimó para el tránsito.

$$SN_{Estructura} = a_1 d_1$$

$$SN_{Estructura} = 0.44 * 6 = 2.61$$

$$2.47 < 2.61$$

Una vez validado el espesor de la estructura de afirmado, se determina el espesor, de acuerdo con los factores de equivalencia entre el concreto asfáltico y el material granular por emplear en el diseño de capas de afirmado; donde se seleccionó un factor de equivalencia de 2.7, obteniendo el espesor de la capa de afirmado.

$$e = e_{Con} * 2.5 * FE$$

$$e = 6 * 2.5 * 2.7 = \mathbf{40\ cm}$$

Se selecciona así un espesor de 40 cm, el cual cumple con la condición requerida entre los números estructurales del tránsito y de las características de resistencia de la subrasante.

Obteniendo este espesor de estructura de afirmado se obtuvieron los costos directos de construcción, teniendo como referencia el listado de precios oficiales del INVIAS para el año 2020, para la alternativa contemplando afirmado y la inclusión de zeolitas en el afirmado en una relación de 23% zeolitas – 77% afirmado, la cual fue la proporción que garantiza el cumplimiento de los parámetros de calidad del afirmado al implementarse zeolitas como agregado.

Tabla 40

Costos directos para la construcción de 300 ml de estructura en afirmado

MEJORAMIENTO DE 300 ML DE VÍA CON ESTRUCTURA DE AFIRMADO				
ACTIVIDAD	UND	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
IMPLEMENTAR EL MEJORAMIENTO DE VÍAS TERCIARIAS PARA LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO				
EXCAVACIONES VARIAS EN MATERIAL COMUN EN SECO (Incluye retiro)	m ³	600	\$56,078.00	\$33,646,800.00
CONFORMACION DE CALZADA EXISTENTE	m ²	1500	\$959.00	\$1,438,500.00
AFIRMADO (incluye suministro, extendido, nivelación, humedecido y compactación)	m ³	600	\$41,692.00	\$25,015,200.00
CONSTRUIR OBRAS DE DRENAJE - CUNETAS				
ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI - 420 Mpa	kg	7080	\$4,302.00	\$30,458,160.00
CUNETETA - BORDILLO EN CONCRETO DE 21 MPA	m ³	109.2	\$550,989.00	\$60,167,998.80
COSTOS DIRECTOS				\$150,726,658.80

Nota. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla 41

Costos directos para la construcción de 300 ml de estructura en afirmado con inclusión de zeolitas

MEJORAMIENTO DE 300 ML DE VÍA CON ESTRUCTURA DE AFIRMADO CON INCLUSIÓN DE ZEOLITAS				
IMPLEMENTAR EL MEJORAMIENTO DE VÍAS Terciarias PARA LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO				
EXCAVACIONES VARIAS EN MATERIAL COMUN EN SECO (Incluye retiro)	m ³	600	\$56,078.00	\$33,646,800.00
CONFORMACION DE CALZADA EXISTENTE AFIRMADO CON INCLUSIÓN DE ZEOLITAS	m ²	1500	\$959.00	\$1,438,500.00
(incluye suministro, extendido, nivelación, humedecido y compactación)	m ³	600	\$388,727.00	\$233,236,200.00
CONSTRUIR OBRAS DE DRENAJE - CUNETAS				
ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI - 420 Mpa	kg	7080	\$4,302.00	\$30,458,160.00
CUNETETA - BORDILLO EN CONCRETO DE 21 MPA	m ³	109.2	\$550,989.00	\$60,167,998.80
COSTOS DIRECTOS				\$358,947,658.80

Nota. **Fuente:** Elaboración propia

Con los valores del tramo a evaluar, y mediante la herramienta del DNP de para la selección de alternativa de mejoramiento para vías terciarias, se seleccionó la alternativa de mejoramiento de una base granular estabilizada con emulsión asfáltica + tratamiento superficial doble, de acuerdo con los parámetros evaluados en la matriz multicriterio.

Tabla 42

Variables de entrada herramienta de diseño VT-9 DNP

Tramo Villa Pinzón - Los Caleños, Municipio de Florida Valle del Cauca		
Longitud (m)		300
Ancho vía (m)		5
Localización Apique 1		3°19'58.9"N 76°10'10.7"W
Localización Apique 2		3°19'53.2"N 76°10'10.9"W
CBR saturado (%)	Apique 1	7.8
	Apique 2	4.4
Clasificación del suelo SUCS	Apique 1	SM
	Apique 2	ML
Limite líquido	Apique 1	48.1
	Apique 2	N. L
Limite plástico	Apique 1	29.3
	Apique 2	N. P
TPD (Veh/día)		26
DISTANCIA A CANTERAS DE MATERIALES PETROS Y BITUMINOSOS (KM)	MEZCLAS Y AGREGADOS CACHIBI SAS YUMBO -VALLE	45
DISTANCIA A PROVEEDORES DE CEMENTO (KM)	CALI	50

Nota. **Fuente:** Convenio interadministrativo N° 001 de 2020 Municipio de Florida Valle- Fundación universidad del Valle.

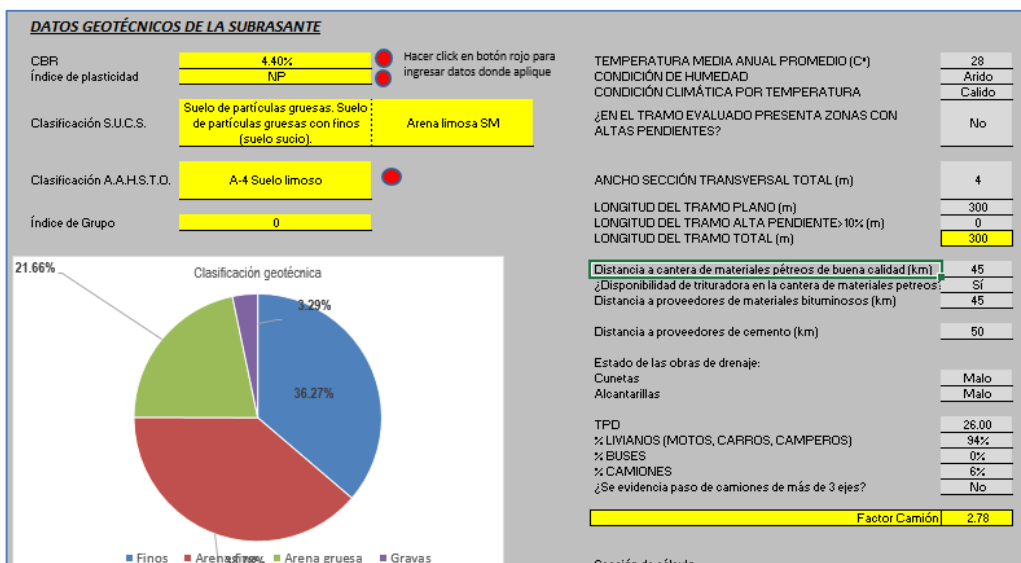


Figura 23- Datos de entrada herramienta VT-9 DNP

Nota. Fuente: Herramienta VT-9. Comunidad virtual de vías regionales (DNP,2020)



Figura 24-Datos de salida de diseño

Nota. Fuente: Herramienta VT-9. Comunidad virtual de vías regionales (DNP,2020)

Dicha alternativa de solución para su ejecución en la fase constructiva tiene un costo, el cual se resume a continuación en el presupuesto de obra:

Tabla 43

Costos directos alternativa de solución proyectos tipo DNP

ALTERNATIVA 4: BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA+TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE				
ACTIVIDAD	UND	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
IMPLEMENTAR EL MEJORAMIENTO DE VÍAS Terciarias para la estructura de PAVIMENTO				
EXCAVACIONES VARIAS EN MATERIAL COMUN EN SECO (Incluye retiro)	m ³	783	\$56,078.00	\$43,909,074
CONFORMACION DE CALZADA EXISTENTE SUB-BASE GRANULAR (incluye suministro, extendido, nivelación, humedecido y compactación)	m ²	1500	\$959.00	\$1,438,500
	m ³	558	\$93,516.00	\$52,181,928
BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA TIPO BEE - 38	m ³	225	\$355,548.00	\$79,998,300
TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE CON EMULSIÓN CRR-2, TIPO 1	m ²	1500	\$15,081.00	\$22,621,500
CONSTRUIR OBRAS DE DRENAJE - CUNETAS				
ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI - 420 Mpa	kg	7080	\$4,302.00	\$30,458,160
CUNETAS - BORDILLO EN CONCRETO DE 21 MPA	m ³	109.2	550989	\$60,167,999
COSTOS DIRECTOS				\$290,775,461

Nota. Fuente: Elaboración propia

8.2.3 Costos de mantenimiento

8.2.3.1 Vías en superficie en afirmado

De acuerdo con el manual de mantenimiento de carreteras del INVIAS, se determinan los parámetros y acciones que conlleven a mejorar la eficacia y la eficiencia de las labores de mantenimiento en las carreteras, para las vías terciarias, rurales y todas aquellas que posean una superficie de rodadura en afirmado. Se consideran como intervenciones de mantenimiento aquellas que permitan mantener los afirmados de la red vial libres de baches, erosiones, ondulaciones y otros deterioros, dichas intervenciones se dividen en mantenimientos rutinarios y mantenimientos periódicos, y se componen de las siguientes actividades:

- **Mantenimiento rutinario de afirmados**
 1. Bacheo
 2. Perfilado ligero
 3. Control de polvo con cloruro de calcio
 4. Tratamiento con rastras.

- **Mantenimiento periódico de afirmados**
 1. Perfilado pesado
 2. Recarga de grava
 3. Reciclado de afirmado

De acuerdo con las características del material de diseño para la estructura en afirmado, el cual garantiza el cumplimiento en cuanto a los requisitos de calidad y teniendo en cuenta los factores de la zona de aplicación del proyecto, tales como la pluviometría y el tránsito promedio diario de vehículos, se determinaron como obras de mantenimiento rutinario, el perfilado ligero y como obra de mantenimiento periódico la recarga de grava.

- **Perfilado ligero**

Esta operación se refiere a la reconformación frecuente de la calzada, con el fin de regularizar la superficie borrando las irregularidades surgidas de la circulación y de la lluvia antes de que alcancen magnitudes importantes y volviendo a distribuir los materiales desplazados y acumulados en los bordes, la frecuencia de dicho mantenimiento se estableció de acuerdo con el Banco Mundial, el cual a través de un estudio recomienda el paso de la motoniveladora por cada 4000 a 8000 vehículos que circulen por la carretera. Para el tramo en estudio, se cuenta con un TPD de 26 vehículos/día, se determina que dicho mantenimiento se debe realizar una vez por año.

- **Recarga de grava**

Este procedimiento se realiza cuando el material de afirmado se ha desgastado por la acción del tránsito, la pérdida de grava es el factor más importante por el cual las vías en afirmado resultan muy onerosas en términos de costo durante el ciclo de vida, en especial cuando se presentan aumentos en los volúmenes de tránsito, por tanto al reducir las pérdidas eligiendo gravas adecuadas o modificando las propiedades de las disponibles de menor calidad, es una alternativa para la reducción de costos a largo plazo.

Para determinar la periodicidad de las recargas de grava, se determina la necesidad técnica cuando el espesor del afirmado haya disminuido hasta alcanzar 75 mm, sin embargo, se puede optar por la recarga cuando el espesor remanente sea mayor a dicho valor, teniendo en cuenta la rapidez con la cual el afirmado pierde la grava a causa de factores como el tránsito, la acción ambiental y las operaciones rutinarias de perfilado ligero. Existen estudios que permiten predecir la pérdida de grava, como resultado de los estudios para la aplicación del método VIZIRET, el LCPC francés propuso la ley de pérdida de grava de acuerdo con las consideraciones que se resumen a continuación (Instituto Nacional de Vías, 2016):

Tabla 44

Pérdida anual de grava en terreno plano en función del tránsito

Tránsito (Vehículos por día)	Perdidas en sitio plano y de baja precipitación (mm/año)
0-50	15
50-100	20
100-200	25
200-400	30
>400	35

Nota. **Fuente:** Manual de mantenimiento de carreteras Volumen 1. (INVIAS,2016)

Tabla 45

Correcciones por aplicar a las pérdidas de grava de acuerdo con la pluviometría y el tipo de terreno

Corrección (%)	Precipitación (mm/año)	Tipo de terreno
0	<1250	Plano
10	1250-1500	Ondulado
20	1500-2500	Montañoso
30	>2500	Escarpado

Nota. **Fuente:** Manual de mantenimiento de carreteras Volumen 1. (INVIAS,2016)

De acuerdo con las características en la zona a intervenir, donde se encuentra una estación evaporimétrica que permitió conocer los registros de precipitación en la zona, tal como se observa a continuación:

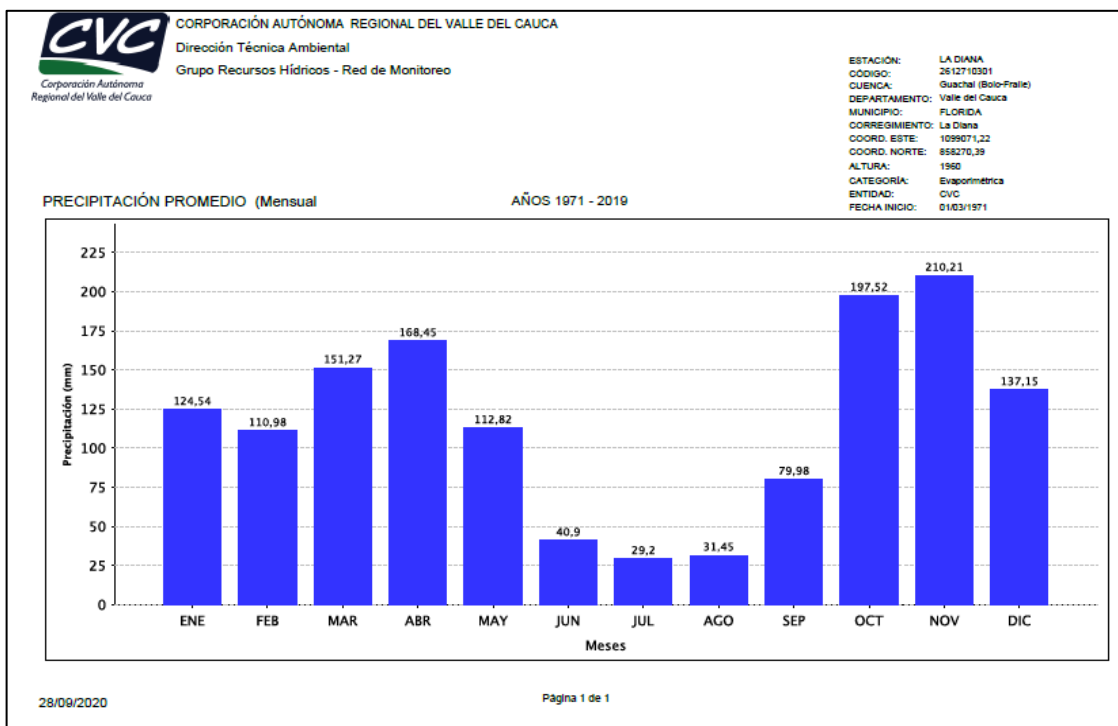


Figura 25 - Datos de precipitación tramo de estudio municipio de Florida Valle

Nota. Fuente: Estación LA DIANA. (CVC,2020)

Donde se registra una precipitación media anual de 1394.29 mm/año, así pues se realiza la corrección de acuerdo con los parámetros establecidos en la *tabla 42*, correspondiente al 10% y para una zona con un terreno ondulado de bajas pendientes con un tránsito promedio diario inferior a 50 vehículos, se asume una pérdida anual de grava correspondiente a 16.5 mm/año, valor con el cual se estableció la proyección de mantenimientos periódicos a la estructura de afirmado, la recomendación realizada por el INVIAS en el manual de mantenimiento de carreteras, hace referencia a que la magnitud de la recarga de grava se puede determinar como el compromiso entre el espesor remanente del afirmado en el instante de la evaluación y el que requeriría un nuevo afirmado sobre la misma subrasante para servir el mismo tránsito; bajo esta recomendación la pérdida máxima aceptable corresponde a la cual el espesor remanente según los criterios de diseño no sea inferior al espesor dado por el $SN_{Tránsito}$ el cual está dado en función

de las características del tránsito y CBR de la zona, y corresponde a 37.8 cm. La estructura adoptada corresponde a 40 cm de espesor de afirmado A25.

Tabla 46

Pérdidas anuales de grava

DETERMINACIÓN DE PERDIDA DE GRAVA ANUAL			
Perdida estimada (cm/año)	1.65	1.65	1.65
Tiempo (años)	0	1	2
Espesor remanente (cm)	40	38.35	36.7

Nota. **Fuente:** Manual de mantenimiento de carreteras Volumen 1. (INVIAS,2016)

De acuerdo con el análisis realizado, se determina que el mantenimiento periódico para la recarga de grava en la vía se realizará con una periodicidad bienal. Así pues, los costos de mantenimiento para la estructura de pavimento en afirmado y afirmado con inclusión de zeolitas se resumen de la siguiente manera.

- **Afirmado**

Tabla 47 Costo mantenimiento rutinario afirmado

COSTO MANTENIMIENTO RUTINARIO (Precios INVIAS 2020)	
Perfilado ligero 300 ml	\$ 397,009.00

Nota. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 48 Costos mantenimientos periódicos afirmado

COSTO MANTENIMIENTO PERIÓDICO (Precios INVIAS 2020)	
Recarga de afirmado 49.5 m3	\$ 1,968,162.00

Nota. **Fuente:** Elaboración propia.

- **Afirmado con adición de zeolitas**

Tabla 49 Costos mantenimiento rutinario afirmado con inclusión de zeolitas

COSTO MANTENIMIENTO RUTINARIO (Precios INVIAS 2020)	
Perfilado ligero 300 ml	\$ 397,009.00

Nota. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 50

Costos mantenimiento rutinario afirmado con inclusión de zeolitas

COSTO MANTENIMIENTO PERIÓDICO (Precios INVIAS 2020)	
Recarga de afirmado con adición de zeolitas 49.5 m3	\$ 19,084,600

Nota. **Fuente:** Elaboración propia.

8.2.3.2 Alternativa de solución seleccionada mediante proyectos tipo DNP

Las actividades a considerar para la alternativa de solución que contempla una subbase granular más una base estabilizada con emulsión asfáltica y un tratamiento superficial doble se pueden ordenar en tres grupos específicos, que son: mantenimiento preventivo, periódico y correctivo (atención de emergencias) (Departamento Nacional de Planeación, 2018)

- **Mantenimiento preventivo**

Comprende obras programadas con intervalos variables de tiempo, destinadas a mantener las condiciones y especificaciones del nivel de servicio original de la vía. Las

cuales pueden incluir: Limpieza de obras de drenaje, sellos o reparación de menor escala como tratamientos superficiales para desprendimientos, lechadas, etc. (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

- **Mantenimiento periódico**

Corresponde a todas aquellas actividades necesarias para solucionar los problemas de fallas superficiales y en algunas ocasiones aumentar la vida útil de los elementos de las actividades de mejoramiento contempladas. Estimándose así por el grupo de estructuración de proyectos del DNP los siguientes costos asociados a los mantenimientos de la alternativa seleccionada mediante la metodología de proyectos tipo para el mejoramiento de vías terciarias (Departamento Nacional de Planeación, 2018)

Tabla 51 Costos de mantenimientos estimados por el DNP

TIPO DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA		MONTO TOTAL
	(VECES POR AÑO)	MONTO ESTIMADO	
Preventivo	2	\$ 535,000.00	\$ 1,070,000.00
Periódico	1	\$ 1,070,000.00	\$ 1,070,000.00

Nota. **Fuente:** Mejoramiento de vías terciarias, Vías de tercer orden (DNP,2020).

8.2.4 Costos de operación

Las actividades por considerar para la operación de la vía terciaria mejorada se pueden enmarcar principalmente en la programación de los diferentes tipos de mantenimiento. Con la designación de funciones para una persona con perfil técnico administrativo, que podrá estar incluida dentro del organismo de planeación o de infraestructura de la entidad territorial, se podrán realizar las actividades administrativas correspondientes (Departamento Nacional de Planeación, 2018)

Tabla 52

Costos operativos en vías terciarias

FRECUENCIA (VECES POR AÑO)	PERSONAL	MONTO ESTIMADO POR MES	DEDICACIÓN	MONTO TOTAL
Permanente	Técnico administrativo	\$ 1,605,000.00	10%	\$ 160,500.00

Nota. **Fuente:** Mejoramiento de vías terciarias, Vías de tercer orden (DNP,2020).

8.3 FASE 3 (ANÁLISIS AMBIENTAL):

Se realizó la evaluación de impacto ambiental, calculándose la huella de carbono para cada una de las alternativas evaluadas, esto con el fin de poder establecer si las zeolitas presentan ventajas en el aspecto ambiental, en comparación con la metodología tradicional del afirmado como punto de referencia de la investigación. Para ello se analizaron la fase constructiva del caso de aplicación correspondiente al mejoramiento de 300 ml de vía, el cual se ha planteado según las variables de la zona, tales como la capacidad de soporte de la subrasante y el número total de ejes equivalentes para el periodo de diseño de 10 años; la construcción de una estructura de 40 cm en afirmado.

8.3.1 Fase de construcción

Para la fase constructiva del proyecto se tuvieron en cuenta factores generadores de emisiones De CO₂, los cuales se resumen a continuación:

8.3.1.1 Materiales de construcción

Las emisiones de CO₂ se liberan durante la producción de materiales de construcción. El proceso de producción incluye la extracción o extracción de materias primas, transporte, procesamiento y distribución. Estas emisiones son emisiones indirectas ya que no se liberan en el sitio de

construcción sino en otros lugares, tanto como el material de afirmado como la zeolita se producen mediante la explotación en cantera a cielo abierto y una posterior molienda que permita obtener el tamaño de partículas acorde con el uso de los minerales.

En lo sucesivo, estas emisiones indirectas se denominarán "carbono incorporado". El carbono incorporado se refiere a las emisiones de CO_2 en todas las etapas del proceso de producción de un bien, desde la extracción de materias primas hasta la distribución del producto terminado al consumidor (Asian Development Bank, 2010).

De acuerdo con Highways England, se han tomado referencias de factores de emisión de materiales, los cuales a su vez han sido tomados del inventario de carbón y energía del gobierno del Reino Unido, y para los agregados explotados de canteras a cielo abierto se ha estimado un factor de emisión que se expresa en función a las toneladas de material producido y tiene como valor 0.007 tCO₂e/t (England, n.d.). Lo cual de acuerdo con los pesos unitarios de cada uno de los materiales presentaría las siguientes emisiones de carbono.

Tabla 53

Comparación de factores de emisión por material

ITEM DE COMPARACIÓN	Material granular de afirmado CACHIBI SAS	Zeolitas	Afirmado con inclusión de zeolitas
Peso unitario (t/m ³)	2.35	1.06	2.01
Emisiones de CO ₂ (tCO ₂ e/t)	0.01645	0.00742	0.01407
Toneladas requerida para proyecto de mejoramiento de 300 ml	1410	636	1206
Total, de emisiones para construcción de afirmado (tCO ₂ e)	23.1945	4.71912	16.96842

Nota. **Fuente:** Elaboración propia.

8.3.1.2 Combustibles fósiles

Combustibles fósiles como diésel, aceite de horno y diésel ligero (LDO), entre otros, se utilizan en sitios de construcción de carreteras en diferentes tipos de maquinaria y vehículos de construcción. La combustión de estos combustibles fósiles en los motores produce emisiones directas de CO₂ (Asian Development Bank, 2010). De acuerdo con las referencias de emisión de Highways england “Carbon emissions calculation tool”, dichas emisiones se cuantifican en función a los litros de combustible siendo el factor de emisión expresado en kgCO₂e/L (England, n.d.). Por tanto, para la construcción de afirmados se han contemplado las siguientes máquinas que de acuerdo con los manuales de rendimiento y sus factores de carga asociados a la clase de trabajo permiten determinar los consumos de combustible horario, variable mediante la cual se permite estimar las emisiones de CO₂, las maquinarias de acuerdo con las normas de construcción especificadas por el INVIAS de acuerdo con los análisis de precios unitarios que establecen los rendimientos de cada máquina, permite cuantificar el total de horas para el caso de aplicación que contempla la construcción de 300 ml de estructura de pavimento en afirmado,

Tabla 54

Horas máquina para proyecto de aplicación

Estructura de pavimento en afirmado	Excavación	Conformación	Aplicación
		calzada	de afirmado
Retroexcavadora	33	-	-
Motoniveladora (DIESEL)	-	3	13
Vibro compactador (DIESEL)	-	3	13
Carrotanque de agua	-	-	13
Volqueta (12m ³)	100	-	250

Nota. **Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con el manual de rendimientos de Caterpillar los consumos horarios de combustible asociados a estas máquinas se resumen a continuación, en donde se consideraron los factores de carga para los trabajos de construcción de caminos.

Tabla 55

Consumos horario de combustible por maquina

Maquina	Rango de consumo construcción (L/h)	Consumo horario de combustible
Retroexcavadora cargadora Caterpillar 426C (DIESEL)	7.2-9.1	8.15
Motoniveladora Caterpillar 14H (DIESEL)	28 – 35	31.5
Vibro compactador Caterpillar C5-563D (DIESEL)	13-15	14
Carrotanque de agua	10.6-14.8	12.7
Volqueta (12m3)	14.8-20.8	17.8

Nota. **Fuente:** Elaboración propia (CATERPILLAR, 2009).

De acuerdo con las horas estimadas con base en los rendimientos de la maquinaria para cada una de las actividades contempladas en la construcción de una estructura de afirmado en 300 ml, se establecieron los siguientes consumos de combustible:

Tabla 56

Consumos totales de combustible en la etapa constructiva

Maquina	Consumo horario de combustible (L/h)	Consumo total en obra (L)
Retroexcavadora cargadora Caterpillar 426C (DIESEL)	8.15	272
Motoniveladora Caterpillar 14H (DIESEL)	31.5	515
Vibro compactador Caterpillar C5-563D (DIESEL)	14	229
Carrotanque de agua (DIESEL)	12.7	165
Volqueta 12m3 (DIESEL)	17.8	6230

Nota. Fuente: **Elaboración propia (CATERPILLAR, 2009).**

De acuerdo con los consumos de combustible y la información presentada por Highways england, se estableció un factor de emisión para el combustible Diesel de **3.156 kgCO₂e/L** (England, n.d.), estimándose así las siguientes emisiones para las maquinarias que operan en la construcción del proyecto:

Tabla 57 Factores de emisión para combustibles DIESEL

Equipo	Factor de emisión	Unidad factor de emisión	Valor
Retroexcavadora cargadora Caterpillar 426C (DIESEL)	3.156	kgCO ₂ e/l	857.38
Motoniveladora Caterpillar 14H (DIESEL)	3.156	kgCO ₂ e/l	1623.762
Vibro compactador Caterpillar C5- 563D (DIESEL)	3.156	kgCO ₂ e/l	721.672
Carrotanque de agua (DIESEL)	3.156	kgCO ₂ e/l	521.0556
Volqueta 12m ³ (DIESEL)	3.156	kgCO ₂ e/l	19661.88

Nota. Fuente: **Elaboración propia** (England, n.d.) .

Por tanto, al considerar los factores de emisión asociados con el material en sus etapas de producción, así como las emisiones generadas en la construcción de un tramo de 300 ml en estructura de afirmado, la huella de carbono para la etapa constructiva se resume a continuación considerando tres escenarios, la construcción con una estructura de afirmado convencional, una estructura de afirmado con inclusión de zeolitas y un escenario que contemple una estructura con zeolitas únicamente.

Tabla 58

Huella de carbono etapa constructiva por material

MATERIAL	Emisiones en producción de agregado (tco2e)	Emisiones en construcción de estructura en afirmado (tco2e)	Huella de carbono (tco2e)
Material granular de afirmado			
CACHIBI SAS	9.87	23.39	33.26
Zeolitas	4.45	23.39	27.84
Afirmado con inclusión de zeolitas	8.44	23.39	31.83

Nota. Fuente: **Elaboración propia.**

Evidenciándose que el uso de zeolitas presenta una disminución en la huella de carbono generada en la construcción de carreteras. Por otro lado, esta disminución se ve reflejada también en la disminución de Tasas impositivas ambientales, las cuales son consideradas en el artículo 222 de la ley 1819 de 2016 en donde se ha fijado una tarifa de \$16,422 por tonelada de CO₂, dicha tasa es pagada por el consumidor final y recaudada por la DIAN (Romero, 2019), a continuación, se resume en el ejemplo de aplicación para el mejoramiento de una vía de 300 ml, las tasas impositivas generadas por las toneladas de CO₂ generadas y la disminución generada al implementar las zeolitas.

Tabla 59

Tasa impositiva por generación de CO2

MATERIAL	Emisiones en producción (tco2e)	Emisiones construcción (tco2e)	Huella de carbono (tco2e)	Impuesto para CO2 articulo 222 Ley 1819 de 2016	Total, tasa impositiva
Material granular de afirmado CACHIBI SAS	9.91	23.39	33.30	\$ 16,422.00	\$ 546,815.64
Zeolitas	4.45	23.39	27.84	\$ 16,422.00	\$ 457,151.52
Afirmado con inclusión de zeolitas	9.57	23.39	32.96	\$ 16,422.00	\$ 541,263.37

Nota. Fuente: **Elaboración propia.**

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 Evaluación técnica

Una vez realizados los procesos de análisis descritos de manera previa en el capítulo de metodología, se obtuvo una serie de datos e información propia que brinda aspectos y características a los materiales en estudio, los cuales permitirán contrastar la información y poder determinar el desempeño de las zeolitas como material pétreo para la construcción de vías con bajos volúmenes de tránsito, bajo un criterio de costo-efectividad, que conlleve a determinar soluciones que resulten más económicas, ofrezcan una mayor durabilidad y sean sostenibles ambientalmente.

A partir de la caracterización inicial que se realizó para las zeolitas como posible agregado para la construcción de carreteras, se obtuvieron los siguientes datos, los cuales fueron contrastados con un material producido en la zona que cuenta con altos índices de calidad para su implementación en la construcción de carreteras.

Tabla 60 Comparación de parámetros para evaluación de agregados

ENSAYO	UNIDAD	MATERIAL GRANULAR		REQUISITO INVIAS
		AGREGADOS Y MEZCLAS CACHIBI S.A.	ZEOLITAS	
Masa unitaria	Tn/m ³	1.9	1.1	N.A
Sanidad sodio	%	2.5	44	<12
Desgaste micro deval	%	21	11.73	<50
Partículas largas	%	18.7	47	N.A
Partículas planas	%	21.1	27	N.A

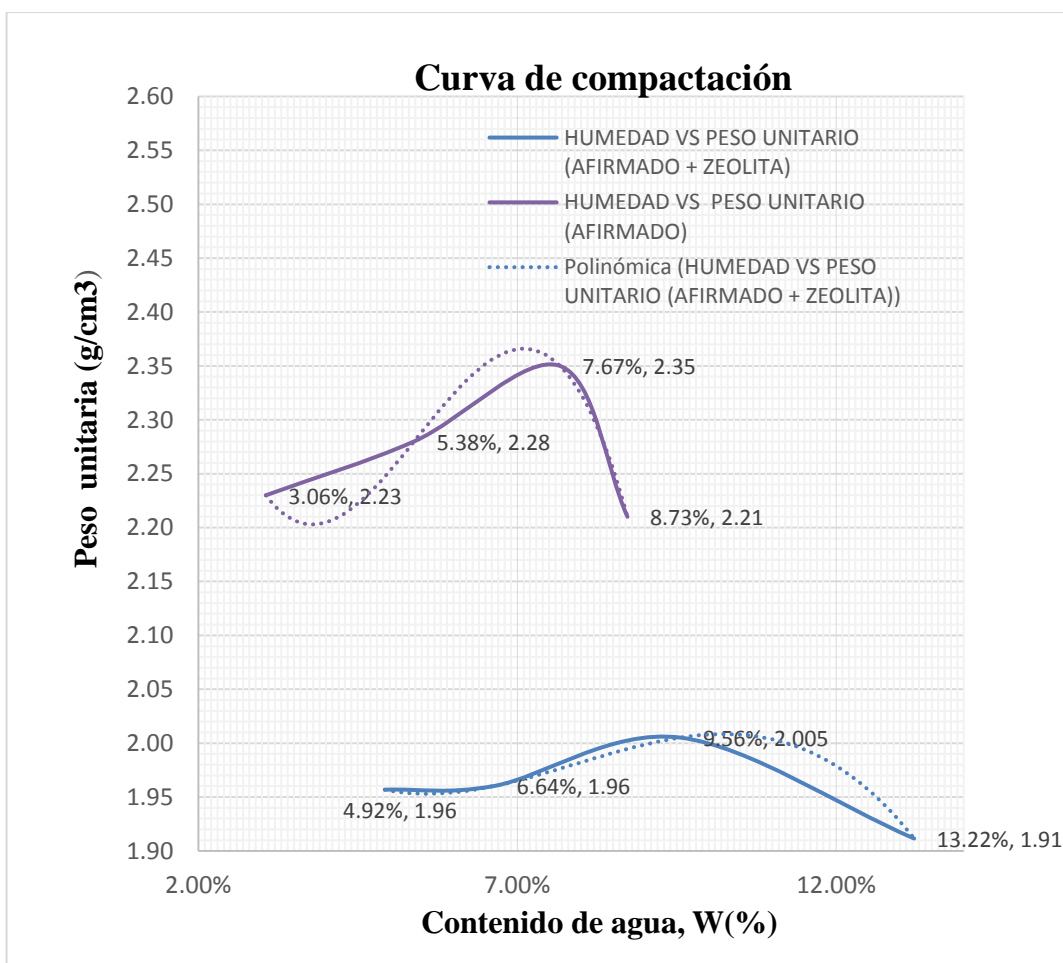
Nota. Fuente: **Elaboración propia.**

A partir de las características físicas del material de zeolita se pudo evidenciar que se tiene un material con el 55% menos del peso que el agregado convencional, esto debido a su estructura interna que posee poros, lo cual se evidencia en los altos porcentajes de absorción y retención de humedad, también debido a su composición abundante en silicio presento un porcentaje de desgaste muy bajo de aproximadamente solo el 12%, lo cual es una propiedad de suma importancia en cuanto a los factores de resistencia frente al comportamiento de las cargas dinámicas de tránsito a las cuales son sometidas las carreteras. No obstante, se evidencio que este material posee poca resistencia en cuanto a los ataques de sulfatos, presentando una perdida bastante alta al realizarse el ensayo con sulfato de sodio, por lo cual restringe su uso en determinadas zonas donde se pueda tener mayor contacto con sulfatos, además de que se debe implementar como agregado en las mezclas con afirmado para garantizar así la durabilidad de las estructuras de las vías. Se seleccionaron de acuerdo con la caracterización granulométrica, los mayores porcentajes de pasa de zeolita, y fueron incluidos en el material de afirmado conformado con el material convencional, analizando el efecto que estas pudieran tener sobre el material, realizándose así una inclusión correspondiente al 33% de zeolita y el 67% remanente de afirmado. Se realizó así pues el ensayo modificado de compactación con el fin de establecer las densidades máximas de compactación y sus humedades óptimas para cada uno de los materiales, pudiéndose evidenciar el efecto de absorción y retención de humedad propio de las zeolitas, en donde se requirió una mayor humedad optima y una densidad máxima seca menor a lo que se obtuvo con

el material convencional, en relación a este efecto se puede inferir que constructivamente las zeolitas permiten disminuir los índices de compactación del material, lo cual es una de las principales causas de deterioro en las vías terciarias, ya que generalmente al instalar las capas de material granular se realiza la compactación a medida que los vehículos transiten sobre la zona, lo cual no garantiza un óptimo desempeño de la capa de rodadura. Al requerir alrededor de un 15% menos de compactación se logra una disminución de pasadas con el compactador lo cual refleja mayores rendimientos en cuanto a la compactación del material reflejándose en menores costos en la etapa constructiva (ver gráfica 13).

Gráfica 13

Comparaciones curvas de compactación

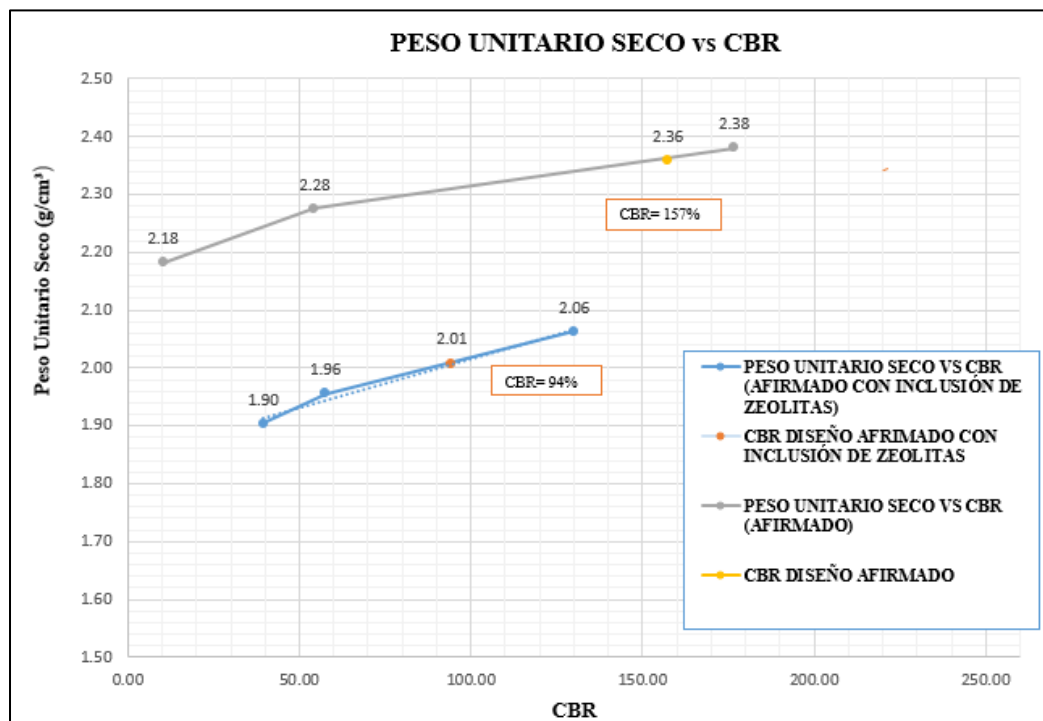


Nota. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se determinaron los porcentajes de humedad óptima para alcanzar la máxima densidad seca, y así mismo realizar el control de compactación del material, se halló el parámetro de resistencia asociado con la capacidad de soporte del material mediante el ensayo del CBR, lo cual de acuerdo con la constante presentada, de mayor humedad, menor densidad se obtuvo una disminución de dicha capacidad de soporte al realizarse la inclusión de un 33% de zeolita, pero manteniéndose en los rangos de aceptación establecidos por el INVIAS para un material de afirmado, y llegando a valores admisibles de CBR para para subbases y bases granulares que se implementan en estructuras de pavimentos con mayores volúmenes de tráfico. Lo cual técnicamente permite afirmar que la zeolita se puede implementar como solución estructural para el mantenimiento y construcción de carreteras de bajos volúmenes de tránsito, teniendo en cuenta que al requerirse una menor compactación se facilita el proceso constructivo teniendo en cuenta que algunos sectores son de difícil acceso para equipos de compactación de gran tamaño.

Gráfica 14

Comparación de CBR vs Peso unitario por alternativas



Nota. Fuente: **Elaboración propia.**

Zeocol SAS, presenta dentro de la caracterización del material, factores que son relevantes en cuanto al comportamiento del material en condiciones de humedad, lo cual es una de las problemáticas que se presentan en las vías terciarias en donde los materiales compactados con humedades reducidas si bien pueden presentar densidades elevadas, después de la construcción pueden sufrir importantes pérdidas de resistencia al crecer su contenido de humedad en eventos de precipitaciones altas y zonas con carencias de drenajes; la inclusión de zeolitas debido a su alto porcentaje de retención de humedad lograría mantener la capacidad portante de la estructura de pavimento en condiciones de saturación y disminuir los riesgos de afectación ante superficies de rodadura que no cuenten con capas ni tratamientos superficiales que creen un sello de impermeabilidad mejorando la funcionalidad de la vía.

Tabla 61

Parámetros de retención de fluidos de la zeolita

Parámetro evaluado	Norma de ensayo	Concentración
Humedad	NTC 35 GRAVIMETRÍA	(0.3-5.0) %
Retención de humedad	NTC 5167 GRAVIMETRÍA	(30-45) %

Nota. Fuente: **Elaboración propia. (ZEOCOL SAS 2020)**

Al realizar la comparación de los parámetros de calidad estimados en el artículo 311 del INVIAS, se cumplían los requisitos de calidad y aceptación del material de afirmado, sin embargo se constató que al sumar las pérdidas por sulfatos presentadas en cada material bajo la proporción 67% afirmado – 33% zeolita, se superaba el porcentaje máximo de pérdida permisible del 12%, por ende se replanteo una nueva proporción acorde con este requisito el cual establece que según las características de los materiales implementados, se deben implementar bajo una proporción de 77% afirmado – 23% zeolitas la cual satisface los requisitos de calidad mencionados previamente.

Tabla 62-

Porcentaje de pérdida por sulfatos (afirmado con inclusión de zeolitas)

AFIRMADO	ZEOLITA	TOTAL, PERIDAS POR SULFATOS
0.67	0.33	16%
0.77	0.23	12%

Nota. Fuente: **Elaboración propia**

9.2 Evaluación financiera

De acuerdo con las soluciones planteadas a un tramo con unas características en particular, se lograron establecer tres escenarios como soluciones constructivas para el mejoramiento de 300 ml de vía terciaria en el municipio de Florida Valle, dos de estos contemplan la estructura de afirmado, con inclusión de zeolitas y solo afirmado; la tercer solución se seleccionó bajo la herramienta de diseño implementada por el DPN dentro de los proyectos tipo para el mejoramiento de vías , que contempla 9 alternativas que cuentan con especificaciones del INVIAS y hacen parte de las soluciones convencionales que se aplican actualmente en el país, así pues se realizó para cada alternativa un flujo de caja en el cual se contrastaron los costos de construcción, operación y mantenimiento de cada una de las alternativas y se evaluó su valor presente neto y el valor anual equivalente que permita realizar una interpretación financiera completa en un periodo de 10 años. De acuerdo con la información del banco de la república, se tomó como constantes una inflación del 2.5% (REPUBLICA, 2020). y una tasa de descuento del 12%, según lo recomendado por el DNP(9% más efecto de la inflación) (Departamento Nacional de Planeación, 2019), obteniendo así los siguientes flujos de caja para cada una de las alternativas:

ALTERNATIVA 1 - ESTABILIZACIÓN MECÁNICA CON ESTRUCTURA DE PAVIMENTO EN AFIRMADO											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Construcción	\$ 150,726,658.00										
Total construcción	\$ 150,726,658.00										
Costos de operación	\$ -	\$ 1,926,000.00	\$ 1,993,410.00	\$ 2,063,179.35	\$ 2,135,390.63	\$ 2,210,129.30	\$ 2,287,483.82	\$ 2,367,545.76	\$ 2,450,409.86	\$ 2,536,174.21	\$ 2,624,940.30
Costos mantenimientos rutinarios	\$ -	\$ 397,009.00	\$ 406,934.23	\$ 417,107.58	\$ 427,535.27	\$ 438,223.65	\$ 449,179.24	\$ 460,408.72	\$ 471,918.94	\$ 483,716.92	\$ 495,809.84
Costos mantenimientos periodicos	\$ -	\$ 1,789,417.00	\$ 1,789,417.00	\$ -	\$ 1,880,006.24	\$ -	\$ 1,975,181.55	\$ -	\$ 2,075,175.12	\$ -	\$ 2,180,230.86
TOTAL FLUJO DE CAJA	\$ 150,726,658.00	\$ 4,112,426.00	\$ 4,189,761.23	\$ 2,480,286.93	\$ 4,442,932.13	\$ 2,648,352.95	\$ 4,711,844.62	\$ 2,827,954.48	\$ 4,997,503.92	\$ 3,019,891.12	\$ 5,300,981.00

ALTERNATIVA 2-ESTABILIZACIÓN MECÁNICA CON ESTRUCTURA DE PAVIMENTO EN AFIRMADO CON INCLUSIÓN DE ZEOLITAS											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Construcción	\$ 358,947,658.00										
Total construcción	\$ 358,947,658.00										
Costos de operación	\$ -	\$ 1,926,000.00	\$ 1,993,410.00	\$ 2,063,179.35	\$ 2,135,390.63	\$ 2,210,129.30	\$ 2,287,483.82	\$ 2,367,545.76	\$ 2,450,409.86	\$ 2,536,174.21	\$ 2,624,940.30
Costos mantenimientos rutinarios	\$ -	\$ 397,009.00	\$ 406,934.23	\$ 417,107.58	\$ 427,535.27	\$ 438,223.65	\$ 449,179.24	\$ 460,408.72	\$ 471,918.94	\$ 483,716.92	\$ 495,809.84
Costos mantenimientos periodicos	\$ -	\$ -	\$ 19,084,600.00	\$ -	\$ 20,050,757.88	\$ -	\$ 21,065,827.49	\$ -	\$ 22,132,285.01	\$ -	\$ 23,252,731.94
TOTAL FLUJO DE CAJA	\$ 358,947,658.00	\$ 2,323,009.00	\$ 21,484,944.23	\$ 2,480,286.93	\$ 22,613,683.77	\$ 2,648,352.95	\$ 23,802,490.56	\$ 2,827,954.48	\$ 25,054,613.81	\$ 3,019,891.12	\$ 26,373,482.08

ALTERNATIVA 3-BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA+TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Construcción	\$ 292,836,119.00										
Total construcción	\$ 292,836,119.00										
Costos de operación	\$ -	\$ 1,926,000.00	\$ 1,993,410.00	\$ 2,063,179.35	\$ 2,135,390.63	\$ 2,210,129.30	\$ 2,287,483.82	\$ 2,367,545.76	\$ 2,450,409.86	\$ 2,536,174.21	\$ 2,624,940.30
Costos mantenimientos rutinarios	\$ -	\$ 1,070,000.00	\$ 1,096,750.00	\$ 1,124,168.75	\$ 1,152,272.97	\$ 1,181,079.79	\$ 1,210,606.79	\$ 1,240,871.96	\$ 1,271,893.76	\$ 1,303,691.10	\$ 1,336,283.38
Costos mantenimientos periodicos	\$ -	\$ 1,070,000.00	\$ 1,096,750.00	\$ 1,124,168.75	\$ 1,152,272.97	\$ 1,181,079.79	\$ 1,210,606.79	\$ 1,240,871.96	\$ 1,271,893.76	\$ 1,303,691.10	\$ 1,336,283.38
TOTAL FLUJO DE CAJA	\$ 292,836,119.00	\$ 4,066,001.00	\$ 4,186,912.00	\$ 4,311,519.85	\$ 4,439,940.56	\$ 4,572,293.89	\$ 4,708,703.40	\$ 4,849,296.67	\$ 4,994,205.37	\$ 5,143,565.41	\$ 5,297,517.06

Figura 26- Flujos de caja para alternativas de construcción planteadas

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Obteniéndose así los siguientes parámetros de VPN, valor anual equivalente y costo por km asociado a cada una de las alternativas evaluadas:

Tabla 63

Comparación de parámetros de evaluación financiera

CRITERIO DE EVALUACIÓN FINANCIERA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
VPN	\$171,228,770.72	\$428,827,012.04	\$333,351,228.11
Valor anual equivalente	\$30,304,780.87	\$75,895,590.29	\$58,997,888.48
Costo por KM	\$570,762,569.08	\$1,429,423,373.45	\$1,111,170,760.37

Nota. Fuente: **Elaboración propia.**

Estos resultados evidencian que el método convencional presenta el menor valor tras el análisis en un periodo de 10 años en donde se tuvieron en cuenta la fase constructiva, fase de mantenimientos rutinarios y periódicos y la fase operativa del tramo de vía en estudio. Cabe resaltar que si bien la alternativa donde se involucran los agregados zeolíticos tiene los costos más altos, esto es debido a que el mineral es importado desde el Ecuador, lo que incrementa su valor de adquisición; sin embargo, investigaciones realizadas por la facultad de minas de la universidad de Medellín, establecieron que según la reconstrucción paleogeológica del suelo colombiano, en varias zonas del país como las cordilleras central y occidental debido a sus condiciones volcánicas cuentan con yacimientos de zeolitas, lo que generaría una gran disminución en los costos de este material de empezarse a explotar en el país (Tobón et al., 2013)

Respecto a las variables que influyen en la variación de los costos, se realizó un análisis de sensibilidad probabilístico con el método de Montecarlo, el cual mediante una simulación permitió analizar el comportamiento del modelo financiero de cada una de las alternativas ante las variaciones en parámetros tales como los niveles de tránsito y la capacidad de soporte del suelo (CBR), los cuales hacen que dichos costos varíen en cada zona modificando así los escenarios de aplicación y a su vez los costos de construcción y de mantenimiento requeridos. Inicialmente para los costos de construcción se manejaron rangos de tránsito que determinan la

caracterización del tránsito de acuerdo con el número de ejes equivalentes, teniendo en cuenta que dichos volúmenes tiene un límite de 500.000 ejes equivalentes como el máximo valor para que la vía sea categorizada como red vial terciaria, tomándose así para rangos entre 0 – 85000, 85000-210000 y 210000 -500000 ejes y a su vez también se realizó dicha interpretación con las categorías de comportamiento de la subrasante las cuales se determinan de acuerdo con los rangos del CBR que van desde 0-2, 3-5,6-10,11-20 y valores por encima del 20%; estas variaciones también fueron implementadas para evaluar la herramienta de cálculo adoptada por el DNP, la cual implementa la matriz multicriterio que determina la solución más adecuada de acuerdo con las características de la zona, en donde las variables de tránsito y suelo son las más representativas al igual que la metodología que estima los espesores de una estructura de pavimento en afirmado. Por otro lado, los costos de mantenimiento arrojan que para la construcción de estructuras de vía en afirmado se presenta una mayor numero de alternativas y que la periodicidad de estos está ligada directamente a los volúmenes vehiculares que transitan por la zona que conlleven a mayores desgastes, mientras que para las soluciones convencionales se mantienen de manera constante; por otro lado, los costos operativos no presentaron variaciones en ninguna de las tres alternativas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación, para cada una de las alternativas analizadas, mediante la extensión RISK de Microsoft Excel.

Tabla 64 Análisis de sensibilidad método de Montecarlo

VARIABLES DE ANALISIS DE SENSIBILIDAD ALTERNATIVA 1 ESTABILIZACIÓN MECANICA CON ESTRUCTURA DE AFIRMADO		
Number of Datapoints		756
Mean	\$	171,674,523.64
Median	\$	167,540,294.80
Standard Deviation	\$	15,917,267.14
Variance	\$	253,359,393,086,121.00
Coefficient of Variation		9%
Maximum	\$	200,558,122.91
Minimum	\$	142,094,323.70

Range	\$	58,463,799.21
Skewness		0.28
Kurtosis		-1.24
25% Percentile	\$	156,561,622.91
75% Percentile	\$	185,892,622.91
Error Precision at 95%		0.01

Nota. Fuente: **Elaboración propia (RISK).**

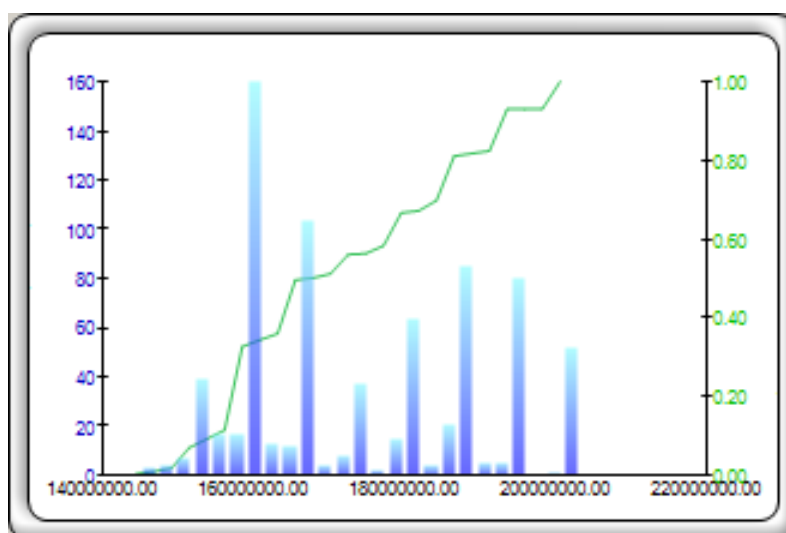


Figura 27 - Análisis de sensibilidad para la construcción de vías en afirmado

Nota. Fuente: **Elaboración propia. (RISK)**

Tabla 65

Análisis de sensibilidad método de Montecarlo

VARIABLES DE ANALISIS DE SENSIBILIDAD ALTERNATIVA 2 ESTABILIZACIÓN MECANICA CON ESTRUCTURA DE AFIRMADO CON INCLUSIÓN DE ZEOLITAS		
Number of Datapoints		1000
Mean	\$	532,385,776.10
Median	\$	553,106,832.78
Standard Deviation		55292214.9640
Variance	\$	3,057,229,035,620,550.00
Coefficient of Variation		10.39%
Maximum	\$	574,136,082.78
Minimum	\$	293,007,931.71
Range	\$	281,128,151.07
Skewness		-2.0568
Kurtosis		3.3411
25% Percentile		532024707.7813
75% Percentile		565724382.7813
Error Precision at 95%		0.0064

Nota. Fuente: **Elaboración propia. (RISK)**

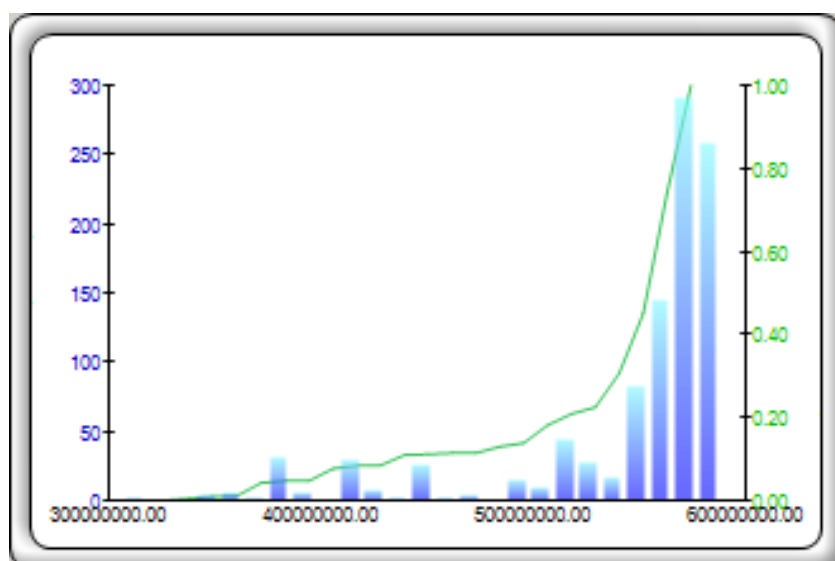


Figura 28-Análisis de sensibilidad para la construcción de vías en afirmado con inclusión de zeolitas

Nota. Fuente: **Elaboración propia. (RISK)**

Tabla 66

Análisis de sensibilidad método de Montecarlo

VARIABLES DE ANALISIS DE SENSIBILIDAD ALTERNATIVA 3 MEJORAMIENTOS PLANTEADOS POR EL DNP		
Number of Datapoints		756
Mean	\$	305,576,566.40
Median	\$	318,945,842.00
Standard Deviation	\$	75,438,362.62
Variance	\$	5,690,946,554,945,510.00
Coefficient of Variation		25%
Maximum	\$	389,484,242.00
Minimum	\$	143,319,392.00
Range	\$	246,164,850.00
Skewness		- 29

Kurtosis		0.70
25% Percentile	\$	318,945,842.00
75% Percentile	\$	318,945,842.00
Error Precision at 95%		0.02

Nota. Fuente: **Elaboración propia. (RISK)**

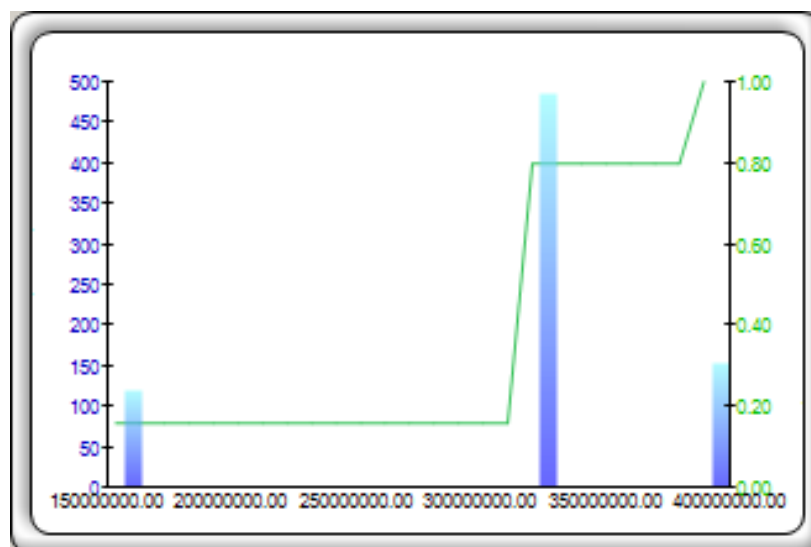


Figura 29- Análisis de sensibilidad alternativas de mejoramiento de vías terciarias DNP

Nota. Fuente: **Elaboración propia. (RISK)**

Después de realizar este análisis se puede inferir que las metodologías de construcción de vías en afirmado con o sin la inclusión de agregado zeolítico, presenta bajos coeficientes de variación lo cual permite inferir que si bien las variables analizadas permiten un mayor rango de costos tanto de construcción como de operación estos no tienden a presentar cambios abruptos, lo cual se evidencia en los valores máximos y mínimos que representan rangos bajos en cuanto a la variación de los costos; por otro lado las metodologías implementadas por el DNP mediante la selección a través de la matriz multicriterio, nos permite inferir que se presenta un alto coeficiente de variación en cuanto a las los rangos de costos constructivos de estas alternativas los cuales varían

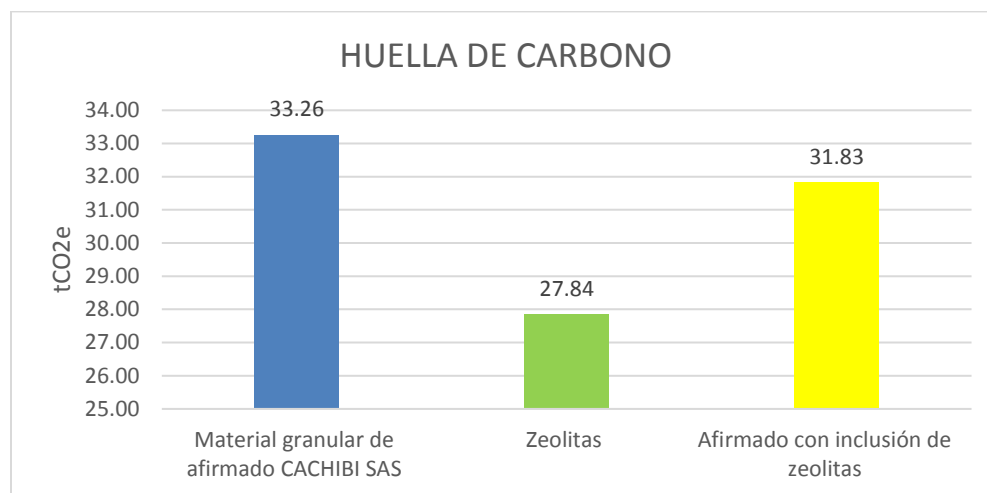
en cada zona donde se requiera su aplicación, lo cual financieramente requiere análisis mayores para la planificación y consecución de recursos en los planes de acción de entidades públicas que busquen mejorar un determinado número de kilómetros en los cuatrienios de gobierno. Los amplios rangos de variación, asociados a coeficientes de variación mayores como en el caso de la alternativa 3, indican que hay un mayor riesgo de que los costos del proyecto se incrementen, como resultados de variaciones en las variables de análisis y que se modelaron como variables aleatorias.

9.3 Evaluación ambiental

Para este análisis se tomó en cuenta los resultados obtenidos en relación con las emisiones de CO₂ generadas en la construcción de vías en afirmado, dentro de lo cual se evidenció que las zeolitas debido a sus características presenta disminuciones respecto a las emisiones de material, si bien estas son producidas de igual manera que el afirmado, su menor peso unitario hace que se reduzcan las emisiones de CO₂ que se generan sobre su etapa constructiva, así como los menores rendimientos de compactación requeridos tal como se analizó en los ensayos técnicos de compactación. Durante el análisis de los factores de emisión en la etapa constructiva de una vía de 300 ml de longitud con afirmado, se obtuvo la siguiente huella de carbono asociada con la implementación de zeolitas

Gráfica 15

Comparación de huella de carbono en la construcción de vías



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado al analizar las soluciones contempladas por el DNP se logró determinar que representan desventajas relacionadas con los factores ambientales, ya que estas incluyen mezclas y emulsiones asfálticas, las cuales durante su producción como materia prima tienen un mayor factor de emisión de CO₂ en comparación con la implementación de afirmados y zeolitas como alternativas de solución, de acuerdo con los factores de emisión estimados por Highways England en la herramienta que presentan “*Carbon emissions calculation tool*” (England, n.d.)

Tabla 67

Factores de emisión de materiales

COMPARACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIAS PRIMAS			
	Subbase granular	tCO2e/t	0.004
Materiales de construcción Base estabilizada con emulsión asfáltica + tratamiento superficial doble	Base granular	tCO2e/t	0.004
	Emulsión CRL-1h	tCO2e/t	0.222
	Emulsión CRR	tCO2e/t	0.222
TOTAL, FACTOR DE EMISIONES			0.452
Materiales de construcción para estabilización mecánica con materiales granulares	Afirmado/zeolita	tCO2e/t	0.007
	TOTAL, FACTOR DE EMISIONES		

Nota. Fuente: **Elaboración propia.**

10. CONCLUSIONES

- El análisis de las zeolitas como material alternativo para la construcción de carreteras, permitió establecer que este material cuenta con propiedades que garantizan un buen desempeño en la función de agregado para la construcción de carreteras del tercer orden, pudiéndose incorporar como un campo más de aplicación para este mineral, el cual a pesar de contar con un peso unitario menor respecto a los agregados convencionales, presenta un alto contenido de sílice que le permite tener una gran resistencia ante factores como el desgaste por abrasión, sin embargo la poca resistencia de este mineral al desgaste por sulfatos, limitan su uso únicamente como complemento y agregado para el afirmado convencional.
- En el presente documento se analizó la influencia de las zeolitas sobre un afirmado A25 convencional lo cual demostró que la presencia de este mineral logra disminuir el valor del CBR en un 37% bajo la proporción analizada con una adición del 33% de zeolitas. Sin embargo, esta disminución mantiene el valor de CBR dentro de los estándares de calidad estimados por el INVIAS con un 94% sobre el requisito, en el cual se establece un valor mínimo de aceptación >15%.
- Se demostró mediante la implementación de zeolitas como agregado en el afirmado el mejoramiento de factores constructivos como la menor densidad máxima de compactación la cual paso de ser 2.36 a 2.01 ton/m³, lo cual facilita la ejecución de construcción de caminos en zonas rurales, permitiendo así tener un comportamiento estructural excelente y ventajas en su etapa constructiva con la disminución de rendimientos de compactación, teniendo en cuenta que la proporción de zeolitas que se implementen en conjunto con el afirmado satisfagan los criterios de aceptación contemplados en el artículo 311 del INVIAS, para garantizar un material con una óptima durabilidad y desempeño.

- La capacidad de retención de líquidos en las zeolitas permite garantizar una mayor capacidad de saturación de la estructura de vía evitando pérdidas en la capacidad portante del suelo, en zonas de alta precipitación que no cuenten con óptimos sistemas de drenaje o capas que impermeabilicen la superficie de rodadura.
- Evaluando los criterios económicos de las alternativas analizadas, se logró demostrar que las estructuras de pavimento construidas con afirmado son las más viables debido a que durante un periodo de evaluación de 10 años en los que se analizaron costos de construcción, operación y mantenimiento obtuvieron los menores costos, seguido de la alternativa implementada por la metodología de proyectos tipo del DNP, y en un último lugar el afirmado con inclusión de zeolitas, las cuales debido a su importación encarecen los costos de esta alternativa.
- La construcción de estructuras de pavimento en afirmado, representa en los factores económicos mayores ventajas debido a que sus coeficientes de variación respecto a variables como el CBR, el número de ejes equivalentes y el tránsito promedio diario si bien son más altos, los rangos de variación se mantienen en valores muy bajos lo cual permite inferir que para diversos escenarios la variación de los costos es relativamente baja, en comparación con las alternativas implementadas en los proyectos tipo del DNP, donde se obtuvieron menores coeficientes de variación pero rangos elevados, por lo que una estructura de pavimento en afirmado ejecutada con todas las condiciones de calidad requeridas representa una mayor factibilidad financiera en el periodo analizado correspondiente a 10 años.
- La implementación de estabilizaciones mecánicas con estructuras de pavimento en afirmado, representa un menor impacto ambiental (0.007 tCO₂e/t) frente a la implementación de emulsiones asfálticas y tratamientos superficiales (0.452 tCO₂e/t) ; las zeolitas como agregado representa los menores factores de emisión comparado con los materiales granulares de afirmado convencional, con 5.42 toneladas emitidas de CO₂

menos respecto al afirmado convencional, debido a sus propiedades de menor peso, y su estructura de poros lo cual le brinda a este mineral propiedades para la captura de CO₂.

11. RECOMENDACIONES

- La búsqueda de alternativas de materiales para la construcción de estructuras de pavimento en afirmado requiere un mayor desarrollo en las investigaciones de nuevas fuentes de materiales, que actualmente no son explotados en el país. Su explotación local disminuiría notablemente los costos de estos materiales, que en el caso de las zeolitas requieren ser importadas generando altos costos en rubros de transporte y se refleja en el precio final del producto.
- Para la implementación de zeolitas como agregado dentro del afirmado se debe realizar el análisis de desgaste por ataque de sulfatos, dado que la suma de este desgaste (44%) con el desgaste aportado por el material de afirmado no supere el porcentaje máximo permisible del 12% estipulado en el artículo 311 del INVIAS;
- En el presente trabajo de investigación se realizó la evaluación y el análisis del desempeño de las zeolitas al ser incluidas en una estructura de pavimento. Para futuras investigaciones, se recomienda la construcción de la granulometría compuesta por zeolitas únicamente para poder afianzar este material como una alternativa más para la construcción de vías terciarias en estructura de afirmado, y promover la investigación para la explotación de estas en el país, ya que la demanda a nivel nacional es alta para los muchos usos que representa este mineral.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asian Development Bank. METHODOLOGY FOR ESTIMATING CARBON FOOTPRINT OF ROAD PROJECTS (2010).
- CAF, & Garavito, E. C. de I. J. (2010). *Soluciones e innovaciones tecnológicas de mejoramiento de vías de bajo tránsito*. Retrieved from www.caf.com/publicaciones
- Campagnoli, S. (2017). Innovación En Métodos De Pavimentación: Casos Regionales. *Revista de Ingeniería*, 0(45), 22–31. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i45.937>
- CATERPILLAR. (2009). *Manual de rendimiento Caterpillar*. (C. Inc, Ed.) (31st ed.).
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). Mejoramiento de vías terciarias -vías de tercer orden. *Proyectos TIPO. Soluciones Ágiles Para Un Nuevo País*, 1, 64.
- Departamento Nacional de Planeación. Tasa de descuento cómo parametro de evaluación de proyectos de inversión del sector público (2019). COLOMBIA. Retrieved from [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/DNP/Proyecto de resolución tasa social de descuento 2019.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/DNP/Proyecto%20de%20resoluci3n%20tasa%20social%20de%20descuento%202019.pdf)
- DNP. (2016). Departamento Nacional de Planeación. Compes 3857 lineamientos de política para la gestión de la red terciaria.
- DNP, USAID, & RURALES, C. V. D. C. (n.d.). ANEXO1 Herramienta-VT-9.
- England, H. (n.d.). Carbon emissions calculation tool.
- Higuera, C. (2008). Diseño de estructuras de pavimentos en afirmado. *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*.
- Instituto Nacional de Vías. (2016). *Manual de Mantenimiento de Carreteras. Volumen 1 Aspectos Informativos* (Vol. 1).
- INVIAS. (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras: Capítulo 1 - Aspectos generales. *Invias*, 1–8.
- Jimenez, M. (2004). "Caracterización De Minerales Zeolíticos Mexicanos."

- Orobio, A. (2013). Consideraciones Para El Diseño Y Construcción Considerations for Design and Construction of Gravel Surfaced Roads Stabilized With Calcium Chloride. *Universidad Del Valle*, 93–100.
- REPUBLICA, B. D. LA. (2020). No Title. Retrieved from <https://www.larepublica.co/economia/el-banco-de-la-republica-espera-que-2020-cierre-con-inflacion-a-15-y-en-2021-en-25-3078142#:~:text=Hacienda-,Banco de la República espera que 2020 cierre con inflación,en 2021 en 2%2C5%25&text=Joaquín M.&text=Por eso is>
- Romero, D. (2019). PL - PND Análisis proposición de modificar el impuesto al carbono. *ANDI Cámara de Grandes Consumidores de Energía y Gas*.
- Sapag Chain, N. (2008). *Preparación y evaluación de proyectos, 6ta Edición*.
- Tobón, J., Bello, L., & Alvarez, Y. (2013). Zeolitas , recurso poco explotado, 1–2.