DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Technical and economic analysis of alternatives for the construction of tertiary roads in Colombia

Zully Palomeque-Sánchez [a], Juan Gabriel Bastidas-Martínez [b] & Jessica Rincón-Estepa [c]

[a] *Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Zully.palomeque@unimilitar.edu.co*
[b] *Facultad de Estudios a Distancia, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. juan.bastidas@unimilitar.edu.co*
[c] *Grupo Enel, Bogotá, Colombia. Jessica.rincon@enel.com*

Received: August 26th, 2025. Received in revised form: October 10th, 2025. Accepted: November 4th, 2025.

Abstract
This article aims to describe the design methods for the construction of tertiary roads in Colombia. A detailed compilation of alternatives currently recommended in technical documents was carried out. Subsequently, pavement designs were developed considering different soil types, traffic levels, climatic conditions, and materials. In total, 410 alternatives were obtained, including pavements with surface treatments, flexible, semi-rigid, rigid, and plain-concrete strip structures. Based on critical conditions (soil, traffic, and climate), seven alternatives were selected for economic analysis. Multi-criteria analyses using the Selection by Advantage method were conducted to identify the best alternative from the technical, environmental, and economic perspectives. Results indicate that semi-rigid pavements present greater feasibility compared to current practices, as they exhibit lower thicknesses, reduced costs, and higher potential for material recycling at the end of their service life.

Keywords: low-volume roads; plain-concrete strip road; camera-ready manuscript; soil improvement techniques; geosynthetics.

Análisis técnico y económico de alternativas para la construcción de vías terciarias en Colombia

Resumen
Este artículo tiene como objetivo describir los métodos de diseño para la construcción de vías terciarias en Colombia. Se efectuó una compilación detallada de alternativas actualmente recomendadas en documentos técnicos. Posteriormente se realizó el diseño de pavimentos considerando diferentes tipos de suelo, niveles de tránsito, clima y materiales. En total, fueron obtenidas 410 alternativas que involucran pavimentos con tratamientos superficiales, flexibles, semirrígidos, rígidos y placa huella. A partir de las condiciones críticas (suelo, tránsito y condiciones climáticas) se seleccionaron siete alternativas en las cuales fueron realizados análisis económico. Análisis multicriterio bajo el método de selección por ventaja fueron realizados para seleccionar la mejor alternativa desde el punto de vista técnico, ambiental y económico. Resultados indican que pavimentos semirrígidos se presentan mayor viabilidad en referencia a las técnicas actuales, dado que exhiben menores espesores, costo y mayor capacidad de reciclaje de materiales al final de su vida útil.

Palabras clave: vías terciaras; placa huella; análisis multicriterio; técnicas de mejoramiento de suelos; geosintéticos.

1 Introducción

Las vías terciarias son importantes, dado que enlazan principalmente poblaciones rurales y centros de producción agrícola, mejorando el acceso a servicios de salud, educación, comercio, entre otros [1,2]. Adicionalmente, se emplean en el sector de minería, hidrocarburos, energía, parques solares, entre otros. Datos del Ministerio de Transporte indican que la red vial colombiana se compone por aproximadamente 205.875 km de carreteras, de las cuales, 7% son primarias, 25% secundarias y 70% corresponden a vías terciarias [3]. Según datos del Instituto Nacional de Vías INVIAS, la red vial no pavimentada 54.43% se encuentra en estado malo-muy malo, 36.66% regular y únicamente 8.91% en estado

How to cite: Palomeque-Sánchez, Z., Bastidas-Martínez, J.G. and Rincón-Estepa, J., Análisis técnico y económico de alternativas para la construcción de vías terciarias en Colombia DYNA, (92)239, pp. 118-129, October - December, 2025.

bueno-muy bueno [4]. Por tanto, es necesaria la creación de políticas que fomenten su construcción y mantenimiento. En Colombia han creado diversos planes nacionales para el fortalecimiento de vías terciarias. En 1960 se creó el Fondo Nacional de Caminos Vecinales en Colombia mediante los Decretos 1650 de 1960 y 1084 de 1961 adscrito al Ministerio de Obras Públicas [5]. Su propósito fue el mejoramiento y conservación de los caminos verdades del país o regionales mediante la cooperación entre los Departamentos y Municipios. Sin embargo, en el año 2003 fue liquidado mediante Decreto Nacional 1790 y trasferido a INVIAS. Entre los años 2003 y 2019 fue creado el plan 2500 que tenía como objetivo la pavimentación, reconstrucción y/o repavimentación de 2500 km de carreteras para el desarrollo regional buscando conectividad de regiones apartadas del país [6]. Este plan contempló los lineamientos del Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES 3311 de 2004 con recursos de 1.8 billones de pesos. En el año 2011 se ejecutó el programa Caminos para la prosperidad que tenía como objetivo la invención de 50.000 km de vías terciarias. Paralelamente, se creó el Sistema General de Regalías SGR que busca la repartición de recursos económicos generados por regalías de petróleo en todos los Departamentos para la financiación de proyectos, mediante el Órgano Colegiado de Administración y Decisión OCAD.

En 2016, fueron definidas las zonas más afectadas por el conflicto armado, por sus siglas ZOMAC considerando 344 Municipios de 19 Departamentos A partir de lo anterior se creó el Plan 50/51 que buscó la intervención de los 50 corredores más productivos y 51 proyectos estratégicos para mejorar la conectividad rural en ZOMAC. Se establecieron estrategias de financiamiento a través de obras por impuestos mediante la Ley 1819 de 2016 que busca la financiación de obras en ZOMAC a partir de impuestos de obras [6]. Asimismo, surgieron Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial PDET que buscan intervenciones, tales como la construcción de vías terciarias en zonas afectadas por conflicto armado. A pesar de la existencia de planes para el fortalecimiento de vías terciaras, en la literatura técnica consultada no se reportan cifras exactas de los kilómetros de vías intervenidas.

1.1 Documentos técnicos para diseño y construcción de estructuras para vías terciarias en Colombia

A fin de garantizar las condiciones técnicas y económicas de proyectos de infraestructura, algunas entidades públicas disponen de documentos técnicos que proporcionan diversas alternativas de pavimentación para vías de bajo volumen de tránsito tales como: i) Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito publicado por INVIAS en el año 2007 [7]. El objetivo de ese documento es proporcionar espesores de estructuras pavimentos flexibles para vías rurales mediante cartas de diseño. Estas cartas de diseño corresponden a espesores determinados mediante la metodología AASHTO 1993 [8]; ii) Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito, desarrollado en el año 2008 por el Instituto Colombiano de productores de cemento ICPC con participación de INVIAS y del Ministerio de transporte [9]. Ese documento suministra el espesor de la losa de concreto a partir de las variables de diseño; iii) Guía de diseño de pavimentos con placa huella publicada por INVIAS en el año 2015 [10]. La placa huella es un conjunto de elementos que conforman la estructura para el tránsito de vehículos en vías rurales. Entre los elementos que conforman la placa huella se tiene: placas en concreto reforzado, separador central y sobreanchos en concreto ciclópeo, elementos de confinamiento tipo riostras y bordillos, transvásales y longitudinales al eje de la vía y elementos de drenaje tipo cunetas. Estos elementos se encuentran apoyados sobre un material de subbase granular [11,12]. En la Fig. 1 se presenta una estructura típica de placa huella; iv) Cartilla de obras menores de drenaje y estructuras viales del programa de Colombia Rural en el año 2020. En este documento se presentan diseños tipo de estructuras de pavimento flexible, semirrígidos, rígidos, placa huella y caminos ancestrales [13]; v) Documento para la formulación de proyectos tipo para el mejoramiento de vías terciarias del Departamento Nacional de Planeación DNP en el año 2021 que proporciona soluciones estructurales y funcionales basadas en estabilización de materiales con cemento o materiales asfálticos, lechadas asfálticas, tratamientos superficiales, entre otros. Adicionalmente, algunos documentos proporcionan lineamientos técnicos para la construcción de elementos de drenaje superficial, subsuperficial, muros de contención, puentes, entre otros. Asimismo, se proporcionan especificaciones de construcción y técnicas para el mantenimiento rutinario [14].

1.2 Variables de diseño

Las metodologías para el diseño y construcción de vías terciarias involucran factores o variables que buscan garantizar aspectos de estructurales, funcionales y durabilidad durante el periodo de diseño. Las principales metodologías incluyen: i) Transito: generalmente es definido por el número de ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño durante el periodo de diseño; ii) Subrasante: definida

Figura 1. Estructura en placa huella.
Fuente: Autores.

Tabla 1.
Consideraciones de documentos técnicos para el diseño de vías terciarias en Colombia.

Documento	Entidades u organizaciones	Periodo (años)	Variables de diseño				Tipos de pavimentos				
			Tránsito	Subrasante	Clima	Materiales	PTS	PF	PS	PR	PH
Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito	INVIAS 2007	10	x	x	x	MDC-MDF-TSD-BG-BEC-BEE-SBG-AFR	x	x	x		
Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito	ICPC -INVIAS-Ministério de Transportes 2008	20	x	x		C-BG-BEC				x	
Guía de diseño de pavimentos con placa huella	INVIAS 2015	20	x	x		C-SBG					x
Cartilla de obras menores de drenaje y estructuras viales del programa de Colombia Rural	INVIAS 2020	10	x	x	x	C-MDC-TSD-TSA-BG-SBG-SCE-SCA	x	x	x	x	x
Cartilla de Proyectos tipo para el mejoramiento de vías terciarias	DNP e INVIAS 2021	5*	x	x		C-TSD-LA-BEC-BEE-BEM	x		x		x

*Periodo de diseño mínimo.
Fuente: Autores.

como la capacidad de soporte del suelo de fundación que comúnmente se determina según los ensayos de California Bering Ratio CBR o módulo resiliente; iii) Clima: determinada a partir del nivel de precipitación anual y de la temperatura media ponderada del lugar donde se pretende construir el pavimento; iv) Materiales para la conformación de las capas de pavimentos dependen de la disponibilidad del sitio, procesos constructivos, costos, entre otros. Cada documento técnico proporciona algunas recomendaciones, destacando: mezclas asfálticas densa en caliente MDC o en frio MDF; tratamientos superficiales dobles TSD; tratamiento superficial con asfaltita (asfalto natural) TSA; lechadas asfálticas LA, base granular BG; base estabilizada con cemento BEC, emulsión BEE o mecánicamente BEM; subbase granular SBG; Afirmado AFR; concreto C; suelos estabilizados con cemento SEC o cal SEC, entre otros. En la Tabla 1 se presenta una descripción de las variables de diseño contempladas en los documentos técnicos para el diseño de vías terciarias en Colombia. Asimismo, se presenta el periodo de diseño y los tipos de alternativas recomendadas en cada documento que incluyen: pavimento con tratamiento superficial PTS, pavimento flexible PF, pavimento semirrígido PS, pavimento rígido PR y placa huella PH

1.3 Nuevas tecnologías

A nivel nacional, en el año 2022, INVIAS incorporó el artículo 237 dentro de su normativa técnica, con el propósito de promover el desarrollo y la implementación de tecnologías emergentes para la estabilización de subrasantes en estructuras de pavimento, particularmente en vías de bajo volumen de tránsito [15]. Esta especificación contempla la utilización de aditivos químicos no convencionales orientados al mejoramiento de las propiedades geotécnicas de los materiales locales. Los estabilizantes considerados incluyen: i) emulsiones enzimáticas, que inducen una reducción en la plasticidad y la permeabilidad de los suelos; ii) materiales puzolánicos, que mejoran la capacidad portante mediante el incremento de la rigidez del sistema suelo-estabilizante; iii) polímeros y organosilanos, los cuales incrementan la impermeabilidad y confieren características hidrofóbicas; iv) sales inorgánicas, empleadas como tratamiento supresor de polvo; y v) aceites sulfonados y sales orgánicas, que contribuyen al control de la expansión en suelos con potencial de hinchamiento.

Adicionalmente, en Colombia se encuentran vigentes especificaciones técnicas para la construcción de carreteras que contemplan diversas soluciones constructivas [16]. Estas incluyen: i) el uso de geotextiles tejidos o no tejidos en subrasantes blandas con altos contenidos de humedad y valores de CBR entre 1 % y 3 %, así como la incorporación de agentes estabilizantes como cal o cemento; ii) la utilización de mezclas asfálticas naturales, tales como asfaltita, mapia, gilsonita, entre otras, que pueden emplearse en la conformación de capas estructurales como subbases, bases o capas de rodadura; iii) la ejecución de capas granulares estructurales tratadas con cemento Portland o emulsiones asfálticas, con el objetivo de mejorar su capacidad mecánica y durabilidad; y iv) la aplicación de tratamientos superficiales o lechadas asfálticas para la conformación de superficies de rodadura, con el fin de brindar protección e impermeabilización a la estructura vial. Algunas investigaciones en laboratorio con materiales locales indican buen desempeño de estas tecnologías [17,18]. A nivel internacional, las tendencias emergentes en ingeniería de pavimentos se orientan hacia el desarrollo de materiales con capacidad de auto reparación, los cuales permiten prolongar la vida útil de las estructuras viales al reducir la necesidad de intervenciones frecuentes. Asimismo, se promueve el aprovechamiento de subproductos industriales en la construcción de capas de pavimento, tales como plásticos reciclados, bio-asfaltos, materiales asfálticos reciclados (RAP, por sus siglas en inglés: *Recycled Asphalt Pavement*), residuos de construcción y demolición (RCD), residuos de concreto y escorias derivadas de procesos siderúrgicos, entre otros. Paralelamente, se investiga el diseño de materiales asfálticos de alto desempeño mediante la incorporación de aditivos especiales que mejoran significativamente las propiedades mecánicas, la resistencia al envejecimiento y la durabilidad del pavimento [19].

1.4 Objetivo del estudio

En síntesis, el desarrollo de proyectos de construcción de vías terciarias es crucial para el desarrollo, crecimiento económico e integración regional. Actualmente, existen documentos técnicos que proporcionan algunas recomendaciones técnicas (alternativas, materiales, procesos constructivos, entre otros) para el diseño y construcción para estructuras de vías terciarias en Colombia. Sin embargo, la selección de la mejor alternativa depende principalmente de factores económicos. Actualmente, en la práctica de la ingeniería existe una tendencia a desarrollo y construcción de estructuras en placa huella para las vías terciarias, principalmente por la disponibilidad de materiales y la facilidad de los procesos constructivos. Por tanto, este articulo realiza un análisis detallado de las alternativas contempladas en los diversos documentos técnicos, a fin de seleccionar la alternativa a partir de un análisis multicriterio que contemplan aspectos técnicos, ambientales y económicos.

2 Metodología

La metodología adoptada en este estudio es de enfoque mixto, combinando elementos cuantitativos y cualitativos para el diseño de alternativas constructivas de un tramo de vía terciaria. Esta se estructuró en cuatro etapas principales. En la primera, se identificaron y describieron las variables fundamentales para el diseño de pavimentos en este tipo de vías, incluyendo tránsito, capacidad de soporte de la subrasante, características de los materiales y condiciones climáticas. La segunda etapa consistió en la determinación de los espesores de pavimento con base en las recomendaciones y materiales descritos en los documentos técnicos vigentes para vías terciarias, considerando pavimentos con tratamientos superficiales, flexibles, semirrígidos, rígidos y estructuras tipo placa huella. En la tercera etapa, se seleccionaron las alternativas de diseño más representativas para la condición más crítica —definida por el mayor nivel de tránsito, el clima más severo y la menor capacidad portante de la subrasante—, realizando un análisis económico para estimar los costos de construcción mediante los análisis de precios unitarios INVIAS 2025. Finalmente, la cuarta etapa comprendió un análisis multicriterio, empleando metodologías de gestión de proyectos, con el propósito de identificar la alternativa viable desde los puntos de vista técnico, ambiental y económico.

2.1 Variables de diseño de pavimentos

2.1.1 Tránsito

En relación con el tránsito, los documentos técnicos consultados presentan los siguientes criterios: i) el manual de diseño de Pavimentos flexibles INVIAS, 2007 clasifica el tránsito en dos niveles, definidos por el número de ejes equivalentes de 80 kN: T1 (<150.000) y T2 (entre 150.000 y 500.000); ii) el manual de diseño de pavimentos de concreto de INVIAS 2008 contempla una única categoría para vías terciarias, con T_0<1.000.000, definida para un tránsito promedio diario inferior a 200 vehículos; iii) la cartilla de del programa Colombia rural establece tres categorías: N1 (<150.000), N2 (entre 150.000 y 300.000) y N3 (entre 300.000 y 500.000); iv) la cartilla de proyectos tipo para el mejoramiento de vías terciarias del DNP define un tránsito máximo de 500.000 ejes equivalentes. Finalmente, la Guía de Diseño de Pavimentos con Placa Huella de INVIAS 2015 no establece un nivel de tránsito específico, dado que los análisis estructurales se realizan considerando cargas últimas para camiones de dos y tres ejes; no obstante, recomienda su aplicación en proyectos con tránsito inferior a 500.000 ejes equivalentes.

En síntesis, las metodologías revisadas para el diseño de vías terciarias utilizan las repeticiones de carga calculadas mediante el método de ejes equivalentes de 80 kN. Para pavimentos flexibles y semirrígidos, se contempla un tránsito de hasta 500.000 ejes equivalentes en un periodo de diseño de 10 años, mientras que, para pavimentos de concreto, el límite es de 1.000.000 de ejes equivalentes en 20 años. Con base en estos criterios, en el presente estudio se definieron cuatro categorías de tránsito, conforme se presenta en la Tabla 2.

2.1.2. Subrasante

De forma general, todos los documentos técnicos indican que el valor mínimo de CBR para el diseño y construcción de estructuras de vías terciarias corresponde a 3.0%, excepto el manual de diseño de pavimentos de concreto INVIAS 2008 que contempla valor mínimo 2%. En la Tabla 3 se presentan las categorías de subrasante (S) definidas en las metodologías de diseño a partir de resultados del ensayo de CBR. A partir de lo anterior, para este estudio fueron definidas cuatro tipos de subrasante con valores de 3.0%, 5.0%, 7.0 y 10.0%

2.1.3. Condiciones climáticas

El manual de diseño de pavimentos flexibles INVIAS 2007 contempla el cálculo del índice de Thornthwite IT a partir de índices de humedad y aridez que permiten clasificar las categorías climáticas donde se presente construir el pavimento, conforme se presenta en la Tabla 4.

Tabla 2.
Nivel de tránsito contemplados en este estudio.

Categoría	Ejes equivalentes de 80 kN	Consideraciones
NT1	150000	
NT2	300000	
NT3	500000	
NT4	1000000	Diseño de pavimentos rígidos

Fuente: Autores.

Tabla 3.
Nivel de tránsito contemplados en este estudio.

Tipo de subrasante	Pavimentos flexibles	Pavimentos rígidos	Colombia Rural
S1	≤ 3.0	< 2.0	3.0 a 5.0
S2	3.0 a 5.0	2.0 a 5.0	5.0 a 7.0
S3	5.0 a 10.0	5.0 a 10.0	7.0 a 10.0
S4	≥ 10.0	10.0 a 20.0	10.0 a 15.0
S5		>20.0	

Fuente: Autores.

Tabla 4.
Clasificación del clima por IT.

Categoría	Descripción	IT
Árido	Muy pocas lluvias, alta evaporación	-100 a -61
Semi-árido	Pocas lluvias	-60 a -21
Subhúmedo	Lluvia moderada o lluvia fuertemente estacional	-20 a 19
Húmedo	Lluvia estacional calurosa moderada	20 a 100
Super húmedo	Lluvias con alta frecuencia o muchos días con superficie húmeda	>100

Fuente: Autores a partir de INVIAS 2007.

Tabla 5.
Clasificación de clima por temperatura.

Categoría del clima	T7 días (°C)
Frío	< 20
Templado	20 a 30
Cálido	> 30

Fuente: Autores a partir INVIAS 2007

Tabla 6.
Parámetros de temperatura y precipitación según guía de Colombia rural.

Temperatura media anual ponderada (°C)	Precipitación media anual (mm/año)	Sistema de subdrenaje
≤ 13	≤ 2000	Con/sin
13 a 20	2000 a 4000	Con/sin
20 a 30	4000 a 6000	Con/sin

Fuente: Autores.

Este valor se determina a partir de datos históricos de precipitación y temperatura. Adicionalmente, este método permite clasificar el clima por temperatura, a partir del promedio de temperatura de los siete días consecutivos más calientes del año (T7 días) conforme se presenta en la Tabla 5. La cartilla de obras menores de drenaje y estructuras viales del programa de Colombia rural INVIAS 2022 contempla la temperatura media anual ponderada y el nivel de precipitación media anual, conforme Tabla 6. Adicionalmente, contempla la alternativa del sistema de subdrenaje.

En este estudio fueron considerados tres escenarios, representando clima frio, templado y cálido con temperaturas de 10°C, 20°C y 30°C, respectivamente. Los valores de precipitación adoptados en este estudio para estos climas corresponden a 1500, 3000 y 5000 mm/año, respectivamente. Estos valores se asocian con climas áridos, húmedos y muy húmedos, los cuales pueden representan las condiciones climáticas típicas de una región fría seca, templada semihúmeda y cálida muy húmeda en regiones Colombia.

2.2 Alternativas de diseño

A partir de las variables, se procedió a realizar el cálculo de espesores de las capas del pavimento para una vía terciaria contemplando alternativas de los documentos técnicos que corresponden a: i) Pavimentos con tratamiento superficial PTS; ii) Pavimentos flexibles empleando mezclas asfálticas en caliente y en frio PF: iii) Pavimentos semirrígidos PS; iv) Pavimentos rígidos PR; v) Placa huella PH. En la Tabla 7 se presentan los materiales que componen la alternativa de diseño según cada metodología de diseño. Para todas las opciones se consideró el periodo de diseño de 10 años, excepto para la opción en pavimento de concreto que se consideró 20 años.

La determinación de los espesores para pavimentos flexibles y semirrígidos según INVIAS 2007 se realizó mediante la herramienta PAV-NT1. Este software hace parte del manual de diseño de pavimentos asfálticas para vías con bajos volúmenes de tránsito (ver Fig. 2) y contiene el algoritmo para cálculo de espesores de la metodología AASHTO 1993. En total, fueron diseñadas 180 estructuras de pavimentos con tratamientos superficiales, flexibles y semirrígidos producto de las cinco (5) alternativas contempladas en la metodología, tres (3) niveles de tránsito, cuatro (4) valores de suelo de subrasante y tres (3) consideraciones de clima. Los diseños de pavimento de concreto según el manual de diseño INVIAS 2008 y la guía de Colombia rural de INVIAS 2022 no contemplan la acción

Tabla 7.
Alternativas de diseño.

Metodología	Metodología	Alternativas									
		PTS		PF		PS		PR			PH
Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito INVIAS 2007	AASHTO 1993	TSD BG SBG	TSD BG BEC	MDF BG SBG	MDC BG SBG	MDC BG BEC	MDF BEE SBG				
Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito INVIAS 2008								C SN	C BG	C BEC	
Guía de diseño de pavimentos con placa huella INVIAS 2015	Carga última										C SBG
Cartilla de obras menores de drenaje y estructuras viales del programa de Colombia Rural INVIAS 2020		TSD o TSA SCE		MDC BG	MDC BG SBG	MDC SCE	MDC BG SCA	C SN	C SBG	C SEC	C SBG
Cartilla de Proyectos tipo para el mejoramiento de vías terciarias INVIAS DNP 2021	AASHTO 1993	TSD o LA BG	TSD o LA BEC o BEE								

Dónde: TSD Tratamiento Superficial Doble; TSA Tratamiento Superficial Asfaltita; LA Lechada Asfáltica; MDC Mezcla Densa en Caliente; MDF Mezcla Asfáltica a Frio; BG Base Granular; BEC Base Estabilizada con Cemento; BEE Base Estabilizada con Emulsión; SCE Suelo Cemento; SCA Suelo Cal; SN suelo natura; C Concreto.
Fuente: Autores.

Figura 2. Herramienta PAV-NT1.
Fuente: INVIAS 2007 [7].

del clima (temperatura y precipitaciones). Estas metodologías tampoco se contemplan la influencia de los alabeos térmicos del concreto. Sin embargo, se observa el efecto del confinamiento de las losas, que puede ser originado por la presencia de bermas, bordillos u otro elemento. En este estudio se adoptó que la resistencia del concreto definida por el módulo de rotura (MR) concierne a 3.8 MPa, dado que puede ser fabricado en obra. Empleando la metodología INVIAS 2008 fueron diseñadas 12 estructuras correspondiente a tres (3) soportes de la losa de concreto (SN, BGC y BEC), cuatro (4) tipos de suelos de subrasante y un (1) nivel de tránsito correspondiente a 1.000.000 de ejes equivalentes de 80 kN para 20 años (Categoría N4). Para los diseños según la guía de Colombia rural, fueron diseñadas 36 estructura considerando tres (3) soportes de losa de concreto (SN, SBG y SCE), tres (3) niveles de tránsito, cuatro (4) tipos de subrasante. En ambas metodologías, los espesores fueron obtenidos de las tablas o cartas establecidos en los documentos. En total fueron diseñadas 48 estructuras de pavimento rígido.

Para el cálculo de los espesores de las estructuras de pavimento flexibles y semirrígidos contempladas en la Cartilla de obras menores de drenaje y estructuras viales del programa de Colombia Rural se analizaron tres (3) categorías del tránsito, cuatro (4) tipos de subrasante, tres (3) condiciones climáticas y cinco (5) opciones de pavimentos (flexibles y semirrígidos). En total, fueron determinas 180 estructuras. No se emplearon las recomendaciones de la cartilla de proyectos tipo para el mejoramiento de vías terciarias INVIAS DNP 2021, dado que las mismas se encuentran referidas en el manual de diseño de pavimentos flexibles INVIAS 2007.

2.3 Evaluación económica

A partir los espesores de pavimentos calculados para diferentes tipos de subrasantes, niveles se transitó, condiciones de clima y materiales, se procedió a determinar siete alternativas de diseño asumiendo las condiciones más críticas. Estas condiciones fueron establecidas a partir de la menor capacidad de la subrasante (CBR=3%), mayor nivel de tránsito y clima más riguroso. Para el caso de las estructuras de pavimentos rígidos se diseñaron considerando periodos de 10 y 20 años. Posteriormente, para cada alternativa se determinó el costo de obra por 100 ml asumiendo un ancho de calzada de 6 metros. Para la alternativa en placa huella se contempló un ancho de 5.5 metros, dado que corresponden a vías unidireccional.

Los costos fueron determinados de los análisis de precios unitarios APU disponibles por INVIAS 2025 para 138 provincias de 30 Departamentos que conforman el territorio colombiano. En este estudio no fueron considerados los APU para el Departamento del Amazonas y San Andrés, dado que los mismos difieren significativamente del promedio. Cada APU contempla costos de equipos, materiales, mano de obra y transporte. En todas las actividades de construcción, en el transporte se contempla la distancia en un tramo de 1 km desde la fuente del material al lugar de la obra. Fueron consideradas las actividades de construcción relacionadas con la construcción de capas para pavimentos de vías terciarias. Es decir, en este estudio no se consideraron actividades relacionadas con actividades de explanaciones (cortes y/o terraplenes), estructuras de contención, obras de drenaje superficial o subsuperficial, señalización y demarcación, entre otras. Lo anterior, dado que el objetivo principal fue realizar un estudio comparativo de las alternativas de estructuras de pavimentos.

2.4 Análisis multicriterio para la selección de alternativas

Dado que este tipo pavimentos tiene diferentes periodos de diseño, materiales y técnicas constructivas, se puede generar efectos que impactan en términos económicos. Por tanto, considerando las alternativas se realizó un análisis multicriterio bajo el método de selección por ventaja [20]. Esta metodología permite crear una matriz de comparación de criterios, en la cual se asignan valoraciones bajo la escala Likert. En este estudio se evaluaron aspectos técnicos (vida útil), ambientales (volumen de materiales naturales empleados y volumen de materiales reciclados) y

Tabla 8.
Definición de valoración para los criterios analizados.

Valoración	Técnico	Ambiental		Económico
	Vida útil (años)	Volumen de materiales (m^3)	Volumen de reciclaje (m^3)	Costo (US$)
5 (muy alto)	5 a 10	> 350	<90	>22000
4 (alto)	10 a 15	275-300	90-150	18000-22000
3 (moderado)	10 a 15	200-275	150-250	14000-18000
2 (moderado-bajo)	15 a 20	100-200	250-350	10000-14000
1 (bajo)	>20	<100	>350	<10000

Fuente: Autores.

económicos (costo de construcción). Como resultado se obtiene la sumatoria de importancia de los aspectos evaluados. El método de selección por ventaja permite hacer una evaluación cualitativa y cuantitativa objetiva con alto grado de certeza, debido a que se consideran los criterios relevantes y se analizan de forma sistemática [21]. En la Tabla 8 se presentan la valoración para cada uno de los criterios analizados.

3 Resultados

3.1 Pavimentos con tratamientos superficiales

En la Tabla 9 se presenta los espesores en centímetros de las capas de los pavimentos que contemplan el uso de tratamientos superficiales TSD. En todos los casos, el espesor del tratamiento superficial corresponde a 3.0 cm y no genera aporte estructural al pavimento. La cartilla Colombia rural propone el uso de una capa estructural compuesta por SCE con un espesor comprendido entre 25 y 30 cm. Esta técnica no es aplicable a suelos con baja capacidad de soporte (CBR del 3%) en condiciones de tránsito N2 y N3. Para suelos con mayor capacidad (CBR del 7% al 10%) y bajo nivel de tránsito (N1), se recomienda un espesor de 25 cm, mientras que para los demás casos se sugiere un espesor de 30 cm. Por su parte, el manual de diseño de pavimentos flexibles INVIAS (2008) contempla estructuras conformadas por dos capas: base granular (BG) y subbase granular (SBG). Una de las alternativas incluye el tratamiento de la subbase con cemento, denominándose en este caso como BEC. Para esta configuración, se recomienda un espesor de 20 cm sobre suelos con CBR del 5% y 7%, independientemente del nivel de tránsito y del clima. El espesor de la capa BG en esta opción varía entre 15 y 30 cm, dependiendo de las condiciones de subrasante y tránsito. En una segunda opción, se considera una capa de BG de 20 cm, apoyada sobre una subbase granular con espesor variable entre 17 y 52 cm. En este caso, los mayores espesores de la BG se asocian con niveles de tránsito elevados, suelos de menor CBR y climas cálidos.

3.2 Pavimentos flexible

En las Tablas 10 y 11 se presentan los espesores en centímetros de las capas de pavimentos flexibles con MDC y MDF, respectivamente. En términos generales, ambas metodologías generan espesores similares para la capa asfáltica, con valores que oscilan entre 7.5 cm y 11 cm. Estas variaciones se atribuyen principalmente a las condiciones climáticas y al nivel de tránsito. En particular, se requieren mayores espesores en escenarios con tránsito tipo N3 y clima cálido, debido a la mayor susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación bajo cargas elevadas y temperaturas altas. Esta tendencia es consistente, dado que ambas metodologías se basan en los lineamientos del diseño AASHTO 1993. Con respecto a los materiales granulares (BG + SBG), la cartilla de Colombia rural contempla espesores variables por capa, entre 15 cm y 30 cm, mientras que el manual de diseño de pavimentos Flexibles del INVIAS (2008) establece espesores constantes de 15 cm, con excepción de los casos en los que la subrasante presenta un CBR del 3% y niveles de tránsito N2 o N3. Además, la cartilla de Colombia rural propone una alternativa consistente en una única capa granular de BG con espesores entre 15 cm y 30 cm, lo cual permite una reducción en la cantidad total de materiales empleados. En el caso de los pavimentos con MDF, se recomiendan espesores para la capa de rodadura que oscilan entre 8 cm y 12 cm, en función del nivel de tránsito y las condiciones climáticas. Independientemente del escenario evaluado, las estructuras incluyen capas granulares BG y SBG con espesores constantes de 15 cm cada una.

Tabla 9.
Espesores de pavimentos con tratamientos superficiales.

***SCE (*INVIAS 2020)**										
Tránsito		**N1**	**N2**	**N3**	**N1**	**N2**	**N3**	**N1**	**N2**	**N3**
CBR (%)	Capa		Frio			Templado			Cálido	
3.0	SCE	30	NA	NA	30	NA	NA	30	NA	NA
5.0	SCE	30	30	30	30	30	30	30	30	30
7.0	SCE	25	30	30	25	30	30	25	30	30
10.0	SCE	25	30	30	25	30	30	25	30	30
***BG* + *BEC* (INVIAS 2008)**										
5.0	BG	17.3	21.7	25.2	18.2	22.8	26.5	20.4	25.5	29.7
	BEC	20	20	20	20	20	20	20	20	20
7.0	BG	15.1	19.3	22.6	15.9	20.3	23.8	17.7	22.7	26.6
	BEC	20	20	20	20	20	20	20	20	20
***BG* + *SBG* (INVIAS 2008)**										
3.0	BG	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	SBG	29.9	35.9	40.7	32.7	39	44.1	39.2	46.3	52
5.0	BG	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	SBG	23.8	29.3	33.7	26.3	32.1	36.7	32.2	38.6	43.7
7.0	BG	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	SBG	20.2	25.3	29.4	22.5	27.9	32.2	27.9	33.9	38.7
10.0	BG	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	SBG	17	22,5	26.4	19.7	24.9	29	24.8	30.6	35.2

Fuente: Autores.

Tabla 10.
Espesores de pavimentos flexibles con MDC.

CBR (%)	Capa	Frio			Templado			Cálido		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
***MDC+BG+SBG* (INVIAS 2020)**										
3.0	MDC	8	9	10	9	10	10	10	N/A	N/A
	BG	15	15	15	15	20	25	30	N/A	N/A
	SBG	20	20	25	25	25	25	30	N/A	N/A
5.0	MDC	8	9	10	9	10	10	10	10	10
	BG	20	25	25	25	30	15	15	25	30
	SBG						25	25	25	30
7.0	MDC	8	9	10	9	10	10	10	10	10
	BG	15	15	15	20	20	25	15	20	25
	SBG							15	25	30
10.0	MDC	8	9	10	9	10	10	10	10	10
	BG	15	15	15	20	20	25	15	20	20
	SBG							15	20	25
***MDC+BG* (INVIAS 2020)**										
3.0	MDC	8	9	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	BG	30	30	30	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5.0	MDC	8	9	10	9	10	10	N/A	N/A	N/A
	BG	20	25	25	25	30	30	N/A	N/A	N/A
7.0	MDC	8	9	10	9	10	10	10	N/A	N/A
	BG	20	20	20	20	25	30	30	N/A	N/A
10.0	MDC	8	9	10	9	10	10	10	N/A	N/A
	BG	15	15	15	20	20	25	30	N/A	N/A
***MDC+BG+SBG* (INVIAS 2008)**										
3.0	MDC	7.5	8.2	9	7.7	8.8	9.7	8.6	9.8	10.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	SBG	15	15	15	15	15	15	15	16.6	19
5.0	MDC	7.5	8.2	9	7.7	8.8	9.7	8.6	9.8	10.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	SBG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
7.0	MDC	7.5	8.2	9	7.7	8.8	9.7	8.6	9.8	10.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	SBG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
10.0	MDC	7.5	8.2	9	7.7	8.8	9.7	8.6	9.8	10.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	SBG	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Fuente: Autores.

Tabla 11.
Espesores de pavimentos flexibles con MDF.

CBR (%)	Capa	Frio			Templado			Cálido		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
3.0	MDF	7.9	9	9.9	8.6	9.8	10.7	9.3	10.6	11.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	SBG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
5.0	MDF	7.9	9	9.9	8.6	9.8	10.7	9.3	10.6	11.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	SBG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
7.0	MDF	7.9	9	9.9	8.6	9.8	10.7	9.3	10.6	11.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	SBG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
10.0	MDF	7.9	9	9.9	8.6	9.8	10.7	9.3	10.6	11.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	SBG	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Fuente: Autores.

3.3 Pavimento semirrígidos

En la Tabla 12 se presentan los espesores en centímetros de las capas que conforman los pavimentos semirrígidos. El manual de diseño de pavimentos flexibles INVIAS 2008 considera estructuras compuestas de MDC, BG y BEC. Los espesores de la capa de rodadura oscilan entre 7.5 cm a 10.7 cm y depende del nivel del tránsito y clima. Los espesores de las capas granulares son constantes y corresponden a 15 cm y 20 cm de BG y BEC, respectivamente. Se evidencia que los espesores no cambian por el tipo de CBR. Por su parte, la guía de Colombia rural plantea dos opciones. La primera

Tabla 12.
Espesores de pavimentos semirrígidos.

CBR (%)	Capa	Frio			Templado			Cálido		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
***MDC+BG+BEC* (INVIAS 2008)**										
3.0	MDC	7.5	8.2	9	7.7	8.8	9.7	8.6	9.8	10.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	BEC	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5.0	MDC	7.5	8.2	9	7.7	8.8	9.7	8.6	9.8	10.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	BEC	20	20	20	20	20	20	20	20	20
7.0	MDC	7.5	8.2	9	7.7	8.8	9.7	8.6	9.8	10.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	BEC	20	20	20	20	20	20	20	20	20
10.0	MDC	7.5	8.2	9	7.7	8.8	9.7	8.6	9.8	10.7
	BG	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	BEC	20	20	20	20	20	20	20	20	20
***MDC+SEC* (INVIAS 2020)**										
3.0	MDC	6	8	8	6	8	8	6	8	**8**
	SCE	20	20	25	25	25	30	25	30	**30**
5.0	MDC	6	8	8	6	8	8	6	8	8
	SCE	15	15	20	20	20	20	20	20	25
7.0	MDC	6	8	8	6	8	8	6	8	8
	SCE	15	15	15	15	15	20	20	20	20
10.0	MDC	6	8	8	6	8	8	6	8	8
	SCE	15	15	15	15	15	15	15	20	20
***MDC+BG+SCA* (INVIAS 2020)**										
3.0	MDC	8	8	9	9	9	10	10	10	N/A
	BG	20	20	20	20	20	25	30	30	N/A
	SCA	20	20	20	20	20	25	20	20	N/A
5.0	MDC	8	9	9	9	10	10	10	N/A	N/A
	BG	20	20	20	20	25	25	30	N/A	N/A
	SCA	20	20	20	20	20	20	20	N/A	N/A

Fuente: Autores.

opción contempla una capa estructural de SCE, con espesores que varían entre 15 cm a 30 cm. Los mayores espesores están asociado a mayores niveles de tránsito y menor capacidad de resistencia de la subrasante. La segunda opción considera dos capas granulares BG y SAC. El espesor de BG oscila entre 20 a 30 cm, mientras que el espesor de SAC es constante y corresponde a 20 cm, excepto para pavimento con CBR 3%, clima templado y nivel de tránsito N3, en el cual se recomienda 25 cm. Sin embargo, esta opción es válida para suelos con CBR 3% y 5%. En todas las dos configuraciones se incluye una capa MDC como superficie de rodadura.

3.4 Pavimento rígido

En la Tabla 13 se presentan los resultados de espesores en centímetros de losa de para pavimentos rígidos, considerando que se soporta directamente en la subrasante (suelo natural SN), 15 cm SBG o 15 cm SEC.

Espesores obtenidos según el manual de pavimentos de concreto INVIAS 2008 oscilan entre 18 cm a 23 cm y son mayores debido al periodo de diseño de 20 año. Por su parte, los espesores obtenidos según la guía de Colombia rural oscilan entre 16 cm a 21 cm. De forma general, el espesor de la losa depende de la capacidad de la subrasante, nivel de tránsito y material de apoyo de la losa. Es decir, el espesor aumenta con el nivel de tránsito y con el aumento del CBR.

Tabla 13.
Espesores de losa para pavimento rígido.

CBR (%)	INVIAS 2020									INVIAS 2008		
	SN			SBG			SEC			SN	SBG	SEC
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N4	N4	N4
3.0	21	20	21	20	20	21	18	17	18	23	22	19
5.0	19	20	20	19	20	20	17	17	18	21	21	18
7.0	19	20	20	19	19	20	16	17	17	21	21	18
10.0	19	19	20	18	19	19	16	16	17	19	18	18

Fuente: Autores.

3.5 Placa huella

Guía de diseño de pavimentos con placa huella INVIAS 2015 contempla una única estructura compuesta por huellas de espesor de 15 cm reforzadas longitudinalmente con barras #4 cada 15 cm y transversalmente con barras #2 cada 30 cm. La guía de Colombia rural considera opciones de placa huella para la circulación de vehículos livianos y comerciales (buses y camiones). En la primera opción, considera un espesor de 15 cm con barras #3 longitudinales y transversales cada 20 cm. La segunda opción considera espesores de 15 cm y 20 cm con barras #4 longitudinales y transversales cada 15 cm y 20 cm, respectivamente.

3.6 Alternativas de diseño

De acuerdo con lo descrito en la metodología, en esta sección se presentan las alternativas de diseño desarrolladas para las condiciones más críticas, correspondientes a una subrasante con CBR del 3 % y el mayor nivel de tránsito proyectado. Se evaluaron diferentes tipologías estructurales, incluyendo pavimentos con tratamientos superficiales (PTS), pavimentos flexibles construidos con mezclas asfálticas en caliente (PF-1) y en frío (PF-2), pavimentos semirrígidos conformados por estructuras de dos (PS-1) y tres capas (PS-2), pavimentos rígidos diseñados para periodos de servicio de 10 (PR-1) y 20 años (PR-2), así como estructuras tipo placa huella con espesores de 15 cm (PH-1) y 20 cm (PH-2). En la Fig. 3 se presenta el resumen de las alternativas.

3.7 Evaluación económica y análisis multicriterio de las alternativas de diseño

En la Fig. 4 se presentan los resultados de la evaluación de económica referente a los costos de construcción por 100 metros y el análisis multicriterio de las alternativas. De forma general, considerando los valores promedios, se puede evidenciar que las alternativas de pavimentos con tratamientos superficiales, flexibles y semirrígidos presentan costos similares. Las alternativas en concreto exhiben mayores costos de construcción, debido a los costos del concreto y acero de refuerzo para el caso de las alternativas en placa huella, a pesar de que el ancho se limitó a 5.5 metros. En todos los casos, la alternativa en pavimento de concreto diseñada a 20 años exhibió el mayor costo. Por tanto, desde el punto de vista económico la alternativa PS-2 (semirrígido compuesto de 8 cm de MDC y 30 cm de SCE) resulta en la mejor alternativa. Este resultado es coherente con el obtenido en el análisis multicriterio que involucra aspectos técnicos, y ambientales. Por otro lado, las estructuras de pavimentos rígidos y en placa huella presentan menores valores de la sumatoria de importancia, debido principalmente a los altos costos de construcción y baja capacidad de reciclaje de los materiales.

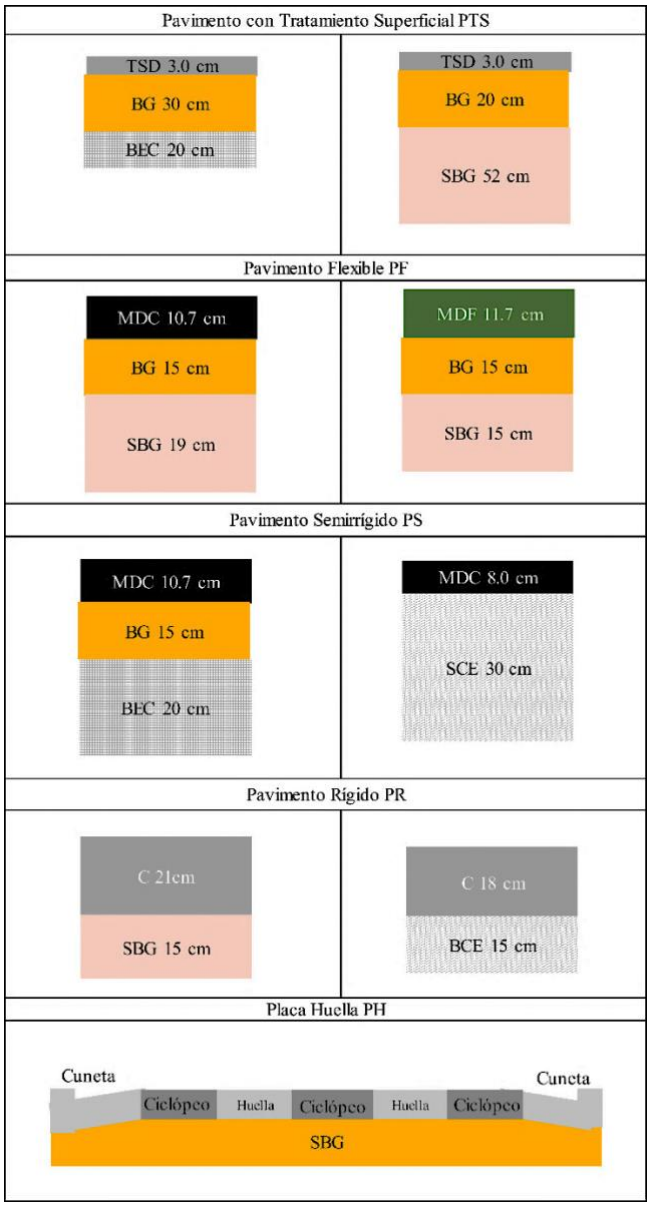

Figura 3. Alternativas de diseño.
Fuente: Autores.

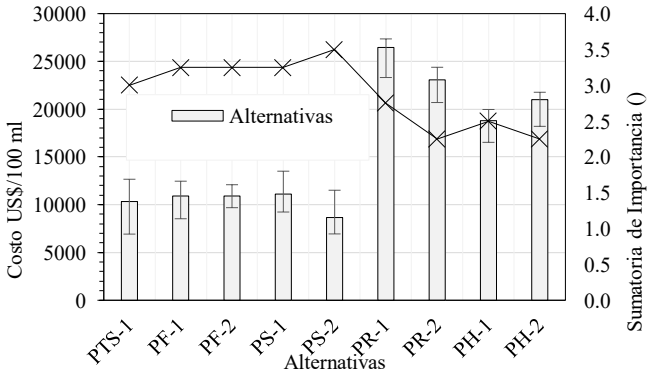

Figura 4. Alternativas de diseño.
Fuente: Autores.

4 Discusión de resultados

El análisis técnico de las alternativas para la construcción de vías terciarias desarrollado en este estudio consideró las condiciones críticas de subrasante, tránsito y clima, permitiendo identificar diferencias significativas en desempeño y viabilidad económica. A partir de este estudio, se aplicó un análisis multicriterio que integró aspectos técnicos, ambientales y económicos. Los resultados permiten concluir que el pavimento semirrígido es la opción más viable frente a otras alternativas evaluadas (flexibles, rígidos, placa huella, entre otros). Este resultado se fundamenta en la capacidad del pavimento semirrígido para ofrecer un balance óptimo entre durabilidad, resistencia y costo, especialmente en contextos rurales con bajo volumen de tránsito. No obstante, dado que el análisis se restringió a vías terciarias, futuros trabajos podrían enfocarse en la caracterización detallada de materiales locales, evaluación de cargas del tránsito reales con diversas condiciones climáticas actuales y análisis de ciclo de vida. Asimismo, sería pertinente ampliar la línea de investigación a nuevas tecnologías y procesos constructivos que apunten a recomendaciones técnicas para el mejoramiento de vías terciarias.

5 Conclusiones

El objetivo de este estudio fue realizar un análisis detallado de las alternativas contempladas en los actuales documentos técnicos para la construcción de vías terciarias. A partir de las condiciones críticas referentes a la subrasante, tránsito y clima. Se realizó un análisis multicriterio para seleccionar la mejor alternativa. A partir de los resultados se puede concluir:

- La alternativa de pavimento semirrígido exhibe mayor importancia en el análisis multicriterio. Es decir, tiene mayor viabilidad en referencia a los aspectos técnicos, ambientales y económicos ante las otras alternativas. Sin embargo, es necesario analizar las condiciones locales referente a la obtención de materiales, diseño del material granular tratado con cemento, mano de obra, equipos, costos de construcción, entre otros. Asimismo, condiciones sociales, principalmente los aspectos de movilidad del tramo vial durante la etapa constructiva.
- Este estudio analizó las alternativas para la construcción de vías terciarias según los lineamientos técnicos en Colombia. En este estudio no fueron incluidas vías de otros sectores, tales como explotaciones mineras a cielo abierto, parques solares, entre otros, los cuales requieren circulación de vehículos extrapesado o extra dimensionados.

Futuras investigaciones que apunten al fortalecimiento de las vías terciarias deben enfocarse al estudio y caracterización de materiales locales, tales como subrasantes, materiales granulares, aditivos, polímeros, entre otros, a fin de proporcionar valores de rigidez considerando la acción de carga del tránsito y las condiciones climáticas.

Referencias

[1] Hafez, M., Ksaibati, M., and Atadero, R. Pavement maintenance practices of low-volume roads and potential enhancement: the regional experience of Colorado pavement management system, International Journal of Pavement Engineering, 22 (6), pp. 718–731, 2021. DOI: https:// doi.org/10.1080/10298436.2019.1643021

[2] Hauser, J., Ševelová, L., Matula, R., and Zedník, P. Optimization of low volume road pavement design and construction, Journal of forest science, 64 (2), pp. 74–85, 2018. DOI: https://doi.org/10.17221/109/2017-JFS

[3] Ministerio de Transporte de Colombia. Anuario Nacional de Transporte [Online], Bogotá, Colombia, 2020. [Consultado Agosto 19, 2024]. Disponible en: http://www.mintransporte.gov.co

[4] INVIAS Instituto Nacional de Vías, Estado de la red vial. [Online], Bogotá, Colombia, 2020. [Consultado Agosto 19, 2024]. Disponible en: https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial

[5] Ospina-Ovalle, G. El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el desarrollo de Colombia, Revista de Ingeniería, 1(44), pp. 20–27, 2016. DOI: https://doi.org/10.16924/revinge.44.3

[6] Cea, S., and Espinosa, S.I., El acuerdo de paz y las vías terciarias en Colombia, Bitacora Urbano Territorial, 32(1), pp. 149–160, 2022. DOI: https:// doi.org/10.15446/bitacora.v32n1.98480

[7] INVIAS, Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, INVIAS, 2007, 103 P.

[8] AASHTO, Guide for design of pavements structures, AASHTO, 1993, 624 P.

[9] INVIAS, Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías de bajos, medios y altos volúmenes de tránsito, INVIAS 2008, 114 P.

[10] INVIAS, Guía de diseño de pavimentos con placa huella, INVIAS, 2015, 244 P.

[11] Orobio, A., and Orobio, J.C. Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D, Revista DYNA, 83(199), pp. 9–18, 2016. DOI: https:// doi.org/10.15446/dyna.v83n199.55350

[12] Orobio, A., Orobio, J.C. and Mosquera, J.M., Recomendaciones de diseño y construcción de pavimento en placa-huella de concreto reforzado, Revista ingenierías Universidad de Medellín, 17(32), pp. 69-83, 2018. DOI: https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a4

[13] INVIAS, Cartilla de obras menores de drenaje y estructuras viales, INVIAS, 2020, 180P.

[14] DNP, Mejoramiento de vías terciarias vías de tercer orden, versión 3.0, DNP, 2021, 74 P.

[15] INVIAS, Articulo 237 Estabilización de suelos con productos químicos no tradiciones, INVIAS 2022.

[16] INVIAS, Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras, INVIAS, 2022, 1345 P.

[17] Bastidas-Martínez, J. G., Ruge, J.C., and Herrera-Cano, C.H., Mechanical performance of an asphalt stabilized base with natural asphalt, hydrated lime and Portland cement. Construction Buildings Materials, 446, pp. 137938, 2024. DOI: https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.137938

[18] Bastidas-Martínez, J.G., Herrera-Cano, C.E., and Bautista-Tapias, H.J. Performance of an unpaved roads reinforced with geogrid: construction of a physical model in laboratory and numerical validation, Revista DYNA 91(231), pp. 153–162, 2024. DOI: https://doi:10.15446/dyna.v91n231.112274

[19] Cavalli, M.C., *et al.* Review of advanced road materials, structures, equipment, and detection technologies, Journal of roads engineering, 4(3), pp. 360-468, 2023. DOI: https:// doi.org/10.1016/j.jreng.2023.12.001.

[20] Miranda-Quiñones, S., Herrera, R.F., Atencio, E., Muñoz-La Rivera, F., and Arroyo, P., An update of the choosing by advantages (CBA) method from a probabilistic perspective: The selection of a heating system in a residential building, Ain Shams Engineering Journal, 15(10), pp. 102977, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102977

[21] Nnaji, C., Lee, H. W., Karakhan, A., and Gambatese, J., Developing a Decision-Making Framework to Select Safety Technologies for Highway Construction, Journal of Construction Engineering and

Management, 144(4), pp. 04018016, 2018. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001466

Z.A. Palomeque Sánchez, Ingeniera Civil de la Universidad Católica de Colombia. MBA y Especialista en Sistemas Integrados de Gestión Calidad, Seguridad y Medio Ambiente de la Universidad Viña del Mar en Chile, actualmente Docente de la Universidad Militar Nueva Granada-Programa de Ingeniera Civil y Líder de Semillero de Investigación PCGG-360
ORCID: 0000-0002-2403-6230.

J.G. Bastidas-Martínez, Ingeniero Civil de la Universidad del Cauca Colombia. MSc. en Geotecnia y PhD. en Geotécnica de la Universidad de Brasilia, Brasil. Profesor de la Pavimentos en cursos de pregrado y posgrado. Premio Nacional de Ingeniería Diodoro Sánchez otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros en 2021.
ORCID: 0000-0002-6818-0322.

J.A. Rincón-Estepa, Ingeniera Civil de la Universidad Militar Nueva Granada Colombia. MSc. en Ingeniería Civil con énfasis en Infraestructura Vial de la Pontificia Universidad Javeriana. Actualmente se desempeña como Especialista Infraestructural para el desarrollo y construcción de proyectos de parques solares en Colombia y Centroamérica del grupo Enel.
ORCID: 0009-0004-5519-9050.