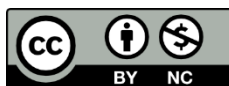


**APLICACIÓN EN TEMÁTICAS DE INGENIERÍA
DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE
IMPLEMENTANDO UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE EN EL K0+000 –
K5+082 EN LA VEREDA LA ZURIA, MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO-META**



Por:
Cristian Leonel Galeano García



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020**

**APLICACIÓN EN TEMÁTICAS DE INGENIERÍA
DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE
IMPLEMENTANDO UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE EN EL K0+000 –
K5+082 EN LA VEREDA LA ZURIA, MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO-META**



Por:
Cristian Leonel Galeano García

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero civil

Aprobado por:
I.C. Jessica María Ramírez Cuello, M.Sc.
Director

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020**

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray José Gabriel Mesa Ángulo, O.P.
Rector General

Fray Eduardo González Gil, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.
Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón
Secretaria de División Sede Villavicencio

I.C. Manuel Eduardo Herrera Pabón, M.Sc.
Decano Facultad de Ingeniería Civil

Nota de aceptación

I.C. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN, M.Sc.
Decano Facultad Ingeniería Civil

I.C. Jessica María Ramírez Cuello, M.Sc.
Director Trabajo de Grado

Villavicencio, 19 de enero de 2021

DEDICATORIA

Primordialmente a Dios, por su misericordia y guía divina.

A mis padres, por el amor, el apoyo incondicional y el sacrificio durante todos estos años, y por la enseñanza del valor de la humildad.

A cada uno de mis familiares que me brindaron el apoyo moral y económicamente. Igualmente, a cada uno de los docentes que me brindaron de su conocimiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la vida y guiarme por el camino correcto.

A mis padres por el apoyo incondicional, el esfuerzo y la dedicación que me brindaron en todo momento, pese a todas las adversidades que se presentaron.

A cada uno de mis familiares que aportaron de una u otra forma un grano de arena en mi formación.

A mi directora de grado I.C. Jessica María Ramírez Cuello, M.Sc., por darme la dirección y dedicación a este trabajo de grado, por brindarme las respectivas sugerencias que permitieron facilitar la realización del proyecto.

A mi compañero Said Ismael Jiménez Díaz, por la colaboración metodológica de las etapas del proyecto.

Y por último no menos importante, a la Universidad Santo Tomás por disponer de sus espacios, servicios y recursos ofrecidos durante la formación profesional.

RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo el diseño de una estructura de pavimento flexible implementando un tratamiento superficial doble, que establezca un diseño viable en materia de costos, eficacia y durabilidad; importante para el servicio esperado de la vía. Ubicada en la vereda La Zuria, municipio de Villavicencio-Meta, la cual se encuentra en mal estado afectando el desarrollo socio-económico integral de los habitantes de esta zona rural.

Para ello, se resaltan los principios básicos a considerar dentro de las variables de diseño de un pavimento que se encuentran en el tránsito, factores ambientales y climáticos y en la capacidad portante de la subrasante (CBR). De modo que, la estructura del pavimento se conforma de la subrasante (suelo natural), subbase granular, base granular, y en la superficie de rodadura del Tratamiento Superficial Doble (TSD); el cual se debe considerar en el diseño, la determinada cuantía a utilizar dependiendo las condiciones del suelo. Dado que, son de vital importancia para el dimensionamiento de la estructura del pavimento.

Palabras Clave: *Clima, pavimento, seguridad, subrasante, tránsito.*

ABSTRACT

The purpose of this document is to design a flexible pavement structure implementing a double surface treatment, which establishes a viable design in terms of cost, efficiency and durability; important for the expected service of the track. Located on the sidewalk La Zuria, municipality of Villavicencio-Meta, which is in poor condition affecting the integral socio-economic development of the inhabitants of this rural area.

To this end, the basic principles to consider within the design variables of a pavement found in transit, in environmental and climatic factors, and in the bearing capacity of the sub-carrier (CBR) are highlighted. Thus, the pavement structure is made up of the subgrade (natural soil), granular sub-base, granular base, and on the rolling surface of the Double Surface Treatment (TSD); which should be considered in the design, the certain amount to be used depending on the soil conditions. Since, they are of vital importance for the sizing of the pavement structure.

Key Word: *Climate, pavement, security, subgrade, transit.*

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
3.	JUSTIFICACIÓN	16
4.	OBJETIVOS	17
4.1.	OBJETIVO GENERAL	17
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
5.	ALCANCE	18
6.	MARCO DE REFERENCIA	19
6.1.	MARCO TEÓRICO.....	19
6.1.1	Subrasante	19
6.1.2	Tránsito	19
6.1.3	Tratamiento superficial doble	20
6.1.4	Metodología AASHTO - 1993	21
6.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	24
6.2.1	Pavimento.....	24
6.2.2	Clasificación de los pavimentos	25
6.2.3	Factores para el diseño de pavimentos.	26
6.2.4	Tratamientos superficiales	26
6.2.5	Proceso constructivo de tratamientos superficiales.....	27
6.3.	ESTADO DEL ARTE	29
6.3.1	Tratamiento superficial con emulsión asfáltica y análisis de costos respecto a placa huella	29
6.3.2	Seguimiento de un doble tratamiento superficial para camino de alto tránsito	29
6.3.3	Metodología para el diseño y construcción de tratamientos superficiales dobles para caminos de bajo volumen de tránsito mediante los métodos de la Dimensión Mínima Promedio y Texas DOT en El Salvador	30
6.3.4	Diseño de la estructura de pavimento, implementando geoceldas, para mejorar la capacidad portante del suelo de la vía ubicada entre K10+500 en San José del Guaviare – Guaviare	30
6.3.5	Estudios de mejoramiento a nivel de doble tratamiento superficial bituminoso de la vía María Auxiliadora-El Carmen, abscisa 0+000-1+400, perteneciente a la parroquia Sinincay, cantón, Ecuador.	30
6.4.	MARCO NORMATIVO	31
6.5.	MARCO GEOGRÁFICO.....	31
7.	METODOLOGÍA	33
7.1.	DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS	33
7.1.1	Revisión bibliográfica	33
7.1.2	Estudio de suelo de la zona.....	33
7.1.3	Estudio de tránsito	34
7.1.4	Metodología de estudios y diseño de la estructura de pavimento	34

8.	ETAPA 1 ESTUDIOS PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	35
8.1.	TAREAS PRELIMINARES	35
8.1.1	Revisión bibliográfica	35
8.1.2	Inspección y reconocimiento de la zona	35
8.2.	ESTUDIO DE TRÁNSITO	38
8.3.	ESTUDIO DE SUELOS	41
8.3.1	Determinación del CBR de diseño	41
8.4.	ESTUDIO CLIMÁTICO	42
8.4.1	Temperatura	43
8.4.2	Precipitación	46
9.	ETAPA 2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE	49
9.1.	PARÁMETROS DE DISEÑO	49
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
11.	RESULTADOS E IMPACTOS	53
12.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	55
12.1.	CONCLUSIONES	55
12.2.	TRABAJOS FUTUROS	56
	BIBLIOGRAFÍA	57
	ANEXOS	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1. Factor daño por el tipo de vehículo.	20
Tabla 6.2. Requisitos de los agregados para el tratamiento superficial doble.	20
Tabla 6.3. Gradación para tratamiento superficial doble.	21
Tabla 6.4. Espesores mínimos en función de la categoría de tráfico.	23
Tabla 6.5. Normatividad.	31
Tabla 8.1. Composición vehicular.	39
Tabla 8.2. Número de ejes equivalentes.	40
Tabla 8.3. Categorías de tránsito según Invías (2013).	40
Tabla 8.4. Parámetros del suelo de la vía de estudio.	41
Tabla 8.5. Valor de diseño según el nivel de tránsito.	41
Tabla 8.6. Método INA.	42
Tabla 8.7. Datos de la Temperatura Media Mensual 2007-2016 en Villavicencio, Meta.	43
Tabla 8.8. Temperatura Media Anual Ponderada	45
Tabla 8.9. Datos de la Precipitación Media Mensual 2007-2016 en Villavicencio, Meta.	46
Tabla 8.10. Precipitación Media Anual.	48
Tabla 11.1. Resultados.	53
Tabla 11.2. Impactos.	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1. Coeficiente estructural a1 para mezcla asfáltica.	22
Figura 6.2. Coeficiente estructural a2 base granular no tratada.	22
Figura 6.3. Coeficiente estructural a2 sub-base granular no tratada.	23
Figura 6.4. Alternativas de las estructuras en milímetros.	24
Figura 6.5. Esquema de la composición de un tratamiento superficial doble.	27
Figura 6.6. Etapas constructivas de un DTS Superficial Doble.	28
Figura 6.7. Ubicación geográfica del municipio de Villavicencio-Meta.	32
Figura 6.8. Ubicación del proyecto.	32
Figura 7.1. Metodología del proyecto.	33
Figura 7.2. Metodología de estudios y diseño de la estructura de pavimento.	34
Figura 8.1. Cruce Corredor Ecológico.	35
Figura 8.2. Inicio de la vía de estudio.	36
Figura 8.3. Entrada institución educativa La Palmas, sede Betania, K3+350.	36
Figura 8.4. Piel de cocodrilo (PC).	37
Figura 8.5. Bache (BCH).	37
Figura 8.6. Baches (BCH).	38
Figura 8.7. Composición vehicular.	40
Figura 8.8. Determinación del CBR de diseño.	42
Figura 8.9. Temperatura Media Mensual 2007-2016 en Villavicencio, Meta.	44
Figura 8.10. Temperatura Media Anual Ponderada.	45
Figura 8.11. Precipitación Media Mensual 2007-2016 en Villavicencio, Meta.	47
Figura 8.12. Precipitación Media Anual.	48
Figura 9.1. Ventana software PAV-NT1.	50
Figura 9.2. Espesores de la base y subbase granular (PAV-NT1).	51
Figura 9.3. Selección de drenaje (PAV-NT1).	51

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial en Colombia enfrenta día a día nuevos desafíos, y está en un proceso de desarrollo con respecto a la implementación de nuevas tecnologías como solución de los problemas de movilidad que presenta el país. Según el Foro Económico Mundial, el reporte global de competitividad, en el índice de conectividad vial, Colombia se encuentra en el puesto 97 (noventa y siete), en el ranking de 140 (ciento cuarenta) países evaluados en el año 2018. [1] Esto implica que, Colombia sigue atrasada a nivel de conectividad vial.

El 67% de la red vial del país corresponden a las vías terciarias, [2] de las cuales, un gran porcentaje presenta fallas relacionadas con el deterioro de la vía, de aquí la importancia de generar soluciones óptimas, como lo es el tratamiento superficial doble, para contribuir en el beneficio de las comunidades que residen y transitan por las zonas rurales, igualmente, dinamizar la economía rural, reducir costos de transporte y facilitar el acceso a la educación, la salud y los servicios públicos en las zonas afectadas.

Como alternativa en el siguiente trabajo se propone el mejoramiento de la vía existente, la cual va desde K0+000 (cruce Corredor Ecológico) hasta el K5+082 (cruce sector barrio La Madrid) en la vereda La Zuria del municipio de Villavicencio, en el departamento del Meta; mediante la implementación de un tratamiento superficial doble; que consiste en la aplicación estratificada y compactada de un producto bituminoso y agregado pétreo, que garantiza la impermeabilización y estabilización de la capa de rodadura, esto de manera separada dependiendo el número de capas que se apliquen, que, para este caso serán dos capas de riego que se aplicarán, el cual está descrito y normalizado por el INVIAS en el capítulo 4 – pavimentos asfálticos, artículo 431 – 13. [3]

Este documento se encuentra dividido en varios apartados, el primero de estos hace referencia al planteamiento del problema, en el cual, se identifican los principales impactos que trae consigo el mal estado de la vía terciaria mencionada anteriormente, seguido de esto, se plantea en la justificación, los beneficios de la implementación de una alternativa vial basada en el tratamiento superficial doble, por su importancia social y económica en el sector rural. Igualmente, se determina el alcance que tendrá como producto, el diseño de una estructura de pavimento con tratamiento superficial doble para la vía estudiada.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Existe una división según el INVIAS de los tipos de vías existentes en el país. La primera división hace referencia a las vías primarias, las cuales comunican capitales de departamentos; la segunda división son las secundarias, que unen cabeceras municipales y conectan a las vías primarias; y la tercera división son las terciarias, que conectan las cabeceras municipales con sus veredas. Donde el 67% de la red vial nacional son vías terciarias, es decir, 142.842 kilómetros. [2] Este último tipo de vías, en específico, tiene frecuentes problemas debido al mal estado en que se encuentran. De los problemas que se mencionan, los más relevantes se relacionan con el desgaste de la capa de rodadura, por efectos del clima o por falta de mantenimiento sobre estas estructuras, las cuales son aporte vital a la economía y la comunicación de la población del sector.

El mal estado de la vía ubicada en la vereda La Zuria, la cual comunica el corredor ecológico, desde el K0+000 al K5+082 con el barrio la Madrid que se encuentra en la comuna 8 del municipio de Villavicencio, en el departamento del Meta, afecta el desarrollo socio-económico integral de los habitantes de esta zona rural, dado que en ese sector, se encuentra un importante porcentaje del sector minero y agroindustrial de Villavicencio, como lo indica el estudio de análisis del sector para las obras de infraestructura que adelanta la Agencia para la Infraestructura del Meta - AIM en el departamento del Meta, del cual se obtiene un análisis económico de la zona estudiada específicamente del sector Las Mercedes – Barcelona, [4] y se identifican las industrias existentes que laboran actualmente.

En épocas de lluvia el tránsito es continuamente restringido para las personas que viven en la vereda, y vehículos que conforman el TPD de esta zona, como: las motos, automóviles y camiones, ya que mecánicamente el suelo y como tal la vía no cuenta con las características óptimas para resistir el impacto del ambiente y principalmente del agua el cual ocasiona daños considerables al terreno como la erosión. Adicionalmente, la continua aplicación de cargas de los vehículos que transitan termina por deteriorar por completo la superficie de rodadura.

Es importante decir, que, otra posible causa del deterioro de las vías rurales del municipio de Villavicencio, o de muchos municipios del país es la falta de inversión por parte de los entes gubernamentales y las alcaldías municipales, en proyectos de mantenimiento y conservación de vías, que, para el caso de la vereda La Zuria sería económicamente viable la implementación de un tratamiento superficial doble, ya que, en comparación con otros diseños, los materiales y la mano de obra requiere menos costos e igualmente proporciona eficacia y durabilidad, características correspondientes al servicio esperado de una vía.

¿Cómo influye el diseño de una estructura de pavimento flexible implementando un tratamiento superficial doble en el mejoramiento de la vereda La Zuria en el K0+000

(cruce Corredor Ecológico), hasta el K5+082 (cruce sector barrio La Madrid) en el Municipio de Villavicencio – Meta?

3. JUSTIFICACIÓN

La vía ubicada en la Vereda la Zuria, que comunica el corredor ecológico con el barrio la Madrid en la ciudad de Villavicencio, se encuentra en un estado crítico y ha sido afectada con el paso del tiempo por factores físicos y ambientales, el cual, ha desacelerado el desarrollo económico en función a la productividad y competitividad de la zona veredal y el casco urbano. Debido a esto, se produce un paso restringido en la vía, de tal forma se incrementa los tiempos de viaje, costos de operación y pérdidas económicas de los productos comercializados por la zona rural afectada. La economía, en la mayor parte del sector rural se ve afectada con los productos agrícolas, de los cuales, deben ser transportados hacia la zona del casco urbano para la comercialización de los mismos.

Es entonces que, se propone el tratamiento superficial doble para solucionar la problemática actual de la zona, esta es una tecnología que proporciona un sistema más económico, conserva la eficiencia y durabilidad en comparación con otros sistemas un poco más costosos. Muchas son las ventajas del tratamiento superficial doble y es importante presentarlas, como lo es; la durabilidad, resistencia al agua, permitiendo soportar las tempestades climáticas, lo cual prolonga su vida útil, proporciona una rugosidad que evita el deslizamiento longitudinal y transversal de los vehículos.

La implementación del tratamiento superficial doble estabiliza la superficie del suelo y fortalece las capas estructurales de rodadura, reduciendo el diseño estructural de las capas de pavimentos asfálticos o del mismo suelo existente. Teniendo en cuenta esta información, se cree importante contemplar esta tecnología en el desarrollo de la infraestructura vial de la vereda La Zuria, aspecto relevante en el acceso directo de la vía rural que conecta la intersección del Corredor Ecológico con el barrio La Madrid; que comunica la población de la zona, incrementando así, el desarrollo socio-económico de la región.

Las inversiones en los pavimentos comunes, tiene como característica un costo de operación y mantenimiento más elevado en cuanto a la implementación del tratamiento superficial doble, y su incentivo es una de las soluciones viables y económicas para el desarrollo rural.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una estructura de pavimento flexible implementando un tratamiento superficial doble como alternativa de mejoramiento de la vía ubicada en la vereda la Zuria, que comunica el cruce del corredor ecológico K0+000 con el barrio la Madrid K5+082 en el municipio de Villavicencio, en el departamento del Meta, mediante la metodología propuesta por el INVIAS.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer las fallas actuales de la capa de rodadura del tramo de la vía estudiado por medio de la recolección de información primaria.
- Identificar las características de la subrasante basados en la información encontrada en estudios de suelos de la zona y en la metodología establecida por el INVIAS incorporando criterios de seguridad y calidad.
- Determinar el número de ejes equivalentes mediante el estudio de un aforo vehicular.
- Calcular la Temperatura media anual ponderada y la precipitación teniendo en cuenta la estación climatológica más cercana al proyecto.

5. ALCANCE

La propuesta de implementar una solución viable con la estructura de pavimento de tratamiento superficial doble, se fundamenta en proporcionar o proveer una superficie de rodado económico, que garantice un resultado de óptimas condiciones para el desarrollo de la infraestructura vial de la red terciaria. En efecto, se establece mediante la elaboración de los siguientes entregables:

- Estudios de suelos previos de la zona (capacidad portante del suelo, CBR).
- Estudio de tránsito objeto de la vía (Tránsito promedio Diario, TPD).
- Diseño de la estructura de pavimento (según las condiciones del suelo y el número de ejes equivalentes N8.2 toneladas).
- Selección de drenajes superficiales y/o subterráneos requeridos por la vía (mediante recomendaciones establecidas en el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS).

Estos entregables tienen como fin diseñar una estructura de pavimento flexible implementando un tratamiento superficial doble como alternativa sostenible del mejoramiento de la vía que conecta la intersección del Corredor Ecológico (K0+000) hasta el Barrio La Madrid de Villavicencio (K5+082), que forma parte de la vereda La Zuria.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1 Subrasante

La subrasante es la capa infinita que se encuentra definida en la parte inferior de la estructura de pavimento, es decir, es el suelo natural. A través, la cual soporta las cargas de las capas superiores del pavimento y del tránsito interferido. En cuanto, la subrasante contenga mejores características físico-mecánicas, mejor será su capacidad de soporte, y el diseño de las capas de la estructura de pavimento se reducirían en dimensión, por ende, en costo.

6.1.1.1 Módulo resiliente (Mr)

El módulo resiliente es un parámetro de gran importancia para conocer la resistencia dinámica de la subrasante, y es fundamental para el diseño de un pavimento. La cual se obtiene de la siguiente manera descrita en la Ecuación 1, para un CBR (capacidad de soporte de la subrasante) <10%. [4]

$$M_r = 10 \times \text{CBR} \text{ (MPa)}$$

Ecuación 1. Módulo resiliente.

6.1.2 Tránsito

El tránsito es una variable considerable para el diseño en una estructura de pavimento, en el cual se determina la proyección del número de ejes equivalentes en un periodo de diseño, en base al Tránsito Promedio Diario (TPD). Mediante la Ecuación 2, se calcula la variable tránsito. [4]

$$N_{8.2} = \text{TPD} \times 365 \times \frac{k_1}{100} \times \frac{k_2}{100} \times \frac{(1+r)^n - 1}{\ln(1+r)} \times FC$$

Ecuación 2. Número de ejes equivalentes.

Dónde:

$N_{8.2}$: Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

TPD: Tránsito Promedio Diario.

k_1 : Porcentajes de vehículos comerciales (buses y camiones).

k_2 : Porcentaje del factor carril.

r : Tasa de crecimiento anual del tránsito.

n : Periodo de diseño en años.

F : Factor camión.

Tabla 6.1. Factor daño por el tipo de vehículo.

Tipo de vehículo	Factor daño
Bus	0.4
Bus metropolitano	1.0
C2-P	1.14
C2-G	3.44
C3	3.76
C2-S1	3.37
C4	6.73
C3-S1	2.22
C2-S2	3.42
C3-S2	4.40
C3-S3	4.72

Fuente: Pavimentos: materiales, construcción y diseño. [4]

6.1.3 Tratamiento superficial doble

El tratamiento superficial doble (TSD) conforma la superficie de rodadura, el cual debe cumplir con los estándares de calidad del agregado y con las gradaciones de granulometría, establecido por el INVIAS, en el artículo 413 – 13.

Tabla 6.2. Requisitos de los agregados para el tratamiento superficial doble.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO	NIVEL DE TRÁNSITO	
		NT-1	NT-2
Dureza, agregado grueso			
Desgaste en la máquina Ángeles, máx. (%)			
-500 revoluciones	INV. E-218	25	25
-100 revoluciones		5	5
Degradación por abrasión equipo Micro-Deval, máximo (%)	INV. E-238	-	25
Coefficiente de pulimiento, mínimo	INV. E-232	0.45	0.45
Durabilidad			
Pérdidas ensayo de solidez en sulfato de magnesio, máximo (%)	INV. E-220	18	18
Limpieza, agregado grueso			
Impurezas, máximo (%)	INV. E-237	0.5	0.5
Geometría de las partículas, agregado grueso			
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	INV. E-230	30	30
Caras facturadas, mínimo (%): una cara/dos caras	INV. E-227	75/-	75/60
Adhesividad			
Bandeja, mínimo (%)	INV. E-740	80	80

Fuente: Artículo 431 – 13. Tratamiento superficial doble INVIAS, 2013.

Tabla 6.3. Gradación para tratamiento superficial doble.

TIPO GRADACIÓN	TAMIZ (mm/ U.S. Standard)							
	25 3/4"	19 3/4"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	6.3 1/4"	4.75 No. 4	2.36 No. 8	1.18 No. 16
	% PASA							
TSD-25	100	90-100	10-45	0-15	-	0-5	-	-
TSD-19	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-
TSD-13	-	-	100	90-100	10-40	0-15	0-5	-
TSD-10	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5
Tolerancias			4%					1%

Fuente: Artículo 431 – 13. Tratamiento superficial doble INVIAS, 2013.

6.1.4 Metodología AASHTO - 1993

La metodología AASHTO – 1993 es un procedimiento semi-empírico que se basa en determinar el número estructural (SN) para el pavimento, el cual, tiene en cuenta requerimientos como: el número de ejes equivalentes de diseño ($N_{8.2}$), módulos resilientes (M_r), índice de serviciabilidad (ΔPSI), nivel de confiabilidad (R), desviación estándar de diseño (S_o), condiciones ambientales y drenaje. Estas variables son necesarias para el desarrollo de este método, comprendidas de la siguiente forma:

- Subrasante. Descrito en el capítulo 6.1.1, se caracteriza a través del módulo resiliente, teniendo en cuenta con la ecuación 1.
- Tránsito. Se contempla en el capítulo 6.1.2, se caracteriza mediante el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en un periodo de diseño, descrita en la ecuación 2.
- Propiedades mecánicas de los materiales. Se requiere el módulo resiliente de cada una de los espesores de las capas en el diseño del pavimento, los cuales se establecen mediante coeficientes estructurales para cada capa. Expuestas a determinar en las ecuaciones 3-5 o en la Figuras 6.1, 6.2 y 6.3.

$$a_1 = 0.184 \times \ln(E_1) - 1.9547$$

Ecuación 3. Coeficiente estructural mezcla asfáltica.

$$a_2 = 0.249 \times \ln(E_2) - 0.977$$

Ecuación 4. Coeficiente estructural base granular.

$$a_3 = 0.227 \times \ln(E_3) - 0.839$$

Ecuación 5. Coeficiente estructural sub-base granular.

Dónde:

E_1 : Módulo de resiliencia de la capa asfáltica (lb_f/in^2).

E_2 : Módulo de resiliencia de la base granular (lb_f/in^2).

E_3 : Módulo de resiliencia de la sub-base granular (lb_f/in^2).

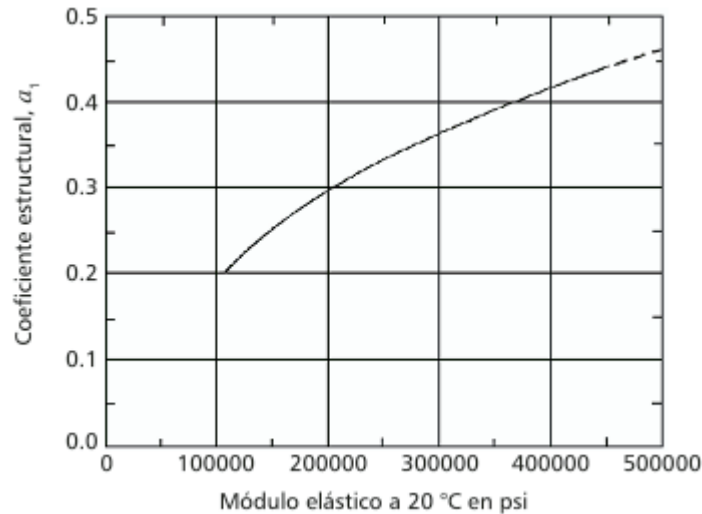


Figura 6.1. Coeficiente estructural a_1 para mezcla asfáltica.

Fuente: Pavimentos: materiales, construcción y diseño. [4]

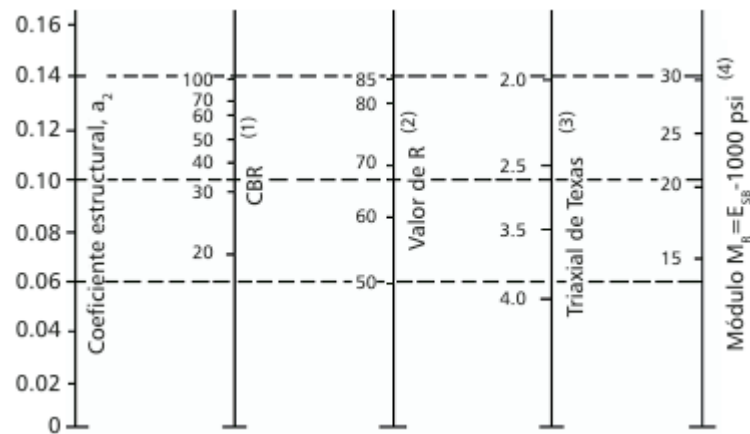


Figura 6.2. Coeficiente estructural a_2 base granular no tratada.

Fuente: Pavimentos: materiales, construcción y diseño. [4]

Dónde:

- (1) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP.

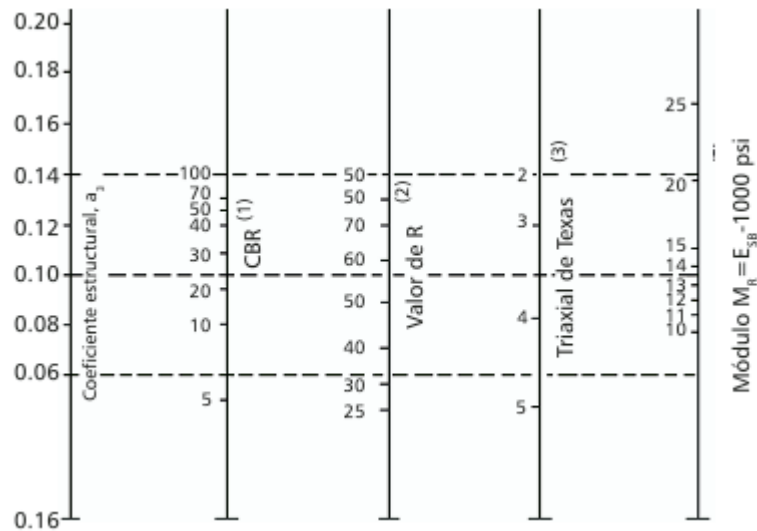


Figura 6.3. Coeficiente estructural a_2 sub-base granular no tratada.
Fuente: Pavimentos: materiales, construcción y diseño. [4]

Dónde:

- (1) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP.

6.1.4.1 Espesor de la capa de rodadura (h)

El espesor mínimo de la capa de rodadura está establecido en 3 definiciones, que se debe tener en cuenta para un espesor menor establecido, para las mezclas asfálticas el espesor mínimo es chequeado por el programa PAV-NT1 escogiendo el mayor, de la siguiente manera:

- Espesor mínimo requerido, establecido por el método AASHTO-93 para proteger la capa inferior de la capa de rodadura. [5]
- Espesor mínimo dispuesto en la metodología AASHTO-93, teniendo en cuenta la categoría del tráfico. [5]

Tabla 6.4. Espesores mínimos en función de la categoría de tráfico.

Categoría de tráfico	Rango de ejes de 80 KN en el carril de diseño	h_{min} (mm)
T1	< 150.000	50
T2	150.000 – 500.000	75

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, INVIAS. [5]

- Espesor mínimo en función del agregado, establecido en el capítulo 4 – pavimentos asfálticos, en el artículo 413 – 13 del INVIAS. [5]

6.1.4.2 Espesor de la capa de base granular ($h_{\text{mínimo}}$).

El espesor mínimo de la capa de la base granular ($h_{\text{mínimo}}$), debe tener en cuenta, que el espesor no sobrepase el mayor de los siguientes valores controlados por el programa PAV-NT1, que son:

- Espesor mínimo para proteger la capa inferior de la base granular.
- Espesor mínimo descrito en la fase constructiva de 150 milímetros.

CATEGORIA DE SUBRASANTE	ESTRUCTURAS TIPO					
	1	2	3	4	5	6
S1 $3 \leq \text{CBR}$		N.A		N.A		
S2 $3 < \text{CBR} \leq 5$		N.A		N.A		
S3 $5 < \text{CBR} \leq 10$				N.A		
S4 $\text{CBR} > 10$						

Figura 6.4. Alternativas de las estructuras en milímetros.

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, INVIAS. [5]

6.2. MARCO CONCEPTUAL

6.2.1 Pavimento

El pavimento es el resultado de una estructura compuesta por diferentes tipos de capas que están construidas con materiales específicos en cada una de las capas, los cuales están una sobre otra y que finalmente son compactadas. [5]

El pavimento debe cumplir con ciertas características las cuales son:

- Soportar condiciones climáticas a las que se expone.
- Resistir lo suficiente al momento de imponerle las cargas de diseño.
- Cumplir con la textura y el color adecuado.
- Drenar eficientemente el agua.
- Tener la señalización necesaria para la seguridad vial.

6.2.2 Clasificación de los pavimentos

Según las literaturas, existe la siguiente clasificación de los pavimentos:

6.2.2.1 Pavimento Flexible

Es una estructura conformadas por una base granular, subbase granular, y una carpeta asfáltica. Esta estructura de pavimento cumple con unos espesores de capas determinados y debe tener un periodo de diseño para 10 años. [4]

6.2.2.2 Pavimento Rígido

El pavimento rígido cumple las condiciones de conformarse por una base granular y una placa de concreto reforzado, y a diferencia del pavimento flexible cumple un periodo de diseño de 20 años. [4]

6.2.2.3 Pavimentos Articulado

La estructura de pavimento articulado está conformada por una base y subbase granular, luego en la superficie de rodadura se compone por adoquines los cuales van ubicados simétricamente y tienen las mismas dimensiones. Este tipo de pavimento se construye para zonas de baja estabilidad del suelo, como para zonas de bajo tránsito. [4]

6.2.2.4 Pavimentos con base tratada o Semirrígidos

Se conforman por capas similares a las del pavimento flexible, pero, en este caso la base granular es tratada con diferentes aditivos, para cumplir con características de resistencia mayores.

6.2.3 Factores para el diseño de pavimentos.

En el diseño de pavimentos hay que tener en cuenta los factores que influyen en las características, que debe tener la estructura en general para cumplir con los parámetros suficientes y lograr prestar el servicio adecuado, luego en su construcción.

Los factores son:

6.2.3.1 Tránsito

El tránsito es la representación en valores numéricos de los ejes totales de los vehículos que en un periodo de tiempo se tiene conocimiento transitan y a sí mismo, mediante una proyección a futuro se espera circulen por una vía. [4]

6.2.3.2 Subrasante

Es la capa superficial encontrada en el suelo la cual debe cumplir con ciertas características de resistencia tanto a las deformaciones como a los esfuerzos cortantes, en el momento que se le impone alguna carga. Mediante estudios de suelos se determinan estos factores y así mismo, si es necesario, hacer el mejoramiento adecuado para caso analizado. [4]

6.2.3.3 Clima

Son los factores como la lluvia y los cambios de temperatura, que influyen en la resistencia, el cambio de volumen y las deformaciones existentes en los suelos que soportan la estructura de pavimento.

6.2.4 Tratamientos superficiales

Como un tema del mejoramiento de suelos en referencia a la construcción de vías, es la aplicación de emulsión asfáltica, sobre una base granular o capa de rodadura con el fin de lograr uniformidad y con la aplicación de agregado del tamaño específico, obtener una resistencia mayor a la subrasante o superficie actual. [7]

6.2.4.1 Tratamiento superficial doble

Es el resultado de la aplicación de dos capas de asfalto las cuales en su intermedio llevan dos capas de material granular, gradado específicamente el cual mediante un proceso de compactación adquiere una resistencia y propiedades mecánicas adecuadas para la capa de rodadura de una vía. [8]

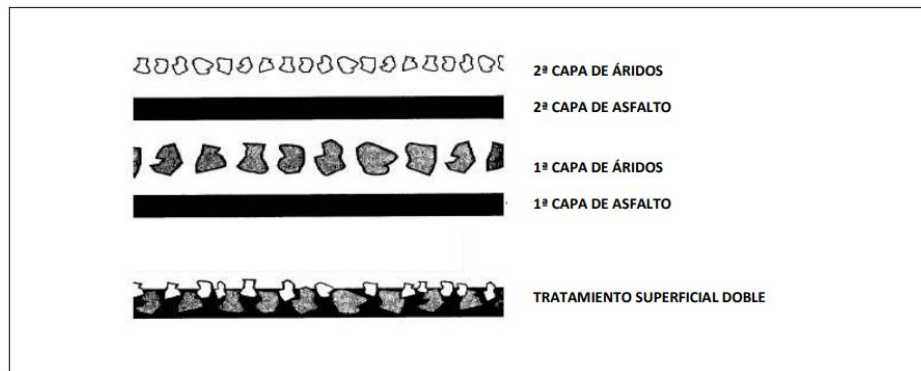


Figura 6.5. Esquema de la composición de un tratamiento superficial doble.
Fuente: [8]

6.2.4.2 Beneficios de los tratamientos superficiales

Dentro de los beneficios más significativos de los tratamientos superficiales se encuentran:

- Proveen impermeabilización a la estructura de pavimento que existe actualmente, así mismo evita la formación de fallas y problemas en las capas más profundas como la base y la subbase. [7]
- Aumentan el coeficiente de fricción en la capa de rodadura, así evita los deslizamientos de los vehículos o el hidroplaneo. [7]
- Si es utilizado en vías terciarias o zonas de material suelo, evitan las grandes concentraciones de polvo emitidas por el tránsito de vehículos en la vía. [7]
- Reduce considerablemente los costos en la construcción de una vía, lo cual genera menor inversión en comparación a otros sistemas de tratamiento o soluciones de vías de bajo tránsito. [8]
- Protege las capas inferiores a la capa de rodadura reduciendo la acción de erosión y los esfuerzos producidos por las cargas impuestas de los ejes de los vehículos que transitan por la vía. [8]

6.2.5 Proceso constructivo de tratamientos superficiales

El proceso constructivo del tratamiento superficial doble esta normalizado por el Artículo 431-07 del INVIAS el cual cuenta con los parámetros y procesos constructivos adecuados para obtener el mejor resultado luego de la aplicación de esta metodología. [9]

La ejecución de los trabajos se puede enumerar de la siguiente manera:

1. Preparación y elaboración de los agregados.

2. Limpieza y ordenamiento de la superficie de diseño.
3. 1ª Aplicación del riego de liga.
4. 1ª Extensión del material granular.
5. 1ª Compactación del conjunto de ligante y agregado pétreo.
6. 2ª Aplicación del riego de liga.
7. 2ª Extensión del material granular.
8. Compactación Final.
9. Acabados y limpieza de residuos.
10. Puesta en marcha.

Para entender de una manera representativa, se presenta la siguiente imagen que ilustra el proceso mencionado anteriormente.

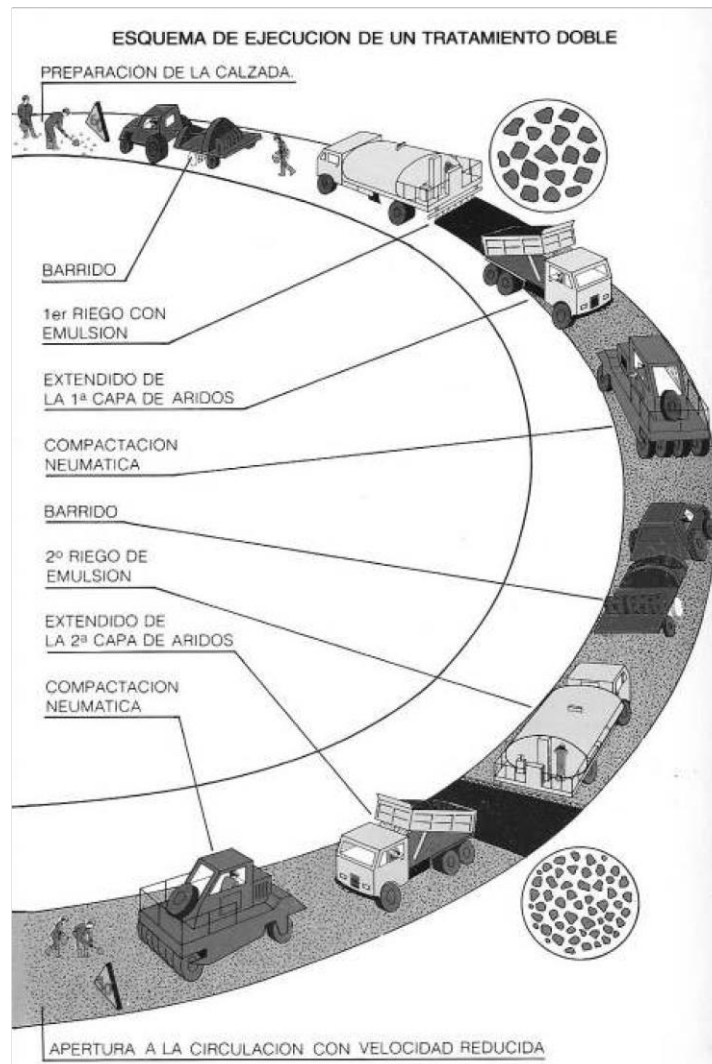


Figura 6.6. Etapas constructivas de un DTS Superficial Doble.

Fuente: [8]

6.3. ESTADO DEL ARTE

Dentro de este apartado consultado, el cual es un punto de referencia claro de la implementación de la idea que se tiene para el desarrollo de este proyecto, en este caso para el desarrollo de la red vial del país en las vías terciarias. Se recopiló información primaria de las actividades realizadas e investigaciones a nivel nacional e internacional, tanto del tratamiento superficial doble como de algunos métodos importantes a resaltar aplicados en años atrás.

6.3.1 Tratamiento superficial con emulsión asfáltica y análisis de costos respecto a placa huella

En la Universidad Militar Nueva Granada se desarrolló un trabajo de postgrado para la especialización en Ingeniería de Pavimentos, propuesto por el estudiante Edween Mauricio Guerrero Veloza. El cual tuvo como objeto realizar la descripción detallada de los tratamientos superficiales con emulsión asfáltica aplicados a la red de vías terciarias del país, igualmente realizar un análisis de costos con respecto a la construcción de una estructura de placa huella, técnica utilizada por INVIAS en la actualidad. [10]

Dentro de las conclusiones más importantes se resalta la variación importante en los costos, donde se indica que la relación entre la placa huella y el tratamiento superficial doble es casi de 5 veces mayor el costo de la placa huella en comparación con el tratamiento superficial, de tal manera que mientras se construye 1 km de placa huella, se construirían 5 km de tratamiento superficial doble. [10]

Esta Investigación realizada tuvo como conclusiones aspectos muy importantes que incentivan el desarrollo del presente proyecto y así mismo la implementación de estructuras de pavimentos con tratamientos superficiales.

6.3.2 Seguimiento de un doble tratamiento superficial para camino de alto tránsito

La estudiante de Ingeniería civil de la Universidad de Chile Ángela Bernardita Queirolo Menz, en su tesis propone una investigación de la eficacia de la implementación de un tratamiento superficial doble en un tramo de vía seleccionado con el fin de demostrar si este tipo de solución, en este caso responde de manera satisfactoria en vías de mayor tránsito.

El desarrollo del trabajo consistió en establecer la condición original de la estructura de pavimento, para luego determinar y comparar la condición actual mediante mediciones de resistencia estructural, funcionalidad y durabilidad. Con esto, más una inspección visual, lograr definir la forma, magnitud y frecuencia del deterioro producido en la vía. [11]

6.3.3 Metodología para el diseño y construcción de tratamientos superficiales dobles para caminos de bajo volumen de tránsito mediante los métodos de la Dimensión Mínima Promedio y Texas DOT en El Salvador

En esta tesis se utilizaron dos metodologías en el diseño de tratamientos superficiales dobles, para vías de tránsito bajo mediante los métodos de Dimensión Mínima Promedio (DMP) y de Texas DOT. El cuál, el primer método fue desarrollado por el County Roads Board de Victoria, que describe las características de la dosis del agregado y la dosis del ligante. El segundo método, fue modificado por Instituto de Transportación de Texas en 1981, igualmente, desarrolla la relación del agregado y del ligante. Aunque los dos métodos se basan en teorías diferentes, el DMP es más óptimo, ya que dosifica la mayor cantidad de agregados. [12]

6.3.4 Diseño de la estructura de pavimento, implementando geoceldas, para mejorar la capacidad portante del suelo de la vía ubicada entre K10+500 en San José del Guaviare – Guaviare

El objetivo principal de este trabajo de grado realizado por dos estudiantes de Ingeniera civil de la universidad Santo Tomas – Villavicencio está muy relacionado con la propuesta expuesta en la presente tesis. Toca un tema muy importante en el diseño de vías, que es la estabilidad del suelo y la capacidad portante de este para la implementación de una vía. La tesis propone un su desarrollo la implementación de geoceldas como la capa inicial en el suelo, la cual proporciona un aumento de resistencia y disminuye la plasticidad del mismo, esto logra mejorar la capacidad portante del suelo y por consiguiente permite la implementación de una estructura de pavimento con sueño cemento. [13]

6.3.5 Estudios de mejoramiento a nivel de doble tratamiento superficial bituminoso de la vía María Auxiliadora-El Carmen, abscisa 0+000-1+400, perteneciente a la parroquia Sinincay, cantón, Ecuador.

La propuesta realizada por dos estudiantes de la universidad católica de Cuenca en Ecuador, se basa en realizar el diseño del mejoramiento geométrico, de una vía de 1400 metros mediante un tratamiento superficial doble, en la primera etapa de esa vía con un periodo de diseño a 10 años, también una segunda etapa la cual consta de una carpeta asfáltica con un mismo periodo de diseño. Todo esto mediante la utilización de los parámetros presentes en la norma para vía del Ecuador (NEVI 12) y la metodología de la AASHTO para el diseño de la estructura de pavimento flexible que representa el objetivo principal del proyecto. [14]

El presente estado del arte refleja la necesidad y los retos existentes en el mejoramiento de la red vial a nivel nacional e internacional, donde existen diferentes

tecnologías y propuestas presentes, en este caso, para el diseño de nuevas vías que no requieren un mayor costo pero que son la solución a los problemas de movilidad, existentes en Colombia y el resto del mundo.

6.4. MARCO NORMATIVO

Tabla 6.5. Normatividad.

NORMA	DESCRIPCION
Artículo 400 – 13 INVIAS	Disposiciones generales para la ejecución de riesgos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos.
Artículo 431 – 13 INVIAS	Tratamiento superficial doble.
INVIAS	Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

Fuente: Autor.

6.5. MARCO GEOGRÁFICO

El presente proyecto está ubicado en el municipio de Villavicencio, capital del departamento Meta. Según el reporte del DANE actualmente cuenta con una población de alrededor 495.227 habitantes. De acuerdo a la ficha municipal de DNP, el municipio cuenta con una extensión de 1.328 Km². [15].

Villavicencio está ubicado geográficamente en la zona de Colombia conocida como el piedemonte llanero, el cual se encuentra en la cordillera oriental. Este municipio cuenta con una altura sobre el nivel del mar de 467 metros. También se identifica que este municipio se registra temperatura media de 27° C.

Sus límites son: en la parte Norte, está ubicado el municipio de Restrepo y el Calvario, al sur se está, Acacías y San Carlos de Guaroa, en la parte oriental esta Puerto López y finalmente en la parte occidental con una parte del municipio de Acacías y el departamento de Cundinamarca [16].



Figura 6.7. Ubicación geográfica del municipio de Villavicencio-Meta.

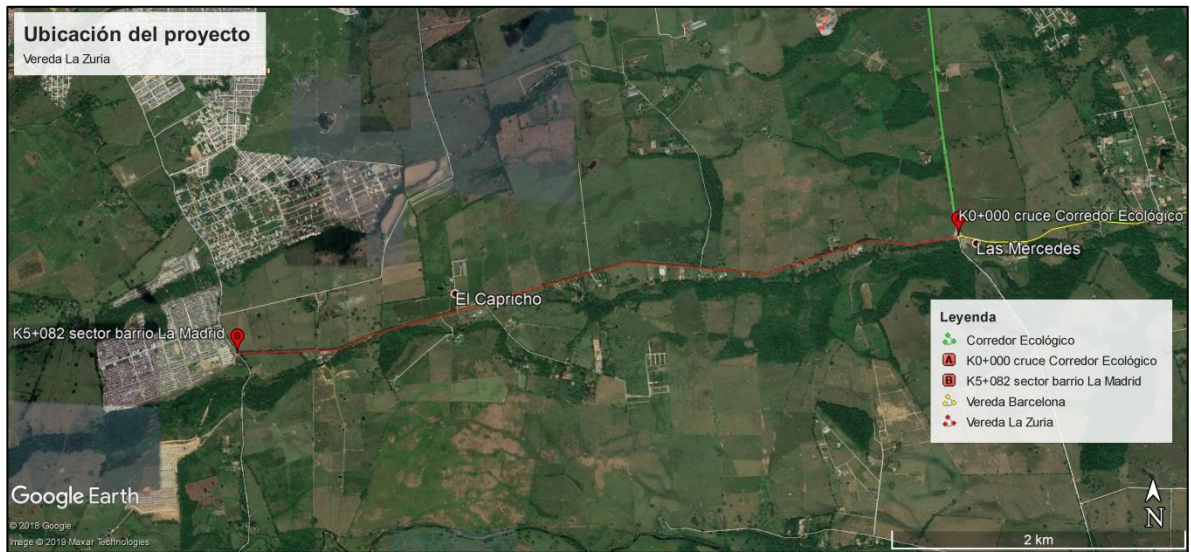


Figura 6.8. Ubicación del proyecto.

Fuente: Google Earth.

Se adopta este tramo desde el K0+000 desde el cruce Corredor Ecológico hasta el K5+082, sector Barrio La Madrid, para el diseño e implementación de una estructura de pavimento con tratamiento superficial doble, como optimización para la vía terciaria señalada en la imagen anterior.

7. METODOLOGÍA

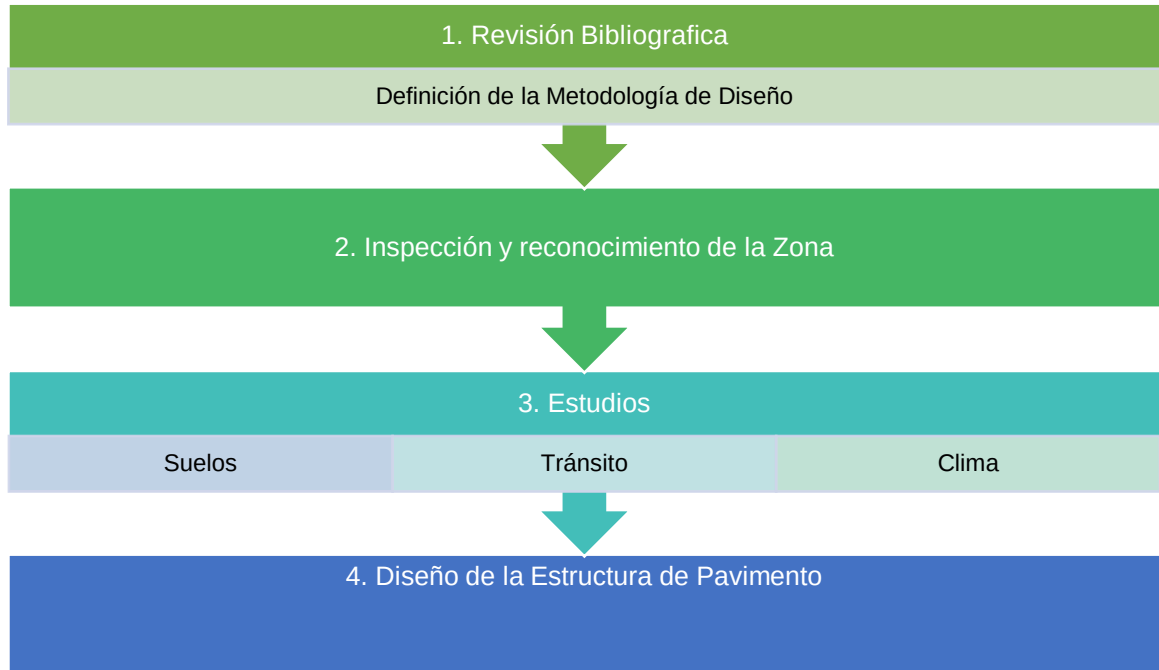


Figura 7.1. Metodología del proyecto.
Fuente: Autor.

7.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

7.1.1 Revisión bibliográfica

Se emplea una investigación previa de la temática a profundidad, sobre el desarrollo de la metodología más conveniente para la definición del diseño. Mediante los siguientes apartados:

- Recopilación de información previa.
- Examinación y comprensión de la información.
- Análisis constructivo de las alternativas.
- Selección de la metodología de diseño.

7.1.2 Estudio de suelo de la zona

Para este estudio se contempla la elaboración de las siguientes actividades:

- Recopilación y análisis de información previa de la zona reciente. En caso, de no haber información existente se debe realizar las siguientes fases:
- Se realiza el recorrido del tramo vial para la distribución de los puntos de apiques en planta topográfica.

- Localización mediante GPS los puntos definitivos de los apiques en campo.
- Toma de muestra de material de los apiques con las especificaciones de profundidad a 1.5 m. para realizar el ensayo de CBR.
- Verificar la estratigrafía del suelo. Además, la existencia de nivel freático y la posición.
- Clasificación de suelos mediante laboratorio y determinación del CBR.
- Elaborar informe.

7.1.3 Estudio de tránsito

7.1.3.1 Recopilación y análisis de información secundaria

Se tiene en cuenta las series históricas disponibles de la zona vial del proyecto con el propósito de establecer la dimensión del tránsito.

7.1.3.2 Recopilación y análisis de información primaria

El estudio de tránsito con información primaria tiene mayor validación y confiabilidad en los resultados de campo, mediante aforo vehicular. El cual se hace un conteo del tránsito promedio diario semanal (TPDs).

7.1.4 Metodología de estudios y diseño de la estructura de pavimento

Se establece la siguiente metodología con base en los estudios de la subrasante, del tránsito, y los factores ambientales y climáticos, que conlleva a la finalidad del diseño de la estructura de pavimento.

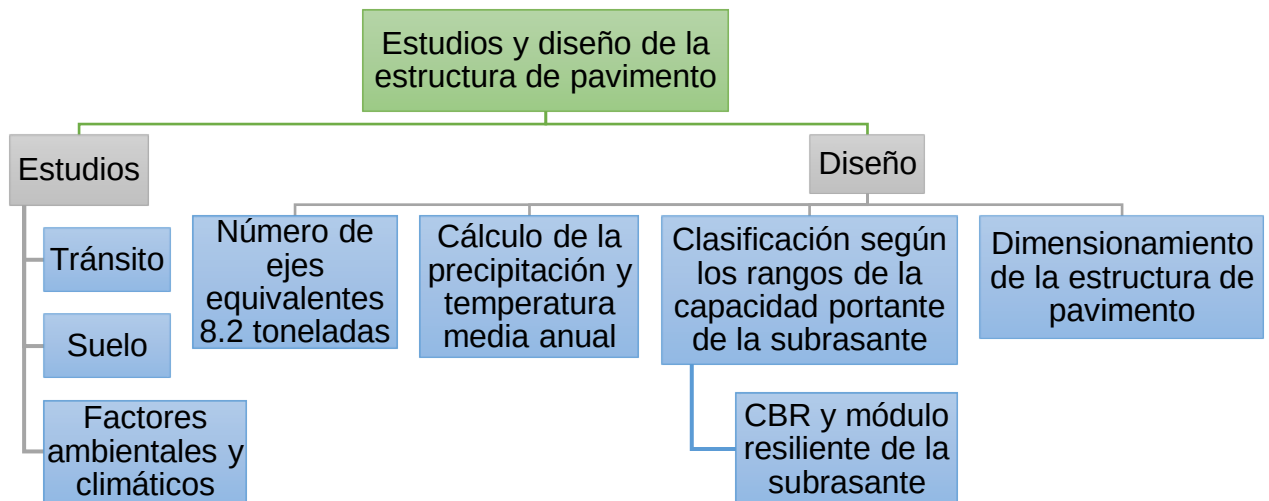


Figura 7.2. Metodología de estudios y diseño de la estructura de pavimento.

Fuente: Autor.

8. ETAPA 1 ESTUDIOS PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

8.1. TAREAS PRELIMINARES

8.1.1 Revisión bibliográfica

Mediante la revisión detallada de las alternativas de diseño para los pavimentos asfálticos, se estableció la metodología AASHTO – 1993. Y para la selección de drenajes superficiales y/o subterráneos requeridos por la vía, se realizó mediante las recomendaciones establecidas en el “Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS”.

8.1.2 Inspección y reconocimiento de la zona

8.1.2.1 Inspección de campo

El objeto de estudio está comprendido en la vereda La Zuria, ubicada en el municipio de Villavicencio-Meta. Donde inicia en el k0+000 (cruce Corredor Ecológico) y termina en el k5+082 (sector barrio La Madrid).



Figura 8.1. Cruce Corredor Ecológico.
Fuente: Autor.



Figura 8.2. Inicio de la vía de estudio.
Fuente: Autor.



Figura 8.3. Entrada institución educativa La Palmas, sede Betania, K3+350.
Fuente: Autor.

A lo largo de la vía se presentan daños causados por factores físicos y ambientales, como: la lluvia, falta o ineficiencia en obras de drenaje, deformación de los materiales granulares existentes o subrasante, entre otros.



Figura 8.4. Piel de cocodrilo (PC).
Fuente: Autor.

En algunos tramos de la vía se presentan baches pronunciados que afectan el estado de la vía. Como se aprecian en la Figura 8.5 y Figura 8.6. Se presentan por la erosión que ocasionan las lluvias.



Figura 8.5. Bache (BCH).
Fuente: Autor.



Figura 8.6. Baches (BCH).

8.2. ESTUDIO DE TRÁNSITO

Para calcular el número de ejes equivalentes o tránsito de diseño, es necesario realizar el aforo vehicular durante tres días de la semana, de los cuales dos son días hábiles y uno no hábil.

Por lo anterior, se tomó el día sábado que es día inhábil, aunque para muchas empresas y personas del sector, realizan sus actividades laborales en la zona. Por consiguiente, se evidenció cierto tránsito significativo de vehículos, también el día lunes y miércoles dado que es entre semana son días hábiles, lo cual se logra registrar un buen tránsito de vehículos que transportan los productos agrícolas hacia el casco urbano. Una vez determinado el tránsito promedio diario se procede a calcular el número de ejes equivalentes utilizando la Ecuación 2.

Se requiere el uso de factores de camión para cada clase particular de vehículo, principalmente para camiones pesados. Esto con el fin de obtener el porcentaje de la tasa anual de crecimiento vehicular, y el período de diseño de la estructura de pavimento, lo que nos da el factor de crecimiento de tránsito.

Para el estudio de tránsito es necesario resaltar que el diseño de la estructura de pavimento con tratamiento superficial doble se espera un periodo de vida útil de 10 años, por lo cual es necesario hacer la proyección del tránsito promedio diario (TPD) con los datos obtenidos de los aforos realizados en la zona de estudio, los días establecidos. Es con esto, que se procede a identificar las demás variables para el cálculo del número de ejes equivalente N 8,2 Ton.

El aforo en la zona de estudio se desarrolló tres días de la semana; dos días hábiles, lunes, miércoles y un día no hábil que correspondió al día sábado.

Tabla 8.1. Composición vehicular.

Resumen									
Fecha	Automóvil	Microbús	Buseta	Bus intermunicipal	C2P	C2G		C3	
					Camión	Camión	Volqueta	Camión	Volqueta
Martes 24 de septiembre de 2019	333	12	8	1	35	22	4	0	1
Jueves 26 de septiembre de 2019	363	11	9	1	33	19	5	2	2
Sábado 28 de septiembre de 2019	289	10	7	1	29	15	3	1	1
Total	985	33	24	3	97	56	12	3	4
TPD	328.33	11	8	1	32	18.67	4	1	1.33
TPDs	406								
Composición vehicular (%)	80.87	2.71	1.97	0.25	7.96	4.6	0.99	0.25	0.33

Fuente: Autor.

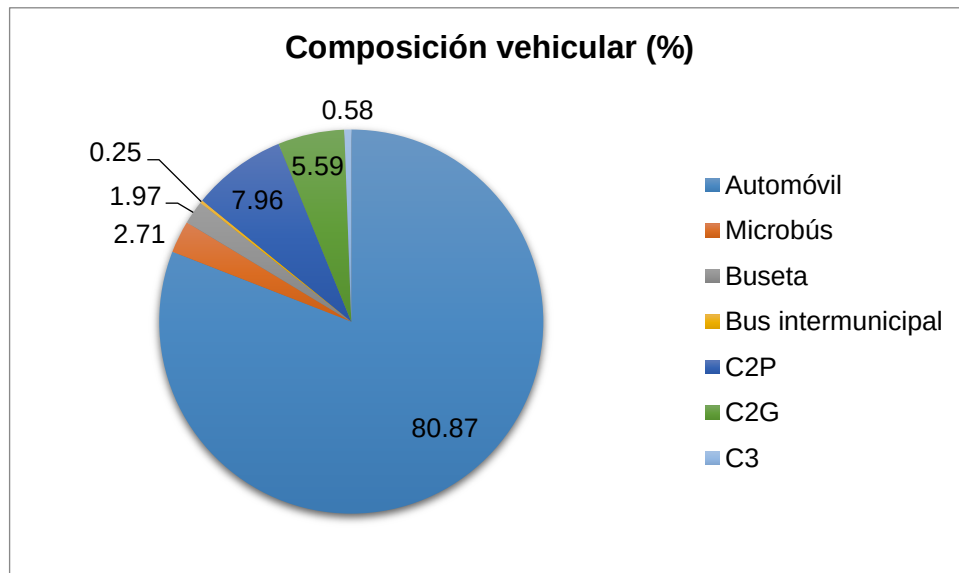


Figura 8.7. Composición vehicular.

Fuente: Autor.

Según el estudio de tránsito, en la Figura 8.7 se muestra la composición vehicular de la movilidad en la zona de estudio, que se caracteriza por un flujo vehicular mayor en los automóviles, con un 80,87%. En la siguiente Tabla 8.2, se muestran los resultados para calcular el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

Tabla 8.2. Número de ejes equivalentes.

Numero de ejes equivalentes (N8.2)		
TPDS	406	Veh/día
Porcentaje vehículos pesados (K1)	19.05	%
Factor carril (K2)	50	%
Tasa de crecimiento (r)	3	%
Periodo de diseño (n)	10	Años
Factor camión (FC)	2.68	
N8.2	440079	# de ejes

Fuente: Autor.

En la Tabla 8.3 se establecen las categorías de tránsito de acuerdo con el INVÍAS (2013), conforme a esto, el nivel de tránsito es NT1. En la Tabla 6.4, se describen dos subcategorías como T1 y T2 de la categoría NT1, considerando el límite de tránsito durante el periodo de diseño, es decir, se establece como T2.

Tabla 8.3. Categorías de tránsito según Invías (2013).

Número de ejes equivalentes de 80 KN ($\times 10^6$)		
NT1	NT2	NT3
<0.5	0.5-5.0	>5.0

Fuente: Pavimentos: materiales, construcción y diseño.

8.3. ESTUDIO DE SUELOS

Se analizaron los apiques realizados en el estudio de suelos por la empresa W & H INGENIERÍA S.A.S. y proporcionado por la AIM (Agencia de Infraestructura del Meta), para el *mejoramiento de la vía Las Mercedes–Barcelona*, estudio que beneficia la obtención de información de la caracterización del suelo y así mismo la obtención de los valores del CBR presente en la zona.

Tabla 8.4, se muestran los valores de los ensayos del CBR, el cual se evidencia la clasificación del suelo de la vía de estudio, en su mayoría como arcilla de baja plasticidad (CL).

Tabla 8.4. Parámetros del suelo de la vía de estudio.

Apique	Longitud	Latitud	Límite Líquido	Límite Plástico	IP	Humedad Natural	CBR 0.1"	USC
10	4°3'52.54"N	73°37'43.37"O	39.09	18.47	20.62	23.6	8.14	CL
11	4°3'48.51"N	73°37'59.81"O	38.96	16.65	20.31	23.5	8.29	CL
12	4°3'47.45"N	73°38'39.97"O	38.25	19.32	18.93	23.1	8.41	CL
13	4°3'42.46"N	73°38'59.28"O	41.75	19.46	22.29	20.1	7.37	CL
14	4°3'42.46"N	73°38'59.28"O	36.91	19.51	17.4	23.7	7.68	CL
15	4°3'38.62"N	73°39'13.19"O	48.6	23.81	24.74	22.6	7.75	CL
16	4°3'35.66"N	73°39'22.44"O	37.47	18.25	18.22	23.2	6.66	CL
17	4°3'32.82"N	73°39'34.06"O	32.12	19.43	12.69	24.7	7.07	CL
18	4°3'28.13"N	73°39'45.65"O	39.22	18.28	20.94	23.5	7.37	CL

Fuente: W & H INGENIERÍA S.A.S.

8.3.1 Determinación del CBR de diseño

El CBR de diseño se calculó mediante la metodología INA (Instituto Nacional del Asfalto), el cual se determina el percentil de la capacidad portante a utilizar. En la Tabla 8.5 se designa el valor de diseño en porcentaje según el nivel de tránsito.

Tabla 8.5. Valor de diseño según el nivel de tránsito.

Clase	Nivel tránsito	% Valor diseño
Liviano	10 ⁴ o menos	60%
Medio	10 ⁴ – 10 ⁶	75%
Pesado	Mayor a 10 ⁶	87,5%

Fuente: Autor.

En la Tabla 8.6, se muestra la aplicación del método INA, donde los valores de CBR están ordenados de forma ascendente, y se evidencia que a partir de los resultados se obtuvo la gráfica de la figura 8.8, que nos indica la determinación del CBR de diseño por medio de los valores de los porcentajes de frecuencia, es decir, los valores de diseño respecto al CBR.

Tabla 8.6. Método INA.

Apique	CBR %	Mayores o iguales a cada valor	Frecuencia
16	6.66	9	100.00%
17	7.07	8	88.89%
13	7.37	7	77.78%
18	7.37	6	66.67%
14	7.68	5	55.56%
15	7.75	4	44.44%
10	8.14	3	33.33%
11	8.29	2	22.22%
12	8.41	1	11.11%
CBR de diseño (%)		7.37	

Fuente: Autor.

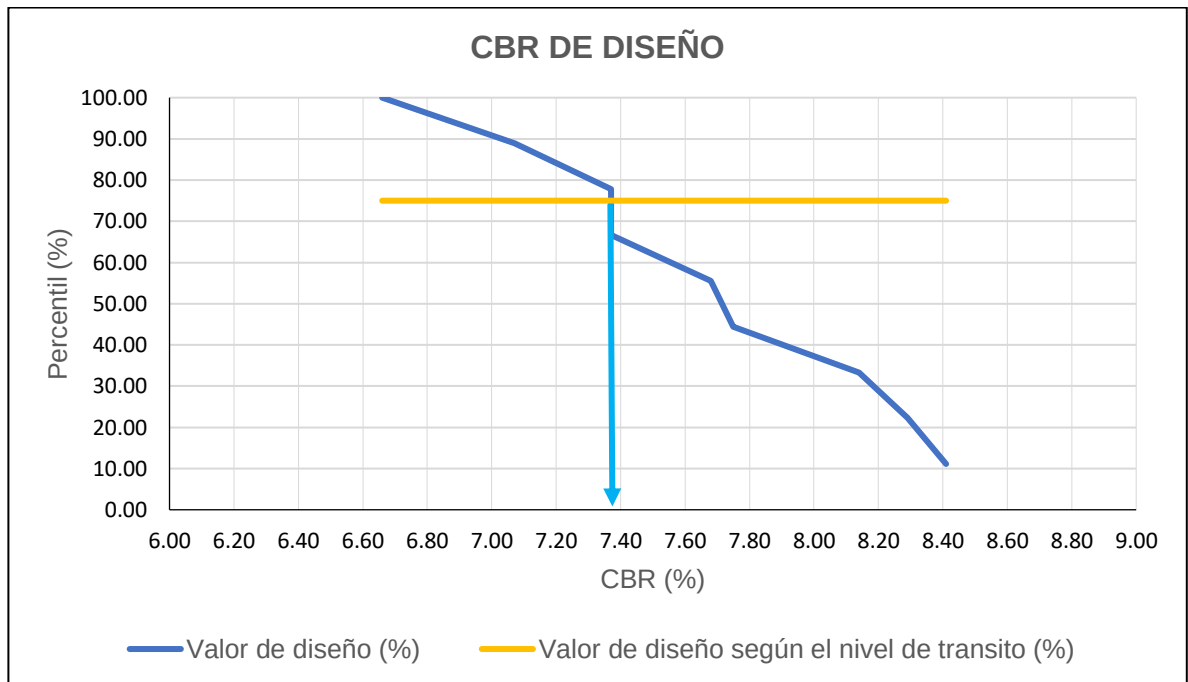


Figura 8.8. Determinación del CBR de diseño.

Fuente: Autor.

De acuerdo a lo anterior, el valor de diseño es del 75% según el nivel de tránsito esperado, por lo tanto, el CBR de diseño a emplear es de 7.37%.

8.4. ESTUDIO CLIMÁTICO

Se consultaron las estaciones climatológicas presentes en la zona estudio mediante el programa Clima, esto con el fin de obtener las condiciones particulares de la temperatura y precipitación anual promedio durante los últimos 10 años, para así determinar los factores climatológicos en el diseño de la estructura de pavimento.

8.4.1 Temperatura

En la Tabla 8.7, se muestran los datos de la Temperatura Media Mensual de los últimos 10 años registrados en el programa Clima, el cual se da a conocer un análisis de la serie histórica climática de las estaciones del IDEAM. Se puede evidenciar que el año 2007 en el mes de junio y 2016 en el mes de febrero, se presentaron la temperatura más baja y más alta respectivamente.

Tabla 8.7. Datos de la Temperatura Media Mensual 2007-2016 en Villavicencio, Meta.

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL 2016-2007 VILAVICENCIO - META												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2007	27.95	28.35	27.2	26.41	25.27	23.93	24.93	24.49	25.44	25.71	26.25	26.3
2008	27.01	27.39	27.96	26.37	25.15	24.61	24.52	25.73	25.68	25.66	25.65	25.99
2009	25.87	25.85	26.6	25.86	26.09	25.13	24.37	25.66	26.09	26.26	26.61	27.26
2010	28.51	27.95	27.12	26.01	25.72	25	24.64	25.07	25.94	25.84	25.45	25.89
2011	26.63	25.98	26.16	25.4	25.08	25.11	24.88	25.61	25.64	25.64	25.47	25.76
2012	26.73	26.77	25.52	25.27	25.34	24.79	24.44	24.76	25.56	26.2	26.65	26.75
2013	27.61	26.76	26.92	26.67	25.61	25.56	24.86	24.95	25.65	26.32	25.77	26.35
2014	27.56	27.48	27.34	26.08	26.28	24.62	24.73	25.2	26.19	25.71	26.17	26.82
2015	26.59	26.45	27.33	26.13	26.18	24.71	25.24	25.35	27.08	26.85	26.3	26.72
2016	28.23	28.76	28.42	26.06	25.76	24.88	24.5	25.48	26.02	26.13	25.95	25.91

Fuente: Software Clima, IDEAM.

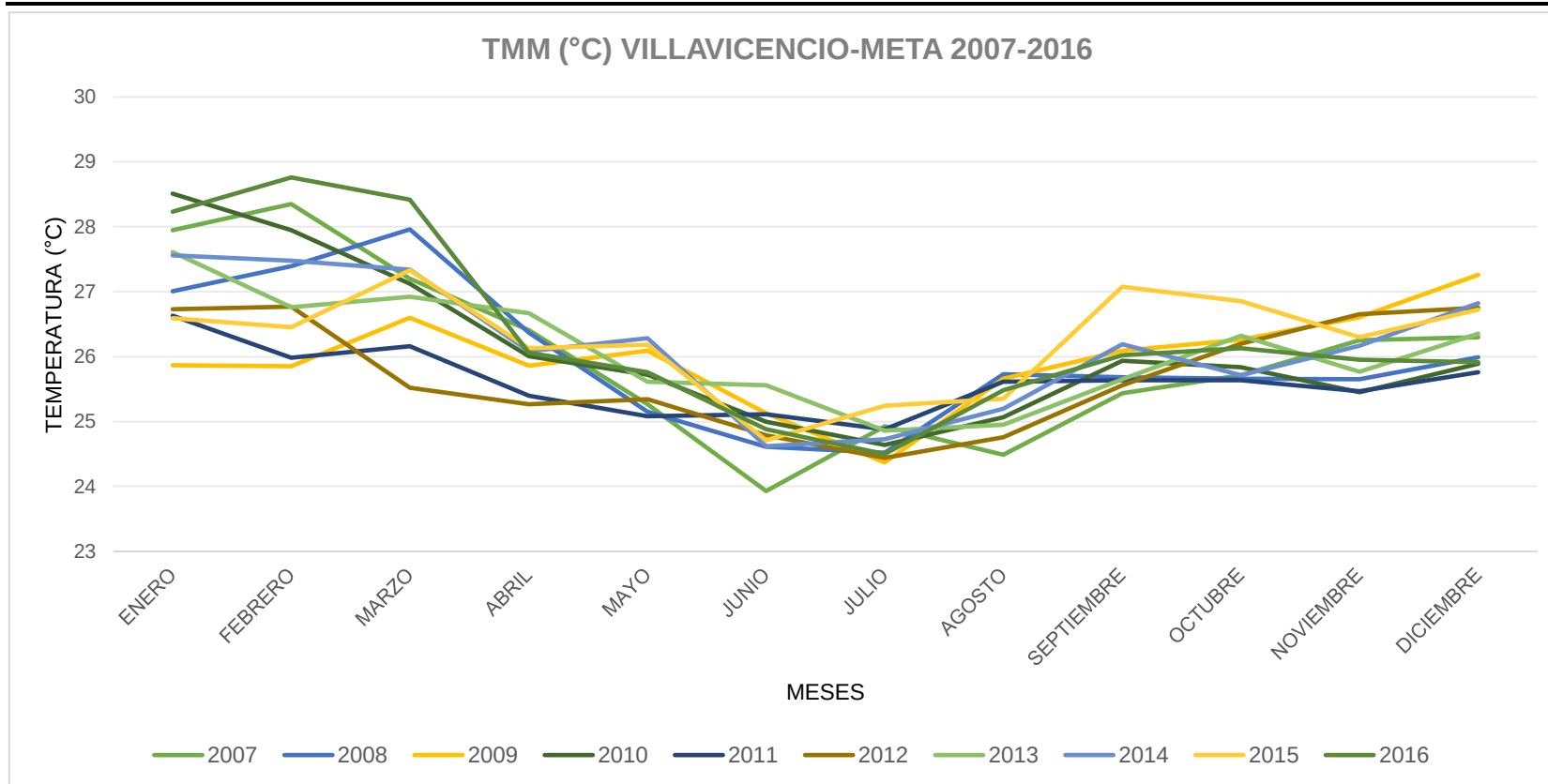


Figura 8.9. Temperatura Media Mensual 2007-2016 en Villavicencio, Meta.

Fuente: Autor.

La Temperatura Media Anual Ponderada (TMAP) de los últimos 10 años registrados con datos suministrados por el análisis del programa Clima, se designan los datos por el IDEAM. En la Tabla 8.8, se evidencia una TMAP promedio de 25.99 °C, lo cual es la TMAP de diseño.

Tabla 8.8. Temperatura Media Anual Ponderada

TEMPERATURA MEDIA ANUAL PONDERADA Y TEMPERATURA DE DISEÑO			
AÑO	TMAP (°C)	TMAP PROM (°C)	FACTOR DE PONDERACION
2007	26.13	25.99	2.13
2008	26.04	25.99	2.11
2009	26.00	25.99	2.10
2010	26.18	25.99	2.15
2011	25.63	25.99	2.00
2012	24.69	25.99	1.77
2013	26.13	25.99	2.13
2014	26.24	25.99	2.17
2015	26.40	25.99	2.21
2016	26.45	25.99	2.23
TMAP DE DISEÑO (°C)		25.99	

Fuente: Autor.

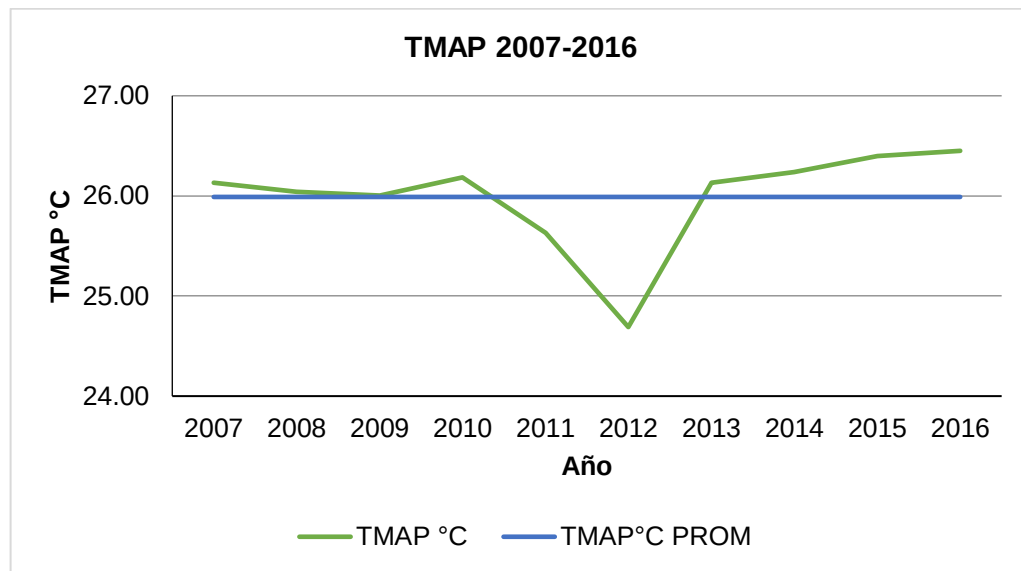


Figura 8.10. Temperatura Media Anual Ponderada.

Fuente: Autor.

8.4.2 Precipitación

En la Tabla 8.9, se muestran los datos de la Precipitación Media Mensual de los últimos 10 años registrados en el programa Clima, que presenta un análisis de la serie histórica climática de las estaciones del IDEAM. En el cual se evidencia que el año 2010 en el mes de enero y 2013 en el mes de mayo, se presentaron la precipitación más baja y más alta respectivamente.

Tabla 8.9. Datos de la Precipitación Media Mensual 2007-2016 en Villavicencio, Meta.

PRECIPITACION MEDIA MENSUAL 2016-2007 VILAVICENCIO - META												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2007	11.9	13.17	288.57	428.82	598.46	525.4	346.76	365.33	344.84	422.77	229.61	131.31
2008	38.27	24.24	45.39	376.2	654.03	559.16	490.28	340.14	437.97	461.24	472.48	215.06
2009	108.3	56.85	238.66	460.14	469.11	628.11	486.02	407.34	281.92	386.82	224.48	70.08
2010	0.42	157.06	349.55	652.1	492.18	601.27	550.69	364.6	303.97	419.49	411.49	363.91
2011	83.09	105.81	172.51	530.98	551.49	470.92	367.54	314.84	432.22	411.06	546.78	325.51
2012	38.55	86.72	545.81	563.77	596.17	444.44	507.03	359.94	274.62	471.73	264.26	364.17
2013	0.76	79.27	274.55	605.7	736.64	451.01	505.24	293.22	262.67	354.06	505.48	152.84
2014	27.7	106.79	177.46	590.11	441.43	605.17	345.08	301.97	276.22	334.49	424.2	204.14
2015	163.66	28.8	177.62	402.71	354.47	428.17	431.48	304.83	333.08	373.94	345.49	159.1
2016	3.47	48.21	216.47	716.27	545.63	330.91	423.81	698.71	376.48	451.94	529.79	432.17

Fuente: Software Clima, IDEAM.

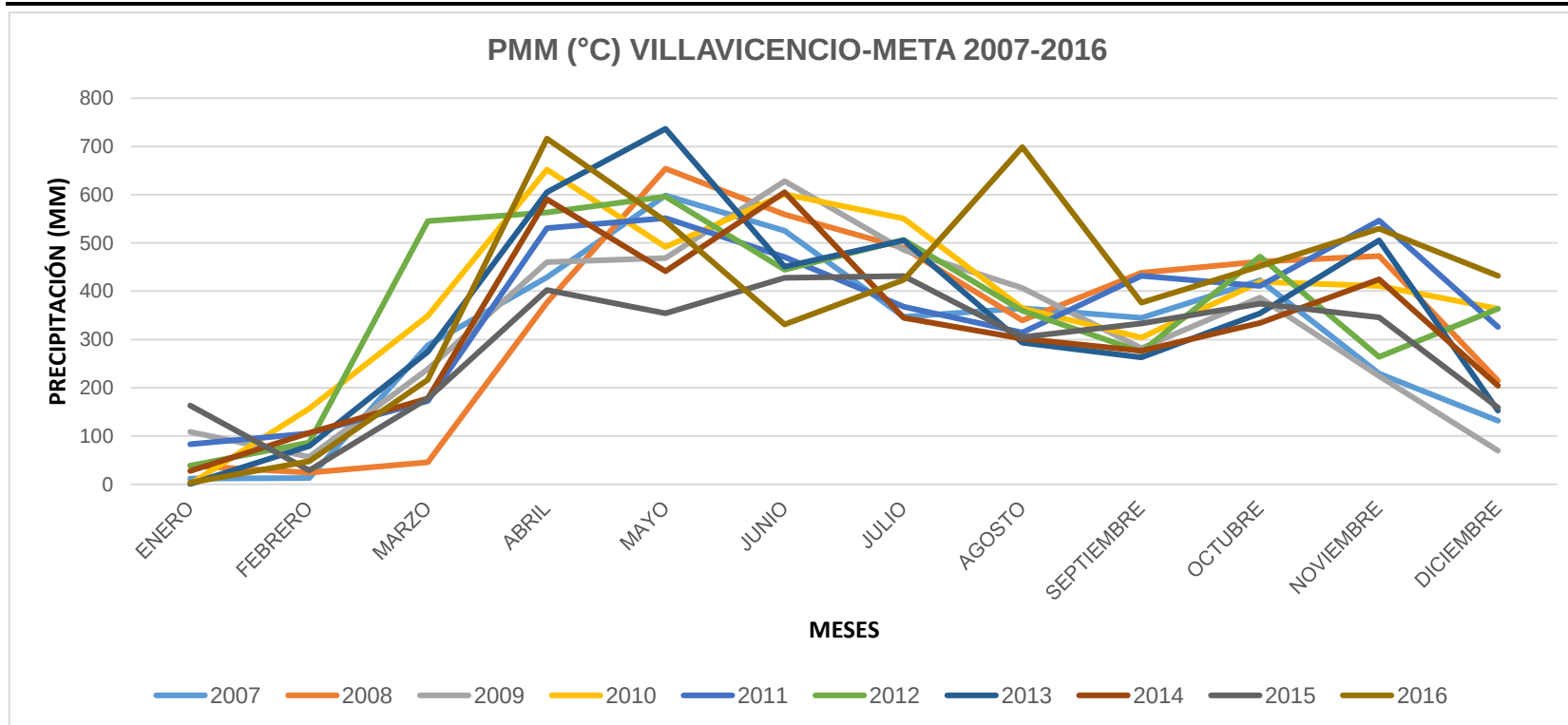


Figura 8.11. Precipitación Media Mensual 2007-2016 en Villavicencio, Meta.

Fuente: Autor.

La Precipitación Media Anual (PMA) de los últimos 10 años registrados con datos suministrados por el análisis del programa Clima, que son dados por el IDEAM. En la Tabla 8.10, se muestra la PMA de diseño de 4146.93 mm.

Tabla 8.10. Precipitación Media Anual.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (PMA)		
Año	PMA (mm)	PMA de Diseño (mm)
2007	3706.94	4146.93
2008	4114.46	4146.93
2009	3817.83	4146.93
2010	4666.73	4146.93
2011	4312.75	4146.93
2012	4517.21	4146.93
2013	4221.44	4146.93
2014	3834.76	4146.93
2015	3503.35	4146.93
2016	4773.86	4146.93

Fuente: Autor.

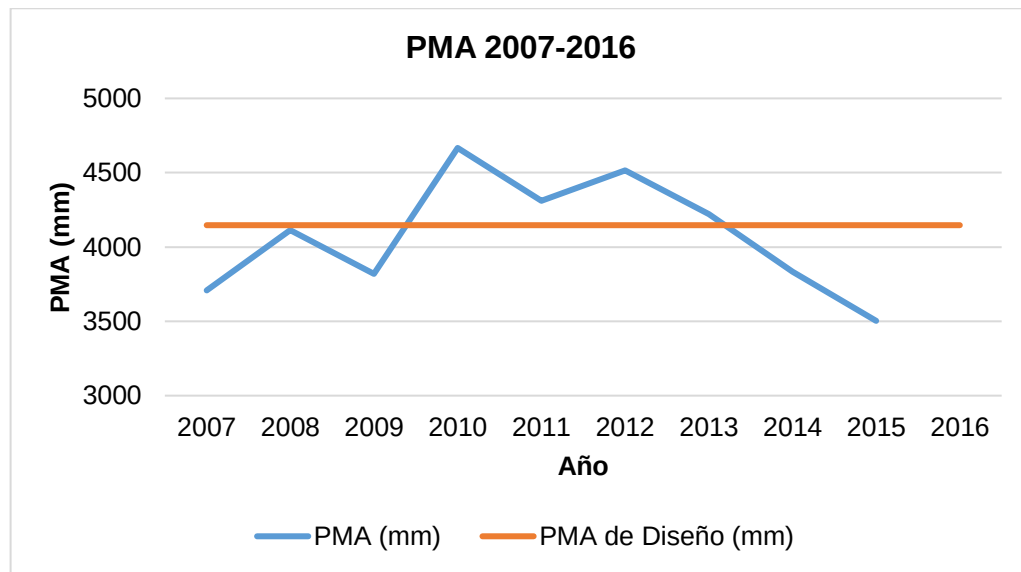


Figura 8.11. Precipitación Media Anual.

Fuente: Autor.

Según la Temperatura Media Anual Ponderada (TMAP) y la Precipitación Media Anual (PMA) de diseño, la región climática de la zona de estudio se clasifica en una región R6, es decir, cálida muy húmeda.

9. ETAPA 2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE

9.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

Basados en los requerimientos propuestos en la etapa 1, se procedió a realizar las actividades pertinentes para obtener los parámetros necesarios para el diseño de la estructura de pavimento implementando un tratamiento superficial doble.

Estos parámetros son los resultados obtenidos del estudio de tránsito realizado los días lunes, miércoles y sábado, mediante el aforo vehicular desarrollado en un punto estratégico del tramo de vía estudiado, dando como resultado un número de ejes equivalentes de 8.2 ton de 4.4×10^5 , lo cual corresponde a un nivel de tránsito bajo (NT1), también las condiciones de temperatura (TMAP) y precipitación promedio anual, los cuales son datos de los últimos 10 años de las estaciones del IDEAM obtenidos y procesados en el software CLIMA, evidenciando una región climática R6, cálido muy húmedo. Por otro lado, teniendo en cuenta el estudio geotécnico, el suelo existente es un material de río en su mayoría contaminado por limos y arcillas, por lo cual las alternativas escogidas de acuerdo con el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, del INVIAS son aquellas en donde no existe o no es posible utilizar el afirmado existente:

Alternativa 1: TSD + BG + SBG

Alternativa 2: TSD + BG + BEC

Por lo anterior, estas dos alternativas (que se muestran en la Figura 6.7) son calculadas por el programa PAV-NT1, teniendo en cuenta el algoritmo de diseño del método AASHTO-93, utilizando el siguiente algoritmo:

$$\log N_{80KN} = Z_r \times S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.2 + \left[\frac{\log \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \right] + 2.32 \log M_r - 8.07$$

Ecuación 6. Algoritmo método AASHTO-93.

Donde:

N_{80KN} : Número acumulado de ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño durante el período de diseño.

Z_r, S_o : Parámetros de confiabilidad.

SN : Número estructural.

ΔPSI : Índice de serviciabilidad.

M_r : Módulo resiliente de la subrasante (psi).

A continuación, se presentan las alternativas de diseño proporcionado por el programa PAV-NT1, con unidades homogéneas de diseño, alternativas de diseño seleccionadas, el costo total por alternativa.

ALTERNATIVAS DE DISEÑO [C:\Users\HP\Desktop\PROYECTO DE GRADO\Villavicencio PAV NT1]

Opciones Salir

# UH	Código Tramo	Abscisa Inicial	Abscisa Final	Longitud (m)	Ancho de Corona (m)	Ejes Equivalentes 80 KN	CBR (%)	Número Estructural Requerido	Costos por Alternativa (miles de pesos)					
		(m)	(m)						1	2	3	4	5	6
1	T1-U1	0.00	5,082.00	5082.00	7.00	4.40E+05	7.37	2.41	1,384,334	1,835,618	1,482,091	0	1,843,519	2,289,187
Costo Total :									1,384,334	1,835,618	1,482,091	0	1,843,519	2,289,187

☒ Alternativa #1

BG (20.0)

SBG (36.8)

☐ Alternativa #2

BG (28.0)

BEC (20.0)

☐ Alternativa #3

MDF-2 (11.4)

BG (15.0)

SBG (15.0)

☐ Alternativa #4

No Aplica

☐ Alternativa #5

MDC-2 (10.5)

BG (15.0)

SBG (15.0)

☐ Alternativa #6

MDC-2 (10.5)

BG (15.0)

BEC (20.0)

Espesores en cm

Imprimir

Unidades Homogéneas de Diseño Alternativas de Diseño Costos Alternativas Alternativas Seleccionadas

Figura 9.1. Ventana software PAV-NT1.
Fuente: Autor.



Figura 9.2. Espesores de la base y subbase granular (PAV-NT1).
Fuente: Autor.

Las dos alternativas de las estructuras seleccionadas del pavimento implementado con un tratamiento superficial doble cuentan con un espesor en la capa de rodadura de 3 cm. Las capas subyacentes de la alternativa número 1, de base granular (BG) de 20 cm y subbase granular (SBG) de 37 cm. Y la alternativa número 2, presenta una base granular (BG) de 28 cm y subbase estabilizada con cemento (BEC) de 20 cm. En la Figura 9.3, se presenta la selección del sistema de drenaje el cual se recomienda un sistema de drenaje superficial.

El software muestra la configuración de parámetros para el diseño de drenaje:

- ESTACIONES CLIMÁTICAS A ANALIZAR:**

#	Código Estación	Factor de Ponderación	Nombre Estación Climática
1	00000001	1	Villavicencio
2			
3			
4			
5			
6			
7			
- Duraciones de Aguacero (minutos):** 5, 15, 30, 10, 20.
- Períodos de Retorno (Años):** 5, 15, 25, 10, 20, 50.
- PARAMETROS PARA DISEÑO DE CUNETA:**
 - Pendiente Mínima Longitudinal (%): 0.5
 - Pendiente Máxima Longitudinal (%): 0.5
 - Período de Retorno (Años): 10
 - Duración del Aguacero (min): 5
 - Tipo de Material: Concreto Hidráulico
 - Tipo de Terreno: Plano
 - Tipo de Cuneta: 1-A
- Geometría Cuneta (m):**

b	h	c	d	f	g
1.000	0.300	0.000	1.000	1.040	0.300
- Diagrama de Geometría de la Cuneta:** Muestra un diagrama de una cuneta con dimensiones: 0.1 m de ancho superior, 0.25 m de ancho inferior, y una longitud de 1.0 m. Se indica la "Tolud en Terroplén" y la "BERMA".
- Intensidad Lluvia para Diseño de Cuneta (mm/h):** 72.982
- Longitud Máxima Cuneta (m):** 957.000

Figura 9.3. Selección de drenaje (PAV-NT1).
Fuente: Autor.

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la inspección de campo realizada en la zona de estudio, se evidenció daños causados por diferentes factores físicos y ambientales. El cual se contempla realizar un diseño nuevo de acuerdo con las condiciones del suelo, tránsito y clima; correspondiente a un sistema implementado con tratamiento superficial doble.

En las estadísticas del estudio climático realizado en el municipio de Villavicencio, nos muestra que la Temperatura Media Mensual (TMM) de los 3 primeros meses del año se registran temperaturas de $\pm 27^{\circ}\text{C}$. Y los meses de abril y mayo se presentan las precipitaciones más altas de hasta alrededor de 700 mm; los meses de enero y febrero muestran las precipitaciones más bajas del año. Los resultados de este estudio demuestran las condiciones climatológicas en la que se encuentra expuesta la estructura de pavimento a lo largo de su vida útil. Cabe resaltar que en los últimos 3 años los datos no se encuentran completos, por eso, se opta 10 años atrás con datos registrados en el año 2007 hasta el 2016.

En la composición vehicular del estudio de tránsito realizado previamente, se evidenció la movilidad en la zona de estudio, que se caracterizó por un flujo vehicular de mayor porcentaje en los automóviles, con un 80,87%. Además, el porcentaje de menor flujo vehicular con un 0.25%, siendo el bus intermunicipal y el tipo camión C3, de igual valor.

El diseño planteado por medio del software PAV-NT1, de acuerdo a los parámetros previamente calculados o suministrados, se establecieron dos diseños como alternativas para la selección de la estructura del pavimento, subyacente a la base granular, una alternativa conformada por una subbase granular y la otra formada por una base estabilizada con cemento. Siendo así, la primera alternativa la más económica con base a los costos que se evidencian en el programa.

11. RESULTADOS E IMPACTOS

En la Tabla 11.1 se muestran los resultados del proyecto conforme a los objetivos específicos, que están referente a su indicador de validación.

Tabla 11.1. Resultados

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Identificación de las fallas de la zona de estudio	Inspección de campo	Objetivo específico 1
CBR de diseño / caracterización del suelo	Estudio de suelo	Objetivo específico 2
Aforo vehicular / Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas	Estudio de tránsito	Objetivo específico 3
Temperatura y precipitación de la zona de estudio	Estudio climático	Objetivo específico 4

Fuente: Autor.

De igual forma, los impactos a obtener de acuerdo a los resultados del proyecto en diferentes aspectos, se deben tener en cuenta para el cumplimiento del impacto y el plazo de tiempo en el cual se va a ver reflejado el mismo. Así, en la Tabla 11.2 se identifican los impactos relacionados en el aspecto social, económico y técnico por el desarrollo del proyecto, y los demás ítems mencionados anteriormente.

Tabla 11.2. Impactos.

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Social	Motivación en entes gubernamentales para la implementación de vías con estructura de tratamiento superficial doble, que permita mejorar la accesibilidad vial y el tiempo de recorrido en la vía.	Las poblaciones carentes de vías terciarias en buen estado, solicitan la solución de dicha problemática a través de la implementación de vías con estructura de tratamiento superficial doble	Mediano plazo
Económico	Disminuir costos derivados del diseño y la construcción de una estructura de pavimento, cumpliendo aún con los parámetros de calidad y seguridad planteados por la normatividad.	La estructura de tratamiento superficial doble requiere menor cantidad de material para su construcción, se garantiza su permanencia en el tiempo y la seguridad	Largo plazo
Técnico	Dar a conocer los valores de resistencia de una estructura de tratamiento superficial doble expuesto a diferentes cargas y presiones, con el fin de mostrar la viabilidad y eficacia de dicha estructura.	La estructura de tratamiento superficial doble es capaz de soportar el valor más alto de presión correspondiente al tránsito promedio diario vehicular.	Mediano plazo

Fuente: Autor.

12. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

12.1. CONCLUSIONES

En la inspección de campo se evidenció fallas pronunciadas que generan inseguridad en la vía, y resultan agobiadas para el tránsito de la zona de estudio, lo cual se planteó una alternativa con tratamiento superficial doble, una alternativa distinta a la planteada por la Agencia de Infraestructura del Meta, con mayor confiabilidad, eficiencia y durabilidad en comparación con otros diseños, lo cual proporciona una rugosidad que evita el deslizamiento longitudinal y transversal de los vehículos, prolongando su vida útil.

Realizado el aforo vehicular, se evidencia que la zona de estudio nos muestra la necesidad de la comunidad tanto de la zona rural (habitantes de la vereda La Zuria) como de la zona urbana (Barrio La Madrid), para llegar a sus destinos, se promueven realizar alternativas que mejoren y cumplan con las necesidades de los implicados. Igualmente, la vía de estudio se identificó con bajos volúmenes de tránsito (NT1).

De acuerdo al estudio geotécnico, no es posible utilizar el afirmado del suelo, ya que cuenta con un material de río y en su mayoría se encuentra contaminado por limos y arcillas.

En el estudio climático se presentaron alteraciones de la temperatura y precipitación, en el municipio de Villavicencio, el cual varía de $\pm 27^{\circ}\text{C}$ su temperatura en el primer trimestre del año y su precipitación llega a los niveles más altos en los meses de abril y mayo. También, cabe resaltar que en los últimos 3 años los datos no se encuentran completamente registrados, por eso, se opta 10 años atrás con datos registrados en el año 2007 hasta el 2016. Siendo una categoría de región (R6) cálido muy húmedo.

Se presentaron dos alternativas de diseños seleccionados por medio del Software PAV-NT1, que diferencia la capa superpuesta de la subrasante, como alternativa 1, una subbase granular (SBG) de 37 cm; y la alternativa 2, una base estabilizada con cemento (BEC) de 20 cm.

12.2. TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto se realiza como insumo o guía para nuevos proyectos de diseños de pavimentos en vías de bajos volúmenes de tránsito, los cuales sigan o implementen las metodologías INVIAS o AASHTO, con el fin de garantizar un buen diseño a sus estructuras.

Se realiza este proyecto con la intención de prolongar alternativas nuevas para la obtención de estructuras de pavimentos en vías rurales, con el fin de promover una mejor oportunidad de selección de alternativa de diseño.

El drenaje seleccionado hace referencia a las condiciones de la vía estudiada, lo cual, si se implementa de manera correcta prolongaría la vida útil de la estructura del pavimento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Economic Forum, «The Global Competitiveness Report,» 16 Octubre 2018. [En línea]. Available: <http://www3.weforum.org/docs/GCR2018/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2018.pdf>.
- [2] E. Correa Valderrama, «EL rol de las vías terciarias en la construcción de un nuevo país,» Universidad de los Andes, 2017. [En línea]. Available: <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/943/1125>.
- [3] INVIAS, «Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras,» 15 Agosto 2014. [En línea]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>.
- [4] H. A. Rondón Quintana y F. A. Reyes Lizcano, Pavimentos: Materiales, construcción y diseño, Bogotá: ECOE Ediciones Ltda, 2015.
- [5] Instituto Nacional de Vías, Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, Republica de Colombia, 2007.
- [6] A. B. Queirolo Menz y J. Torrejón Olmos, «Seguimiento de un Doble Tratamiento Superficial para Camino de Alto Tránsito,» 2009. [En línea]. Available: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103525>. [Último acceso: 30 junio 2020].
- [7] UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, «TRATAMIENTOS SUPERFICIALES COMO ALTERNATIVA DE RUTAS LASTRE,» 2017. [En línea]. Available: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/866/public_esp_tratam_superficiales_ruta_lastre.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [8] A. B. Q. MENZ, «SEGUIMIENTO DE UN DOBLE TRATAMIENTO SUPERFICIAL,» 2009. [En línea]. Available: http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/queirolo_a/sources/queirolo_a.pdf.
- [9] INVIAS, «CAPITULO 4 - PAVIMENTOS ASFALTICOS,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/puente-sobre-el-rio-magdalena-en-barranquilla/2903-5-capitulo-4>.
- [10] E. M. Guerrero Veloza, «Tratamiento superficial con emulsión asfáltica y análisis de costos respecto a placa huella,» 2014. [En línea]. Available: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13149/Tratamiento%20superficial%20con%20emulsi%F3n%20asf%E1ltica%20y%20an%E1lisis%20de%20costos%20respecto%20a%20placa%20huella.pdf;jsessionid=FC08A0EF842FF71E70A9B3CD427B5968?sequence=1>.
- [11] A. B. Queirolo Menz, «Seguimiento de un doble tratamiento superficial para camino de alto tránsito,» Marzo 2009. [En línea]. Available: http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/queirolo_a/sources/queirolo_a.pdf.
- [12] J. A. Hernández García, K. M. Rosales Galdámez y . W. Trigueros Llanes, «Metodología para el diseño y construcción de tratamientos superficiales dobles para caminos de bajo volumen de tránsito mediante los métodos de la Dimensión Mínima Promedio y Texas DOT en El Salvador,» Junio 2016. [En línea]. Available: <http://ri.ues.edu.sv/10332/>.
- [13] M. P. M. R. Miller Escarraga Lopez, «CRAI USTA,» 2019. [En línea]. Available: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/18418>.
- [14] E. J. Torres López, «Repositorio Dspace de la Universidad Católica de Cuenca,» 2016. [En línea]. Available: <http://dspace.ucacue.edu.ec/handle/reducacue/7934>.
- [15] Gobernación del Meta, «Ficha Informativa del municipio de Villavicencio,» 2018. [En línea]. Available: https://intranet.meta.gov.co/secciones_archivos/461-27597.pdf.
- [16] Alcaldía de Villavicencio, Información del Municipio. [En línea]. Available: <http://www.villavicencio.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>.
- [17] M. J. Fernández Mollinedo, «Análisis comparativo del costo en la construcción y mantenimiento de una carretera con hombros simplemente imprimados con una de hombros con doble tratamiento superficial,» 2015 octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/2773>. [Último acceso: 30 Junio 2020].
- [18] Y. E. A. Pérez Mejías, «Utilización de escoria de cobre de codelco ventanas como agregado petreo para tratamientos superficiales asfálticos simples en la región de valparaíso,» 2017. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/11673/14088>. [Último acceso: 30 junio 2020].

- [19] P. A. Macharé Aquino, «Diseño de pavimentos con alternativas de mezcla asfáltica en caliente y tratamiento superficial bicapa en la vía de evitamiento de la Ciudad de Jaén,» 2019. [En línea]. Available: <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/3694>. [Último acceso: 30 junio 2020].
- [20] H. A. Guzmán Magaña, «Evaluación técnico económica entre la técnica del OTTA SEAL y la técnica del doble tratamiento superficial, ambas como solución definitiva para caminos básicos : un seguimiento al tramo Hualqui - San Onofre, VIII Región Chile,» 2011. [En línea]. Available: <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/13311>. [Último acceso: 30 junio 2020].

ANEXOS

ANEXO A

Libro de Excel con hojas de cálculo