

APLICACIÓN DE GEOSINTÉTICOS EN VIAS Terciarias: CASO DE ESTUDIO MUNICIPIO
DE CARURÚ DEPARTAMENTO DEL VAUPÉS



EDWIN ALBERTO MESTRE

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FAÇULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ D.C. NOVIEMBRE DE 2020

APLICACIÓN DE GEOSINTÉTICOS EN VIAS Terciarias: CASO DE ESTUDIO MUNICIPIO
DE CARURÚ DEPARTAMENTO DEL VAUPÉS



Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero civil especialista en pavimentos, dirigido por el docente:

Ing. Juan Gabriel Bastidas Martínez
Coordinador especialización en ingeniería de pavimentos

EDWIN ALBERTO MESTRE, Cód. 150580

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ D.C. NOVIEMBRE DE 2020



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:

Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Resumen

Este proyecto tiene como propósito principal evaluar la conveniencia del uso de geosintéticos en el aumento de la capacidad portante de una subrasante categorizada como soporte bajo, según los CBR (California Bearing Ratio) encontrados y el módulo resiliente calculado a partir de estos. La subrasante pertenece a la vía Carurú, localizada en el departamento del Vaupés y categorizada como una vía de tercer nivel con bajo volumen de tránsito, no pavimentada, pero esencial para la movilización hacia el colegio pluriétnico del municipio de Carurú. Para el cumplimiento del propósito principal, se realizó el estudio geotécnico de clasificación de la subrasante, el cual incluye la determinación de los límites de Atterberg, estimación de CBR, clasificación del suelo a una profundidad de 1.50m y descripción de las características mecánicas de la subrasante. La metodología se basa en el cálculo de ejes equivalentes con una proyección a diez años, cálculo del CBR de diseño, cálculo del módulo resiliente de diseño, incorporación de geosintéticos y diseño de espesores de material granular que acompaña los geosintéticos propuestos para el mejoramiento de la subrasante (separación y refuerzo de suelos de subrasante y capas granulares con geotextil; estabilización de subrasante con geomalla triaxial; y estabilización de subrasante con geocelda y geomalla biaxial). Como resultado se obtuvieron las respuestas al aporte estructural otorgado por cada una de estas combinaciones en afirmados y sus correspondientes espesores de lleno en material granular clasificado. Por último, se analizó la deformación vertical por compresión sobre la subrasante mediante la comparación del número de ejes equivalentes de 8.2 t antes de que se presente ahuellamiento con el número de ejes equivalentes de 8.2 t de diseño, lo cual permitió concluir que la única opción que garantiza el soporte a las cargas de tránsito estimadas en un periodo de diez años es la estructura conformada por una geocelda con un espesor de 0.28m, acompañado de un tendido en geomalla biaxial de resistencia 19 kN/m y un lleno superior de 0.30m en material granular, tipificado como subbase granular tipo C y cuyas especificaciones se encuentran adjuntas al presente documento. Las demás opciones por sí solas no son soluciones definitivas para los requerimientos planteados en el diseño, a pesar del aporte estructural que brindan a la capa de soporte.

Palabras clave. Geosintéticos, geotextil, geomalla, geocelda, pavimentos, subrasante, capacidad portante, estudio geotécnico.

Abstract

The main purpose of this project is to evaluate the convenience of using geosynthetics in increasing the bearing capacity of a subgrade categorized as low support, according to the CBRs found and the resilient modulus calculated from them. The subgrade belongs to the Carurú road, located in the department of Vaupés and categorized as a third-level road with low volume of traffic, not paved, but essential for the mobilization to the multi-ethnic school of the municipality of Carurú. For the fulfillment of the main purpose, the geotechnical study of classification of the subgrade was carried out, which includes the determination of the Atterberg limits, estimation of CBR, classification of the soil at a depth of 1.50m and description of the mechanical characteristics of the subgrade. The methodology is based on the calculation of equivalent axes with a ten-year projection, calculation of the design CBR, calculation of the design resilient modulus, incorporation of geosynthetics and design of thicknesses of granular material that accompanies the geosynthetics proposed for the improvement of the subgrade (separation and reinforcement of subgrade soils and granular layers with geotextile; subgrade stabilization with triaxial geogrid; and subgrade stabilization with geocell and biaxial geogrid). As a result, the responses to the structural contribution granted by each of these combinations in affirmations and their corresponding thicknesses of filled in classified granular material were obtained. Finally, they were compared from the constructive and economic point of view, concluding that the only option that guarantees the support to the estimated traffic loads is the use of geocells with a thickness of 0.28m, accompanied by a laying of biaxial resistance geogrid. 19 kN / m and a top fill of 0.30m in granular material, typified as type C granular subbase and whose specifications are attached to this document. The other options alone will not meet the intended design period (ten years).

Keywords. Geosynthetics, geotextile, geogrid, geocell, pavements, subgrade, bearing capacity, geotechnical study.

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Pregunta de investigación	11
2. Justificación	12
3. Objetivos	13
3.1 Objetivo general	13
3.2 Objetivos específicos	13
4. Estado del arte	14
5. Marco de referencia	16
5.1 Marco conceptual.....	16
5.1.1 Geosintéticos.....	16
5.1.2 Subrasante.....	18
5.1.3 Capacidad portante.....	19
5.1.4 Tipos de falla.....	19
5.2 Marco geográfico	19
5.3 Marco teórico.....	20
5.3.1 Metodología por especificación.....	20
5.3.2 Metodología por función.....	21
5.3.3 Metodología Giroud-Han.....	21
5.3.4 LCR.....	22
5.3.5 AASHTO 93.....	23
6. Metodología.....	24
6.1 Cálculo del tránsito de diseño.....	24
6.2 Estudio geotécnico	26
6.3 Calculo CBR de diseño.....	29
6.3.1 Instituto de asfalto.....	29
6.3.2 Criterio de la media.....	30
6.3.3 Promedio aritmético	31
6.3.4 Coeficiente de variación.....	31
6.4 Mejoramiento.....	31

6.5	Cálculo del módulo resiliente	32
6.6	Espesor de subbase granular tipo C para una vía no pavimentada sin refuerzo 33	
6.7	Separación y refuerzo de suelos de subrasante y capas granulares con geotextil	34
6.8	Estabilización de subrasante con geomalla	36
6.9	Estabilización de subrasante con geocelda y geomalla biaxial	38
7.	Análisis de resultados.....	41
7.1	Estructura sin refuerzo.....	41
7.2	Estructura reforzada con geomalla triaxial	42
7.3	Estructura reforzada con geocelda y geomalla biaxial	42
8.	Análisis de resultados.....	45
8.1	Optimización de la subrasante a partir de la separación y refuerzo de suelos con geotextil	45
8.2	Optimización de la subrasante a partir de la incorporación de geomalla triaxial 47	
8.3	Optimización de la subrasante a partir de la incorporación de geocelda y geomalla biaxial.....	48
8.4	Valoración económica.....	49
9.	Conclusiones.....	53
10.	Recomendaciones.....	54
11.	Bibliografía.....	55

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación municipio de Vaupés	19
Figura 2. Vía Carurú hacia el colegio pluriético del municipio de Carurú	20
Figura 3. Valores de LCR	23
Figura 4. Trafico promedio diario semanal (TPDS)	24
Figura 5. Perfil estratigráfico a una profundidad de 1.50m	27
Figura 6. Clasificación de la subrasante (Carta de plasticidad de Casagrande)	28
Figura 7. Registro fotográfico Vía Carurú	29
Figura 8. Grafica para el cálculo de CBR de subrasante.	30
.....	32
Figura 9. Espesor de mejoramiento de la subrasante de acuerdo al CBR de diseño. ...	32
Fuente. Propia.....	32
Figura 10. Módulo resiliente en función del CBR de diseño, según el método de cálculo utilizado.....	33
.....	35
Figura 11. Cálculo del número estructural de la subrasante.....	35
Figura 12. Estimación de LCR en función del CBR de diseño	40
Figura 13. Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.	41
Figura 14. Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.	43
Figura 15. Mejoramiento de subrasante mediante la incorporación de geotextil y material granular de mejoramiento.	46
Figura 16. Mejoramiento de subrasante mediante la incorporación de geomalla triaxial y material granular de mejoramiento.	47
Figura 17. Mejoramiento de subrasante mediante la incorporación de geomalla triaxial y material granular de mejoramiento.	48
Figura 18. Mejoramiento de subrasante mediante la incorporación de geomalla, geocelda y material granular de mejoramiento.	49

Lista de tablas

Tabla 1. Porcentaje de camiones por tipo de eje	25
Tabla 2. Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T a un periodo de diseño de diez años...	25
Tabla 4. Ubicación topográfica de apiques para muestreo.	27
Tabla 5. Resultados de ensayo practicados a las pruebas tomadas en campo.....	28
Tabla 6. Percentiles para determinar CBR de diseño.....	29
Tabla 7. Desviación normal estándar de acuerdo al nivel de confianza	30
Tabla 8. Promedio aritmético de los valores de CBR.....	31
Tabla 9. Precisión obtenida para cada CBR de diseño	31
Tabla 11. Cálculo de material granular en vía no reforzada con subbase granular tipo C	33
Tabla 12. Variables para el cálculo de resistencia requerida del geotextil.....	35
Tabla 13. Consideraciones para el cálculo del geotextil a utilizar.....	35
Tabla 14. Consideraciones para el cálculo del lleno sobre el geotextil	36
Tabla 15. Cálculo de espesor de diseño para una geomalla triaxial TX140.....	37
Tabla 16. Cálculo de espesor de diseño para una geocelda con lleno en subbase granular tipo C.....	38
Tabla 17. Cálculo de espesor de diseño sobre la geocelda con lleno en subbase granular tipo C, para garantizar el soporte del tráfico.	39
Tabla 18. Requisitos de los agregados de subbases granulares.....	45
Tabla 19. Especificaciones técnicas MARV (valor mínimo promedio rollo) geotextiles tejidos.	46
Tabla 20. Propiedades Geocelda 445-150.....	48
Tabla 21. Propiedades Geomalla biaxial coextruida	49
Tabla 21. Presupuesto para la optimización de la subrasante a partir de la separación y refuerzo de suelos con geotextil.	49
Tabla 22. Presupuesto para la optimización de la subrasante a partir de la incorporación con geomalla triaxial TX 140.	50
Tabla 23. Presupuesto para la optimización de la subrasante a partir de la incorporación de geomalla biaxial con geoceldas.....	51

Introducción

La optimización de las vías nacionales cobra gran importancia, porque de su desempeño depende el crecimiento económico de las zonas y por ende del país. Sin embargo, las carreteras a nivel nacional principalmente, presentan un claro atraso en cuanto a su conformación y tiempo de servicio, lo cual en ocasiones no compensa los costos de inversión, ni responde a las necesidades de las comunidades (Guerra, 2019). Las causas más comunes de las falencias en las vías colombianas, no están relacionadas con problemas geológicos, sino con el mal uso del suelo, ingeniería deficiente, improvisación en los proyectos de infraestructura, problemas no resueltos de erosión, entre otros (Guerra, 2019). Incluso, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) afirma que hacen falta alrededor de 45000 Km de vías adicionales, lo cual crea una brecha del 52% en relación con otros países con el mismo nivel de desarrollo. En cuanto a las vías terciarias las apreciaciones son precarias, ya que la mayor parte de los recursos se enfocan en realizar labores de mantenimiento, más no de construcciones nuevas. Lo anterior indica la necesidad creciente de incorporar diseños efectivos en términos de construcción, a fin de mejorar la calidad de las vías y aumentar en número la malla vial eficiente del país, especialmente en sus sectores rurales, que es donde se presentan más deficiencias y menor inversión.

La capacidad de soporte de una subrasante es una de las características más importantes a tener en cuenta en el proceso de diseño de una estructura de pavimento. Algunas de estas subrasantes presentan pobres características mecánicas y físicas, que al no ser mejoradas pueden a futuro generar daños estructurales. Una de las alternativas para mejorar las subrasantes con capacidad de soporte bajo es la incorporación de geosintéticos como refuerzo aprovechando las propiedades mecánicas que aporta, su amplia presencia en el mercado, la facilidad de instalación y el beneficio en términos económicos gracias a la disminución de espesores de las capas de material granular. Con la incorporación de geosintéticos en el diseño de vías pavimentadas y no pavimentadas no solo se mejoran las condiciones de soporte del suelo, también se protegen las capas de material ante situaciones de saturación tanto en subrasantes como en las capas (Cuzcano, 2018). Como insumo principal para determinar las necesidades de la subrasante es de vital importancia conocer el valor de referencia de CBR en una muestra compacta de densidad máxima con humedad óptima, a fin de calcular el módulo resiliente que incidirá directamente en las características del diseño.

El presente trabajo de grado busca aplicar los conocimientos adquiridos a partir de la evaluación del uso de los geosintéticos en el refuerzo estructural de las subrasantes. Para tal fin, se aplicará en la vía ubicada en el casco urbano al colegio pluriétnico del municipio de Carurú, en el departamento de Vaupés. Lo cual pretende enfrentar problemáticas locales como los altos costos relacionados con el transporte de los materiales convencionales e impactando favorablemente en los costos de construcción a mediano y largo plazo. Así como, destacar el uso de los geosintéticos como materiales de adecuadas capacidades mecánicas que mejoran el comportamiento de la subrasante.

Mediante esta investigación se determinó la manera en que influye la aplicación de geosintéticos en el mejoramiento de una vía terciaria; para tal fin se ha sustentado por medio de información recopilada del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y sus documentos técnicos. Adicionalmente, se recolectó información sobre las características más relevantes de la vía (transito promedio diario semanal, geometría, ubicación y clasificación), ensayos de laboratorio para caracterizar el suelo y la capacidad estructural del mismo, a fin de lograr proponer alternativas de diseño para el refuerzo y separación de la subrasante de la vía previamente

mencionada.

Como principal limitante se destaca la insuficiencia en la información e investigación acerca de la incorporación de geosintéticos en el diseño de afirmados en nuestro país, aspecto que fue superado mediante la aplicación de metodologías e investigaciones desarrolladas por institutos de otros países, como es el caso de California department of transportation e investigaciones como las descritas en el libro Design with geosynthetics y el manual de diseño con geosintéticos de PAVCO del año 2012.

1. Pregunta de investigación

Ante la problemática planteada referente al mejoramiento de vías terciarias y en específico en la vía que comunica el internado sede secundaria del colegio pluriétnico de Carurú con el casco urbano del Municipio de Carurú, en el departamento de Vaupés, surge la pregunta:

¿Cuál es el aporte estructural que prestan diversos tipos de geosintéticos, como la geomalla, geotextil y geoceldas, en el refuerzo de las subrasantes?

2. Justificación

Según información del INVIAS en Colombia existen 142.000 kilómetros de vías terciarias, de las cuales únicamente el 6% se encuentra en buen estado, lo cual refleja el abandono en las zonas rurales del país (Chagui, 2019). Lo anterior debido a la poca inversión en recursos para el mantenimiento, rehabilitación y construcción de vías de tercer orden a nivel nacional, departamental y municipal, lo cual ha ocasionado el atraso económico en distintas comunidades (Chagui, 2019). Aunque en la actualidad se desarrollan proyectos por parte del departamento de planeación nacional que priorizan las zonas rurales y la financiación de este tipo de vías, es necesario incorporar metodologías prácticas, de bajos costos a mediano y largo plazo que cumplan con las necesidades de la zona, mejorando así la calidad de vida de las comunidades. Este tipo de vías de acuerdo al diseño y proceso constructivo pueden presentar insuficiencia en el soporte y distribución de cargas, situación que se representa en fallas por corte, compresión o desplazamiento lateral de material, lo cual afecta su vida útil.

El uso de geosintéticos ha sido utilizado como técnica de preservación efectiva ante las necesidades viales, gracias a sus propiedades mecánicas y sus componentes a base de polímeros sintéticos o naturales; los cuales cumplen funciones de separación (condicionada a la humedad del suelo), refuerzo (según CBR), estabilización, permisividad en el flujo del agua, garantía en los módulos de diseño, ahorro en materiales granulares, entre otros. Así, el presente proyecto permitirá comparar los aportes estructurales de geotextiles, geomallas y geoceldas en el mejoramiento de la capacidad de soporte de una subrasante aplicado a una vía de tercer orden, y profundizar los conocimientos teóricos sobre los diseños de vías no pavimentadas con aplicación de geosintéticos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la optimización de la capacidad portante de la subrasante a partir del refuerzo con geosintéticos en la vía que comunica el internado sede secundaria del colegio pluriétnico de Carurú con el casco urbano del Municipio de Carurú, en el departamento de Vaupés.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las características generales del comportamiento de los materiales geosintéticos (geotextiles, geomallas y geoceldas), en el refuerzo de subrasantes con baja capacidad portante.
- Identificar los beneficios que se pueden obtener con el uso racional de los Geosintéticos, teniendo en cuenta que son solo un instrumento en el mejoramiento de una vía.
- Determinar los costos que tiene los mejoramientos propuestos con el uso de geosintéticos en la vía que conduce al internado del municipio de Carurú.

4. Estado del arte

La estructura de un pavimento define la durabilidad del mismo, se requiere que éste sea capaz de soportar las cargas aplicadas a causa del tránsito y transmitir las uniformemente a la estructura que lo conforma a fin de mitigar las deformaciones y daños a nivel estructural y funcional, al tiempo que brinda una superficie de rodamiento cómoda para los usuarios, optimizando el índice de serviciabilidad durante su vida útil, aspecto que incide directamente en los costos de ejecución y la calidad de servicio a la comunidad.

Para tales fines, se emplean materiales caracterizados previamente, con propiedades mecánicas aptas para los requerimientos de la vía, conformando pavimentos rígidos o flexibles según los criterios de diseño y recibo por parte de las entidades correspondientes. Para cumplir con estas exigencias, se requiere no solo una respuesta estructural adecuada por parte de los materiales que conformaran la estructura, sino también que el suelo de fundación o subrasante posea la suficiente capacidad para soportar las cargas inducidas desde la capa superior y que su humedad no degrade las capas de material que le siguen. Como respuesta a esta situación, ha sido clave el uso de geosintéticos que separen la subrasante de los materiales que conforman la estructura del pavimento mitigando las filtraciones de finos en los suelos granulares y viceversa, aspecto que disminuye la capacidad de drenaje de la estructura y su capacidad portante. Así mismo, los geosintéticos se utilizan como refuerzo para optimizar el funcionamiento estructural de los materiales granulares, estabilizar subrasantes a fin de permitir el aumento de los ejes equivalentes de diseño sin repercusiones mayores en las condiciones del pavimento; los geosintéticos no tejidos filtran el agua del subsuelo y permiten el drenaje de la misma.

Dada la importancia en estos materiales, se busca que los geosintéticos incrementen propiedades mecánicas de la subrasante, variando en sus componentes, destacados principalmente por el polipropileno, poliamida, polietileno, poliéster, entre otros.

Se han realizado diversos estudios a fin de establecer la conveniencia del uso de geosintéticos en la conformación de pavimentos de alta respuesta estructural, en la que determinaron que la aplicación de la geomalla triaxial brinda mayor viabilidad técnica, económica e impacto ambiental en la estabilización de subrasantes de baja capacidad, generando mayor soporte y grado de confinamiento a las bases granulares gracias a las aberturas triangulares del mismo, aumentando la vida útil de éste, así como una disminución notable en los costos (Nicole Santos, 2017).

En vías no pavimentadas los geosintéticos generan múltiples beneficios como el aumento de la distribución de los esfuerzos verticales, reducciones en las deformaciones verticales gracias al efecto de membrana, mayor tiempo de vida útil de la estructura y reducción en el número de mantenimientos, lo que a mediano y largo plazo representa menores costos de operación (Beltran, 2013). Adicionalmente, cuando la profundidad de los ahuellamientos afecta la deformación del geosintético instalado, éste genera mayor refuerzo por sus propiedades de membrana. La componente vertical de las fuerzas de tensión en el refuerzo, mitiga posteriores deformaciones verticales en el terraplén (Ambrosio, 2018).

De otro lado, investigaciones previas han concluido que los geosintéticos que tienen un alto contenido en polímeros de propileno, adquieren más calor en comparación con los geosintéticos del poliéster que tardan más en adquirir el mismo calor, lo que debe considerarse según las condiciones medio ambientales de la zona y las características de la mezcla a utilizar;

por lo cual, coinciden en que el material de poliéster es más favorable en la rehabilitación de pavimentos flexibles (Jose Contreras, 2009).

En Colombia, una de las aplicaciones más novedosas en cuanto a la estabilización de subrasante con geosintéticos es la incorporación de geoceldas llenas con material reciclado o granular, ya que garantiza un sistema de confinamiento celular que brinda durabilidad y estabilidad dimensional, promoviendo el desempeño óptimo de la vía y la distribución homogénea de las cargas incidentes (TEXDELTA, 2020). Así, incrementa la capacidad portante de la subrasante, generando reducción en la presión de contacto con el suelo de fundación, permite un efecto de membrana tensionada proporcionando un efecto de puenteo al transferir la carga de un área débil a una zona comparativamente estable, en suelos arcillosos reduce los problemas de resistencia a la tensión y los fallos por resistencia al corte, y por último optimiza los espesores significativos de materiales, lo que repercute favorablemente en los costos de construcción (GEOMATRIX, 2017).

El uso de geoceldas puede funcionar como mejoramiento de la subrasante y sobre esta diseñar las capas de estructura granular y posteriormente el pavimento flexible o rígido, sin embargo, a fin de mejorar su respuesta y disminuir los espesores de las capas siguientes, se ha realizado la incorporación de geomalla biaxial o triaxial que funcione como una trabazón, al generar confinamiento aportando a las condiciones estructurales del pavimento a partir de la resistencia a la tensión que poseen, su diseño se estima basado en el coeficiente denominado LCR (Layer Coefficient ratio) en función del CBR. Este procedimiento se aplica en la actualidad en las vías en ejecución por parte del IDU (Instituto de Desarrollo Urbano), como es el caso de la Av. Alsacia, en las localidades de Bosa y Kennedy en Bogotá D.C.

5. Marco de referencia

5.1 Marco conceptual

Los geosintéticos son polímeros sintéticos o naturales utilizados para mejorar y ejecutar diversos proyectos de obra civil, en el campo de la geotecnia, su uso se enfatiza en mitigaciones medioambientales, redistribución de esfuerzos, refuerzos de suelos, filtraciones, drenajes, protección de materiales y suelos, control de permeabilidad, estabilización de taludes, impermeabilización de lixiviados, drenajes, control de erosión, entre otros. En la generalidad, se dividen en geotextiles, geomallas, geoceldas y geomembranas, constituidos por fibras sintéticas como el polipropileno y el poliéster (Geosoft PAVCO, 2009).

5.1.1 Geosintéticos.

Entre los geosintéticos aplicables al proyecto que se presenta encontramos los siguientes:

5.1.1.1 Geotextiles.

Los geotextiles son materiales colocados sobre la tierra, planos y poliméricos, de comportamiento flexible y permeable a los fluidos, compuestos por fibras sintéticas como el polipropileno o el poliéster, retienen partículas de suelo mayores al tamaño de sus poros, a fin de impedir la migración de finos de un suelo a otro. Es altamente deformable y con gran variabilidad en cuanto a sus propiedades mecánicas e hidráulicas, lo cual incide en los factores de seguridad que requiere las obras. Entre las variedades se encuentran los siguientes (Geosoft PAVCO, 2009):

- Tejidos, aquellos en que las fibras se orientan en dos direcciones (trama y urdimbre), en estos se puede escoger la distancia de separación entre las direcciones. Se dividen en tejidos planos y tricotados.
- No tejidos, aquellos en que las fibras que conforman el geotextil no tienen una forma regular, si no por el contrario su tejido es aleatorio. Se dividen en agujados y termosoldados.
- Filamentos continuos, en estos los filamentos del geotextil no tejido son infinitos.
- Fibras cortadas, los filamentos que componen el producto final poseen longitudes determinadas.
- Agujados, punzonados o agujereados, en este los filamentos no tejidos son unidos mediante uniones mecánicas a través de agujas dispuestas en la parte inferior y superior de la napa de filamentos, entrando y saliendo a gran velocidad de la napa cohesionando y entrelazando los filamentos.
- Termosoldados, los filamentos están unidos por calor a través de procesos de termofusión.

Las propiedades de este tipo de geosintético se basan en su resistencia mecánica a la perforación y a la tracción, y la capacidad de drenaje, gracias a las mallas de fibras sintéticas presentes en el tejido. Las propiedades que deben evaluarse, para determinar su conveniencia en una obra son principalmente, la resistencia a la tracción, al punzonamiento, la elongación a la rotura, la perforación dinámica por caída libre de cono, el espesor del geotextil, la permeabilidad, la abertura eficaz de los poros, la fluencia, fatiga y fricción contra el terreno, entre otros (Geosoft PAVCO, 2009).

5.1.1.2 Geomembranas.

Hacen parte de la familia de los geosintéticos y garantizan la estanquidad de una superficie, son utilizadas principalmente para revestir superficies, conteniendo materiales y en algunos casos

sustancias, evitando el flujo de líquidos y vapores entre capas de material. Sus principales funciones son la contención de líquidos, el revestimiento en pilas de lixiviación y depósitos. Se fabrican con resinas vírgenes de polietileno y son resistentes a productos químicos altamente alcalinos como ácidos, sales, alcoholes, aceites e hidrocarburos. Brindan una alta resistencia a la fricción (Geosoft PAVCO, 2009).

Las geomembranas de menor densidad poseen excelentes propiedades mecánicas, resistencia química y adaptabilidad a los suelos, por su componente de polipropileno son elásticas, flexibles y de resistencia al punzonamiento, lo que asegura la elongación multiaxial para acomodarse a los niveles diferenciales del subsuelo (Geosoft PAVCO, 2009).

5.1.1.3 Geomallas.

Estos elementos *compuestos por filamentos que pueden ser de una sola pieza, tejidos o soldados, forman un entramado* ofreciendo trabajo a tensión, aumentan la capacidad de carga de un terreno, mediante la distribución de cargas, gracias a la interacción de cargas que es el resultado de la interacción o fricción a la que está sometida. Entre los tipos de geomalla se encuentra la uniaxial, biaxial y triaxial (Lopez, 2019).

Son fabricadas en polietileno de alta tenacidad lo cual les confiere la resistencia y durabilidad y se protegen de los daños mecánicos con un recubrimiento polimérico de PVC. Son de fácil instalación, sin importar las condiciones climáticas; aumentan la seguridad y estabilidad de taludes; reducen el volumen en los movimientos de tierra, mantienen el aspecto natural de las laderas; alargan significativamente la vida útil de las carreteras; reducen la aparición de grietas en la superficie de los suelos reforzados y presentan alta resistencia del material contra los daños de instalación (Geosoft PAVCO, 2009). Son aplicadas en actividades como las siguientes:

- Refuerzo y estabilización de terraplenes en carreteras y vías férreas
- Refuerzo de base en terraplenes blandos
- Terraplenes sobre pilotes
- Refuerzo de rellenos y suelos en zonas industriales y centros comerciales
- Refuerzo y control en la erosión de taludes
- Estabilización y refuerzo de muros de contención y muros verdes
- Estabilización y refuerzo de encauzamientos, riveras y zonas costeras.
- Refuerzos de cimentaciones en suelos blandos

5.1.1.4 Geocompuestos.

Se consideran geocompuestos a la unión de dos o tres geosintéticos que combinan múltiples funciones en áreas de drenaje para caminos, carreteras y estructuras de retención.

Son muchas las posibles convenciones, entre ellas encontramos el geocompuesto DLT GEOFORCE HT IMP, el cual, se genera por la unión de fibras de propileno de alta tenacidad termo fijadas mediante un tratamiento impermeable, ligero y de poco espesor (Geosoft PAVCO, 2009). Las principales ventajas son:

- Alta resistencia frente a requerimientos de tracción y perforación de material
- Evitar el avance de líquidos gracias a su impermeabilidad
- Es de fácil instalación ya que se adapta fácilmente al terreno
- Permite generar capas no permeables en explanadas, terraplenes y suelos con alto riesgo de desgaste, gracias a los efectos de infiltración del agua.

Se utiliza principalmente en suelos industriales, aparcamientos, soleras y bases de terraplenes: estabiliza suelos en caminos y carreteras; controla amenazas de derrame en zonas de carga de combustible y zonas de fuga de residuos; refuerza las capas de un terreno; evita la degradación de taludes; es altamente resistente al desgarramiento y la perforación; impide el paso de lixiviados; controla la filtración de agua en capas de terreno con riesgo de degradación; entre otros (Geosoft PAVCO, 2009).

5.1.1.5 Geoceldas.

Se considera un método de construcción respetuoso con el medio ambiente, formado por un sistema celular de aleaciones nano poliméricas, tridimensional, con forma de panel, lleno con tierra, grava o materiales granulares. Sus principales ventajas son la resistencia a la fatiga, la rigidez, la reducción de espesores que conforman el pavimento, reemplazan materiales granulares de alta especificación, disminuyen costos y optimizan la vida útil del pavimento. Son ampliamente utilizadas en la estabilización de suelos débiles a fin de aumentar la resistencia del relleno, estabilizan subrasantes, refuerzan estructuras de pavimento, refuerzan cimentaciones, estructuras férreas, absorben cambios de rigidez y asentamientos diferenciales, entre otros (TEXDELTA, 2020).

Sin embargo, debido a la fluencia que puede generar a largo plazo, puede perder confinamiento y estabilidad dimensional, lo que puede traducirse en fallos estructurales, los factores que deben considerarse para determinar la durabilidad de la geocelda son la rigidez elástica (módulo mecánico dinámico), la fluencia (deformación permanente), la resistencia a la tracción y la durabilidad del medio ambiente (TEXDELTA, 2020).

5.1.2 Subrasante.

Se conoce como subrasante a la capa en la que se soporta la estructura de pavimento o afirmado y su comportamiento se determina a través del módulo de resiliencia (M_r). Su función es resistir las cargas transmitidas por el tránsito desde la rasante y distribuir las uniformemente a fin de evitar fallas en el pavimento. Para tal fin, es estabilizada con materiales de altas propiedades mecánicas que mejore la estructura global y aumente la capacidad portante del suelo (INVIAS, 2008).

Entre los sistemas de estabilización de subrasantes se encuentra la estabilización mecánica, que se realiza a partir de la compactación del material de grano grueso y fino sobre el suelo de fundación; estatización con aditivos químicos, que alteran las propiedades físico – químicas del suelo mediante el incremento en el soporte del mismo, mejorando su durabilidad; estabilización con materiales cementales; y por último estabilización con geosintéticos, Estas actividades permiten mejorar funcionalmente el suelo, relacionado con el comportamiento del mismo y estructuralmente, lo que permite aumentar la capacidad de soportar cargas de tránsito (INVIAS, 2008).

Es por esto, que la respuesta estructural y el comportamiento de un pavimento depende de las características de la subrasante. Los principales ensayos que permiten determinar las características del suelo de fundación son los siguientes:

- Ensayos de constitución, entre los que se encuentran la humedad (INV-E 122), densidad (INV-E 142, INV-E 161, INV-E 164), gradación (INV-E 123, INV-E 213), plasticidad (INV-E 125, INV-E 126), equivalente de arena (INV-E 133), desgaste (INV-E 218).
- CBR inalterado (INV-E 148).
- PDC (INV-E 172).
- Estabilidad volumétrica (INV-E 132, INV-E 148, INV-E 173).

5.1.3 Capacidad portante.

Se conoce como la resistencia a la deformación que posee un suelo para soportar las presiones causadas por las cargas ejercidas en la rasante y distribuidas hacia este, sin permitir que se generen fallas en su estructura, dependiendo de criterios funcionales como la densidad, humedad, resistencia a la presión cortante, entre otros (Muñoz, 2015).

Entre los factores que afectan la capacidad portante se encuentran los efectos de retracción y expansión del suelo, licuefacción de los suelos por acción de cargas dinámicas, proximidad del nivel freático, ampliación de cargas inclinadas o excéntricas, defectos del subsuelo, erosión y corrosión del suelo (INVIAS, 2008).

Otra falla que se encuentra en la subrasante es la falla por ahuellamiento, causada por el esfuerzo excesivo de las capas inferiores de una carpeta asfáltica. Se considera un problema estructural, más que de los materiales en sí (Muñoz, 2015).

5.1.4 Tipos de falla.

Las fallas son producidas cuando la capacidad de soporte es superada, entre las clases más usuales encontramos los siguientes:

- +Cortes por rotura general, en arcillas rígidas y arenas densas.
- Corte por rotura local, en arenas medias, flojas y en arcillas suaves
- Corte por punzonamiento, se presentan cortes alrededor de la cimentación.

Adicional a lo anterior es usual encontrar fallas por ahuellamiento en la subrasante, debidas al esfuerzo excesivo de esta. Se considera un problema estructural, más que de la utilización de ciertos materiales. Su aparición se da principalmente por la intrusión de humedad y la poca resistencia a la fuerza aplicada (Muñoz, 2015).

5.2 Marco geográfico

El área de proyecto se encuentra localizada al Noroeste del casco urbano del municipio de Carurú, que se encuentra ubicado sobre la margen derecha del río Vaupés en el departamento del Vaupés.

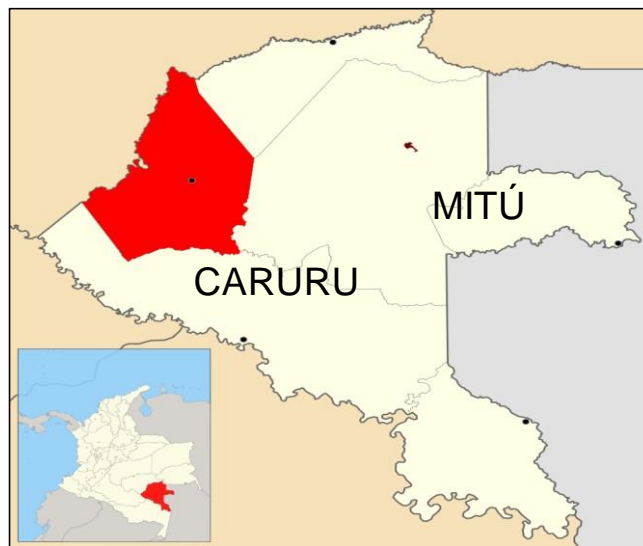


Figura 1. Ubicación municipio de Vaupés

Fuente. Mapa de localización del municipio. Fuente: «Colombia - Vaupés - Carurú»

El tramo de estudio inicia en el sitio de empalme con el primer tramo de placa huella ya construido localizado en las coordenadas 604373.43N y 1308452.03E. En la figura N. 2 se presenta la localización de la vía en estudio.

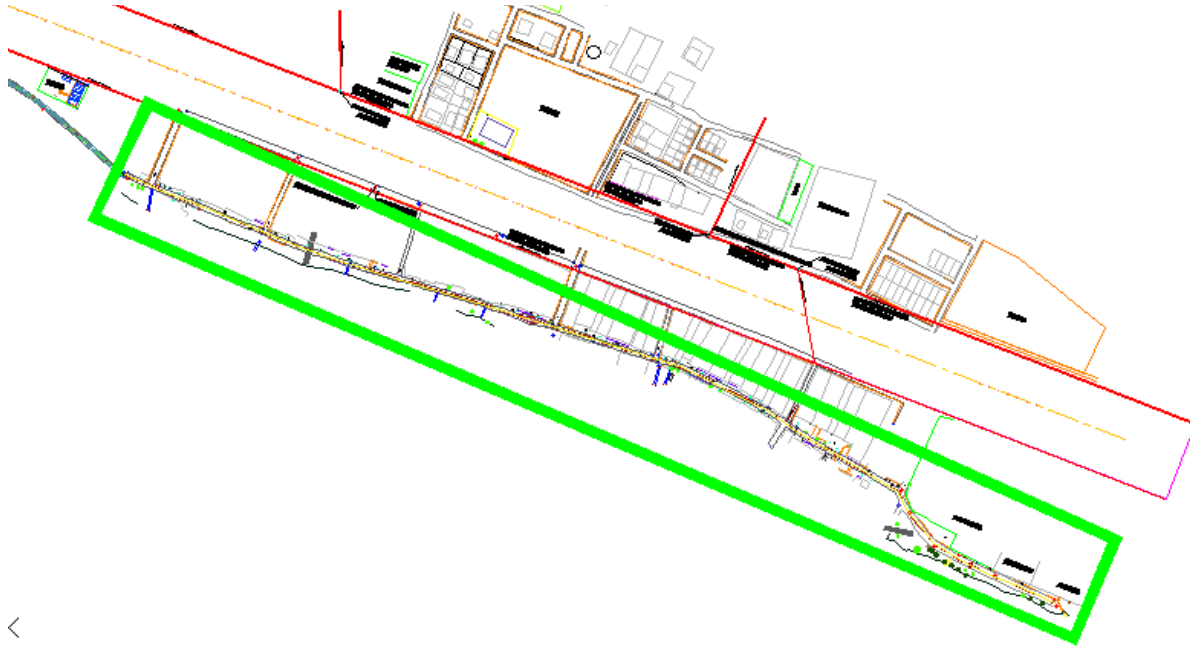


Figura 2. Vía Carurú hacia el colegio pluriétnico del municipio de Carurú.

Fuente. Mapa de localización del municipio. Fuente: «Colombia - Vaupés - Carurú»

5.3 Marco teórico

En el marco teórico se evaluarán las metodologías a implementar para la verificación de las capacidades estructurales y funcionales de los diferentes geosintéticos y su conveniencia en el mejoramiento de la subrasante, la cual se encuentra caracterizada por medio de ensayos destructivos (apiques), que no solo muestran las condiciones del suelo si no también su capacidad portante y por tanto su resistencia frente al tráfico de diseño, estimado previamente por la alcaldía municipal.

5.3.1 Metodología por especificación.

La AASHTO en compañía con la American Building Contractors (ABC), han intentado unificar todas las propiedades de estos materiales, lo cual origina una serie de recomendaciones de acuerdo con las propiedades mínimas de los geotextiles en las siguientes áreas:

- Separación para subrasantes de suelo firme.
- Separación y estabilización, para subrasante de suelos blandos
- Geotextiles de drenaje para filtración
- Control de erosión, bajo las roscas
- Control de sedimentos
- Control de reflexión de grietas, para estructuras de pavimento.

Para este método se listan los requerimientos mínimos de las propiedades del geosintético, comparándolo con los valores de especificación con los otorgados por el fabricante. Se

considera un factor estadístico, a partir de incontables laboratorios realizados para evaluar la competencia estructural del material. Es decir, que este método de diseño de especificaciones se debe comparar bajo un mismo criterio, listando los valores mínimos promedio de los rollos con variaciones estándar entre el 5 y el 20%, los cuales deben seguir las especificaciones técnicas del INVIAS.

5.3.2 Metodología por función.

Evalúa la función principal para la cual se especifica el geosintético y de acuerdo a esto, calcula los valores numéricos de la propiedad que se requiere. Se considera un factor de seguridad al calcular la relación entre el valor del ensayo típico de la propiedad (relevante para la función principal del geotextil), entre el valor requerido para esta propiedad (obtenido según método o norma). Siendo este valor mayor a la unidad, se considera adecuado el geosintético (Geosoft PAVCO, 2009).

$$FS = \frac{\text{valor admisible}}{\text{valor requerido}} \quad (1)$$

Los pasos resumidos para realizar el diseño por función

- Evaluar la ampliación del geosintético considerando los materiales en contacto.
- Escoger un factor de seguridad adecuado.
- Especificar la función primaria del geosintético
- Cálculo numérico del valor de la propiedad requerida del geosintético según su función primaria.
- Determinar el valor de la propiedad admisible por ensayos
- Cálculo del factor de seguridad
- Comparar el factor de seguridad obtenido con el deseado
- Si el factor de seguridad es aceptable, comprobar si otras funciones del geosintético pueden ser críticas.

A fin de evaluar el comportamiento in-situ se debe tener en cuenta el valor admisible, determinado a partir de la relación del valor del ensayo con respecto al factor de reducción, este último, varía considerablemente de acuerdo con la función que vaya a desempeñar el geosintético.

5.3.3 Metodología Giroud-Han.

Se trata de un método de diseño que emplea principalmente el confinamiento generado entre las geomallas y la capa de material que se encuentra sobre esta. El principio contempla la deformación de los suelos, mediante una carga específica que genera ahuellamiento sobre la superficie de la rodadura, y su disminución exponencial gracias a la fricción producida por el geosintético (Nicole Almendarez, 2017).

La ecuación que determina el espesor de base utilizando el geosintético es la siguiente:

$$h = \frac{0.868 + Cf \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \text{Log } N}{1 + 0.204 \left(\frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}} - 1\right)} \left[\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\frac{s}{f_s} \left(1 - 0.9e^{-\frac{r^2}{h}}\right) N c f c CBR_{sg}} - 1} \right] r \quad (2)$$

Dónde:

h, espesor de la capa granular

r, radio del área de contacto del neumático

N, número de pasadas del eje

CBR_{bc}, CBR de la capa base

CBR_{sg}, CBR de la subrasante

F_s, factor igual a 75mm de profundidad de la huella

N_c, factor de capacidad de carga

F_c, factor de cohesión de la subrasante y CBR

S, profundidad permisible de la huella

P, carga de la rueda

J, módulo de estabilidad de la abertura

Esta ecuación es sensible al parámetro del módulo de estabilidad de la abertura (rigidez torsional) o estabilidad torsional, lo cual es una medida de la resistencia de la geomalla. A través de esta se puede utilizar cualquier característica adaptada a geosintéticos, por medio de la constante K. Esta metodología enfoca el uso de diseños con geomallas gracias a sus grandes aberturas y el agregado de la capa base y el grado de confinamiento depende de la relación entre el tamaño de la abertura y de la partícula del agregado. La efectividad de confinamiento depende de la rigidez en el plano de la geomalla y la estabilidad de las costillas y las uniones de geomalla.

Este método puede ser utilizado en estructuras sin pavimentar reforzadas con geomallas triaxiales que permiten el confinamiento en el agregado y la rigidez de la geomalla en el plano. También en estructuras sin pavimentar, no reforzadas, al no incluir el pavimento no reforzado al descuidar el efecto de la capacidad portante de la subrasante.

Es así como la base tiene un espesor uniforme, donde solo se utiliza una capa con geomalla que se sitúa entre la subrasante y el suelo, cuando este último es homogéneo, en profundidad suficiente para permitir las fallas del suelo hacia la subrasante sin ningún tipo de influencia del suelo, ubicado a mayor profundidad.

5.3.4 LCR.

Esta herramienta es utilizada para optimizar el CBR del suelo de fundación, permite estimar el refuerzo adicional con geomalla biaxial, a fin de generar una trabazón en el material de la plataforma de trabajo. Al generar este comportamiento tiene un aporte estructural diferente y el valor de dicho mejoramiento se denomina LCR.

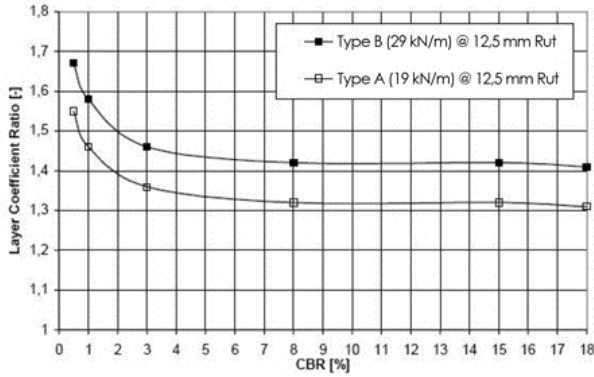


Figura 3. Valores de LCR

Fuente. Manual de diseño con geosintéticos, 9º edición (Nombre del Autor).

Utilizando la ecuación de Ivanov se logra determinar la interacción entre la subrasante y el mejoramiento, considerada en suelos con baja capacidad portante, lo cual permite dar espesores que brindan mejoramiento y dan viabilidad técnica.

$$h = \frac{2a}{\pi} * \left[\frac{1 - \frac{E_{inferior}}{E_{equivalente}}}{\frac{z}{\pi} * \left(1 - \frac{1}{n^{3.5}}\right)} \right] \quad (3)$$

5.3.5 AASHTO 93

Este método permite conocer la contribución estructural de la geomalla, de acuerdo con las solicitaciones de la estructura, teniendo en cuenta que este tipo de geosintéticos son rígidos y con valores de esfuerzos y módulos de resistencia altos.

A partir del número estructural de la subrasante (determinado con los ensayos destructivos, donde se calcula el CBR), se determinan espesores de subbase granular y se continúa el procedimiento que se describe a continuación:

- Determinación del coeficiente de aporte de la geomalla biaxial a la estructura de pavimento, utilizando la gráfica de LCR¹ para el valor del CBR de la subrasante.
- Manteniendo constante el valor del número estructural inicial, a fin de obtener disminución en los espesores de mejoramiento.
- Cálculo de espesor de material de mejoramiento de la capa granular con el refuerzo de la geomalla incluido.

$$NE \text{ reforzado} = a1 * D1 + a3 * LCR * D3ref * m3^{69} \quad (4)$$

- Una vez determinado el espesor del material de mejoramiento, se calcula el número estructural de la geomalla.

$$NE3 \text{ reforzado} = a3 * D3ref * m3^{69} \quad (5)$$

- Este último es el número estructural del mejoramiento incluyendo la geomalla, es decir el número estructural reforzado.

¹ Grafica N. 2. Valores de LCR (Layer Coefficient Ratio).

6. Metodología

Para los fines de este proyecto la metodología a implementar combina la proyección de ejes equivalentes en un periodo de diseño de 10 años; el cálculo de CBR de diseño, a partir de los estudios de caracterización y CBR inalterado realizados a cuatro muestras tomadas en este sector vial, con una profundidad a 0.25m y 0.50m; el cálculo de módulo resiliente de la subrasante a fin de conocer las necesidades estructurales de la misma para el soporte de las cargas producidas por el tránsito en el mismo periodo de diseño; cálculo del esfuerzo máximo que soportaría la superficie a las cargas verticales; diseño de los geosintéticos propuestos para el mejoramiento de la subrasante (geotextil tejido, geomalla triaxial, geocelda y geomalla biaxial); y cálculo de los espesores mínimos según las características del material de lleno y el aporte estructural causado por el geosintético.

6.1 Cálculo del tránsito de diseño

A fin de conocer la cantidad de ejes equivalentes que circularan en el segmento vial en el transcurso de diez años (periodo de diseño), se tomó como información base el número de vehículos actual en la zona durante una semana (TPDS)² y a continuación se realizaron los cálculos correspondientes a la proyección del tránsito de diseño a partir de la guía para la rehabilitación de pavimentos asfálticos del INVIAS (Instituto nacional de vías), tal como se señala a continuación (INVIAS, 2008).







Vehículos	Configuración	Comentario	TPDs
Bus pasajeros		Alcaldía	20
Camión		Ejercito	10
Volqueta		Alcaldía	20
Tractor + Remolque		Alcaldía	24
Retroexcavadora		Alcaldía	8
Motoniveladora		Alcaldía	4
Total			86

Figura 4. Trafico promedio diario semanal (TPDS)

Fuente. Alcaldía municipal Carurú.

Las variables involucradas en la estimación del tránsito de diseño en ejes equivalentes de 8.2 T, se describe a continuación:

- Tránsito promedio semanal (TPDS), 86 vehículos
- Desviación estándar de la muestra, 11 vehículos

² Ver figura N. 4, tráfico promedio diario semanal (TPDS).

- Confiabilidad 95%, por tratarse de una vía colectora rural, como lo indica la norma ASSHTO 93 (OFFICIALS), el valor del factor de distribución estándar es de -1.645.
- Índice de serviciabilidad³ inicial 4 y final 2.
- El rango promedio de tránsito promedio semanal (TPDS) es de +/- 7 vehículos, lo cual indica que el tránsito semanal se encuentra entre 79 y 93 vehículos.
- Factor camión calculado en 2.48.
- Factor direccional de valor 1, por tratarse de afirmados.
- Factor de distribución por carril de valor 1, ya que la sección típica se compone de un ancho de 4.50m.
- La composición vehicular, correspondiente a la gráfica 1 es de 0% automóviles, 23% buses y 77% camiones, distribuidos como se muestra en la tabla N. 1, según la información entregada por el municipio.

Tabla 1. Porcentaje de camiones por tipo de eje

CAMIONES	CANTIDAD	PORCENTAJE
C2P	10	15.10%
C2G	20	30.20%
C3-C4	24	36.24%
C5	0	0.00%
C6	12	18.12%

De acuerdo con los datos anteriores se calculó la cantidad de ejes equivalentes en un periodo de 10 años, con una tasa de crecimiento anual de 3%. El valor de ejes equivalentes de diseño permitió conocer el número de repeticiones esperado para evaluar el comportamiento estructural de la subrasante mejorada por medio de geosintéticos y material granular de lleno, cuyas especificaciones se encuentran en el documento *“proyectos tipo, soluciones ágiles para un nuevo país, 15 mejoramiento de vías terciarias – vías de tercer orden”* del departamento nacional de planeación (Departamento Nacional de Planeación, subdirección territorial de inversiones públicas, 2018). Los cálculos del número acumulado de ejes equivalentes (NESE) se presentan en la tabla N. 2.

Tabla 2. Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T a un periodo de diseño de diez años.

AÑO	TPD vc	FACTOR DIR.	FACTOR DE DISTR. POR CARRIL	FACTOR CAMIÓN	NESEi
0	86	1	1	2.48	77927.50
1	88.58	1	1	2.48	80265.33
2	91.16	1	1	2.48	82603.15
3	93.74	1	1	2.48	84940.98
4	96.32	1	1	2.48	87278.80
5	98.9	1	1	2.48	89616.63

³ AASHTO, Guide for design of pavement structures 1993

AÑO	TPD vc	FACTOR DIR.	FACTOR DE DISTR. POR CARRIL	FACTOR CAMIÓN	NESEi
6	101.48	1	1	2.48	91954.45
7	104.06	1	1	2.48	94292.28
8	106.64	1	1	2.48	96630.10
9	109.22	1	1	2.48	98967.93
10	111.8	1	1	2.48	101305.75
NESE Acumulado					985782.88

Tomando como insumo principal estos valores, se determinó el número de repeticiones esperadas para el periodo de diseño estipulado (diez años), a partir de la ecuación (6).

$$Re = TPDA * \%Te * FS * FC * Pd * FCA * 365 \quad (6)$$

Dónde TPDA corresponde al tránsito promedio diario anual, %Te al Porcentaje del TPDA para cada tipo de eje, Fs factor de sentido, Fc factor de carril, Pd periodo de diseño y FCA factor de crecimiento anual.

Según lo anterior y de acuerdo con la metodología descrita por el INVIAS en la guía de rehabilitación de pavimentos asfálticos (INVIAS, 2008), el número acumulado de ejes simples equivalentes de 8.2 T (NESE acumulado) es de 985782.88. De otro lado, el número de repeticiones esperadas para el periodo de diseño y el porcentaje de cada tipo de eje (23% buses, 11.63% C2P, 23.26% C2G, 27.91% C3-C4 y 13.95% C6), es 720123; deducido a partir de los datos relacionados en la tabla N. 3.

Tabla 3. Cálculo del número de repeticiones esperadas según el Tránsito diario promedio anual.

DESCRIPCIÓN	VALOR
TDPA	86
FS (Factor de Sentido, doble circulación)	2
FC (Factor carril)	1
Pd (Periodo de diseño)	10
FCA (Factor de crecimiento anual)	1.15
Re (Buses)	166053.1
Re (C2P)	83950
Re (C2G)	167900
Re (C3-C4)	201480
Re (C5)	0
Re (C6)	100740
Total, número de repeticiones esperadas	720123

6.2 Estudio geotécnico

El estudio geotécnico se realizó a partir de la toma de cuatro apiques localizados en el recorrido del tramo, cuya ubicación y coordenadas de referencia se encuentran en la tabla N. 4.

Tabla 4. Ubicación topográfica de apiques para muestreo.

APIQUE	ABSCISA	COORDENADAS	
		ESTE	NORTE
1	K0+110	1308357.60	604430.00
2	K0+380	1308132.12	604575.62
3	K0+600	1307961.07	604715.07
4	K0+860	1307719.84	604802.13

Se realizaron ensayos para determinar CBR (California Bearing Ratio) a una altura de 0.50m en promedio, límites de Atterberg, granulometría, humedad natural y adicional un perfil estratigráfico a 1.50m, como se muestra en la figura N. 5.

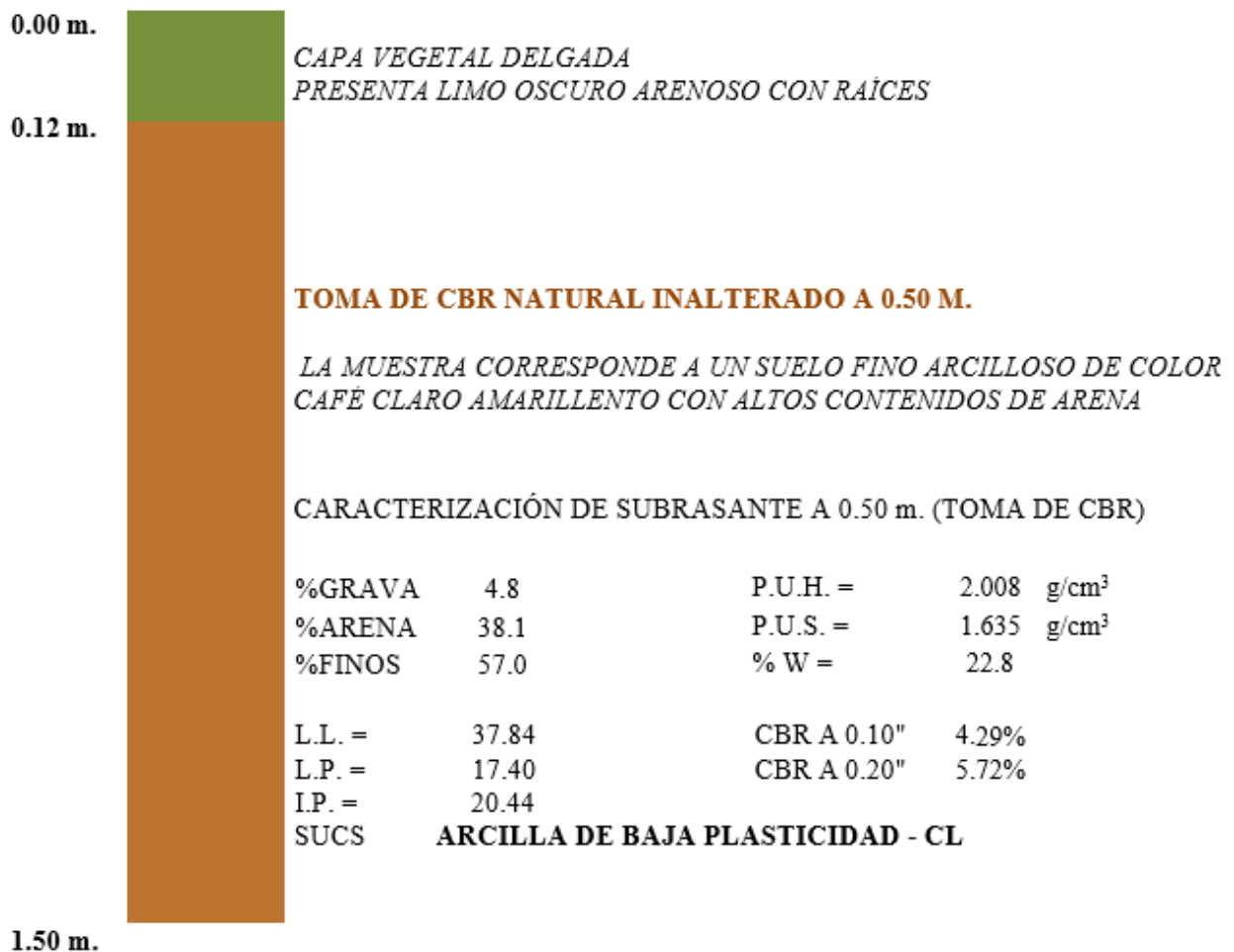


Figura 5. Perfil estratigráfico a una profundidad de 1.50m

Fuente. Propia.

Tabla 5. Resultados de ensayo practicados a las pruebas tomadas en campo.

APIQUE #	LÍMITE LIQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	IP	HN	IL	IC	CBR
							0.1"
1	34.73	18.36	16.4	22.60	0.26	0.74	5.1
2	35.22	17.25	18	23.30	0.34	0.66	3.2
3	38.4	19.39	19	24.20	0.25	0.75	2.7
4	37.84	17.4	20.4	22.80	0.26	0.74	4.3

Mediante la interpretación de los límites de Atterberg y teniendo presente que el suelo puede pasar de un estado de consistencia a otro en función de su contenido de humedad, se logró clasificar la subrasante de acuerdo con la carta de plasticidad de Casagrande, como se presenta en la figura N. 6.

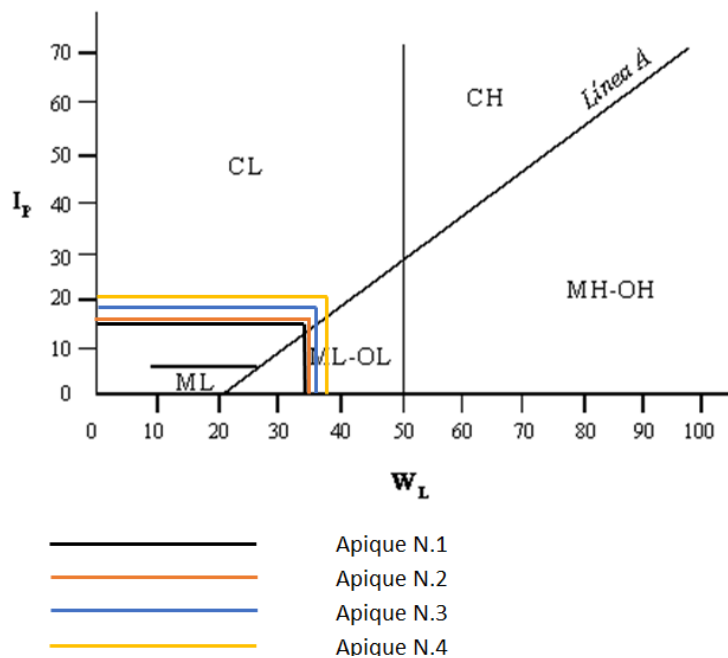


Figura 6. Clasificación de la subrasante (Carta de plasticidad de Casagrande)

Fuente. Propia.

Como resultado de la clasificación por el método del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) se pudo concluir que la subrasante en estudio es una arcilla inorgánica de baja compresibilidad. Así mismo, el índice de consistencia indica que su estado es plástico blando y no se encontró nivel freático a una profundidad promedio de 1.50m. Por tratarse de una arcilla se deben considerar los cambios volumétricos a causa de humedades altas en el suelo. Adicionalmente, mediante inspección visual se evidenció deterioro a nivel superficial y afectación por cargas provenientes de vehículos pesados y la presencia de una capa vegetal de aproximadamente 0.12m (según los apiques realizados), como se muestra en la figura N. 7.



Figura 7. Registro fotográfico Vía Carurú

Fuente. Propia.

6.3 Calculo CBR de diseño

Teniendo en cuenta que el desarrollo de este ejercicio pretende mejorar las condiciones de la subrasante con la incorporación de diversos geosintéticos, a fin de prorrogar la vida útil de una vía que no se encuentra pavimentada, pero que contiene tráfico vehicular, se debe establecer el CBR de diseño, tomado en las muestras inalteradas del terreno. Para tales fines se utilizaron los siguientes métodos:

6.3.1 Instituto de asfalto.

Este método está basado en tomar un percentil de diseño que se encuentra en el rango de 60%, 75% y 87.5%, de acuerdo con el número de ejes equivalentes de 8.2 T en el carril de diseño. Según el número de ejes equivalentes de 8.2 T proyectado, esta vía se encuentra en el rango de 10^4 - 10^6 , por lo cual el percentil de diseño es de 75 como se muestra en la tabla N. 6 (INVIAS, 2008).

Tabla 6. Percentiles para determinar CBR de diseño.

NUMERO DE EJES DE 8.2 TONELADAS EN EL CARRIL DE DISEÑO	PERCENTIL A SELECCIONAR PARA DETERMINAR EL CBR DE DISEÑO
$< / = 10^4$	60
$10^4 - 10^6$	75
$> / = 10^6$	87.5

CBR

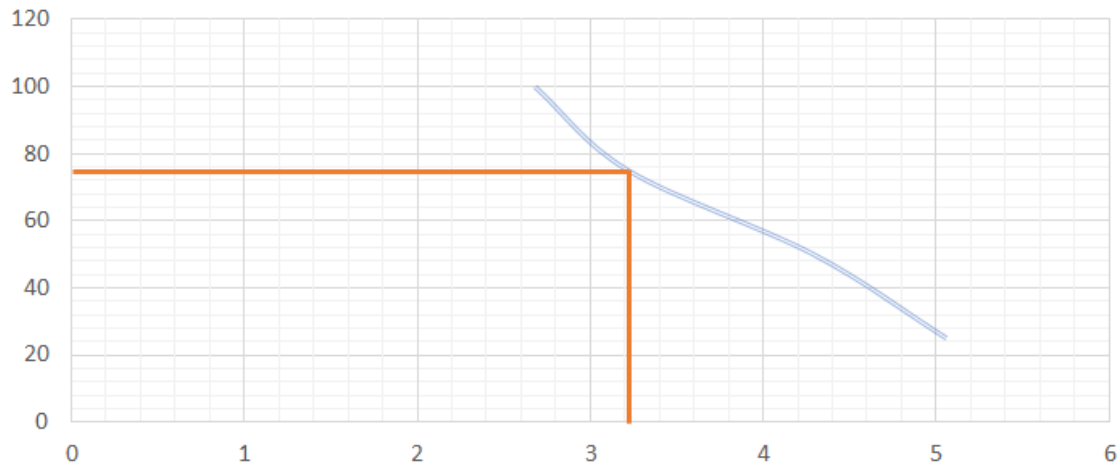


Figura 8. Grafica para el cálculo de CBR de subrasante.

Fuente. Propia.

La figura N. 8, relaciona el percentil obtenido en función de los valores de CBR obtenidos en laboratorio, lo cual permite determinar que el CBR de diseño es 3.22%.

6.3.2 Criterio de la media.

Este método evalúa un valor en el cual la mitad de los valores quedan por debajo y la mitad por arriba del valor calculado. Así, el valor seleccionado se le disminuye un parámetro Z veces la desviación estándar el cual depende del nivel de confianza con que se pretenda realizar el diseño.

Tabla 7. Desviación normal estándar de acuerdo al nivel de confianza

NIVEL DE CONFIANZA (NC%)	DESVIACIÓN NORMAL ESTÁNDAR (Z)
50	0
85	1
90	1.282
95	1.645
98	2.054

En la tabla N. 7 se indica el valor de desviación normal estándar correspondiente a un nivel de confianza de 95%, según norma ASSHTO (ASSHTO LRFD, 2002). Basados en estos valores el modelo de cálculo de CBR de diseño se determina con la ecuación (6).

$$CBR_{diseño} = CBR - (Z * \sigma) \quad (6)$$

Dónde:

CBR es el valor medio de los valores de CBR (%), Z es la desviación normal estándar y σ , Desviación estandar de los valores CBR.

$$CBR_{diseño} = 2.29$$

6.3.3 Promedio aritmético

Este método de cálculo, es tal vez el más sencillo y de fácil aplicación, consiste en promediar los valores de CBR encontrados en laboratorio, a fin de estimar el CBR de diseño, de tal forma los valores incluidos y el resultado correspondiente se encuentra en la tabla N. 8.

Tabla 8. Promedio aritmético de los valores de CBR

CBR				PROMEDIO
2.68	3.22	4.29	5.06	3.81

6.3.4 Coeficiente de variación.

Este coeficiente se utiliza para mitigar los errores producidos por no considerar la dispersión de los datos agrupados. Indica la confiabilidad de las estimaciones de las variables investigadas para el valor obtenido, como se muestra en la ecuación (7).

$$\emptyset(\%) = \frac{CBR_{diseño}}{\sigma} * 100 \quad (7)$$

$$\emptyset(\%) = 4.12$$

La precisión de la muestra depende del rango en el que se encuentra el coeficiente de variación, como se muestra a continuación:

- Menor 10%, buena
- Entre 10% y 20%, aceptable
- Más de 20%, no confiable

De esta forma los coeficientes de variación para los valores de CBR calculados por las diversas metodologías se relacionan en la tabla N. 9.

Tabla 9. Precisión obtenida para cada CBR de diseño

METODO	CBR DISEÑO	FACTOR DE CONFIABILIDAD	PRECISIÓN
Instituto de asfalto	3.22	3.48	Buena
Criterio de la media	2.29	2.48	Buena
Promedio aritmético	3.81	4.12	Buena

6.4 Mejoramiento.

Según el proyecto tipo presentado por el departamento de planeación nacional en colaboración con el INVIAS (NACIONAL, 2018), la subrasante requiere mejoramiento cuando su CBR sea inferior al 3%, a fin de apoyar las capas estructurales viales sobre una subrasante mejorada al valor de CBR 4%, mínimo. Esto con el fin de aumentar el soporte en el proceso constructivo de las capas granulares siguientes, ya que como se pudo establecer por medio de los ensayos de laboratorio, la subrasante de la vía a mejorar se considera blanda y de baja capacidad portante.

En vista de lo anterior se evalúa un mejoramiento de la subrasante en material caracterizado por el INVIAS como subbase granular tipo C con especificaciones adjuntas a este documento en el artículo 320-13.

Teniendo en cuenta lo valores de CBR encontrados en los ensayos realizados sobre las muestras inalteradas y aplicando la fórmula para determinación del espesor de mejoramiento de la subrasante descrita por (RONDON,2015), se muestra en la figura N. 9 la relación entre los espesores de mejoramiento en función del CBR.

$$h(cm) = -14.571(CBR) + 43.936 \quad (9)$$

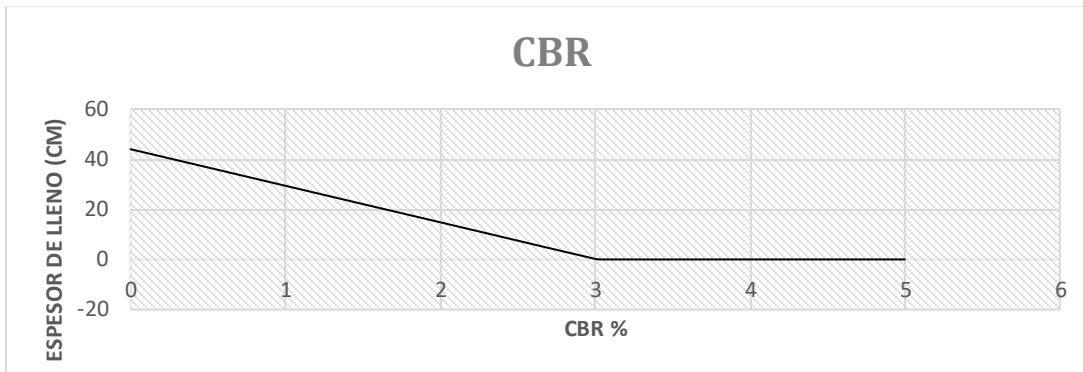


Figura 9. Espesor de mejoramiento de la subrasante de acuerdo al CBR de diseño.

Fuente. Propia.

6.5 Cálculo del módulo resiliente

Para los fines de este proyecto se calculó el módulo resiliente con respecto al CBR de diseño determinado en el subcapítulo anterior. La estimación de este módulo permitió determinar la capacidad de la subrasante y por ende los requerimientos del mejoramiento a proponer. Su cálculo se realizó por los métodos SHELL, CSIR, TRRL y USACE, como se encuentra especificado en el manual de diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tráfico del INVIAS (INVIAS, 2008).

De acuerdo con las variaciones en los módulos encontrados por los diferentes métodos y representados en la figura N. 10, se concluye que el valor de mayor conveniencia a utilizar es el calculado a partir del CBR estimado por percentiles (3.22%), lo cual concuerda con la metodología para diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito (INVIAS, 2008). Así mismo, el valor de módulo resiliente a utilizar será el obtenido por el método SHELL (ejes $1 \cdot 10^5$), lo cual es concordante con la metodología ASSHTO (ASSHTO LRFD, 2002).

Adicional a esto se afectó el valor del módulo resiliente en un 0.33%, como lo indica la guía metodológica de rehabilitación de pavimentos flexibles, para la determinación del módulo resiliente de diseño. Los anteriores resultados se presentan en la tabla N. 10.

Tabla 10. Cálculo de módulo resiliente de diseño con un factor de 0.33%

METODO	CBR DISEÑO	MR (PSI)	MR (MPA)	MR DISEÑO (MPA)	ECUACIÓN
SHELL	3.22	4830.00	33.30	6423.90	$Mr = k * CBR$

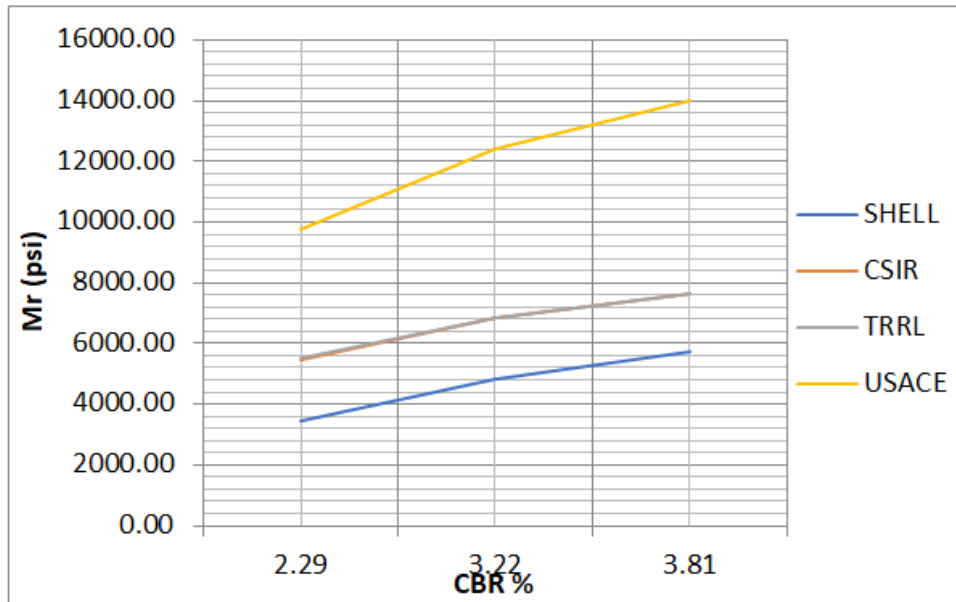


Figura 10. Módulo resiliente en función del CBR de diseño, según el método de cálculo utilizado.

Fuente. Propia.

6.6 Espesor de subbase granular tipo C para una vía no pavimentada sin refuerzo

Se calculo el espesor de material granular tipo C, a fin de establecer un parámetro de comparación entre el espesor de material granular de diseño (subbase granular tipo C) en una subrasante no reforzada y los espesores de diseño en el mismo material sobre la subrasante reforzada con geosintéticos (geotextil, geomalla y geocelda), para tal fin se utilizó la ecuación (2), otorgando un valor de 0 al módulo de proporción (P_e), un coeficiente de corrección (C_f) de 0.672 indicado para pavimentos no reforzados y 0 como valor para el módulo de estabilidad de la abertura (j), (Nicole Santos, 2017). De tal forma el diseño de material para una vía no pavimentada sin refuerzo por medio de geosintéticos se describe en la tabla N. 11.

Tabla 11. Cálculo de material granular en vía no reforzada con subbase granular tipo C⁴

DESCRIPCIÓN	VALORES
Carga de eje	80
Carga de rueda	40
Numero de repeticiones para conformación	720123
CBR subrasante	3.22
CBR subbase granular	30
Factor de capacidad	3.14
Profundidad máxima ahuellamiento (ASSHTO)	75
Cohesión de la subrasante (f_c)	30
Capacidad de la subrasante	22.06

⁴ Especificaciones técnicas INVIAS. Artículo 320-13.

DESCRIPCIÓN	VALORES
Radio de contacto (r)	0.15
Módulo de proporción (re)	0
Capacidad de la subrasante	22.07
¿Soporta la carga del tráfico?	No soporta la carga de trafico
factor de corrección (módulo j)	0.672
Módulo de estabilidad de la abertura (j)	0.000
NC	3.14
Iteraciones	1.49
h iterativo	0.81
h (espesor)	0.81

6.7 Separación y refuerzo de suelos de subrasante y capas granulares con geotextil

De acuerdo con el manual de diseño de geosintéticos de PAVCO (PAVCO, 2012), para considerar que la función de refuerzo y separación se dé por parte del geotextil, el suelo de subrasante debe presentar un CBR entre 1% y 3.5%, además de no estar en condición de saturación, lo cual aplica para el suelo del segmento vial en estudio.

Para efectos del mejoramiento de la subrasante descrita en este proyecto, el geotextil cumplirá las siguientes funciones:

- Separar el material de mejoramiento, (cuya caracterización es desgaste en la máquina de los Ángeles menor al 50%, perdidas en el ensayo de solidez de sulfato de sodio menor al 12% y de magnesio menor al 18%, índice de plasticidad menor al 12%, cantidad de arena mayor al 25% y CBR mayor al 30%) y el suelo de subrasante.
- Refuerzo de la superficie blanda (subrasante), aprovechando su coeficiente de fricción y resistencia a la tracción.

Su estimación se realizó en función de la gradación del material de lleno, de la caracterización de la subrasante y la estimación de ejes equivalentes en un periodo de 10 años.

De acuerdo con el estudio geotécnico, la subrasante se encuentra conformada principalmente por suelo arenoso-arcilloso de color habano claro a café claro, clasificado como arcilla de baja plasticidad (CL) y en ningún apique (con alturas máximas de 1.50m) se evidencio nivel freático a una altura de 1.50m de exploración.

Basados en la confiabilidad requerida para la subrasante (95%), la desviación estándar de 0.45, el índice de sevicialidad inicial y final de 4 y 2 respectivamente, y el cálculo de los ejes equivalentes de diseño a un periodo de diez años, se calculó el número estructural de la subrasante, por medio del software AASHTO 93, como se muestra en la figura N. 11.

Figura 11. Cálculo del número estructural de la subrasante.

Fuente. Propia.

Incluyendo este valor al rango de variables establecidas en la tabla N. 12 para calcular la resistencia del geotextil requerida para una subrasante arcillosa de baja permeabilidad y aplicando el método de elección por función se obtienen los resultados mencionados en la tabla N. 13.

Tabla 12. Variables para el cálculo de resistencia requerida del geotextil

DESCRIPCIÓN	VARIABLE
Esfuerzo en la superficie del geotextil	40 kN
Ancho de calzada	4.5 m
TPD	86
NESE	985782.88
Presión de inflado	100 psi
CBR diseño	3.22
Suelo arenoso arcilloso	0.0000025
Material de estabilización	2.5
SN	4.16
Función de elongación	950

Tabla 13. Consideraciones para el cálculo del geotextil a utilizar

DESCRIPCIÓN	VARIABLE
Valor del ensayo	5.5
Factor de reducción por instalación	1.55
Factor de reducción por fluencia	2
Factor de reducción por degradación	1.25
Valor admisible	2.75

DESCRIPCIÓN	VARIABLE
Resistencia a la tensión (N)	1519.00
Factor de seguridad global	2.00
Resistencia requerida	759.5
Factor de reducción por daños de instalación	1.55
Factor de reducción por degradación química y biológica	1.5
Factor de seguridad parcial (fsp)	2.325
Resistencia del geotextil requerida (N)	12540

El valor último de resistencia requerida (T_{req}) del geotextil es de 12540 N y el valor de resistencia última (método de tira ancha sentido transversal es 37 kN/m), a partir de estos valores se eligió a conveniencia el tipo de geotextil tejido (con función de separación y refuerzo) en las especificaciones técnicas de geotextiles de PAVCO (PAVCO, 2012). Así mismo, mediante la ecuación (2) se determinó el diseño del espesor de lleno en subbase granular tipo C, como se muestra en la tabla N. 14.

Tabla 14. Consideraciones para el cálculo del lleno sobre el geotextil

DESCRIPCIÓN	VALORES
Carga de eje	80
Carga de rueda	40
Numero de repeticiones para conformación	720123
CBR subrasante	3.22
CBR subbase granular	30
Factor de capacidad	3.14
Profundidad máxima ahuellamiento (ASSHTO)	75
Cohesión de la subrasante (F_c)	30
Capacidad de la subrasante	20.90
Radio de contacto (r)	0.15
Módulo de proporción (re)	2.27
Capacidad de la subrasante	20.90
¿Soporta la carga del tráfico?	no soporta la carga de trafico
factor de corrección (módulo j)	0.672
Módulo de estabilidad de la abertura (j)	0.000
NC	3.14
Iteraciones	1.132527553
h iterativo	0.50
h (espesor)	0.50

6.8 Estabilización de subrasante con geomalla

La geomalla triaxial es utilizada principalmente en suelos blandos como la subrasante estudiada en este proyecto, disipa la presión en la interfaz de la subrasante con la geomalla, mejorando la capacidad portante del suelo. Permite proveer estructuras más estables al producir un mayor

confinamiento por el interlocking, entendido como el entrelazamiento de las partículas. Esto magnifica la vida útil del pavimento y reduce significativamente espesores de materiales granulares, lo cual tiene gran impacto en los costos del proyecto y facilita su instalación (Nicole Santos, 2017).

Para los efectos de este proyecto, la implementación de una geomalla triaxial (en lugar del uso de otros materiales de mejoramiento como el rajón), tiene como propósito mitigar las fallas por ahuellamiento en la subrasante, las cuales se causan por el esfuerzo excesivo de las capas interiores y la inclusión de humedad. Así mismo, ser un elemento de refuerzo dentro de la estructura de pavimento, mejorando su resistencia mecánica a la deformación, disminuyendo y disipando las cargas que actúan sobre el terreno.

De esta forma, mediante la aplicación de la metodología Giroud-Han (ecuación (2) se calculó el espesor de material de mejoramiento⁵ con un CBR de 30% (descrito en el artículo 320-3 del INVIAS, donde clasifica el material y considera una resistencia a la penetración en condiciones de densidad seca máxima y humedad optima), a fin de promover el confinamiento, y por ende la fricción, entre este material y la geomalla, así como la rigidez axial de las geomallas aplicando las siguientes variables:

- Módulo de estabilidad de la apertura (J), que indica la resistencia de la geomalla.
- Radio de contacto (r), determinado a partir de la carga de la rueda, que para efectos de este proyecto es 40 kN.
- Módulo de proporción (Re), como la relación entre el CBR de la subrasante y el CBR de la subbase.
- Revisión de la capacidad de la subrasante (Ph), evaluado a partir de la carga ejercida por la rueda.
- Factor de corrección (Fc), dependiente en su totalidad del módulo J de las geomallas triaxiales y establecido por el fabricante mediante los ensayos al material.
- Factor de capacidad de 5.71 para pavimentos con geomalla.
- Cohesión de la subrasante de 30 KPa

La evaluación y diseño de esta capa de material, así como los valores estipulados para el mejoramiento de la subrasante de diseño se presentan en la tabla N. 15.

Tabla 15. Cálculo de espesor de diseño para una geomalla triaxial TX140

DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
Carga de eje	80	kN
Carga de rueda	40	kN
Numero de repeticiones para conformación	720123	
CBR subrasante	3.22	%
CBR subbase granular tipo C	30	%
Factor de capacidad	5.71	
Profundidad máxima ahuellamiento (AASHTO)	75	Mm
Cohesión de la subrasante (Fc)	30	kPa
Capacidad de la subrasante	40.12	> 40
Radio de contacto (r)	0.15	M

⁵ Subbase granular Tipo C. Artículo 320-13 del INVIAS, adjunto en los anexos.

DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
Módulo de proporción (re)	2.99	
Capacidad de la subrasante	22.07	kN
¿Soporta la carga del tráfico?	NO SOPORTA LA CARGA DE TRAFICO	
Factor de corrección (módulo j para mallas triaxiales)	0.348	
Módulo de estabilidad de la abertura (j)	0.105	
NC	5.71	Para pavimentos con geomalla
Iteraciones	1.262549728	0.243278214
h iterativo	0.25	m
h (espesor)	0.25	m

6.9 Estabilización de subrasante con geocelda y geomalla biaxial

Como alternativa de refuerzo estructural de la subrasante se calculó el aumento en la capacidad portante del suelo a partir del mejoramiento con geocelda, considerado como un sistema de confinamiento celular que garantiza la durabilidad y estabilidad dimensional a fin de mantener el desempeño de la vía. Lo anterior debido a que distribuye las cargas e incrementa la capacidad de soporte del suelo (indicado en la clasificación de suelos), reduciendo los esfuerzos por contacto en el suelo de fundación y generando un efecto de membrana tensionada, transfiriendo la carga desde un área débil a una zona más estable. En suelos blandos, como el caracterizado en este proyecto, reduce los problemas de resistencia a la tensión y las fallas por resistencia al corte. Adicional a lo anterior, disminuye los espesores de materiales en las capas superiores, para este caso en el material de lleno que combina a la geocelda (PAVCO, 2012).

Teniendo en cuenta que la subrasante fue clasificada como una arcilla de baja plasticidad, y los límites de Atterberg establecidos, se aplica la metodología de Giroud-Han para la determinación del espesor de lleno para la geocelda, como se muestra en la tabla N. 16 y cuyas especificaciones técnicas se encuentran al finalizar el documento.

Tabla 16. Cálculo de espesor de diseño para una geocelda con lleno en subbase granular tipo C.

DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
Presión de inflado	590	psi
Carga de eje	80	kN
Carga de rueda	40	kN
Numero de repeticiones para conformación	720123	
CBR subrasante	3.22	%
CBR subbase granular tipo C	30	%
Factor de capacidad	5.71	tabla PAVCO para pavimentos con geomalla
Profundidad máxima ahuellamiento (ASSHTO)	75	mm

DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
Cohesión de la subrasante (fc)	30	kPa
Ahuellamiento permitido	60	mm
Radio de contacto (r)	0.15	m
Módulo de proporción (re)	2.99	
Capacidad de la subrasante	20.57	kN
¿soporta la carga del tráfico?	no soporta la carga de trafico	
factor de corrección (módulo j para mallas triaxiales)	0.348	
Módulo de estabilidad de la abertura (j)	0.105	m
NC	5.71	para pavimentos con geomalla
Iteraciones	1.224615771	0.213926584
h iterativo	0.282	
h (espesor)	0.282	

Nota. Cálculo del espesor del lleno requerido, en subbase granular tipo C, para el refuerzo con geocelda.

A fin de mejorar la respuesta estructural de la geocelda y brindar una superficie cómoda para el tránsito vehicular, se empleó la fórmula de IVANNOV, para estimar el espesor de subbase granular tipo C sobre la geocelda diseñada en la tabla N. 16, incorporando una geomalla biaxial de resistencia 19 KN/m. Los valores de LCR se tomaron mediante la lectura en la figura N. 13 de LCR en función de CBR, para una resistencia de 19 KN/m.

Tabla 17. Cálculo de espesor de diseño sobre la geocelda con lleno en subbase granular tipo C, para garantizar el soporte del tráfico.

DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
Módulo equivalente (MR diseño)	10500.00	
Presión de inflado	590	Psi
Carga de eje	80	kN
Carga de rueda	40	kN
Numero de repeticiones para conformación	720123	
CBR subrasante	3.22	%
Módulo resiliente subrasante	4830	Psi
CBR subbase granular	30	%
Módulo resiliente subbase granular	14800	Psi
Factor de capacidad	5.71	Tabla PAVCO para pavimentos con geomalla
Profundidad máxima ahuellamiento (ASSTHO)	75	Mm
Cohesión de la subrasante (FC)	30	kPa
Ahuellamiento permitido	60	Mm
LCR	1.36	
Factor de seguridad	1.15	
LCR diseño	1.18	

DESCRIPCIÓN	VALORES	OBSERVACIONES
Radio de carga (a)	0.15	M
Relación de módulos de las capas inferior y superior	1.565	
Capacidad de la subrasante	20.57	kN
¿Soporta la carga del tráfico?	Sí soporta la carga de trafico	
h1	0.30	

Nota. Cálculo del espesor del lleno requerido, en subbase granular tipo C, para el refuerzo con geomalla.

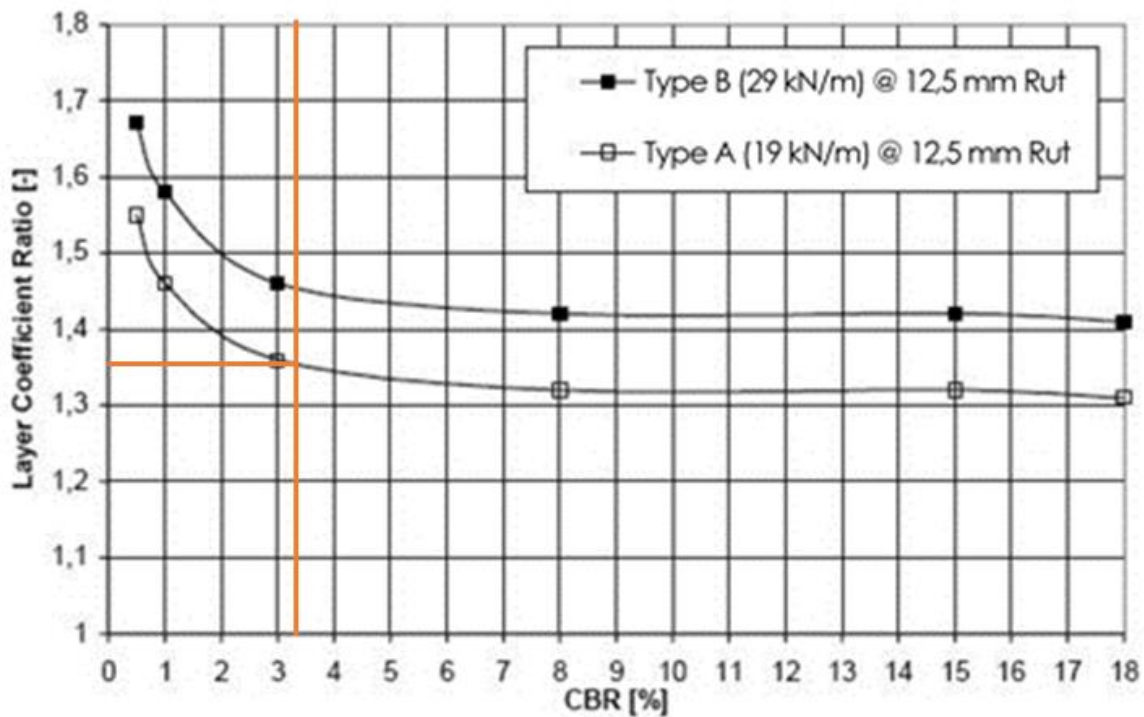


Figura 12. Estimación de LCR en función del CBR de diseño

Fuente. Propia.

7. Análisis de resultados

A fin de conocer el aporte estructural de la capa reforzada con los diseños descritos en el capítulo 6, se verificaron los esfuerzos de deformación vertical y horizontal por los criterios de ahuellamiento y fatiga respectivamente, mediante el uso del método racional a través del software DEPAV y la metodología descrita por el manual de geosintéticos de PAVCO (PAVCO, 2012).

7.1 Estructura sin refuerzo

La estructura sin refuerzo se diseñó mediante la aplicación de la ecuación (2) y los valores de referencia son los siguientes:

- Numero estructural de la subrasante según metodología de la ASSHTO 93 (4.16)
- Modulo resiliente de la subrasante calculado en el capítulo anterior 337.47 Kg/cm².
- Modulo resiliente de la subbase granular tipo C contemplada para lleno⁶ 1040.54 Kg/cm².
- Relación de Poisson (ν) de la subrasante 0.45 (PAVCO, 2012).
- Relación de Poisson (ν) de la subbase granular 0.40 (PAVCO, 2012)
- Espesor de lleno obtenido a partir de la ecuación (2), descrito en la tabla N. 11

Resultados del análisis											
Archivo											
Descripción del proyecto: Vía Carurú (Estructura no reforzada)											
Sistema de carga					Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta			
Radio de las ruedas (cm)		10.80			A Bajo una rueda simple			Exportar resultados a Excel (csv)			
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)		32.40			B Bajo una de las ruedas de la carga						
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)		5.594			C Al centro de la carga						
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.											
Número de capas: 2											
No.	E (kgf/cm ²)	ν	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	1.040E+03	0.40	0.00	5.180E+00	B	5.598E+00	A	909.0	B	-83.9	C
Continua			81.00	-2.692E-01	C	1.744E-01	C	-229.0	C	368.0	C
2	3.375E+02	0.45	81.00	6.873E-03	B	1.744E-01	C	-229.0	C	492.0	C
Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)											
99.72											
Radio de curvatura (m)											
32.55											
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)											
3245.9											
Salir y descartar los resultados											

Figura 13. Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Fuente. Propia.

⁶ Gráfico para determinar el coeficiente estructural (a3) o módulo de la subbase granular en función del CBR. ASSTHO Guide for designing of pavement structures

7.2 Estructura reforzada con geomalla triaxial

Para analizar el aporte estructural a la subrasante a partir del tendido de una geomalla triaxial (cuyas propiedades se encuentran descritas en el capítulo de resultados), se calculará el número estructural de la misma, según la metodología descrita por el manual de geosintéticos (PAVCO, 2012), como se muestra en la ecuación (10).

$$SN_{gr} = a_3 * LCR * D_3 * m_3 \quad (10)$$

Para este caso, el valor de coeficiente de capa de subbase granular corresponde al valor de 0.10 según el manual de diseño de geosintéticos PAVCO para capas (a_3) y un valor de 1 para coeficientes de drenaje de calidad buena, según la misma guía (PAVCO, 2012). El valor del espesor en pulgadas es el calculado en la tabla N. 15 y el coeficiente LCR determinado a partir del CBR de la subrasante es el obtenido en la figura N. 13. De esta forma, el número estructural obtenido con la incorporación de la geomalla es el que se muestra a continuación:

$$SN_{gr} = 0.10 * 1.36 * 8 * 1$$

$$SN_{gr} = 1.09 < 4.16$$

Lo anterior indica que esta alternativa de mejoramiento no permitirá soportar las cargas de tránsito estimadas a un periodo de diseño de diez años, por lo cual se debe recalculer el espesor del material granular en función del LCR a fin de mantener el número estructural calculado en la figura N. 12 (4.16) mediante la aplicación de la ecuación (10), como se muestra a continuación.

$$4.16 = 0.10 * 1.36 * D * 1$$

$$30.58 \text{ in} \cong 31 \text{ in} = D$$

Ajustando el número estructural por las aproximaciones del espesor de material granular a 0.77m se obtiene que el número estructural por el aporte estructural de la geomalla triaxial es superior al número estructural requerido para el número de ejes equivalentes proyectados.

$$NS_{gr} = 0.10 * 1.36 * 31 * 1$$

$$SN_{gr} = 4.21 > 4.16$$

7.3 Estructura reforzada con geocelda y geomalla biaxial

Para determinar el aporte estructural de la subrasante reforzada con geoceldas, se empleó el método racional a través del software DEPAV y cuya metodología se describe en el manual de diseño de geosintéticos (PAVCO, 2012).

Para tales fines se calculó el MIF (Modulus Improvement Factor) el cual establece la relación entre el módulo de un material granular confinado con geocelda y un material no confinado. Se utiliza para analizar el comportamiento esfuerzo deformación de una estructura de pavimento y determinar el módulo de la capa confinada dentro de las celdas, mediante la ecuación (11).

$$MIF = \frac{E_{reforzado}}{E_{sinrefuerzo}} \quad (11)$$

$$MIF = \frac{14800 \text{ psi}}{4830 \text{ psi}} = 3.06$$

Este factor aplica para la zona confinada y a partir de él se determina el módulo modificado de la capa de soporte, como se establece en la ecuación (12).

$$E_{mod} = \frac{H1 * MIF * E + (H2 * E)}{H} \quad (12)$$

Donde, H1 es el espesor de la zona totalmente confinada adicionando dos centímetros estimados sobre la zona confinada (según recomendación de la guía), H2 es el espesor de la zona no confinada, E es el Módulo de resiliencia del material de llenado y H el espesor total de la capa (PAVCO, 2012). La ecuación (12) se resuelve de la siguiente forma

$$E_{mod} = \frac{28.2cm * 3.06 * 4830 \text{ psi} + (30cm * 14800)}{58.2cm}$$

$$E_{mod} = 21961.34 \text{ psi}$$

Adicional a lo anterior se contemplan dos centímetros subyacentes a la geocelda y se considera bajo el efecto del confinamiento, por lo tanto, la capa de subrasante en este caso, sufre una modificación en el módulo (PAVCO, 2012).

$$E_{mod} = \frac{2cm * 3.06 * 4830 \text{ psi} + (58.2cm * 14800 \text{ psi})}{58.2}$$

$$E_{mod} = 15307.89 \text{ psi}$$

Resultados del análisis

Archivo											
Descripción del proyecto		Vía Carurú									
Sistema de carga Radio de las ruedas (cm) <input type="text" value="10.80"/> Distancia entre los centros de las ruedas (cm) <input type="text" value="32.40"/> Presión de contacto de las ruedas (kg/cm²) <input type="text" value="5.594"/>		Posición del valor máximo para una carga <input type="radio"/> A Bajo una rueda simple <input type="radio"/> B Bajo una de las ruedas de la carga <input type="radio"/> C Al centro de la carga									
		<input type="button" value="Gráficos de respuesta"/> <input type="button" value="Exportar resultados a Excel (csv)"/>									
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.											
Número de capas: <input type="text" value="4"/>											
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)		Compresión			
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	1.040E+03	0.40	0.00	5.160E+00	5.598E+00	886.0	B		-62.9	C	
	<i>Continua</i>		30.00	2.631E-01	1.101E+00	-336.0	C		817.0	B	
2	1.544E+03	0.40	30.00	3.549E-02	1.101E+00	-336.0	C		655.0	B	
	<i>Continua</i>		58.00	-6.169E-01	2.886E-01	-331.0	C		490.0	C	
3	1.076E+03	0.40	58.00	-3.712E-01	2.886E-01	-331.0	C		527.0	C	
	<i>Continua</i>		60.00	-4.201E-01	2.733E-01	-353.0	C		548.0	C	
4	3.396E+02	0.45	60.00	1.703E-02	2.733E-01	-353.0	C		739.0	C	3.5206E+05 2.800
Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)				101.07							
Radio de curvatura (m)				33.22							
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)				3357.8							
								<input type="button" value="Salir y descartar los resultados"/>			

Figura 14. Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Fuente. Propia.

Conforme a lo descrito en la figura 15 se concluye que el uso de geocelda con una capa adyacente de 0.30cm de subbase granular tipo C, no es suficiente para soportar el número de ejes simples acumulados de 8.2 T, diseñados a un periodo de diez años, por lo cual se refuerza la interfaz subbase granular tipo C con la superficie de la geocelda, con una geomalla biaxial de 19 KN/m que permitirá soportar el número de ejes equivalentes de diseño, antes de la falla.

8. Resultados

De acuerdo con los diseños propuestos para el mejoramiento de la capacidad de soporte de la subrasante en estudio, se presentan los resultados obtenidos y las comparaciones correspondientes, de la siguiente forma:

8.1 Optimización de la subrasante a partir de la separación y refuerzo de suelos con geotextil

Para la subrasante con baja permeabilidad se propone la incorporación de un geotextil tejido que cumpla funciones de refuerzo con una resistencia a la tensión superior a 12540 N y resistencia ultima (método tira ancha sentido transversal) superior a 37kN/m, con función de separación ya que el CBR de la subrasante se encuentra entre el 1% y el 3.5%. Adicional a lo anterior un lleno en subbase granular Tipo C de 0.50m, cuya caracterización se encuentra en las especificaciones técnicas del INVIAS artículo 320-13, capítulo 3-Afirmados, sub bases y bases. En las tablas N. 18 y 19 se encuentran las especificaciones técnicas del material granular y el geotextil respectivamente.

Tabla 18. Requisitos de los agregados de subbases granulares

CARACTERISTICA		NORMA DE ENSAYO INV	SUBBASE GRANULAR TIPO C
Dureza	Desgaste en la máquina de los ángeles (gradación a), máximo (%)	e-218	50
	Degradación por abrasión en el equipo microdeval, máximo (%)	e-238	-
Durabilidad	Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	e-220	
	*Sulfato de sodio		12
	*Sulfato de magnesio		18
Limpieza	Limite líquido, máximo (%)	e-125	25
	Índice de plasticidad, máximo (%)	e-125 y e-126	6
	Equivalente de arena, mínimo (%)	e-133	25
	Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	e-211	2
Resistencia del material (f)	CBR%: Porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo.	e-148	30

Tabla 19. Especificaciones técnicas MARV (valor mínimo promedio rollo) geotextiles tejidos.

PROPIEDADES		NORMA	UNIDAD	TR3000
Propiedades mecánicas	Método GRAB	ASTM D4632		
	Resistencia a la tensión		N(lb)	1870 (421)
	Elongación		%	10
	Método tira ancha	ASTM D4595		
	sentido longitudinal		KN/m (lb/ft)	52 (3563)
	Elongación		%	11
	Sentido transversal	ASTM D4595	KN/m (lb/ft)	52 (3563)
	Elongación		%	10
	Método CBR resistencia al punzonamiento	ASTM D6241	KN (lb)	7.0 (1574)
	Resistencia al rasgado trapezoidal	ASTM D4533	N (lb)	610 (137)
Propiedades hidráulicas	Tamaño de abertura aparente	ASTM D4751	mm (Tamiz)	0.425 (40)
	Permeabilidad	ASTM D4491	cm/s	4.6*10 ²
	Permitividad	ASTM D4491	s	0.42
	Tasa de flujo	ASTM D4491	l/mln/m ²	1238
Propiedades físicas	Espesor	ASTM D5199	mm	1.1
	Resistencia UV @500 hr	ASTM D4355	%	>70
	Rollo ancho	Medido	m	3.85
	Rollo largo	Medido	m	100
	Rollo área	Calculado	m ²	385
Función del geotextil	Refuerzo			x
	Separación			x
	Estabilización			x

Nota. Tabla de geotextiles tejidos PAVCO.

El mejoramiento propuesto para esta alternativa de mejoramiento de la capacidad de soporte de la subrasante se ilustra en la figura 16.

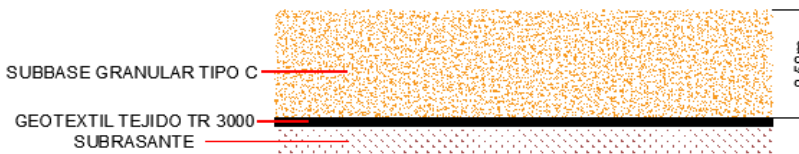


Figura 15. Mejoramiento de subrasante mediante la incorporación de geotextil y material granular de mejoramiento.

Fuente. Propia.

8.2 Optimización de la subrasante a partir de la incorporación de geomalla triaxial

La geomalla triaxial se incorpora como un elemento rígido que provee a la estructura estabilidad al producir un mayor confinamiento por el entrelazamiento de las partículas, lo cual no solo aumenta la vida útil de la estructura, sino también una disminución representativa en los espesores de conformación.

La geomalla está fabricada con una lámina perforada de polipropileno, orientada en tres direcciones equilaterales, permitiendo un alto grado de dirección molecular. Las propiedades que contribuyen al desempeño de una capa mecánicamente estabilizada incluyen las siguientes características.

- 4 cm de distancia entre costillas paralelas
- 1.2 cm de profundidad a media costilla
- 1.1 cm de ancho a mitad de costilla
- Forma rectangular de costilla
- Forma triangular de costilla
- 93% de eficiencia en unión
- 3 kg-cm/grad de estabilidad de apertura
- 225 kN/m de rigidez radial a baja deformación
- 100% de resistencia a degradación química
- 100% de resistencia a la luz ultravioleta e intemperismo

Acompañado de la incorporación de la geomalla triaxial se propone un mejoramiento en subbase granular tipo C, que posee las especificaciones descritas en la tabla N. 18 (requisitos de los agregados de subbases granulares). El diseño propuesto para esta alternativa de mejoramiento de la capacidad de soporte de la subrasante (insuficiente en la validación del aporte estructural) se ilustra en la figura 17 y el diseño corregido a partir de la verificación del aporte estructural a partir del método desarrollado en el subcapítulo 7.2 (estructura reforzada con geomalla triaxial) se muestra en la figura N. 18.

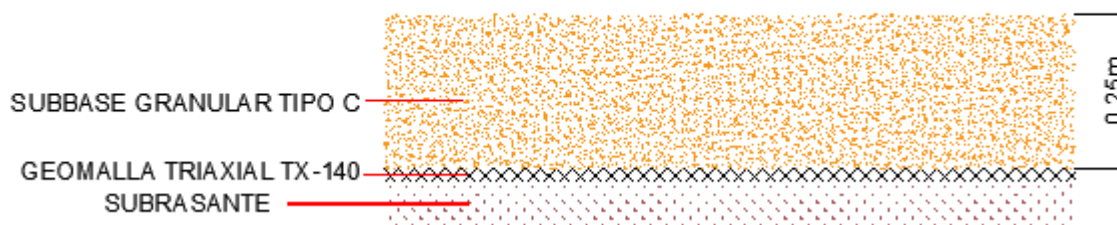


Figura 16. Mejoramiento de subrasante mediante la incorporación de geomalla triaxial y material granular de mejoramiento.

Fuente. Propia.

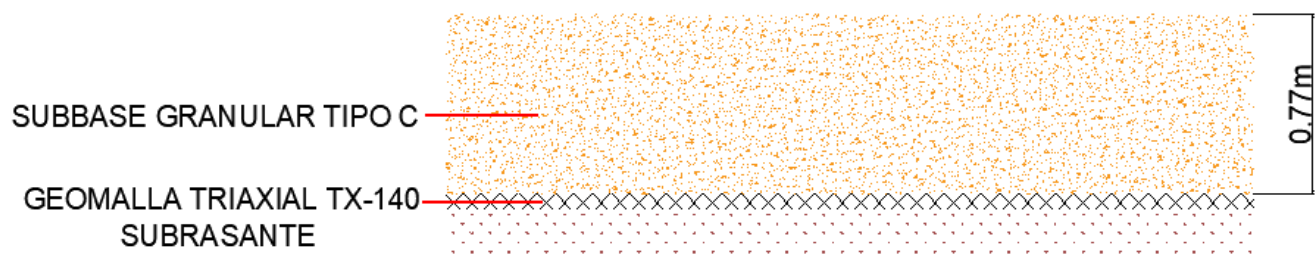


Figura 17. Mejoramiento de subrasante mediante la incorporación de geomalla triaxial y material granular de mejoramiento.

Fuente. Propia.

8.3 Optimización de la subrasante a partir de la incorporación de geocelda y geomalla biaxial.

Para el aumento de la capacidad de soporte de la subrasante se propone estabilizarla con subbase granular tipo C (descrito en la tabla N. 18), confinado en geoceldas cuya especificación técnica se encuentra descrita en la tabla N. 20.

Tabla 20. Propiedades Geocelda 445-150

PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	VALOR
Resistencia a la tensión en el punto de fluencia valor mínimo (+/-3%)	ASTM d6693	KN/m	22
Resistencia a la tensión en el punto de rotura valor mínimo (+/- 3%)	ASTM d6693	KN/m	16
Resistencia en la soldadura valor mínimo (+/- 7%)	USACE gl-86-19 iso 13426-1 método b	N	2325
Material	-		hdep virgen
Densidad	ASTM d1505	g/cm3	0.945 - 0.96

Nota. PAVCO. Tabla geosintéticos

Adicional a lo anterior se propone el tendido de una geomalla biaxial de resistencia 19 kN/m en la interface subbase granular y subbase granular confinada en geoceldas (requerimientos descritos en la tabla N. 20), cuyas características se encuentran descritas en la tabla N. 21.

Tabla 21. Propiedades Geomalla biaxial coextruida

PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	VALOR	
			DM	DT
Resistencia a la tensión 2% deformación (sl/st)	ASTM D6637	KN/m	11	11
Resistencia a la tensión 5% deformación (sl/st)	ASTM D6637	KN/m	21	21
Resistencia a la tensión pico (sl/st)	ASTM D6637	KN/m	30	30
Eficiencia en los nodos	GRI-GG2-05	%		
Rigidez flexural	ASTM D6637	mg-cm		
Tamaño de abertura (sl/st)	MEDIDO	mm	40	40

Adicional a lo anterior se propone el tendido de un geotextil que cumpla con la función de separación entre el material confinado y la subrasante, a fin de mitigar la migración de finos entre estas y permitir el flujo de agua. El mejoramiento propuesto para esta alternativa de mejoramiento de la capacidad de soporte de la subrasante se ilustra en la figura 19.

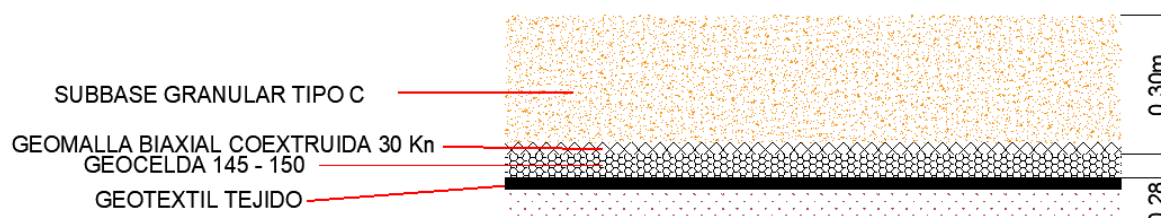


Figura 18. Mejoramiento de subrasante mediante la incorporación de geomalla, geocelda y material granular de mejoramiento.

Fuente. Propia.

8.4 Valoración económica

A continuación, se presenta la evaluación económica de cada una de las propuestas de optimización de la capacidad portante de la subrasante, descritas anteriormente. Es necesario resaltar que estos precios pueden presentar variación según incrementos anuales y traslados al lugar de construcción.

Tabla 21. Presupuesto para la optimización de la subrasante a partir de la separación y refuerzo de suelos con geotextil.

ACTIVIDAD	UN	PRECIO UNT	LONG	ANCHO	H	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Replanteo general	M2	\$ 580	1034	5.60	-	5790.4	\$ 3,358,432.00

ACTIVIDAD	UN	PRECIO UNT	LONG	ANCHO	H	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	M3	\$ 4,578	1034	5.60	0.10	579.04	\$ 2,650,845.12
Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	M3	\$ 30,070	1034	5.60	0.10	579.04	\$ 17,411,732.80
Nivelación y compactación de subrasante	M2	\$ 1,105	1034	5.60	-	5790.4	\$ 6,398,392.00
Geotextil tr3000 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	M2	\$ 7,480	1034	6.60	-	6824.4	\$ 51,046,512.00
Subbase granular clase c (SBG C) (suministro, extendido manual, humedecimiento y compactación)	M3	\$ 106,446	1034	5.60	0.50	3474.24	\$ 369,818,951.04
TOTAL							\$ 450,684,864.96

Nota. Listado de precios tope INVIAS.

Tabla 22. Presupuesto para la optimización de la subrasante a partir de la incorporación con geomalla triaxial TX 140.

ACTIVIDAD	UN	PRECIO UNT	LONG.	ANCHO	H	CANT	VALOR TOTAL
Replanteo general	M2	\$ 580	1034.00	5.60	-	5790.4	\$ 3,358,432.00
Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	M3	\$ 4,578	1034.00	5.60	0.10	579.04	\$ 2,650,845.12
Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	M3	\$ 30,070	1034.00	5.60	0.10	579.04	\$ 17,411,732.80
Nivelación y compactación de subrasante	M2	\$ 1,105	1034.00	5.60	-	5790.4	\$ 6,398,392.00

ACTIVIDAD	UN	PRECIO UNT	LONG.	ANCHO	H	CANT	VALOR TOTAL
Geomallas con fibras continuas de multifilamentos de poliéster de alta tenacidad (IDU et sección 342-11 trafico t4 - t5, resistencia ultima > 75kN/m) y/o similar. suministro e instalación.	M2	\$ 15,533	1034.00	6.60	-	6824.4	\$ 9,599,238.67
ACTIVIDAD	UN	PRECIO UNT	LONG.	ANCHO	H	CANT	VALOR TOTAL
Subbase granular clase c (SBG C) (suministro, extendido manual, humedecimiento y compactación)	M3	\$ 106,446	1034.00	5.60	0.25	1737.12	\$ 184,909,475.52
TOTAL							\$ 224,328,116.11

Nota. Listado de precios tope INVIAS.

Tabla 23. Presupuesto para la optimización de la subrasante a partir de la incorporación de geomalla biaxial con geoceldas.

ACTIVIDAD	UN	PRECIO UNT	LONG.	ANCHO	H	CANT	VALOR TOTAL
Replanteo general	M2	\$ 580	1034.00	5.60	-	5790.4	\$ 3,358,432.00
Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	M3	\$ 4,578	1034.00	5.60	0.10	579.04	\$ 2,650,845.12
Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	M3	\$ 30,070	1034.00	5.60	0.10	579.04	\$ 17,411,732.80
Nivelación y compactación de subrasante	M2	\$ 1,105	1034.00	5.60		5790.4	\$ 6,398,392.00
Geocelda hdpe perforada, altura 15 cm (suministro e instalación).	M2	\$ 35,459	1034.00	6.60		6824.4	\$ 21,913,307.41

ACTIVIDAD	UN	PRECIO UNT	LONG.	ANCHO	H	CANT	VALOR TOTAL
Geomallas con fibras continuas de multifilamentos de poliéster de alta tenacidad (IDU et sección 342-11 trafico t4 - t5, resistencia ultima > 75kN/m) y/o similar. suministro e instalación.	M2	\$ 15,533	1034.00	6.60		6824.4	\$ 9,599,238.67
Subbase granular clase c (SBG C) (suministro, extendido manual, humedecimiento y compactación)	M3	\$ 106,446	1034.00	5.60	0.26	3184.72	\$ 339,000,705.12
Geotextil T2400 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	M2	\$ 6,250	1034	6.60	-	6824.4	\$ 51,046,512.00
TOTAL							\$ 422,245,960.53

Nota. Listado de precios tope INVIAS.

9. Conclusiones

El estudio geotécnico clasificó la subrasante como una arcilla de baja plasticidad (CL), conformada principalmente por suelo arenoso-arcilloso de color habano claro a café claro, sin evidencias de nivel freático a una altura de 1.50m de exploración. Así mismo, se determinó que el CBR de diseño es de 3.22%, lo cual exige que se integre al diseño un geotextil con funciones de separación, de forma que impida la migración de finos hacia la subrasante y viceversa, el índice de consistencia se encuentra en un valor promedio de 0.72 lo cual define un suelo plástico blando. Por lo anterior, y teniendo en cuenta los esfuerzos a los que será sometida esta subrasante en un periodo de diez años, se plantearon tres alternativas para el mejoramiento de la capacidad portante del suelo a través de la implementación de geotextiles, geomallas y geoceldas.

Después de comparar los espesores de diseño para una estructura sin refuerzo y para una reforzada con geomalla, se logró concluir que, aunque la geomalla triaxial brinda gran aporte estructural a la subrasante por el confinamiento de material que produce en las aberturas y la mitigación de fallas por deslizamiento lateral, no es suficiente para la resistencia a tracción y compresión que demanda el tránsito de diseño, a menos de que se aumente el espesor al mismo que se calculó en la estructura sin refuerzo. Es decir, para que la respuesta estructural de la geomalla triaxial frente a deformaciones por fatiga y ahuellamiento sea la suficiente para el número de repeticiones estimadas, es necesario incorporar otras alternativas como el uso de materiales granulares de mejor desempeño, reducción del periodo de diseño, aumento del espesor en el material granular planteado, utilización de geotextiles de alto módulo, incorporación de geomallas con resistencias más altas, combinación de otros tipos de geosintéticos, planteamiento de estructuras complementarias (placa huella), entre otros.

La incorporación de geotextil cumple principalmente con la función de separación, lo cual evita que materiales finos ingresen a la subrasante y al mismo tiempo permite el paso del agua. Sin embargo, las propiedades físicas y mecánicas del geotextil no permiten que se cumpla (según las solicitaciones del diseño) la función de refuerzo, ya que los esfuerzos inducidos son mayores al aporte estructural hacia la subrasante, adicional a esto, se refleja un aumento considerable del espesor de subbase granular tipo C requerida (0.50), lo cual impacta en los costos de ejecución.

Por esta razón, fue necesario plantear el mejoramiento de la capacidad portante de la subrasante con el extendido de material confinado de 0.28m en una geocelda de resistencia a la tensión al 2% de 11 kN/m, una capa superior de 0.30m de subbase granular tipo C con las mismas propiedades del material confinado y en la interfaz de estas dos capas una geomalla biaxial de resistencia 19 kN/m. Adicional a lo anterior un tendido en geotextil con funciones de separación entre la subrasante y el material confinado a fin de impedir la migración de finos de una capa a otra y permitir el flujo del agua. Esta es la alternativa que genera mayor aporte estructural a la subrasante.

10. Recomendaciones

En otras etapas de este proyecto, es necesario evaluar materiales de impermeabilización sobre los mejoramientos propuestos a fin de impedir la saturación de los mismos y por ende daños en la estructura. Así como un diseño geométrico que permita el adecuado drenaje de las aguas superficiales, evitando daños en la estructura propuesta.

En otras etapas de este proyecto se requiere evaluar otras combinaciones de geosintéticos que permitan mejorar las condiciones estructurales y funcionales de los mejoramientos planteados, a fin de mejorar la respuesta a la falla por fatiga y ahuellamiento aumentando la vida útil de la vía. Adicional a una evaluación y diseño hidráulico que contemple la incorporación de sistemas de drenaje que eviten el aumento en la humedad de la subrasante ya que se trata de una arcilla de baja compresibilidad y su potencial expansivo depende de la humedad a la que se encuentre expuesta.

11. Bibliografía

- Ambrosio, R. O. (08 de 07 de 2018). *Geosintéticos en carreteras*. Recuperado el 03 de 11 de 2020, de <https://es.slideshare.net/rociolgamatosambros/geosinteticos-en-carreteras>
- ASSHTO LRFD. (2002). *American Association of state Highway and transportation officials*. Washington DC: Bridge Design Specifications.
- Beltran, C. A. (2013). *Ventajas de la utilización de geosintéticos para el refuerzo de pavimento en la carrera 7 estación transmilenio museo nacional*. Bogotá D.C.
- Chagui, R. (27 de 11 de 2019). *CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA*. Recuperado el 01 de 12 de 2020, de <https://www.senado.gov.co/index.php/prensa/lista-de-noticias/546-de-todas-las-vias-terciarias-con-las-que-cuenta-colombia-el-94-esta-en-mal-estado#:~:text=En%20Colombia%20existen%20142.000%20kil%C3%B3metros,las%20zonas%20rurales%20del%20pa%C3%ADs.>
- Cuzcano, J. G. (2018). *Aplicación de geosintéticos para mejorar la capacidad portante de la Carretera Nincaca-Huachón, Departamento de Pasco, 2018*. Lima: Escuela profesional de Ingeniería Civil.
- Departamento Nacional de Planeación, subdirección territorial de inversiones publicas. (2018). *Proyectos TIPO, Soluciones ágiles para un nuevo país*. Recuperado el 1 de 11 de 2020, de Mejoramiento de vías terciarias - vías de tercer orden: <https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/viasterciarias/ptviasterciarias.pdf>
- GEOMATRIX. (2017). *Guía de manejo e instalación de geoceldas para sistemas de soporte de cargas*. Recuperado el 01 de 11 de 2020, de Aplicación de Geoceldas CONFICELL LS: http://g-tech.geomatrix.co/uploads/1470756879_Gua_de_instalacin_geoceldas_soporte_de_carga.pdf
- Geosoft PAVCO. (2009). *Manual de diseño con GEOSINTÉTICOS*. Bogotá D.C.: Zetta Comunicadores S.A.
- Guerra, F. (01 de 07 de 2019). *RAZON PUBLICA*. Recuperado el 26 de 09 de 2020, de <https://razonpublica.com/asi-estan-las-carreteras-colombianas/>
- INVIAS. (2008). *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos*. Bogotá.
- INVIAS. (s.f.). *Capítulo 3. Sub base granular artículo 320-13*. Recuperado el 1 de 11 de 2020, de <http://gerconcesion.co/invias2013/320%20SUB-BASE%20GRANULAR.pdf>

- Jose Contreras, D. Z. (8 de Enero de 2009). *Análisis térmico de geosintéticos utilizados en la rehabilitación de pavimentos* . Recuperado el 3 de Noviembre de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/772/77211342010.pdf>
- JULIÁN VIDAL, R. O. (03 de 2002). *MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS FINOGRANULARES*. Recuperado el 08 de 10 de 2020, de <file:///F:/TRABAJOS/EDWIN/957-Texto%20del%20art%C3%ADculo-2962-1-10-20120619.pdf>
- Lopez, M. A. (2019). *Evaluar la construcción de un pavimento rígido empleando una geomalla triaxial para su viabilidad técnica, económica e impacto ambiental en la Av. Circunvalación TUPAC AMARU-CHAUPIMARCA-PASCO*. Lima.
- Muñoz, W. R. (2015). *Evaluación de la capacidad portante de los suelos de fundación de la Ciudad universitaria-Universidad Nacional de Cajamarca*. Recuperado el 1 de 11 de 2020, de <http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1427/TESIS%20WILFREDO%20FERNANDEZ%20%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- NACIONAL, D. D. (2018). *PROYECTO TIPO PARA MEJORAMIENTO DE VIAS TERCARIAS-VIAS DE TERCER ORDEN*. BOGOTÁ: INVIAS, ANI.
- Nicole Almendarez, J. R. (2017). *Diseño de pavimentos flexibles con refuerzo de geomalla triaxial utilizando la metodología Giroud-Han: Caso de aplicación en Honduras* . Recuperado el 1 de 11 de 2020, de http://www.laccei.org/LACCEI2017-BocaRaton/student_Papers/SP495.pdf
- Nicole Santos, J. R. (2017). *Diseño de pavimentos flexibles con refuerzo de geomalla triaxial utilizando la metodología Giroud-Han: Caso de aplicación en Honduras*. 15 *LACCEI International Multi-Conference for engineering, Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education"*, (pág. 10). Boca Raton FL, United States.
- OFFICIALS, A. A. (s.f.). *AASHTO 93. GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES*. WASHINGTON D.C.
- PAVCO. (06 de 2012). *9º MANUAL DE DISEÑO CON GEOSINTETICOS*. Obtenido de <http://www.geosoftpavco.com/manualvirtual/document.pdf>
- RONDON QUINTANA HUGO ALEXANDER, R. L. (2015). *PAVIMENTOS, MATERIALES, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO 1º EDICIÓN*. BOGOTÁ: ECOE EDICIOE.
- TEXDELTA. (14 de 01 de 2020). *Geoceldas. Funciones y aplicaciones principales*. Recuperado el 1 de 11 de 2020, de [NONWOVENS TEJIDOS TECNICOS: https://texdelta.com/blog/geoceldas-funciones-y-aplicaciones-principales/](https://texdelta.com/blog/geoceldas-funciones-y-aplicaciones-principales/)