

**ESTUDIO DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO DE CONCRETO REFORZADO CON GEOCELDAS (CRG) EN VÍAS Terciarias. CASO DE ESTUDIO VÍA Terciaria EL AGRADO – MUELLE GUARANÍ, EN EL DEPARTAMENTO DEL HUILA.**

**WILSON ALDEMAR SANTANDER DERAZO**

Universidad Santo Tomás  
Facultad de Ingeniería Civil  
Bogotá, D.C., Colombia  
Enero, 2025

**ESTUDIO DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO DE CONCRETO REFORZADO CON GEOCELDAS (CRG) EN VÍAS Terciarias. CASO DE ESTUDIO VÍA Terciaria EL AGRADO – MUELLE GUARANÍ, EN EL DEPARTAMENTO DEL HUILA.**

**WILSON ALDEMAR SANTANDER DERAZO**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

**Magíster en Infraestructura Vial**

Director(a):

**Ing. Carlos Eduardo Torres Romero**

Codirector:

**Ing. William Alfonso Piñerez Bettin**

Codirector:

**Ing. Joshua Schmalbach**

Universidad Santo Tomás  
Facultad de Ingeniería Civil  
Bogotá, D.C., Colombia  
Enero, 2025

## AGRADECIMIENTOS

*A mi madre, María Marleny Derazo Díaz, mujer abnegada, visionaria, inteligente y admirable, quien con su fortaleza y amor inquebrantable sembró en mí el coraje para soñar y la determinación para alcanzar lo que parecía distante. Madre, tu ejemplo ha sido el faro que guía mis pasos en este vasto océano de desafíos, a ti dedico este triunfo, reflejo de tus sacrificios y enseñanzas.*

*A Dios, al universo y a la vida, fuerzas misteriosas e infinitas, agradezco la sinfonía de oportunidades, aprendizajes y retos que han marcado este sendero. Con gratitud profunda, celebro este logro, que no es sino un peldaño más en la escalinata de metas que, con esperanza y empeño, me propongo conquistar.*

## RESUMEN

En el presente trabajo de grado se estudió un tramo de 11,8 kilómetros de la vía terciaria El Agrado – Muelle Guaraní, localizada en el departamento del Huila, la cual se pavimentó en el año 2021 con concreto reforzado con geoceldas – CRG –, para esto se auscultó la estructura superficial del pavimento CRG en el tramo en mención, aplicando la metodología de inspección visual de pavimentos articulados desarrollada por la Universidad de Medellín 2010; cabe resaltar que, el CRG está catalogado como una tecnología de mejoramiento vial eficiente, convirtiéndose en una alternativa sostenible en comparación con otras técnicas constructivas de mejoramiento tradicional en vías terciarias como la placa huella; además, en este trabajo se incluyó una descripción del proceso constructivo, diseño, análisis de precios unitarios y las ventajas del uso del pavimento CRG. Lo anterior, con el fin de brindar información útil al lector para su aplicación y toma de decisiones en futuros proyectos que estén enfocados en el uso de nuevas tecnologías para solucionar la problemática nacional respecto al mal estado de transitabilidad en el que se encuentra la red terciaria, aportando al crecimiento y progreso de la economía nacional y regional, toda vez que, la red terciaria tiene un papel primordial, pues constituye la infraestructura de transporte de mayor extensión en el territorio nacional.

**Palabras Claves:** Mejoramiento, Vías Terciarias, Concreto Reforzado Con Geoceldas, Placa Huella, Auscultación.

### **Abstract**

In this degree work we studied an 11,8 kilometer section of the El Agrado - Muelle Guaraní tertiary road, located in the department of Huila, which will be paved in 2021 with geocell reinforced concrete - GRC -, for this purpose the surface structure of the pavement of the section in question was surveyed, applying the methodology of visual inspection of articulated pavements developed by the University of Medellin 2010; It should be noted that the GRC is classified as an efficient road improvement technology, becoming a sustainable alternative compared to other traditional construction techniques of improvement in tertiary roads such as the footprint plate; in addition, this work included a description of the construction process, desing, unit price analysis and the advantages of using the GRC pavement. The above, in order to provide useful information to the reader for its application and decision making in future projects that are focused on solving the national problem regarding the poor state of trafficability in which the tertiary network is found through the use of new technologies, contributing to the growth and progress of the national and regional economy, since the tertiary network has a key role, as it is the largest transport infrastructure in the national territory.

**Key words:** Improvement, Tertiary Roads, Geocell Reinforced Concrete, Footprint, Improvement, Auscultation.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Planteamiento del Problema.....</b>	<b>16</b>
<b>3. Justificación .....</b>	<b>19</b>
<b>4. Objetivos.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1. Objetivo General.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>22</b>
<b>5. Alcance .....</b>	<b>23</b>
<b>6. Marcos de Referencia .....</b>	<b>24</b>
<b>6.1. Marco Contextual .....</b>	<b>24</b>
6.1.1. Localización de la Vía.....	25
6.1.2. Datos del Municipio .....	25
6.1.3. Área de Influencia.....	26
<b>6.2. Marco Normativo .....</b>	<b>27</b>
<b>6.3. Marco Conceptual .....</b>	<b>28</b>
6.3.1. Geosintéticos.....	28
6.3.2. Concreto Hidráulico .....	32
6.3.3. Proyectos de Mantenimiento.....	32
6.3.4. Proyectos de Mejoramiento .....	32
6.3.5. Proyectos de Rehabilitación.....	33
6.3.6. Construcción de Vía Nueva .....	33
6.3.7. Vías Terciarias.....	33
6.3.8. Pavimento Rígido .....	34
6.3.9. Placa Huella .....	35
6.3.10. Pavimento en Concreto Reforzado con Geoceldas – CRG .....	37
6.3.11. Diseño Infraestructura Vial con Geoweb (CRG).....	42
6.3.11.1. Diseño geométrico .....	43
6.3.11.2. Diseño de pavimento .....	44
6.3.11.3. Diseño hidráulico .....	46
<b>6.4. Marco Teórico.....</b>	<b>49</b>
6.4.1. Auscultación - Inspección Visual.....	50
6.4.2. Métodos Para la Auscultación Visual del CRG .....	51
6.4.2.1. Pasos Básicos Iniciales. ....	51
6.4.2.2. Realizar un Inventario de Deterioros (Primer Paso). ....	52
6.4.2.2.1 Deformaciones.....	52
6.4.2.2.2. Desprendimientos.....	53
6.4.2.2.3. Desplazamientos. ....	54
6.4.2.2.4. Fracturamiento.....	55
6.4.2.2.5. Otros Deterioros.....	57

6.4.3. Índice de Condición del Pavimento, ICP (Segundo Paso).....	58
6.4.3.1. Identificación del Tipo y Grado de Influencia de los Deterioros por Clase, FC. .	58
6.4.3.2. Cálculo del Área Total (AT) y del Porcentaje de Área Afectada, %Aa.....	59
6.4.3.2.1. Determinación de los factores de penalización. ....	60
6.4.3.2.1. Cálculo del Porcentaje de Área Equivalente Afectada, %Ae .....	61
6.4.3.2.2. Cálculo del Factor de Penalización por Área Afectada, FA. ....	62
6.4.3.2.3. Cálculo de los Índices (ICE Y ICF).....	62
6.4.3.2.4. Cálculo del Índice de Condición del Pavimento, ICP.....	62
6.4.3.3. Escala del Índice de Condición del Pavimento, ICP.....	63
6.4.4. Herramientas Para el Desarrollo de la Auscultación Visual del GRC .....	64
<b>7. Estado del Arte.....</b>	<b>65</b>
<b>7.1. Investigaciones acerca de pavimentos reforzados con geoceldas .....</b>	<b>65</b>
<b>7.2. Ejemplos de aplicación de Geoceldas .....</b>	<b>69</b>
7.2.1. En Colombia .....	73
<b>8. Metodología.....</b>	<b>76</b>
<b>8.1. Delimitación .....</b>	<b>76</b>
<b>8.2. Desarrollo Objetivo 1 «Recopilar los Estudios Previos y la Información Secundaria del Proyecto de Mejoramiento de la Vía El Agrado – Muelle Guarani.» .....</b>	<b>76</b>
<b>8.3. Desarrollo Objetivo 2 «Inspeccionar la Superficie de Rodadura del Pavimento CRG, en el Tramo El Agrado – Muelle Guarani, en una Longitud de 11,8 Kilómetros a partir de Auscultación Visual.» .....</b>	<b>77</b>
<b>8.4. Desarrollo Objetivo 3 «Realizar un Análisis Comparativo de los Costos Asociados a la Construcción de CRG y dos Alternativas Convencionales.» .....</b>	<b>77</b>
<b>9. Estudios Previos e Información Secundaria del Proyecto de Mejoramiento de la Vía El Agrado – Muelle Guarani.....</b>	<b>79</b>
<b>9.1. Especificación particular – Convenio INVIAS 1826 - 2020.....</b>	<b>79</b>
9.1.1. Materiales a utilizar .....	79
9.1.2. Equipos .....	79
9.1.3. Ejecución de los trabajos .....	80
9.1.4. Tramo de prueba .....	81
9.1.5. Proceso Constructivo.....	82
<b>9.2. Artículo «CRG, Concreto reforzado con geoweb vía El Agrado, Huila, Colombia», Schmalbach, 2019 .....</b>	<b>86</b>
9.2.1. Generalidades .....	86
9.2.2. Estudios Realizados .....	87
9.2.2.1. CBR de la Subrasante .....	87
9.2.2.2. Tránsito.....	88
9.2.3. Aplicación del Método Racional .....	93
9.2.4. Equipo .....	99
9.2.5. Información constructiva .....	99
9.2.5.1. Instalación de Geoweb:.....	100
9.2.5.2. Concreto: .....	101

9.2.5.3. Cunetas y manejo de aguas pluviales: .....	104
9.2.6. Antes y Después.....	105
9.2.7. Beneficios para la Región .....	106
9.2.8. Análisis Proyecto de Mejoramiento de la vía El Agrado – Muelle Guaraní con GRC	106
<b>10. Estudio de la Condición Superficial del Pavimento, en el Tramo El Agrado – Muelle Guaraní, en una Longitud de 11,8 Kilómetros a Partir de Auscultación Visual.....</b>	<b>108</b>
10.1. Formato Utilizado .....	108
10.2. Patologías Encontradas.....	109
10.3. Procesamiento de Datos.....	115
10.4. Resumen Inspección Visual de Deterioros.....	117
10.5. Análisis de los resultados.....	118
10.6. Cálculo del ICP – Índice de Condición del Pavimento .....	123
<b>11. Análisis comparativo de costos de construcción de las alternativas .....</b>	<b>126</b>
<b>12. Análisis Multicriterio .....</b>	<b>135</b>
12.1. Resultados Análisis Multicriterio .....	138
<b>13. Discusiones y Conclusiones .....</b>	<b>139</b>
<b>14. Lista De Referencias .....</b>	<b>141</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Red vial colombiana</i> .....	12
Figura 2. <i>Composición de la red vial Nacional</i> .....	13
Figura 3. <i>Administración de la red vial nacional</i> .....	13
Figura 4. <i>Panorama de vías terciarias en Colombia</i> .....	16
Figura 5. <i>Localización Municipio El Agrado</i> .....	25
Figura 6. <i>Área de Influencia</i> .....	27
Figura 7. <i>Geomallas</i> .....	30
Figura 8. <i>Geoceldas</i> .....	31
Figura 9. <i>Estructura Geoceldas</i> .....	31
Figura 10. <i>Sección transversal pavimento rígido</i> .....	35
Figura 11. <i>Corte Longitudinal</i> .....	36
Figura 12. <i>Corte Transversal</i> .....	37
Figura 13. <i>Proceso Constructivo Placa Huella</i> .....	37
Figura 14. <i>Pavimento en concreto reforzado con geoceldas – GRC</i> .....	39
Figura 15. <i>Esquema de la Berma - Cuneta de un pavimento con GRC con bordillo (Tipo 1)</i> ....	48
Figura 16. <i>Esquema de la Berma - Cuneta de un pavimento con GRC sin bordillo (Tipo 2)</i> ....	48
Figura 17. <i>Localización de la obra</i> .....	87
Figura 18. <i>INVIAS clasificación de camión tipo</i> .....	91
Figura 19. <i>Análisis de Modelo Racional</i> .....	96
Figura 20. <i>Estructura de pavimento en concreto reforzado con geoceldas</i> .....	99
Figura 21. <i>Tramo de Prueba pavimento en concreto reforzado con Geoweb, CRG</i> .....	99
Figura 22. <i>Instalación de Geoweb</i> .....	100
Figura 23. <i>Instalación de Geoweb (2)</i> .....	101
Figura 24. <i>Reporte de concretos</i> .....	102
Figura 25. <i>Fundido de concretos</i> .....	102
Figura 26. <i>Fundido de concreto en la Geoceldas</i> .....	103
Figura 27. <i>Fundido de concreto en las Geoceldas (2)</i> .....	103
Figura 28. <i>Procedimiento para dar el acabado al concreto</i> .....	104
Figura 29. <i>Acabado de concreto en la Geocelda</i> .....	104
Figura 30. <i>Descoles en GRC</i> .....	105
Figura 31. <i>Prueba Piloto Pavimento en Concreto reforzado con Geoweb</i> .....	105
Figura 32. <i>Auscultación visual en tramos de 100 metros a lo largo de la vía terciaria en estudio</i> .....	108
Figura 33. <i>Juntas longitudinales</i> .....	111
Figura 34. <i>Juntas con severidad baja</i> .....	111
Figura 35. <i>Desgaste superficial</i> .....	112
Figura 36. <i>Ahuellamiento de radio ancho (1)</i> .....	113
Figura 37. <i>Ahuellamiento de radio ancho (2)</i> .....	114
Figura 38. <i>Fracturamiento</i> .....	114
Figura 39. <i>Gráfica de área con deterioros acumulados por tramos</i> .....	116
Figura 40. <i>Gráfica de área con deterioros por tramos</i> .....	117
Figura 41. <i>Distribución espacial del estado de la vía</i> .....	123
Figura 42. <i>Distribución espacial del índice ICP de la vía</i> .....	125

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Inventario de deterioros</i> .....	52
Tabla 2. <i>Deformaciones</i> .....	53
Tabla 3. <i>Desprendimientos</i> .....	54
Tabla 4. <i>Desplazamientos</i> .....	55
Tabla 5. <i>Fracturamientos</i> .....	56
Tabla 6. <i>Otros deterioros</i> .....	57
Tabla 7. <i>Tipo y factor de influencia por clase</i> .....	59
Tabla 8. <i>Factores de penalización para el índice de Condición Estructural, ICE</i> .....	60
Tabla 9. <i>Factores de penalización para el índice de Condición Funcional, ICF</i> .....	60
Tabla 10. <i>Matriz para el cálculo del ICP</i> .....	63
Tabla 11. <i>Nivel de servicio y categorías de acción del ICP</i> .....	63
Tabla 12. <i>Dimensiones Geocelda tipo GW30V</i> .....	87
Tabla 13. <i>Formato de campo – Conteos vehiculares</i> .....	89
Tabla 14. <i>Tránsito Diario</i> .....	90
Tabla 15. <i>Composición vehicular y TPDs</i> .....	91
Tabla 16. <i>Clasificación de ejes por tipo de vía</i> .....	92
Tabla 17. <i>Valores típicos para Concreto hidráulico</i> .....	93
Tabla 18. <i>Valores típicos para materiales de subbase y base</i> .....	93
Tabla 19. <i>Valores típicos para suelos</i> .....	94
Tabla 20. <i>Valores de la relación de Poisson adoptados</i> .....	94
Tabla 21. <i>Valores de los parámetros para el cálculo del esfuerzo de tensión del concreto</i> .....	98
Tabla 22. <i>Formato para la evaluación del pavimento reforzado con geoceldas</i> .....	109
Tabla 23. <i>Tipo de deterioros en el pavimento CRG</i> .....	110
Tabla 24. <i>Resumen inspección visual de deterioros</i> .....	118
Tabla 25. <i>Cálculo del ICP vía El Agrado – Muelle Guaraní</i> .....	123
Tabla 26. <i>Presupuesto alternativa 1 - placa huella con precios INVIAS 2024-1</i> .....	126
Tabla 27. <i>Presupuesto alternativa 2 - CRG con pecios INVIAS 2024-1</i> .....	127
Tabla 28. <i>Presupuesto alternativa 3 – Pavimento rígido con pecios INVIAS 2024-1</i> .....	128
Tabla 29. <i>Presupuesto alternativa 1 - Placa huella con precios ICCU 2024</i> .....	128
Tabla 30. <i>Presupuesto alternativa 2 - CRG con pecios ICCU 2024</i> .....	129
Tabla 31. <i>Presupuesto alternativa 3 – Pavimento rígido con pecios ICCU 2024</i> .....	130
Tabla 32. <i>Costos iniciales para la alternativa 1 y 2</i> .....	131
Tabla 33. <i>Costos iniciales para la alternativa 1 y 2</i> .....	131
Tabla 34. <i>Cálculo de costo total en 10 años con precios INVIAS 2024</i> .....	132
Tabla 35. <i>Cálculo de costo total en 10 años con precios ICCU 2024</i> .....	132
Tabla 36. <i>Cálculo de costo total en 10 años con precios INVIAS 2024</i> .....	132
Tabla 37. <i>Cálculo de costo total en 10 años con precios ICCU 2024</i> .....	133
Tabla 38. <i>Resumen Financiero alternativa 1 y 2</i> .....	133
Tabla 39. <i>Resumen Financiero alternativa 2 y 3</i> .....	133
Tabla 40. <i>Puntaje matriz multicriterio</i> .....	135
Tabla 41. <i>Evaluación Matriz Multicriterio</i> .....	138

## **1. Introducción**

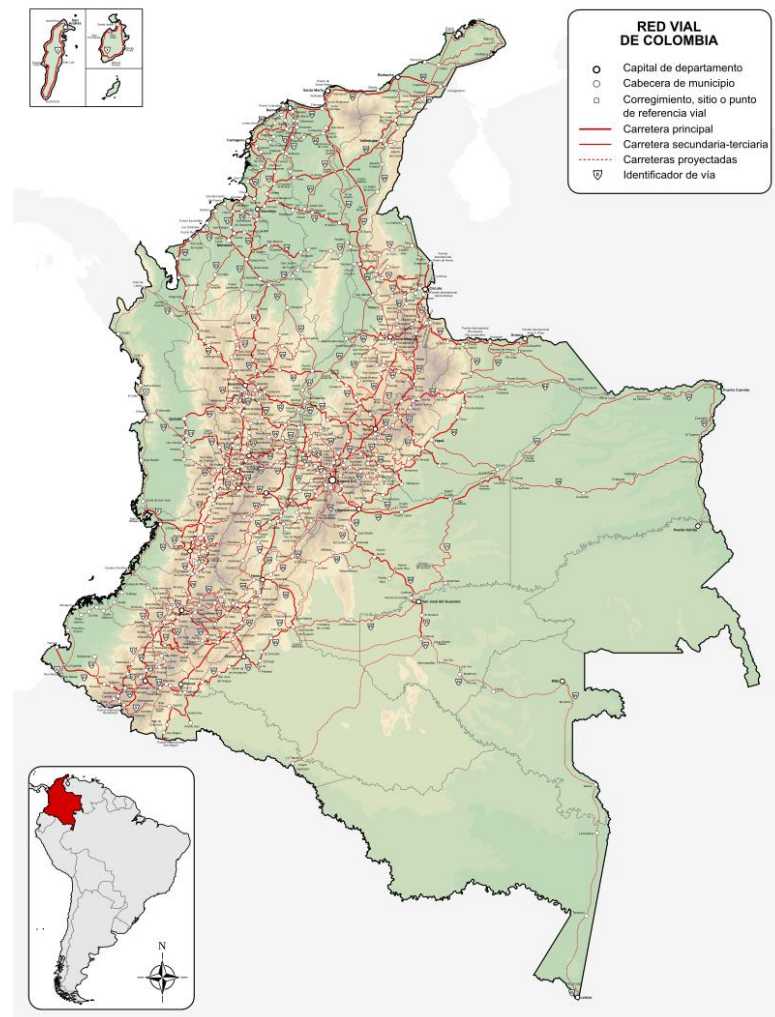
En el ámbito de la ingeniería civil, las geoceldas han emergido como una solución innovadora y eficiente para el mejoramiento de la infraestructura vial. Estas estructuras tridimensionales, fabricadas generalmente de polímeros, proporcionan una excelente capacidad de soporte y distribución de cargas, lo que las convierte en una alternativa atractiva para la construcción y rehabilitación de pavimentos. Su uso no solo optimiza el rendimiento estructural de las vías, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir la necesidad de materiales tradicionales como el concreto y el acero. En este contexto, el presente estudio se centra en la vía El Agrado – Muelle Guaraní, ubicada en el departamento del Huila, donde se ha implementado un tramo de 11,8 kilómetros pavimentado con concreto reforzado con geoceldas (CRG). Por lo tanto, este proyecto busca evaluar la efectividad de esta tecnología en el mejoramiento de vías terciarias, contribuyendo así a la solución de problemas de infraestructura vial que afectan a las comunidades regionales. Algunos de los aspectos claves por los cuales se decidió desarrollar esta investigación en esta zona se debe a razones de oportunidad para innovación tecnológica, toda vez que, el proyecto más representativo de mejoramiento de una vía terciaria en Colombia con CRG se ejecutó en la vía El Agrado – Muelle Guaraní, localizada en el departamento del Huila, lo cual podría tener un impacto más amplio en la discusión sobre el mejoramiento de las vías terciarias a nivel nacional; además, la implementación de CRG en esta zona representa una oportunidad para evaluar una tecnología que podría ofrecer soluciones sostenibles y eficientes para el mejoramiento de vías; en segundo lugar, por razones de impacto social y económico, debido a que El Agrado es un municipio donde la economía local depende en gran medida de la agricultura y otras actividades productivas. Mejorar las vías permitiría a los productores locales acceder más fácilmente a los mercados, aumentando su competitividad y mejorando su calidad de vida; por último y no menos importante, se debe a las condiciones críticas de las vías

terciarias en esta zona, porque la región enfrentaba un deterioro significativo en sus vías terciarias, lo que afectaba gravemente la movilidad y el acceso a servicios esenciales.

Dicho lo anterior, es importante, dar un vistazo a nivel general para examinar la composición y estado de la red carretera nacional, encontrando que en Colombia la red vial está compuesta por vías primarias, vías secundarias y vías terciarias, las cuales suman alrededor de 205.745 kilómetros según se puede observar en la **Figura 1**.

Figura 1.

*Red vial colombiana*

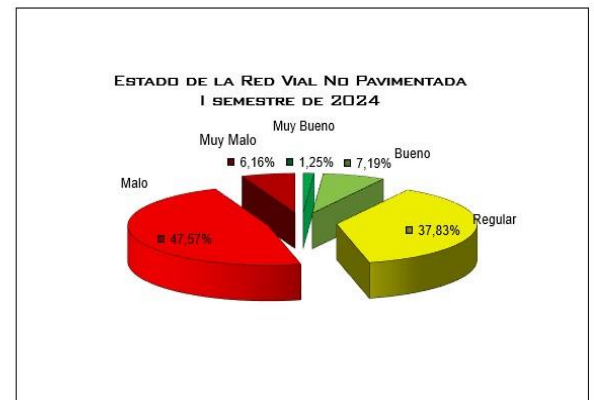
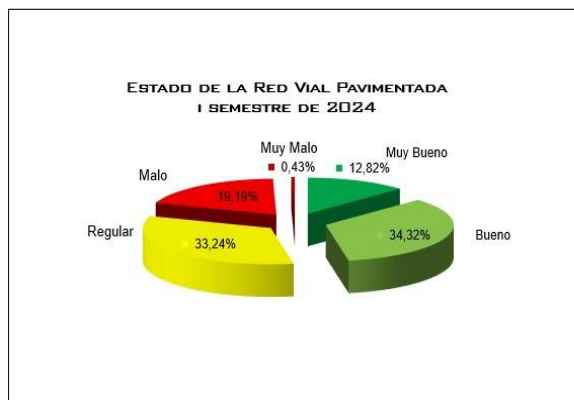


Nota. Milenio Oscuro (2024)

De los 205.745 Kilómetros de carreteras existentes, la red terciaria es la más extensa del país según el cuadro de composición de la red vial que se muestra en la Figura 2. Aunque no hay información exacta sobre su longitud debido a su ubicación en lugares remotos y la inclusión de caminos vecinales y vías privadas, según el Anuario Nacional de Transporte 2022 del Ministerio de Transporte, se estima que la red terciaria en Colombia tiene una longitud aproximada de 142.284 kilómetros. Como se observa en la Figura 3, el 70,8% (100.748 km) está bajo la responsabilidad de los municipios, el 9,8% (13.959 km) se encuentra bajo la administración departamental y el 19,4% (27.577 km) está a cargo de la nación a través del INVIAS quien le transferirá esta competencia al INVIR. (Ministerio de Transporte, 2022, p.37)

Figura 2.

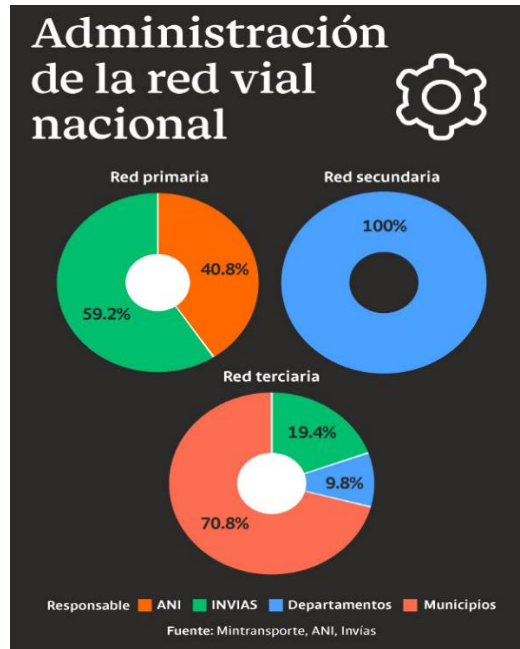
*Composición de la red vial Nacional*



Nota. INVIAS, (2024)

Figura 3.

Administración de la red vial nacional



*Nota.* Capital Inteligente, Grupo Bancolombia, (2022)

La red vial terciaria, pese a ser la más extensa, es frecuentemente opacada por grandes proyectos de la red primaria; sin embargo, estas vías son igual o más importantes que las grandes autopistas del país, ya que permiten conectar a poblaciones y territorios alejados con servicios básicos como transporte, salud, y educación, mejorando el desarrollo y la competitividad del país. (Bancolombia, 2022); no obstante, a pesar de su importancia, los recursos públicos asignados para su conservación, mejoramiento y mantenimiento con el fin de preservarlas en buen estado no son suficientes.

Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2019), una cuarta parte de todas las vías terciarias están destapadas. Aunque la falta de pavimento no necesariamente indica mala calidad; el 45,4% de estas vías está en mal estado y el 36,1% en estado regular. El Ingeniero Juan Esteban Gil, exdirector del Invias, explicó al Periódico «La República» que el 96% de estas vías están en malas condiciones y que menos de 8.000 kilómetros están pavimentados de los cuales sólo el 33,5% está en buen estado. (La República, 2019)

En ese sentido, este documento presenta un estudio de caso sobre la vía terciaria El Agrado – Muelle Guaraní, en el departamento del Huila, donde se pavimentaron 11,8 kilómetros de vía entre el Municipio de El Agrado y la Vereda Muelle Guaraní con Concreto Reforzado con Geoceldas (CRG). Esta obra fue financiada por la multinacional Enel – Emgesa y se planificó después de varias mesas de concertación entre la Gobernación del Huila; los municipios de El Agrado, Garzón, Altamira, Gigante, Paicol y Tesalia; el Ministerio de Minas y Energía; Ministerio de Agricultura y EMGESA S.A. E.S.P. Según el Grupo Informativo La Nación, el proyecto desarrollado en 2021, contribuyó con el desarrollo económico, turístico y tuvo un gran impacto social, beneficiando a una parte representativa de la comunidad del área de influencia del proyecto hidroeléctrico El Quimbo y fue ejecutado por la empresa huilense Maseq Proyectos e Ingeniería S.A.S. quienes desarrollaron obras suplementarias y complementarias relacionadas con la intervención de un puente de 40 metros sobre la Quebrada Buenavista e instalación de 7 «*Box Couvert*» y 56 alcantarillas. (La Nación, 2021)

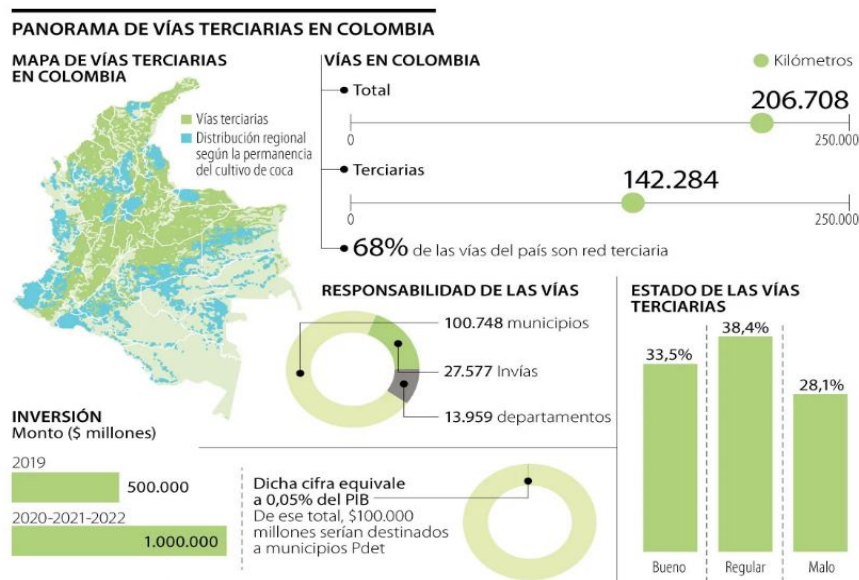
La hipótesis que se plantea es que el uso de una nueva tecnología para el mejoramiento de vías terciarias con pavimento con concreto reforzado con geoceldas, contribuirá a la solución del problema planteado en forma eficiente, eficaz y sostenible; esto debido a sus beneficios técnicos, como la distribución uniforme de cargas y la reducción de deformaciones, junto con los potenciales ahorros económicos en mantenimiento y construcción y la reducción de la huella de carbono, dado que se reduce el uso de materiales de cantera, de concreto y de acero.

## 2. Planteamiento del Problema

Según se evidencia en la Figura 4, más del 50% de las vías terciarias en Colombia se encuentran en mal y regular estado. Esta situación impacta negativamente en el desarrollo de actividades productivas, comerciales y sociales, debido al aumento en los costos de transporte de carga y pasajeros, incremento en los precios de los productos regionales y baja comercialización de estos. También conlleva pérdidas de cosechas, aumento en los tiempos de viaje que retrasan el acceso oportuno de la comunidad a servicios médicos, y la inasistencia de estudiantes a escuelas y colegios.

Figura 4.

### Panorama de vías terciarias en Colombia



*Nota.* El Inviás acelera la inversión para las carreteras terciarias en Colombia, La República, (2019)

De acuerdo con el Plan de Desarrollo Territorial (PDT 2016-2019) del Municipio de El Agrado, las vías terciarias bajo su jurisdicción presentaban una ausencia de pavimentación y se encontraban en un avanzado estado de deterioro, evidenciando deficiencias significativas en su

mantenimiento y conservación. Entre las vías terciarias destacadas en el mencionado documento se encuentran:

- Casco urbano – vereda Alto Granadillo; 25,5 Km de extensión.
- Cruce del puente sobre la Quebrada Buena Vista – Boquerón – Paicol; 8 km.
- Ramal San Antonio – El Pital – El Carmen; 12 Km de extensión.
- Ramal escuela vereda San Antonio; 2,5 Km de extensión.
- Filo de Hambre; 5,5 Km de extensión.
- Vía nacional – La Cañada; 9 Km de extensión.
- Vía nacional – Los Cocos; 12 Km de extensión.
- Ramal Los Pinos; 2,5 Km de extensión.
- Vía nacional – La Escalereta; 2,5 Km de extensión.
- El Agrado – Muelle Guarani; 12 Km de extensión.

Posteriormente, las intensas precipitaciones ocurridas en el año 2018, especialmente en el departamento del Huila, agravaron significativamente las condiciones de transitabilidad de la red vial terciaria del Municipio de El Agrado, tal como se reportó en el siguiente medio de comunicación:

*«Derrumbes, taponamientos, perdida (sic) de la banca y averías en muros y alcantarillas, son entre otras las afectaciones que viene registrando la mayor parte de la malla vial terciaria de El Agrado por cuenta de las intensas lluvias.*

*Waldina Losada Vega, alcaldesa de ese municipio admitió que la situación que se registra en buena parte de las comunidades rurales es complicada dadas las dificultades que en materia de movilidad se están registrando. En por lo menos la mitad de las vías que tiene a cargo el municipio se han presentado deslizamientos, daños y taponamientos que*

*prácticamente hicieron colapsar la capacidad de respuesta de la maquinaria que debe atender y reparar las carreteras». (La Voz de la Región, 2018)*

En la actualidad, el Municipio de El Agrado enfrenta serias dificultades de movilidad y una baja calidad en el servicio de sus vías terciarias, producto de su deteriorado estado y la presencia de sectores con restricción de tránsito. Esta situación ha derivado en un aumento considerable en los tiempos de viaje, tanto en las zonas rurales como urbanas, lo que se traduce en un incremento en los costos de operación y movilización de los vehículos que transitan por estas vías. (La voz de la Región, 2023)

Con el fin de abordar esta problemática, surge la siguiente pregunta:

**¿El Concreto Reforzado con Geoceldas (GRC) podría ser una alternativa eficiente para mejorar la condición superficial y la transitabilidad de las vías terciarias?**

### 3. Justificación

Según Transporte en Cifras (2022) del Ministerio de Transporte, el Índice de Competitividad Global (ICG), desarrollado por el Foro Económico Mundial (FEM), para 2019 respecto al componente de calidad de carreteras, Colombia ocupaba la posición 104 entre las 141 economías evaluadas. Este panorama nos muestra que Colombia presenta un gran déficit en infraestructura vial básica para desarrollar la actividad productiva, integrar al país y contribuir a la calidad de vida de la población.

Es importante reconocer los esfuerzos e inversiones realizadas por el sector público en materia de infraestructura vial. No obstante, es altamente probable que los recursos destinados a garantizar una infraestructura adecuada, especialmente para vías terciarias, continúen siendo limitados, considerando que aproximadamente el 68% de la red vial del país está constituido por este tipo de vías. Por ello, es crucial fomentar el desarrollo y la implementación de métodos constructivos de ingeniería que sean tanto eficientes como eficaces, con el fin de mejorar el estado y la transitabilidad de las vías terciarias y asegurar un acceso sostenible para el desarrollo de las comunidades a un costo razonable.

Un ejemplo representativo de estos esfuerzos es el «Documento de Cooperación» suscrito entre la Gobernación del Huila, los Municipios de El Agrado, Garzón, Altamira, Gigante, Paicol y Tesalia, El Ministerio de Minas y Energía, El Ministerio de Agricultura y la empresa EMGESA SAESP, en el marco del proyecto hidroeléctrico El Quimbo del año 2018. Este documento fue resultado de las mesas de concertación entre las partes involucradas y tenía como objetivo fortalecer la capacidad socioeconómica de los municipios mencionados, evidenciando un esfuerzo colaborativo, estableciendo compromisos específicos para mitigar los efectos sociales y económicos derivados de la construcción del proyecto hidroeléctrico, con un enfoque en el desarrollo de infraestructura vial y productivo que permita mejorar la conectividad

y el acceso de las comunidades rurales a servicios esenciales, contribuyendo al desarrollo regional y al bienestar de la población afectada.

Cabe resaltar que este proyecto recibió la aprobación de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA- la cual expidió la resolución No. 0127 del 05 de octubre de 2018 «Por la cual se incorpora la modificación (No. 002) al documento de cooperación celebrado entre la Gobernación del departamento del Huila, los municipios del Agrado, Garzón, Altamira, Gigante, Paicol y Tesalia, El Ministerio de Minas y Energía, de Agricultura y EMGESA S.A. E.S.P, del 09 de julio de 2018, a la resolución del 15 de mayo de 2009, que otorgó licencia ambiental para el proyecto hidroeléctrico El Quimbo» (sic), (Resolución 0127 , 2018). En este contexto, se desarrolló el compromiso de destinar recursos a proyectos viales que contribuyan al desarrollo y la mejora de la calidad de vida en la región.

El fundamento y la razón del desarrollo de esta investigación se sustentan en la necesidad imperiosa de que la comunidad disponga de una red de carreteras regionales mejorada en las distintas áreas rurales de sus municipios; porque, el deterioro de las vías terciarias restringe considerablemente la conectividad terrestre, lo que conlleva una serie de impactos negativos para la región. Estas restricciones incluyen:

- **Congestión vial:** La insuficiente infraestructura provoca restricciones en los pasos, dificultando el flujo continuo del tránsito.
- **Aumento de tiempo de viaje:** Las condiciones precarias de las vías y las restricciones generan demoras, incrementando el tiempo necesario para desplazarse de un lugar a otro.
- **Incremento de costos operativos:** Los retrasos y las rutas ineficientes elevan los costos de transporte y operación, afectando tanto a empresas como a individuos.

- **Impacto en la productividad y competitividad:** Las dificultades en el transporte afectan la eficiencia de las actividades económicas y disminuyen la competitividad de la región en comparación con otras áreas mejor conectadas.

En virtud de lo expuesto anteriormente y con el fin de mitigar estos problemas, resulta fundamental estudiar nuevas tecnologías que contribuyan al mejoramiento de las vías terciarias. Por lo tanto, este trabajo se enfoca en estudiar el comportamiento de la estructura superficial del CRG y cuantificar los costos asociados a la construcción de esta nueva alternativa, con el objetivo de elevar la calidad de las vías terciarias y proporcionar un servicio óptimo que facilite el acceso a los mercados; además de:

- **Disminuir tiempos de viaje y reducción de costos de transporte:** Mejorar las vías reduce los tiempos de viaje y, por ende, los costos asociados al transporte de bienes y personas.
- **Incremento de la productividad agrícola:** Con mejores vías, los productores locales pueden acceder más fácilmente a mercados más amplios, lo que incentiva la actividad económica y el desarrollo regional.
- **Mayor acceso de la comunidad rural a otros servicios básicos como la salud y educación:** Una infraestructura vial adecuada permite un acceso más rápido y seguro a servicios vitales como la atención médica y la educación, mejorando la calidad de vida de los habitantes.
- **Impulso al desarrollo social y económico:** La mejora de las vías terciarias no solo favorece la movilidad y el comercio, sino que también atrae inversiones y fomenta el desarrollo sostenible de las comunidades locales.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo General**

Evaluar el índice de condición superficial del pavimento en concreto reforzado con geoceldas de la vía El Agrado – Muelle Guaraní.

### **4.2. Objetivos Específicos**

- Recopilar los estudios previos y la información secundaria del proyecto de mejoramiento de la vía El Agrado – Muelle Guaraní, donde se incluya la descripción del proceso constructivo.
- Inspeccionar la superficie de rodadura del pavimento CRG, en el tramo El Agrado – Muelle Guaraní, en una longitud de 11,8 kilómetros a partir de auscultación visual.
- Realizar un análisis comparativo de los costos asociados a la construcción de CRG y dos alternativas tradicionales.

## **5. Alcance**

La metodología del trabajo será mixta, cualitativo – cuantitativo, ya que el análisis de la información secundaria, la auscultación y demás investigaciones son de naturaleza exploratoria, basadas en la recolección y el análisis de información (Método cualitativo).

Por otra parte, en cuanto al cálculo del índice de condición del pavimento CRG y el análisis comparativo en costos de construcción de las alternativas se usarán fórmulas estadísticas y matemáticas para cuantificar el problema de investigación (Método cuantitativo).

## **6. Marcos de Referencia**

### **6.1. Marco Contextual**

Si bien el problema que atañe a la investigación de este documento se presenta en todo el territorio nacional, por tratarse de vías terciarias, este proyecto pretende estudiar casos en los que se haya mejorado la superficie de rodadura mediante la construcción de pavimento de concreto reforzado con geoceldas.

Algunos de los proyectos en Colombia en los que se ha utilizado el sistema de concreto reforzado con Geoceldas – CRG – son los siguientes:

- Vía de acceso a Marina Barú, en Cartagena, departamento de Bolívar, en una longitud de 8 kilómetros; año de ejecución 2013.
- Vía de acceso a Centro de Disposición Logística (CEDI) ARA en Gachancipá, departamento de Cundinamarca; se utilizó CRG de 10 centímetros de altura con un concreto de 40 MPa, en un tramo de 720 metros; año de ejecución 2017.
- Vía El Agrado – Muelle Guaraní, departamento del Huila, en una longitud de 11,8 kilómetros; con geocelda de 10 centímetros de altura y concreto de 24 MPa; año de ejecución 2021.
- Vía a la vereda Tuaneca Arriba, Municipio de Toca, departamento de Boyacá, en una longitud de 300 metros; año de ejecución 2023.

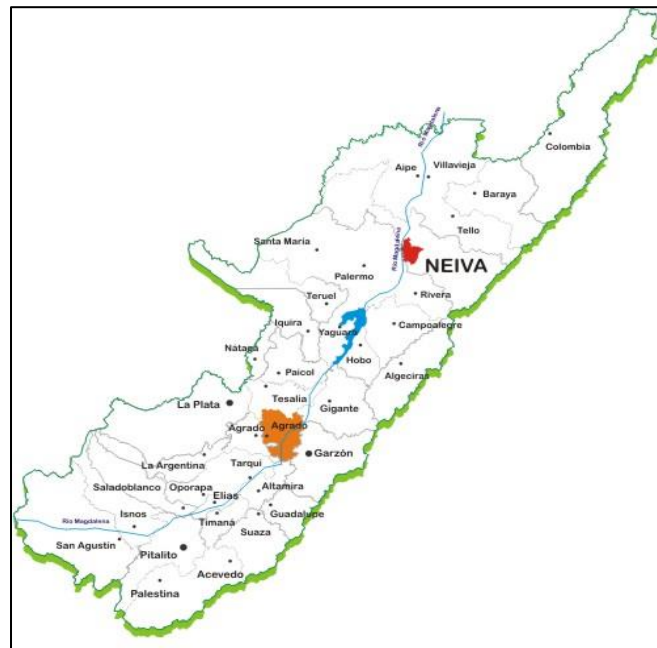
De los proyectos mencionados, se tomará como referencia el más representativo en la longitud del tramo intervenido, siempre que nos permita analizar mejor el proceso constructivo y el comportamiento de este pavimento. En ese sentido, el proyecto a evaluar se encuentra localizado en el Municipio de El Agrado, en el departamento del Huila.

### 6.1.1. Localización de la Vía

El Agrado, es un municipio situado en el subcentro del departamento del Huila, en la región andina de Colombia. Yace sobre el valle del Magdalena sobre las estribaciones de la región montañosa comprendida por accidentes orográficos de la Serranía de Las Minas y el Cerro de Pan de Azúcar. (Wikipedia, s.f). En la Figura 5 se presenta la localización del Municipio El Agrado.

Figura 5.

*Localización Municipio El Agrado*



*Nota.* El Agrado, Red Huila, (s.f)

### 6.1.2. Datos del Municipio

Algunos datos importantes sobre el Municipio El Agrado, tomados de (Alcaldía Municipal de El Agrado, Huila, 2022) son:

- Superficie: Total 286 km<sup>2</sup>
- Altitud media: 838 m.s.n.m.

- Población: 8.459 habitantes
- Gentilicio: Agraduno, agraduna, agradunos
- Temperatura media: 24 °C
- Distancia de referencia: 136 Km desde Neiva. (El Agrado, Red Huila, s.f)

Para dar cumplimiento con los compromisos de conectividad de las poblaciones afectadas por el llenado del Embalse El Quimbo, además de garantizar la conectividad entre las veredas y la movilidad del transporte de carga y de los habitantes de la zona, se establece lo relacionado con el suministro de un ferry adaptado para transporte de leche y otros usos, incluido el transporte de vehículos, de tal manera que se garantice la comunicación que prestaba el puente de Los Cocos. El diseño de los muelles corresponde a estructuras tipo «rampa» que utilizará la infraestructura existente (vías y/o caminos veredales), y sus características técnicas permitirán su uso para actividades turísticas, piscícolas y transporte de carga por medio del uso del ferry del embalse.

Es entonces, donde se construye el Muelle Guarani, el cual se ubica a 11,8 km en dirección sureste desde el casco urbano del Municipio El Agrado en las coordenadas 744.817 N, 821.536 E MAGNA SIRGAS BOGOTÁ, accediendo por el predio del mismo nombre. El Muelle es vehicular y aprovecha el tramo de vía que se verá inundado por el embalse El Quimbo hasta la cota 720 msnm.

### **6.1.3. Área de Influencia**

En la Figura 6 se presenta el área de influencia del proyecto

Figura 6.

*Área de Influencia*



*Nota.* Vía Perimetral entre Paicol y El Agrado, Diario del Huila, (2024)

## 6.2. Marco Normativo

A continuación, se nombran algunas de las normas que rigen lo referente al tema de este documento:

- Resolución 2483 de 2020, por la cual se adopta la Cartilla de Obras Menores de Drenajes y Estructuras Viales del Instituto Nacional de Vías – INVIAS.
- Ley 715 de 2001, artículo 74 y 76, y artículo 5 del Decreto 1682 de 2013, a través del cual se constituye el documento «Mejoramiento de vías terciarias mediante el uso de placa huellas», DNP, 2016.
- «Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella», INVIAS, 2015.
- GRC (Concreto reforzado con Geoweb), Séptima rueda de innovación del INVIAS, (en estado de preselección).

- Convenio PLAN 51/50 – Colombia Rural, firmado entre la Agencia de Renovación del Territorio y 29 municipios.
- Decreto 1961 del 15 de noviembre de 2023, expedido por el presidente de la república, a través del cual se crea el Instituto Nacional de Vías Regionales (INVIR), adscrito al Ministerio de Transporte.
- Convenio 0587 de 2003, celebrado entre la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Nacional de Vías, por el cual se expide el Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles.
- Convenio 0587 de 2003, celebrado por la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Nacional de Vías, por el cual se expide el Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos.
- Normas ASTM «Propiedades del material»: D1505, D5199, D1603, D4218, D6693, D4437, D3895, D5397, D1693, D5321, D1004, D4833, D5596, D5885, D5721, D7238,
- Especificación IDU 241-18, Código: ET -IC-01 «Geoceldas»
- Especificación IDU 412-18, Código: ET -IC-01 «Mejoramiento de la subrasante con Geoceldas»

### **6.3. Marco Conceptual**

En el presente marco conceptual se abordan conceptos técnicos indispensables para una mejor comprensión de este documento, se hace un recuento de conceptos básicos los cuales estarán interrelacionados entre sí, siguiendo una secuencia lógica:

#### **6.3.1. Geosintéticos**

El prefijo «geo» sugiere que su aplicación tiene que ver con la tierra, el suelo o las rocas, aportando o modificando propiedades naturales del suelo, y el sufijo sintético denota un material o producto que se obtiene a partir de procesos industriales más no directamente de la naturaleza; por lo tanto, la palabra geosintético se refiere a un producto que está hecho de

materiales poliméricos, es decir, moléculas grandes compuestas de largas cadenas de moléculas más pequeñas llamadas monómeros; los polímeros sintéticos se fabrican generalmente a partir de compuestos de petróleo. En el campo de la infraestructura vial, específicamente se han utilizado para cumplir con las funciones de separación, filtración, refuerzo, rigidización, drenaje, barrera y protección; algunas aplicaciones para proyectos viales son las siguientes: estabilización de la subrasante, reducción de la contaminación de materiales de capas diferentes en la estructura del pavimento, disminución del contenido de humedad en las capas de subbase y de base, estabilización de la capa de base, mitigación de agrietamiento reflectante en carpetas de asfalto y disminución de problemas asociados con la presencia de arcillas expansivas en la subrasante. (Zornberg, 2019)

Los geosintéticos pueden sustituir soluciones y materiales tradicionales para la construcción, como el cemento, la grava, la cal, la arena y la arcilla, entre otros. Dependiendo de la fuente, la clasificación de los geosintéticos puede variar; no obstante, podemos clasificarlos en:

- Geotextiles: tejidos y no tejidos.
- Geomallas: axiales y uniaxiales.
- Mantos de control de erosión.
- Geomembranas.
- Geotubos.
- Geoceldas.
- Geoespuma.
- Geocumpuestos: Geodrenes, revestimientos geosintéticos de arcilla (GCL's) o mantos geosintéticos de cemento (GCCM's)

**a. Geomallas.** Son elementos compuestos por filamentos, que pueden ser extruidos (una sola pieza), tejidos o soldados por procesos de calor térmico o adhesión, que forman un entramado donde las aberturas son más grandes que las dimensiones de los componentes y que en combinación a un elemento de relleno ofrece el trabajo de tensión. Su función es aumentar la capacidad de carga de un terreno, esto se logra por medio de la distribución de cargas, resultado de la interacción o fricción a la que es sometido, comercialmente pueden encontrarse de tres tipos, uniaxial, biaxial y multiaxial. (Justiniano Cancha, 2022). En la Figura 7 se presenta el detalle de una geomalla.

Figura 7.

*Geomallas*



*Nota*

. Tres ventajas del uso de las Geomallas de poliéster en el refuerzo de capas asfáltica, Geomatrix, (s.f)

**b. Geoceldas.** Según se observa en la Figura 8 y Figura 9, los sistemas de geoceldas son estructuras tridimensionales dispuestas en forma de panal, permeables, a base de polímeros (sintéticos o naturales), interconectadas, que encierran completamente un tipo de relleno, proporcionando confinamiento a toda la estructura, previendo la extensión lateral del

material de relleno. Cuando se le aplican cargas verticales a este sistema, las tensiones circunferenciales en las paredes de las celdas y las resistencias de las celdas adyacentes se movilizan. Estas tensiones y resistencias reducen la deformación lateral del material de relleno. Como resultado, la rigidez incrementa generando que la capa de material de relleno y la geocelda actúen como una matriz rígida y distribuya las cargas verticales del tráfico sobre un área más grande que la del suelo de la subrasante. (Escárraga & Mejía, 2019, p.21)

Figura 8.

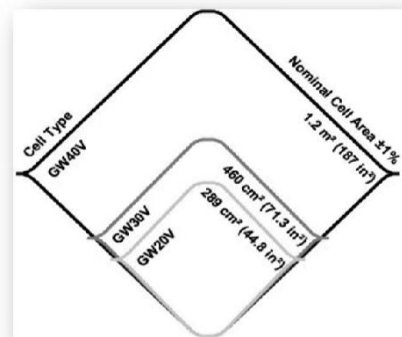
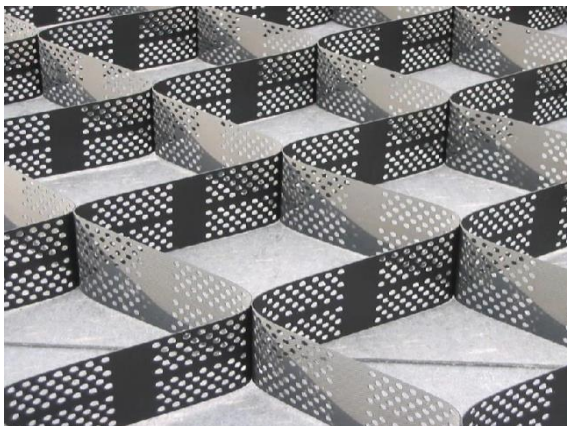
*Geoceldas*



*Nota.* Geoceldas para refuerzo de vías, Wavin, (s.f)

Figura 9.

*Estructura Geoceldas*



*Nota.* Geoceldas para refuerzo de vías, Presto Geosystems, (s.f)

### **6.3.2. Concreto Hidráulico**

El concreto está conformado por una mezcla homogénea de agregados, material cementante, adiciones suplementarias, agua, aditivos y eventualmente adiciones complementarias. En el concreto hidráulico el material aglutinante se conoce como cemento hidráulico y los agregados están conformados por agregado grueso (gravas) y agregado fino (arenas); materiales que mezclados adecuadamente proporcionan resistencia y durabilidad en las estructuras. La buena resistencia del concreto depende generalmente de sus características en estado plástico como la manejabilidad, la consistencia, la plasticidad, grado de exudación, segregación y la relación agua/cemento, pero además intervienen otros elementos de gran importancia como son la granulometría, la textura superficial, la forma, la resistencia, la rigidez y el tamaño máximo de los agregados, el tipo y la calidad del cemento, la calidad del agua y aditivos que se empleen durante la fabricación. Para la evaluación de sus propiedades se realizan diferentes ensayos mecánicos tales como resistencia a la compresión y resistencia a la flexión entre otros. (Mongua & Suárez, 2022, p.33)

### **6.3.3. Proyectos de Mantenimiento**

Son proyectos cuyo objetivo es mantener las condiciones de la infraestructura de transporte con el mismo nivel de servicio para el que fue diseñada y construida. El mantenimiento puede ser rutinario, si se realiza en intervalos de tiempo menores de un año; periódico, si corresponde a intervalos variables para recuperar el deterioro causado por su uso; o de emergencia, si tiene que ver con las intervenciones originadas por daños, bloqueos o desastres de origen natural o antrópico. (Guía de Estructuración de Proyectos de Infraestructura de Transporte [INVIAS], 2022, p.15)

### **6.3.4. Proyectos de Mejoramiento**

Son proyectos que tienen por objeto mejorar las especificaciones técnicas de la infraestructura de transporte existente, o mejorar los niveles de servicio para los cuales se

concebido inicialmente. En estos casos se trata de proyectos que por condiciones especiales de demanda u otras condiciones de planificación, se hace necesario mejorar sus condiciones de servicio. (INVIASa, 2022, p.15)

### **6.3.5. Proyectos de Rehabilitación**

Son proyectos destinados a la reconstrucción de infraestructura de transporte existente, cuya condición de operación ha sufrido deterioro y por tanto su nivel de servicio es inferior al nivel para el cual fue diseñado y construido el proyecto. En este tipo de proyectos se considera la reconstrucción total o parcial de la infraestructura existente, con el fin de recuperar su nivel de servicio. (INVIASa, 2022. p.16)

### **6.3.6. Construcción de Vía Nueva**

Consiste en ejecutar los movimientos de tierra necesarios para conformar la subrasante de la vía; a partir de la cual se extienden las distintas capas del pavimento, al tiempo que se construyen las obras de arte (drenajes, taludes), los puentes, y demás obras complementarias. (INVIASa, 2022, p.16)

### **6.3.7. Vías Terciarias**

Con base en la definición registrada en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008, encontramos que dentro de la clasificación por funcionalidad las carreteras pueden ser terciarias cuando se trate de vías de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí; asimismo, si bien la red terciaria está compuesta de bajos volúmenes de tránsito, una proporción importante de este puede corresponder a vehículos pesados, de ahí que las soluciones de ingeniería deben buscar que las estructuras de mejoramiento propuestas estén orientadas a lograr menores costos en la inversión y viabilidad técnica. (Lineamientos de Política para la Gestión de la Red Terciaria, CONPES 3857, 2016, p.18)

### **6.3.8. Pavimento Rígido**

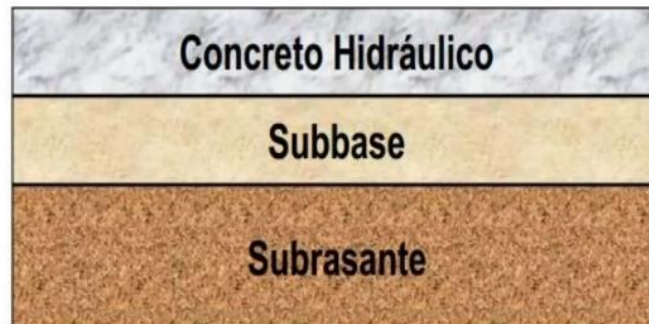
(López & García, 2020) mencionan que los pavimentos de concreto reciben el apelativo de «rígidos» debido a su naturaleza de la losa de concreto hidráulico que la constituye.

Cuando hablamos de pavimento rígido hacemos referencia a una estructura conformada por capas diseñada en función de variables que inciden en la determinación de los espesores y calidad de cada una de ellas; de acuerdo con la Figura 10, la estructura de pavimento rígido está conformada por una losa de concreto simple o armado apoyada sobre una capa de base granular o subbase granular; debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos y los distribuye y transmite a la subrasante.

**Subrasante.** La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural (cortes), o por estos con algún proceso de mejoramiento tal como sucede cuando se someten a una estabilización mecánica (terraplén) o mixtas, estabilización fisicoquímica con aditivos como el cemento Portland, la cal o el asfalto, entre otras, y básicamente es la fundación sobre la cual el pavimento se construirá. (Mongua & Suárez, 2022, p. 34)

**Subbase o Base Granular.** Las principales funciones de esta capa son las de dar soporte uniforme y constante al apoyo de losas, controlar las variaciones volumétricas de la subrasante y aumentar la capacidad de soporte de la fundación, deben cumplir con ciertas características que se estipulan en normas o especificaciones; para el caso concreto, en Colombia, el Instituto Nacional de Vías las regula mediante sus especificaciones técnicas: Especificaciones Generales de Construcción de Carretas, particularmente en el caso de la base granular el Capítulo 3 – AFIRMADOS, SUBBASES Y BASES.

Figura 10.

*Sección transversal pavimento rígido*

*Nota.* Pavimentos Flexibles y rígidos, (2012)

**6.3.9. Placa Huella**

En la cartilla de Obras Menores de Drenaje y Estructuras Viales, documento elaborado inicialmente para apoyar el programa de gobierno denominado Colombia Rural, menciona que: «La placa huella es un sistema orientado a generar condiciones de transitabilidad adecuadas (sic) para vehículos, animales y personas en tramos críticos de vías rurales. El sistema consiste en la colocación de franjas delgadas de placas de concreto separadas transversalmente a una distancia tal, que coinciden con las huellas de la circulación vehicular, con anchos en promedio de 0,90 m cada una, entre las cuales se aloja una zona central construida en concreto ciclópeo y/o piedra pegada, manteniendo unos sobre anchos externos variables en piedra pegada para garantizar el acomodamiento de la sección al ancho disponible de la vía. Sus módulos se confinan transversalmente con viguetas de concreto, tipo riostras y lateralmente por berma cunetas.»

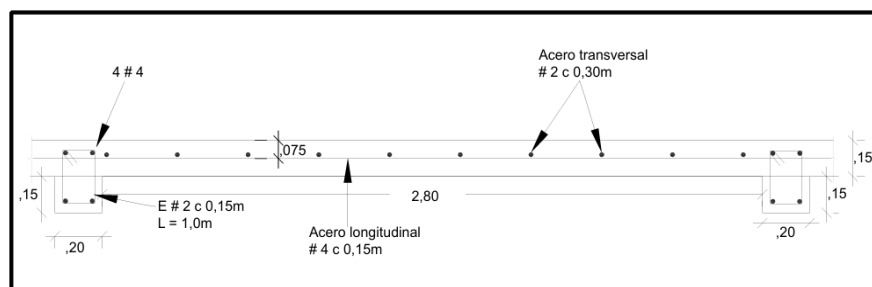
Asimismo, dadas sus características estructurales, este sistema constructivo se propone para vías con bajos niveles de tránsito, que permitan su canalización sobre las huellas de concreto reforzado; recomendando que el sistema propuesto en dicho documento sólo se use en vías con ancho de calzada inferior a 5,5 metros, velocidad de operación inferior a 30 Km/h y

que los tramos no superen 500 metros de longitud; en los casos donde las vías predominantemente son bidireccionales se sugiere que el sistema de placa huella se utilice únicamente en vías donde las restricciones propias de pendiente y ancho de vía originen velocidades inferiores a 30 Km/h y garanticen condiciones de comodidad y seguridad. (Cartilla de Obras Menores de Drenaje y Estructuras Viales, INVIASb, 2020, p.166)

Según se muestra en la Figura 11 y Figura 12, se recomienda que el espesor de la placa huella sea de 15 centímetros, con el objetivo de facilitar la construcción y asegurar un recubrimiento adecuado. En relación con el espesor de la subbase granular, se sugiere también una capa de 15 centímetros. Esto se debe a que variables como la cantidad de acero, la longitud, el ancho y el espesor de la placa huella, así como el de la riostra, no presentan una sensibilidad significativa a la rigidez de la superficie de apoyo. Este espesor es aplicable a subrasantes con un valor de CBR (*California Bearing Ratio*) igual o superior al tres por ciento (3%). Además, dicha recomendación se basa en consideraciones constructivas que buscan lograr una compactación óptima y garantizar una superficie de trabajo limpia. En caso de que el CBR sea inferior al tres por ciento (3%), se aconseja consultar a un especialista para determinar los procedimientos adecuados para el mejoramiento de la subrasante.

Figura 11.

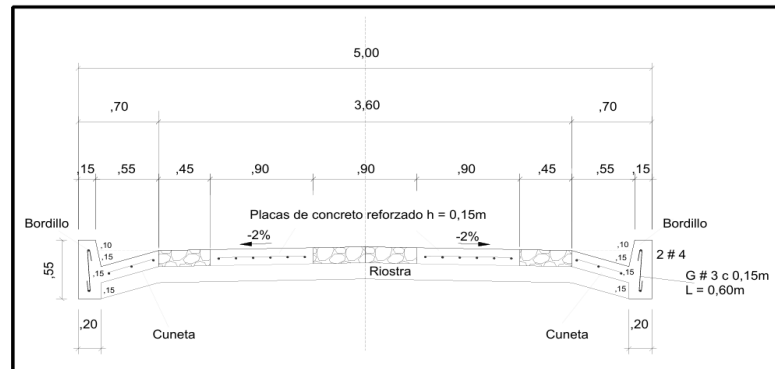
*Corte Longitudinal*



*Nota.* INVIAS, Guía de Diseño de Pavimentos con Placa Huella, 2017, p. 40.

Figura 12.

*Corte Transversal*



Nota. INVIAS, Guía de Diseño de Pavimentos con Placa Huella, 2017, p. 40.

En la Figura 13, se presenta gráficamente el proceso constructivo de una placa huella

Figura 13.

*Proceso Constructivo Placa Huella*



Nota. DNP, Mejoramiento de vías terciarias mediante el uso de placa huella, 2016, p.29

**6.3.10. Pavimento en Concreto Reforzado con Geoceldas – CRG**

Se conoce como GRC por sus siglas en inglés (*Geoweb Reinforced Concrete*), este es un sistema que combina geoceldas y concreto para crear una forma más eficiente para el mejoramiento de la infraestructura vial y de transporte.

En su artículo sobre análisis mecanicista de un pavimento con GRC, el ingeniero Schmalbach (2023) menciona que, el sistema se desarrolló por primera vez en Colombia en la década de 2000 mediante métodos empíricos, posteriormente el estudio formal del sistema comenzó en 2018 por el profesor Jie Hann.

La geocelda aporta la flexibilidad y elasticidad que el hormigón por sí solo no podría soportar, mientras que el con el hormigón aporta la resistencia necesaria para soportar cargas pesadas. La geocelda también sirve de encofrado para el hormigón, lo que hace que la instalación sea más rápida y sencilla que con otros sistemas. (Schmalbach, 2023)

En este contexto, el pavimento en concreto reforzado con geoceldas se configura como un sistema de confinamiento celular. Como se ilustra en la Figura 14, la capa de rodadura está compuesta por concreto hidráulico, cuya función principal es absorber los esfuerzos de compresión generados en la estructura de pavimento. Por su parte, la geocelda se encarga de soportar los esfuerzos de tracción.

El concreto reforzado con geoceldas es una técnica innovadora que combina las propiedades del concreto y las geoceldas para mejorar la resistencia y durabilidad de las estructuras, así como para reducir los costos y el impacto ambiental de los proyectos de construcción. En este marco teórico, exploraremos los principios fundamentales, las aplicaciones y los beneficios de esta tecnología emergente en la ingeniería civil.

Figura 14.

*Pavimento en concreto reforzado con geoceldas – GRC*



*Nota.* Geoceldas, Cidelsa (s.f)

**Fundamentos del Concreto Reforzado con Geoceldas.** El concreto reforzado con geoceldas se basa en la integración de geoceldas, estructuras tridimensionales de polímeros de alta resistencia, en la matriz de concreto. Estas geoceldas actúan como refuerzo al distribuir las cargas de manera más uniforme a lo largo de la estructura, mejorando así su resistencia a la tracción y a la fatiga. La combinación de concreto y geoceldas también permite una mayor flexibilidad y capacidad de deformación, lo que contribuye a una mejor resistencia a los movimientos del suelo y a la redistribución de esfuerzos.

**Aplicaciones del Concreto Reforzado con Geoceldas.** El concreto reforzado con geoceldas encuentra una amplia gama de aplicaciones en proyectos de ingeniería civil, incluyendo:

- **Pavimentación de carreteras y puertos:** El uso de concreto reforzado con geoceldas en pavimentos permite una mayor resistencia a la fatiga y una reducción de la deformación permanente, lo que resulta en una vida útil más prolongada y menores costos de mantenimiento.

- **Construcción de muros de contención:** Las geoceldas incrustadas en estructuras de concreto proporcionan una mayor estabilidad y resistencia a los muros de contención, permitiendo la construcción de estructuras más delgadas y económicas.
- **Mejora de suelos blandos:** La combinación de geoceldas y concreto se utiliza para estabilizar y reforzar suelos blandos, aumentando su capacidad de carga y reduciendo la sedimentación y la erosión.

**Beneficios del Concreto Reforzado con Geoceldas.** El uso de concreto reforzado con geoceldas ofrece una serie de beneficios significativos en comparación con las técnicas tradicionales de construcción, entre los que se incluyen:

- Mejora de la resistencia y durabilidad de las estructuras.
- Reducción de los costos de construcción y mantenimiento.
- Mayor flexibilidad y adaptabilidad a las condiciones del sitio.
- Menor impacto ambiental y huella de carbono.

**Desafíos y Consideraciones.** A pesar de sus numerosos beneficios, el uso de concreto reforzado con geoceldas también presenta algunos desafíos y consideraciones que deben tenerse en cuenta, como la selección adecuada de materiales, el diseño estructural y la instalación adecuada de las geoceldas para garantizar su eficacia y durabilidad a largo plazo.

#### **Funcionamiento del Pavimento de Concreto Reforzado con Geoceldas.**

- **Distribución de Cargas:** Las geoceldas, se rellenan con concreto hidráulico durante la construcción del pavimento. Estas geoceldas actúan como refuerzo al distribuir las cargas del tránsito de manera más uniforme a lo largo de la losa. Cuando un vehículo pasa sobre el pavimento, las geoceldas absorben parte de la carga y la distribuyen a una mayor área de la capa de base o subbase granular, reduciendo así la concentración de esfuerzos y minimizando el riesgo de agrietamiento y deformación.

- **Mejora de la Resistencia a la Fatiga:** La incorporación de geoceldas en el pavimento aumenta su resistencia a la fatiga al proporcionar una capa de refuerzo adicional que ayuda a resistir las tensiones cíclicas causadas por la repetición de cargas. Esto se traduce en una vida útil más prolongada del pavimento y una reducción de los costos de mantenimiento a largo plazo.
- **Reducción de la Deformación Permanente:** Las geoceldas también contribuyen a reducir la deformación permanente del pavimento, conocida como huellas de rueda o *rutting*. Al distribuir las cargas de manera más uniforme, las geoceldas ayudan a prevenir la formación de surcos y depresiones en la superficie del pavimento, lo que mejora la comodidad del viaje y la seguridad del tráfico.
- **Flexibilidad y Adaptabilidad:** El pavimento de concreto reforzado con geoceldas es altamente flexible y adaptable a una variedad de condiciones del sitio y requisitos de diseño. Las geoceldas pueden personalizarse en tamaño, forma y espesor para adaptarse a las necesidades específicas de cada proyecto, lo que permite una mayor flexibilidad en el diseño y la construcción del pavimento.
- **Patologías del pavimento en concreto reforzado con geoceldas:** La falla por cizallamiento es una posibilidad en los pavimentos de concreto reforzado con geoceldas, aunque es menos común que otras formas de falla. La cizalladura se refiere al deslizamiento relativo entre las capas del pavimento, lo que puede ocurrir en diferentes interfaces dentro del sistema pavimentado. Aunque las geoceldas están diseñadas para mejorar la capacidad de carga y distribuir las tensiones, existen escenarios en los que la resistencia al cizallamiento puede verse comprometida, especialmente si no se realiza un diseño o una construcción adecuados.

Algunas situaciones que pueden provocar fallas por cizallamiento en pavimentos de concreto reforzado con geoceldas incluyen:

- a. **Deslizamiento entre Capas del Pavimento:** Si no se proporciona una adecuada adherencia entre las capas del pavimento, como entre la capa de base y la subbase, o entre la subbase y las geoceldas, puede producirse deslizamiento por cizallamiento bajo cargas de tráfico repetidas.
- b. **Compactación Deficiente:** Si las capas del pavimento no se compactan adecuadamente durante la construcción, pueden formarse bolsas de aire o zonas de baja densidad, lo que reduce la resistencia al cizallamiento y aumenta el riesgo de falla.
- c. **Inclinación del Terreno:** En áreas con pendientes pronunciadas, especialmente en curvas o cambios bruscos de pendiente, puede producirse un deslizamiento lateral debido a las fuerzas gravitacionales, especialmente si las geoceldas no están instaladas correctamente o si no se proporciona un drenaje adecuado para manejar el agua de escorrentía.
- d. **Efectos Ambientales:** Condiciones climáticas extremas como lluvias intensas, pueden afectar la estabilidad del pavimento y aumentar el riesgo de falla por cizallamiento, especialmente si el agua se acumula dentro del sistema pavimentado y reduce la resistencia al cizallamiento del suelo.

Para prevenir la falla por cizallamiento en pavimentos de concreto reforzado con geoceldas, es crucial realizar un diseño adecuado que considere las condiciones del sitio, proporcionar una construcción de calidad que incluya una compactación adecuada de las capas inferiores del pavimento. Además, el monitoreo regular del pavimento y la implementación de medidas de mantenimiento preventivo pueden ayudar a detectar y abordar cualquier problema potencial antes de que se convierta en una falla significativa.

#### **6.3.11. Diseño Infraestructura Vial con Geoweb (CRG)**

A continuación, se mencionan los principales parámetros a tener en cuenta en el diseño de la infraestructura vial con Geoweb, dentro de los cuales se mencionan el diseño geométrico,

de pavimento e hidráulico, según el manual para vías y patios de maniobras con pavimento de concreto reforzado con Geoweb (CRG), (Soil Protection SAS, 2021)

#### **6.3.11.1. Diseño geométrico**

- **Vehículo de diseño**

La selección de vehículos de diseño debe ser tal que corresponda a la composición del tránsito definida en el estudio de ingeniería de tránsito para el proyecto de estudio. Esta selección va a tener una afectación directa en la definición de las dimensiones de los anchos de carril, calzada, bermas y sobrecanchos de la sección transversal. De igual forma afectará el radio mínimo de giro en el diseño de las intersecciones.

- **Planeación y estructuración de vías nuevas en CRG**

Para las vías veredales nuevas se requerirán las siguientes etapas de proyecto:

- Adquisición de la cartografía existente de la zona del proyecto.
- Identificación, con base en la información cartográfica, de los posibles corredores de ruta.
- Identificación, sobre las restituciones 1:10.000, de tramos homogéneos desde el punto de vista de la velocidad de diseño.
- Trazado de la línea de ceros sobre las restituciones 1:10.000
- Reconocimiento terrestre.
- Trazado de la línea de ceros en el terreno.
- Levantamiento topográfico del corredor de ruta.
- Estudio de la estratigrafía a lo largo del corredor de ruta.
- Diseño del eje en planta y en perfil, diseño de la sección transversal y definición de algunos aspectos requeridos para el diseño geométrico.
- Elaboración de la documentación final.

- **Velocidad de diseño**

Se debe buscar que, a lo largo del trazado, se maneje una velocidad que permita que los conductores operen de manera cómoda y segura; por tratarse de vías de tercer orden la velocidad máxima recomendada no debe superar los 30 Km/h.

Teniendo este objetivo en mente, el diseñador de la vía debe identificar tramos homogéneos a lo largo del corredor de ruta, que por sus condiciones topográficas se les pueda asignar la misma velocidad.

### **6.3.11.2. Diseño de pavimento**

- **Periodo de diseño**

El pavimento con Geoweb sigue los lineamientos estructurales similares a los de un pavimento rígido, por lo cual se espera que ofrezca condiciones de servicio apropiadas durante un periodo no menor a veinte (20) años. Esto, considerando los respectivos tipos de vehículo y el drenaje especificados.

- **Requisitos de los materiales**

Los materiales empleados en la construcción de la sub - base del GRC deberán provenir de fuentes aprobadas; estarán libres de sustancias deletéreas, de materia orgánica, raíces y otros elementos perjudiciales; no tendrán características expansivas ni colapsables. Se debe dar cumplimiento a lo establecido en el artículo 320-22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS 2022.

- **Geoweb**

El Geoweb deberá cumplir los requisitos establecidos en la norma ASTM D1505 y ASTM D1693, composición, espesor de la lámina determinado bajo la norma ASTM D5199, para celdas perforadas y para celdas texturizadas sin perforar. El polímero (Geoweb) utilizado deberá en todos los casos tener una capacidad superior a mil newtons (1000 N) de carga

máxima a tensión tanto en las paredes como en uniones, siguiendo la norma NTC-3353 o con mayor especificación la ASTM D-638.

- **Resistencia del concreto**

Los documentos del proyecto o las especificaciones particulares indicarán el tipo de suelo y el concreto a utilizar en cada capa. Se recomienda el desarrollo de diseño de pavimento adecuado para cada proyecto a realizar.

El concreto deberá cumplir los requisitos generales establecidos en la norma NTC 2017, con excepción a la absorción de agua y resistencia a la abrasión. Estos requisitos de calidad se establecen de acuerdo con el artículo 500 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS 2022, Tabla 500 – 5 y Tabla 500 – 2 respectivamente. Es importante señalar que el tamaño máximo de los agregados deberá ser inferior a tres cuartos de pulgada (3/4”), para garantizar un llenado uniforme de la celda, esto implica un tipo de gradación AG-8 de acuerdo con la Tabla 500 - 1 INVIAS 2022. Además, la fluidez del concreto a instalar debe ser de 6” ± 1” garantizando una correcta distribución de este.

Independientemente del diseño vial, se recomienda utilizar un concreto con una resistencia a la compresión mínima de 21 MPa. La apertura al tránsito vehicular podrá darse cuando el concreto alcance la resistencia establecida en los diseños.

- **Comprobante de rasantes**

Verificar la capacidad portante del suelo una vez se tenga definida una estructura preliminar. Para esto se hace uso de los espesores de cada capa y los pesos específicos de los materiales a utilizar en la estructura de pavimento, de esta manera se calcula el esfuerzo al que es sometido la subrasante ( $P_{estructura}$ ). Es fundamental considerar el peso de suelo removido ( $P_{removido}$ ) cuando se presenten excavaciones, y así, calcular la carga real que se le está adicionando a la subrasante.

- **Estructura del CRG**

El Geoweb tiene que resistir las deformaciones y el esfuerzo al que se encuentra sometido, a causa de esto, es importante revisar que la deformación unitaria del suelo no sobrepase el 10 % de la deformación unitaria permisible tangencialmente, de esta manera se puede garantizar que el sistema funcione dentro de un rango aceptable

La capacidad de resistencia a tensión de las celdas es de 14 KN/m, dado esto, es primordial determinar el espesor de la pared para determinar su capacidad de resistencia total.

Se determina una resistencia de 1,4 kN para el Geoweb de cuatro (4”) pulgadas y de 1,05 kN para el Geoweb de tres (3”) pulgadas. De esta manera con el análisis racional se debe comprobar que no se somete el sistema a una deformación superior a la que es capaz de soportar el sistema, pues realmente lo que hará el soporte de cargas será el concreto, pero el Geoweb no puede deteriorarse en el proceso y su esfuerzo/deformación debe encontrarse en el rango elástico. Debido a esto, se debe determinar que la deformación tangencial no sobrepase los 1500  $\epsilon\epsilon$  o los 0.015 m correspondiendo este valor a una deformación unitaria permisible inferior al 5%, para tener un factor de seguridad de 2 sobre esta condición. Esto implica que el sistema para trabajar de forma óptima debe encontrarse trabajando en el rango elástico.

- **Capacidad estructural del concreto**

Para determinar la cantidad de ciclos que soportará el concreto, se utilizará el método PCA propuesto por la *Portland Cement Association -PCA-*, el cual es aceptado en Colombia y certificado por la AASHTO -*American Association of State Highway and Transportation Officials-*.

### 6.3.11.3. Diseño hidráulico

- **Escorrentía superficial e intensidad de lluvia**

El diseño hidráulico tiene como objetivo dar manejo a las aguas que llegan a la vía y evacuarlas rápidamente para evitar que generen daños progresivos, tanto en las capas de superficiales como las internas del pavimento.

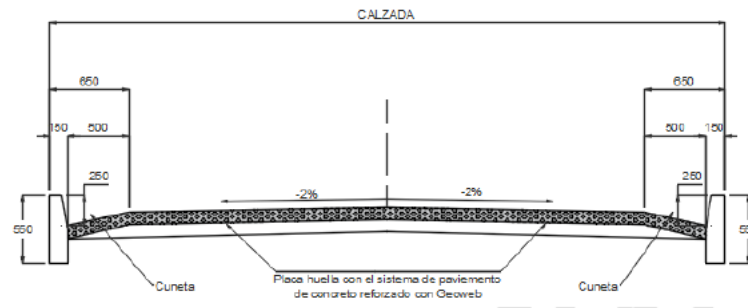
Con el fin de determinar la esorrentía superficial e intensidad de la lluvia, es necesario:

- a. Identificación de la estación meteorológica representativa.
  - b. Cálculo de la intensidad de la lluvia en la zona del proyecto.
- **Control hidráulico en la berma-cuneta y bordillo**

En el caso de los pavimentos CRG, las dos bermas-cuneta laterales son construidas con la misma capa de CRG de manera monolítica con el resto de la vía; por esta razón, los vehículos de diseño pueden transitar sobre estas zonas con seguridad para permitir el adelantamiento. Se presentan dos opciones de control hídrico de berma-cuneta, en la Figura 15 se presenta la alternativa con bordillo, mientras que en la Figura 16 se presenta una alternativa sin bordillo. La diferencia entre una y la otra es el tamaño de la zona en la que se permite el tránsito de vehículos, en el primer caso se tiene de tránsito la longitud de la calzada menos la dimensión de los dos bordillos, a diferencia del segundo caso que se tiene la totalidad de la longitud de la calzada para tránsito. La selección entre una y otra opción depende enteramente de las condiciones del proyecto.

Figura 15.

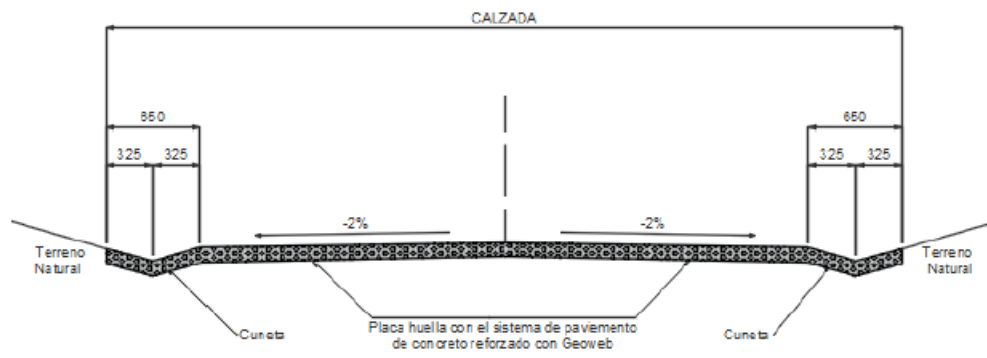
Esquema de la Berma - Cuneta de un pavimento con CRG con bordillo (Tipo 1)



*Nota.* Soil Protection SAS, Manual para vías y patios de maniobras con pavimento de concreto reforzado con Geoweb (CRG), 2021, p. 18

Figura 16.

Esquema de la Berma - Cuneta de un pavimento con GRC sin bordillo (Tipo 2)



*Nota.* Soil Protection SAS, Manual para vías y patios de maniobras con pavimento de concreto reforzado con Geoweb (CRG), 2021, p. 18

- **Aliviaderos o alcantarillas**

- a. Identificación de las abscisas donde se inicia y finaliza las cunetas.
- b. Selección de sitios de cruce de flujos de agua permanentes.
- c. Ubicación de los aliviaderos o alcantarillas.

#### 6.4. Marco Teórico

Torres-Peceros, (2021), en su análisis arqueológico del antiguo Perú de épocas preincaicas, menciona los grandes avances constructivos desarrollados por la cultura Caral hace más de 2500 años a.c., encontrando que fueron ellos una de las primeras civilizaciones en usar *Schicras*, como sistema de confinamiento para la construcción de muros de tierra armada.

Las *Schricras* eran bolsas tejidas con fibras vegetales por los habitantes de Caral hace cinco mil años. Estas se rellenaban con piedras de diferentes tamaños y las colocaban en el interior de sus construcciones cumpliendo una gran función antisísmica. (Biblioteca nacional del Perú, 2017)

Asimismo, Cruz & Manrique (2020), en el trabajo de grado del análisis comparativo del uso de geomallas biaxiales como elemento de refuerzo en pavimentos flexibles destacan que la civilización Babilónica (1792 – 1595 a.C.) inició la inclusión de refuerzos en forma de textil, hojas de palmas entrelazadas para formar un tipo de textil robusto, dando paso a lo que hoy se conoce como geosintéticos.

En su artículo, historia de las geocelda, Beyer (2022) nos hace un recuento de la invención de la tecnología moderna de las geoceldas, donde menciona que ésta tecnología inició a finales de 1970 a raíz de una solicitud parte del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. a una compañía privada, quienes debían desarrollar un sistema de confinamiento que ayudara a mantener la resistencia bajo cargas de vehículos pesados, principalmente en suelos arenosos, debido a los problemas que se les presentaba a los militares cuando realizaban desembarques de vehículos pesados en zonas costeras o cuando tenían que transitar por el desierto; es así como Steve Webster junto con Gary Bach desarrollaron un innovador sistema conocido como *Sandgrid*, el cual consistía en una estructura tridimensional formada por tubos de plástico que posteriormente se unieron entre sí con tiras de polietileno de alta densidad

(PEAD). Años más tarde, el sistema de confinamiento celular fue mejorado, hasta llevarlo a una forma de panel tridimensional compuesto de polietileno de alta densidad (PEAD).

(Sock, 2019), destaca algunas desventajas de los geosintéticos de polietileno de alta densidad, como las geoceldas, mencionando que, si bien el PEAD tiene una excelente resistencia química a la corrosión, ofrece una muy pobre resistencia a los factores ambientales tales como los rayos UV y a los agentes oxidantes, lo que provoca un envejecimiento acelerado; además, a lo largo del tiempo tiende a perder el módulo elástico (rigidez), particularmente bajo cargas dinámicas y cíclicas, que le ocasionan cambios geométricos o la pérdida de estabilidad dimensional a causa de la fatiga o falla del material, generando consecuencias críticas como pérdida de confinamiento. Reconociendo las limitaciones del material de PEAD, a comienzos del siglo XXI, la cooperación entre químicos de polímeros e ingenieros civiles resultó en la creación de una Aleación Nano Polimérica (NPA) para geoceldas, que se presenta como una aleación de polímero compuesto que consta de un termoplástico de ingeniería de alto rendimiento con una mezcla de poliolefinas (PP, PE).

#### **6.4.1. Auscultación - Inspección Visual**

La auscultación de carreteras es una herramienta fundamental para la gestión de la infraestructura carretera en su etapa de construcción y en la fase de operación; ya que permite obtener información relevante sobre el estado y condición de sus parámetros superficiales, como lo son el Índice de Perfil (IP), el Índice de Regularidad Internacional (IRI), el Coeficiente de Fricción (CF) y la Macro Textura. (Auscultación en carreteras nacionales y evaluación superficial en carreteras, Gobierno de México, 2020)

El fin de la inspección de pavimentos es determinar el porcentaje de área de pavimento afectado, estableciendo los tipos de daño o deterioros que se presentan, su extensión, severidad y recurrencia; factores que orientan al ingeniero en el momento de definir las

posibles causas de los daños o de programar actividades de campo y de laboratorio para su estudio.

Para nuestro caso de estudio, se desarrolla esta auscultación por medio de una inspección visual. Esta inspección es una revisión de forma manual, que se hace con el fin de observar los tipos de daños, y el índice de deterioro del pavimento.

#### **6.4.2. Métodos Para la Auscultación Visual del CRG**

Se debe tener en cuenta, que aún no existe un manual reglamentado en Colombia para realizar auscultaciones en un pavimento reforzado con Geoceldas; sin embargo, esta inspección se puede realizar de acuerdo con lo establecido en el Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos de INVIAE elaborado por la Universidad Nacional en el año 2006, y la revista Ingenierías Universidad de Medellín «Patología de pavimentos articulados por Carlos Hernando Higuera Sandoval y Óscar Fabián Pacheco Merchán, de la Universidad de Medellín, 2010»; esto debido a que el comportamiento de la estructura del pavimento GRC es similar a la de un pavimento semirrígido o a la de un pavimento articulado con adoquines de concreto.

**6.4.2.1. Pasos Básicos Iniciales.** Según el «Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos», INVIAE y Universidad Nacional, 2006, se establecen las siguientes actividades preliminares para desarrollar una correcta auscultación de pavimento:

- a. Información general.** Antes de realizar la identificación de daños en campo es importante conocer la siguiente información primaria de la vía a evaluar como la localización de la vía, código de la vía, nombre de la vía, número de contrato, fecha del levantamiento de daños en campo, nombre del evaluador, abscisas.
- b. Realizar el registro fotográfico.** Se debe tener en cuenta realizar un registro fotográfico del elemento a evaluar y de lo encontrado en campo.

Una vez realizado y teniendo en cuenta los pasos básicos iniciales, se continúa con lo establecido en la revista Ingenierías Universidad de Medellín-Patología de Pavimentos articulados.

**6.4.2.2. Realizar un Inventario de Deterioros (Primer Paso).** Para realizar el inventario de deterioros se toma como referencia lo descrito en la revista Ingenierías Universidad de Medellín-Patología de Pavimentos Articulados, tal como se indica en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

*Inventario de deterioros*


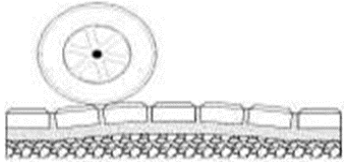

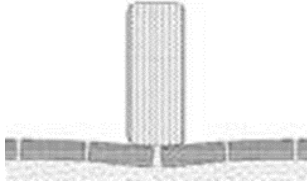

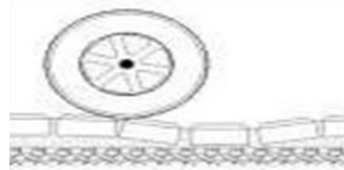
Clase	Tipo de deterioro	Símbolo	Unidad
Deformaciones	Abultamiento	BA	m <sup>2</sup>
	Ahuellamiento	AH	m <sup>2</sup>
	Depresiones	DA	m <sup>2</sup>
Desprendimientos	Desgaste superficial	DS	m <sup>2</sup>
	Bombeo de agua en las juntas	BAJ	m <sup>2</sup>
Desplazamientos	Desplazamiento de borde	DB	m
	Desplazamiento de juntas	DJ	m <sup>2</sup>
Fracturamientos	Fracturamiento	FA	m <sup>2</sup>
	Fracturamiento de confinamientos externos	CE	m
	Fracturamiento de confinamientos internos	CI	m <sup>2</sup>
Otros deterioros	Escalonamiento entre adoquines	EA	m <sup>2</sup>
	Juntas abiertas	JA	m <sup>2</sup>
	Vegetación en la calzada	VC	m <sup>2</sup>

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

**6.4.2.2.1 Deformaciones.** Las deformaciones son cambios repentinos en los perfiles de los pavimentos. Estos cambios tienen flechas apreciables que repercuten negativamente en la comodidad de los usuarios. Las deformaciones pueden ser de tres clases según se observa en la **Tabla 2**.

Tabla 2.

*Deformaciones*


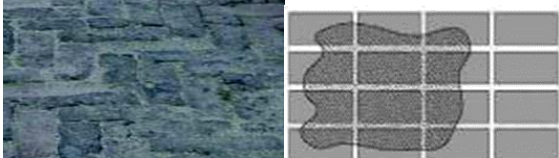
	<b>Abultamiento</b>	<b>Ahuellamiento</b>	<b>Depresiones</b>
<b>Descripción</b>	Son protuberancias que se presentan en la superficie del pavimento.	Depresión que se presenta a lo largo del sentido del tránsito, bajo las huellas de los vehículos.	Son hundimientos localizados en forma circular o semejante a ella, sin pérdida de material.
<b>Causa</b>	Cambios volumétricos de la subrasante. Generalmente se presentan en subrasantes con suelos expansivos.	Hundimientos causados por las cargas del tránsito. Consolidación de las capas subyacentes Inadecuada compactación de las capas estructurales. Aparcamiento de vehículos pesados durante mucho tiempo	Asentamientos en el suelo de fundación. Fallas en la capa de arena cuando las partículas de ésta se degradan. Un inadecuado drenaje o la falta de mantenimiento de éste.
<b>Foto y Esquema</b>	 	 	 
<b>Severidad</b>	BAJA (B): Flecha menor de 20 mm MEDIA (M): Flecha entre 20 y 40 mm ALTA (A): Flechas mayores a 40 mm	BAJA (B): Flecha menor de 20 mm MEDIA (M): Flecha entre 20 y 40 mm ALTA (A): Flechas mayores a 40 mm	BAJA (B): Flecha menor de 20 mm MEDIA (M): Flecha entre 20 y 40 mm ALTA (A): Flechas mayores a 40 mm

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

**6.4.2.2.2. Desprendimientos.** Los desprendimientos son la pérdida de material en zonas localizadas del pavimento y pueden generarse por desgaste superficial y/o bombeo de agua en las juntas, de acuerdo con lo mencionado en la **Tabla 3**.

Tabla 3.

*Desprendimientos*

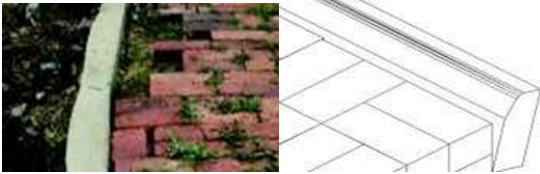
	Desgaste superficial	Bombeo de agua en las juntas
<b>Descripción</b>	Es la pérdida de finos en la superficie del adoquín, creando una textura superficial rugosa, se forman cavidades y deja expuesto el agregado grueso.	Es la aparición de partículas de arena y/o finos alrededor y sobre los adoquines.
<b>Causa</b>	Baja calidad y/o control en la fabricación en de los adoquines. Por la abrasión de las llantas. Exposición constante a flujos de aguas a presión.	cuando se produce acumulación de agua en la base y subbase, es posible que por las juntas de adoquines se expulse el agua por las cargas de tráfico, con lo cual se desprende progresivamente la arena y/o finos. Juntas abiertas. Desplazamiento de juntas.
<b>Foto y Esquema</b>		
<b>Severidad</b>	<p>BAJA (B): Desgaste superficial aislado. Área inferior o igual a 0.5 m<sup>2</sup>.</p> <p>MEDIA (M): Desgaste superficial en un área de extensión considerable y de forma continua, solamente con pérdida de finos. Área superior a 0.5 m<sup>2</sup></p> <p>ALTA (A): Desgaste superficial en un área de extensión considerable y de forma continua, con pérdida de agregado grueso y formación de concavidades. Área superior a 0.5 m<sup>2</sup>.</p>	<p>BAJA (B): Se presenta en zonas aisladas y solamente se aprecia pérdida de la arena de sello. Área inferior a 0.5 m<sup>2</sup>.</p> <p>MEDIA (M): Se presenta en zonas con áreas superiores a 0.5 m<sup>2</sup>.</p> <p>ALTA (A): Se presentan asentamientos y pérdida de los perfiles del pavimento.</p>

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

**6.4.2.2.3. Desplazamientos.** Los desplazamientos son el corrimiento localizado de los elementos constitutivos del pavimento. Estos pueden ser desplazamientos de borde y/o desplazamiento de juntas tal como se indica en la **Tabla 4.**

Tabla 4.

*Desplazamientos*

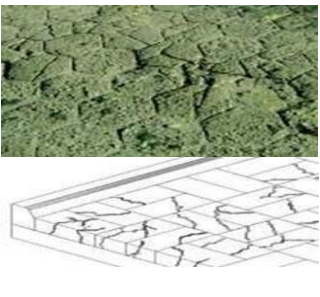

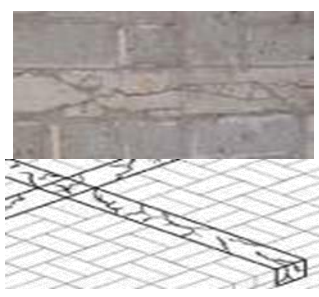
	Desplazamiento de borde	Desplazamiento de juntas
<b>Descripción</b>	Son corrimientos localizados de los adoquines junto a los elementos de confinamiento.	Los adoquines se apartan de su alineamiento inicial. Generalmente se da en hiladas de adoquines rectangulares.
<b>Causa</b>	Falla localizada en el lugar de construcción del elemento, inadecuada construcción y diseño del elemento de confinamiento. Por las cargas del tránsito.	En zonas de frenado. En sitios de alta pendiente. Por falta de confinamientos transversales o porque éstos no están a una distancia adecuada.
<b>Foto y Esquema</b>		
<b>Severidad</b>	<p>BAJA (B): Los adoquines todavía están en su posición original y el desplazamiento de borde es menor a 2 cm.</p> <p>MEDIA (M): Los adoquines se desplazaron de su posición original y el desplazamiento de borde está entre 2 y 5 cm.</p> <p>ALTA (A): Los adoquines se desplazaron de su posición original, algunas piezas ya se salieron del pavimento y el desplazamiento de borde es superior a 5 cm.</p>	<p>BAJA (B): La separación promedio de las aberturas de las juntas es menor a 5 mm.</p> <p>MEDIA (M): Se presenta en zonas con áreas superiores a 0.5 m<sup>2</sup>.</p> <p>ALTA (A): La separación promedio de las aberturas de las juntas está entre 5 y 10 mm.</p>

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

**6.4.2.2.4. Fracturamiento.** Es la aparición de fisuras y grietas en las piezas de adoquines o demás elementos constitutivos del pavimento, como son los elementos de confinamientos (bordillos); las causas están asociadas al inadecuado espesor de los adoquines o losas junto con los esfuerzos de fatiga, de acuerdo con lo señalado en la **Tabla 5**.

Tabla 5.

*Fracturamientos*

	<b>Fracturamiento</b>	<b>Fracturamiento de confinamientos externos</b>	<b>Fracturamiento de confinamientos internos</b>
<b>Descripción</b>	Son corrimientos localizados de los adoquines junto a los elementos de confinamiento.	Es el deterioro y destrucción parcial o total de los confinamientos externos. En estados avanzados de deterioro, se presenta pérdida de material, permitiendo la incrustación de partículas y objetos extraños al pavimento.	Es el deterioro y destrucción parcial o total de los confinamientos internos. En estados avanzados de deterioro se presenta pérdida de material, permitiendo la incrustación de partículas y objetos extraños al pavimento.
<b>Causa</b>	Inadecuado espesor de los adoquines Inadecuado espesor de las capas de apoyo. Deficiencia en la calidad de los materiales de la capa de apoyo y/o de los adoquines. Paso de cargas extraordinarias.	Fatiga provocada por el paso del tránsito. Baja calidad de los materiales y/o precario control en el proceso de construcción. Por impacto de las llantas de los vehículos, cuando los confinamientos están a un nivel superior al de la rasante de la carretera. Por invasión de vegetación. Por retracción del concreto (sí éste es en concreto).	Fatiga provocada por el paso del tránsito. Baja calidad de los materiales y/o precario control en el proceso de construcción. Por impacto de las llantas de los vehículos, cuando los confinamientos están a un nivel superior al de la rasante de la carretera. Por invasión de vegetación. Por retracción del concreto (sí éste es en concreto).
<b>Foto y Esquema</b>			
<b>Severidad</b>	BAJA (B): Fractura de adoquines de manera aislada. Área menor a 0.5 m <sup>2</sup> . MEDIA (M): Fractura de adoquines en un área de extensión considerable y de forma continua. Área igual o superior a 0.5 m <sup>2</sup> . ALTA (A): Fractura de adoquines en un área de extensión considerable y de forma continua. Se presenta pérdida de material, se forman concavidades que generan una textura rugosa. Área igual o superior a 0.5 m <sup>2</sup> .	BAJA (B): Se presentan fisuras menores de 3 mm. MEDIA (M): El elemento presenta grietas (<math>3\text{ mm}</math>) y aún se mantiene en su lugar, sirviendo como confinamiento. ALTA (A): El elemento presenta grietas (<math>3\text{ mm}</math>), pero ya se ha desplazado de su ubicación inicial y no impide el desplazamiento lateral de los adoquines.	BAJA (B): Se presentan fisuras menores de 3 mm. MEDIA (M): El elemento presenta grietas (<math>3\text{ mm}</math>), no se presentan pérdidas de material y aún se mantiene en su lugar, sirviendo como confinamiento ALTA (A): El elemento presenta grietas (<math>3\text{ mm}</math>), se presentan pérdidas de material; permitiendo la incrustación de basuras y demás partículas u objetos extraños al pavimento. El elemento no impide el desplazamiento longitudinal y lateral de los adoquines


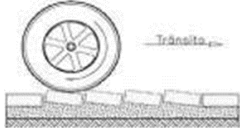

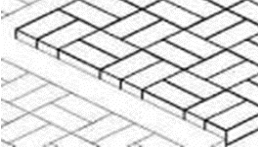


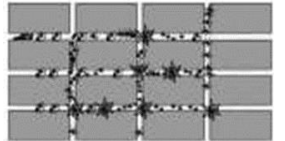
*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

**6.4.2.2.5. Otros Deterioros.** En la **Tabla 6** se encuentran diversos deterioros que

afectan el correcto funcionamiento estructural y funcional del pavimento.

Tabla 6.

*Otros deterioros*

	Escalonamiento entre adoquines	Escalonamiento entre adoquines y confinamientos	Juntas abiertas	Vegetación en la calzada
<b>Descripción</b>	Es el cambio brusco de nivel entre hiladas de adoquines	Es el cambio brusco de nivel entre los elementos de confinamientos y los adoquines.	Es una separación entre juntas superior a 3 mm, permitiendo la pérdida de arena de sello y la incrustación de partículas a través de las juntas, propiciando la destrucción de las aristas de los adoquines.	Es la invasión o crecimiento de vegetación a través de las juntas en la calzada. La vegetación puede llegar a levantar el adoquinado.
<b>Causa</b>	<p>Error constructivo, debido a la falta de control y/o precarias técnicas de construcción.</p> <p>Torsión ocasionada por las cargas del tránsito.</p> <p>El patrón de diseño de colocación de los adoquines no es el más apropiado.</p>	<p>Debido a la variación del nivel superior del elemento de confinamiento con los adoquines al momento de construcción.</p> <p>La cota de rasante del adoquinado quedó a un nivel superior, o en su defecto, inferior al elemento de confinamiento cuando se construyó el adoquinado</p>	<p>Por efecto de las cargas del tránsito.</p> <p>Confinamientos inadecuados o la falta de éstos.</p> <p>Falta del sello de juntas</p> <p>Error constructivo debido a la falta de control y/o precarias técnicas de construcción.</p>	<p>Abandono de la carretera.</p> <p>Falta de limpieza y desmonte de las franjas adyacentes de la calzada.</p>
<b>Foto y Esquema</b>	 	 		 

	Escalonamiento entre adoquines	Escalonamiento entre adoquines y confinamientos	Juntas abiertas	Vegetación en la calzada
<b>Severidad</b>	BAJA (B): La altura del desnivel promedio es menor a 5 mm. MEDIA (M): La altura del desnivel promedio está entre 5 y 10 mm. ALTA (A): La altura del desnivel promedio es mayor a 10 mm.	BAJA (B): La altura del desnivel promedio es menor a 5 mm. MEDIA (M): La altura del desnivel promedio está entre 5 y 10 mm. ALTA (A): La altura del desnivel promedio es mayor a 10 mm.	BAJA (B): La altura del desnivel promedio es menor a 5 mm. MEDIA (M): La altura del desnivel promedio está entre 5 y 10 mm. ALTA (A): La altura del desnivel promedio es mayor a 10 mm.	BAJA (B): La altura del desnivel promedio es menor a 5 mm. MEDIA (M): La altura del desnivel promedio está entre 5 y 10 mm. ALTA (A): La altura del desnivel promedio es mayor a 10 mm.

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

### 6.4.3. Índice de Condición del Pavimento, ICP (Segundo Paso)

Según la revista Ingenierías Universidad de Medellín-Patología de Pavimentos Articulados, la metodología propuesta para Colombia permite hallar el índice de condición para los pavimentos articulados; se fundamenta en determinar cómo un deterioro repercute negativamente en los parámetros de tipo funcional y estructural, teniendo en cuenta su clase, gravedad y extensión.

Por tal razón, se desarrollaron dos índices: índice de Condición Funcional (ICF) e índice de Condición Estructural – ICE. A partir del índice de Condición Funcional (ICF) y del índice de Condición Estructural – ICE, se determina el índice de Condición del Pavimento – ICP.

Una vez determinado el índice de Condición del Pavimento, se determina la calificación del estado del tramo en estudio: muy malo, malo, regular, bueno y muy bueno.

#### 6.4.3.1. Identificación del Tipo y Grado de Influencia de los Deterioros por Clase, FC.

En la **Tabla 7**, se muestra cada tipo de deterioro y si éste afecta estructural y/o funcionalmente el pavimento y también se muestran los factores de influencia de los deterioros según su clase.

Tabla 7.

*Tipo y factor de influencia por clase*

CLASE	TIPO DE DETERIORO	Afecta parámetro		INFLUENCIA POR CLASE, FC	
		Estructural	Funcional	Estructural	Funcional
Deformaciones	Abultamiento	X	X		
	Ahuellamiento	X	X		
	Depresiones	X	X	48	48
Desprendimientos	Desgaste superficial		X		
	Bombeo de agua en las juntas	X	X	6	9
Desplazamientos	Desplazamiento de borde	X	X		
	Desplazamiento de juntas		X	10	10
Fracturamientos	Fracturamiento	X			
	Fracturamiento de confinamientos externos	X	X	28	10
	Fracturamiento de confinamientos internos	X	X		
Otros deterioros	Escalonamiento entre adoquines	X	X		
	Escalonamiento entre adoquines y confinamientos		X		
	Juntas abiertas		X	8	23
	Vegetación en la calzada	X	X		
		Sumatoria		100	100

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

**6.4.3.2. Cálculo del Área Total (AT) y del Porcentaje de Área Afectada, %Aa.** Para el cálculo del área total (AT) de cada tramo, se recomienda tomar tramos de cien metros de longitud y se multiplican por su ancho de calzada. El porcentaje de área afectada (%Aa) para un deterioro se calcula haciendo la relación entre el área afectada por el deterioro y el área total (1).

$$%Aa = \frac{Aa_i}{A_T} \times 100$$

Donde,

%Aa: Porcentaje de área afectada por el deterioro i

Aa: área afectada por el deterioro i

$A_T$ : área Total del tramo

I: Deterioro

**6.4.3.2.1. Determinación de los factores de penalización.** Según el grado de influencia que cada deterioro ocasione por su clase, su severidad y extensión en los parámetros de tipo estructural y/o funcional, se les han asignado pesos y valores de penalización; entre mayores sean estos valores, indican que su efecto negativo es mayor. En las **Tabla 8 y Tabla 9**, se muestran factores de penalización.

Tabla 8.

*Factores de penalización para el índice de Condición Estructural, ICE*

Clase	Deterioro	Peso en su clase, PI	Nivel severidad, FNS			% Área equivalente afectada, FA				
			Bajo	Medio	Alto	0	5	10	15	>15
Deformaciones	Abultamiento	1,2	1,00	1,15	1,30	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
	Ahuellamiento	1,2	1,00	1,15	1,30					
	Depresiones	1,0	1,00	1,10	1,20					
Desprendimientos	Bombeo de agua juntas	1,0	1,00	1,15	1,30	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
Desplazamientos	Desplazamiento de borde	1,0	1,00	1,15	1,30	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
Fracturamientos	Fracturamiento	1,1	1,00	1,10	1,20	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
	Fracturamiento de confinamientos externos	1,2	1,00	1,15	1,30					
	Fracturamiento de confinamientos internos	1,0	1,00	1,10	1,20					
Otros deterioros	Vegetación en la calzada	1,0	0,80	1,00	1,20	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

Tabla 9.

*Factores de penalización para el índice de Condición Funcional, ICF.*

Clase	Deterioro	Peso en su clase, PI	Nivel severidad, FNS			% Área equivalente afectada, FA				
			Bajo	Medio	Alto	0	5	10	15	>15
Deformaciones	Abultamiento	1,2	1,00	1,25	1,50					
	Ahuellamiento	1,2	1,00	1,15	1,30	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
	Depresiones	1,0	1,00	1,20	1,40					
Desprendimientos	Desgaste superficial	1,1	1,00	1,20	1,40	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
	Bombeo de agua juntas	1,0	1,00	1,15	1,30					
Desplazamientos	Desplazamiento de borde	1,0	1,00	1,15	1,30	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
	Desplazamiento de juntas	1,0	1,00	1,10	1,20					
Fracturamientos	Fracturamiento de confinamientos externos	1,2	1,00	1,15	1,30	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
	Fracturamiento de confinamientos internos	1,0	1,00	1,10	1,20					
Otros deterioros	Escalamiento entre adoquines	1,2	1,00	1,25	1,50					
	Escalamiento entre adoquines y confinamientos	1,1	1,00	1,15	1,30	0,00	0,50	0,60	0,76	1,00
	Juntas abiertas	1,0	1,00	1,15	1,30					
	Vegetación en la calzada	1,1	1,00	1,15	1,30					

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

**6.4.3.2.1. Cálculo del Porcentaje de Área Equivalente Afectada, %Ae.** El porcentaje de área equivalente afectada (%Ae) es la combinación de tres factores

$$%Ae_i = \sum PI_j \times \%Aa_j \times FNS_j$$

Donde;

%Ae: Porcentaje de área equivalente afectada para los deterioros de clase i

i: Clase de deterioro

PI: Peso del deterioro j en su clase i

%Aa: Porcentaje de área afectada por el deterioro j

FNS: Factor de penalización por nivel de severidad del deterioro

j: Deterioro

El porcentaje de área equivalente afectada es un porcentaje igual o mayor que cero ( $\%Ae \geq 0,0\%$ ) y cuando este de más del 15%, simplemente se debe anotar que dio mayor al 15%, ( $\%Ae \geq 15,0\%$ )

#### **6.4.3.2.2. Cálculo del Factor de Penalización por Área Afectada, FA.**

Este factor es el grado de afectación que causó la combinación de los deterioros de una misma clase al porcentaje de influencia de esa clase de deterioros en los parámetros estructurales y funcionales. Para hallar el factor de penalización por área afectada (FA), se utiliza la Tabla 8 para el ICE y la Tabla 9 para el ICF.

#### **6.4.3.2.3. Cálculo de los Índices (ICE Y ICF).**

Para calcular el ICE y el ICF se utilizan los modelos matemáticos que están en función del factor de influencia por clase del deterioro (FC) y del factor de penalización por área afectada (FA). El resultado debe redondearse al número entero.

$$ICE = 100 - \sum (FC_i \times FA)$$

$$ICF = 100 - \sum (FC_i \times FA)$$

Donde;

ICE: índice de condición estructural ICF: índice de condición funcional

FC: Factor de influencia por clase de deterioro en el índice

FA: Factor de penalización por área afectada i: Clase de deterioro

Los índices varían en una escala de 0 a 100. Siendo cero para un pavimento fallado o en pésimo estado y cien para un pavimento en excelentes condiciones

#### **6.4.3.2.4. Cálculo del Índice de Condición del Pavimento, ICP.**

El índice de condición del pavimento (ICP) es la combinación del índice de condición estructural (ICE) y el índice de condición funcional (ICF).

Su valor es un número entero que varía en una escala de uno a cinco. Para el cálculo del índice de condición del pavimento (ICP) se utiliza la matriz de **la Tabla 10**.

Tabla 10.

*Matriz para el cálculo del ICP.*

Calificación del ICP	Rangos del ICF				
	86-100	71-85	41-70	21-40	0-20
Rangos del ICE 86-100	5	4	4	3	2
71-85	4	4	3	3	2
41-70	4	3	3	2	1
21-40	3	3	2	2	1
0-20	2	2	1	1	1

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

#### 6.4.3.3. Escala del Índice de Condición del Pavimento, ICP.

Obtenida la calificación del índice de condición del pavimento (ICP), en **Tabla 11**, se determina el nivel de servicio y las acciones de actuación necesarias.

Tabla 11.

*Nivel de servicio y categorías de acción del ICP*

Calificación ICP	Nivel de servicio	Categoría de acción	Descripción
5	MUY BUENO	Mantenimiento rutinario	Pavimento en condición muy buena. El nivel de comodidad y seguridad percibido por los usuarios es satisfactorio. Ocasionalmente se presentan pequeños daños que no afectan significativamente la circulación y pueden ser evitados o corregidos en el mantenimiento rutinario.
4	BUENO	Mantenimiento rutinario recurrente	y Pavimento en condición buena, la circulación es cómoda. Se presentan daños localizados en etapa de iniciación.
3	REGULAR	Refuerzo mantenimiento rutinario	- Pavimento en estado regular, en donde la circulación deja de ser cómoda. Se presentan daños de manera constantemente en etapas avanzadas.
2	MALO	Rehabilitación	Pavimento en condición mala, la circulación es muy incómoda. Se presentan daños en etapas muy desarrolladas.

Calificación ICP	Nivel de servicio	Categoría de acción	Descripción
1	MUY MALO	Reconstrucción	Pavimento en condición muy mala, la vía se vuelve intransitable. Los deterioros están muy desarrollados y son irreversibles. El pavimento está totalmente degradado.

*Nota.* Patología de Pavimentos articulados, Universidad de Medellín (2010)

#### **6.4.4. Herramientas Para el Desarrollo de la Auscultación Visual del GRC**

Las herramientas a utilizar para el desarrollo de la inspección visual del GRC son:

- Odómetro, Cinta Métrica, Calculadora,
- Cámara Fotográfica, Elementos de protección personal (EPP).

## 7. Estado del Arte

### 7.1. Investigaciones acerca de pavimentos reforzados con geoceldas

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)

Según Yang Xiaoming en uno de sus artículos, afirma que la utilización de geosintéticos ha generado que el refuerzo de terrenos tenga un desempeño favorable, mejorando así los comportamientos en estructuras como muros de tierra, taludes, canales y vías.

Dicho artículo denominado «Prueba acelerada del pavimento de carreteras sin pavimentar con geoceldas reforzadas de bases de arenas», despliega los aciertos de una prueba de pavimento acelerado sobre tramos de carretera sin pavimentar, que implican el

refuerzo de geoceldas de bases de arena; bajo esta noción se determina que , la prueba acelerada del pavimento (APT), es una de las técnicas más acertadas al momento de evaluar el rendimiento del pavimento mediante la carga controlada de la rueda en condiciones normales; del mismo modo se puede determinar que los geo sintéticos se han utilizado durante mucho tiempo para reforzar capas base / subbase en carreteras pavimentadas y sin pavimentar.

Es así que, en este ensayo, se realizó una prueba APT en cuatro carreteras sin pavimentar, los resultados de las pruebas expresaron: Que la geocelda NPA (nuevo tipo de producto de geocelda, que es hecho de una aleación de nanocompuesto de poliéster / poliamida nano- fibras dispersas en matriz de polietileno) utilizada en este estudio tuvo un efecto significativo en la mejora de la estabilidad de carreteras sin pavimentar con bases de arena y se presentó reduciendo en gran medida de la deformación, así mismo se pudo establecer, que sin la geo celda, la carretera sin asfaltar de espesor 15 cm, con una base de arena gruesa y una cubierta de agregado AB-3 de 7 cm, no le fue posible admitir una carga por eje de tráfico de 80 kN para una pasada. También se evidenció, que la arena reforzada con geoceldas experimentó un «estallido de células» falla ocasionada probablemente, porque la base delgada estaba sobrecargada bajo la carga de tráfico. Esto es de especial cuidado, cuando la geocelda está acostumbrada a reforzar material de baja calidad (p. ej., arena) que tiene un nivel mucho más bajo resistencia al corte a bajo esfuerzo de confinamiento. La medición del indicador de tensión mostró que la geocelda NPA bajo la trayectoria de la rueda, experimentó cargas de tracción, mientras que la geocelda fuera de la trayectoria de la rueda experimentó cargas de compresión. (Xiaming & Han, 2013)

El 6 de septiembre de 2012 en la Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental de Oklahoma, se llevó a cabo un estudio sobre el desarrollo de un modelo tridimensional mecanicista-empírico para carreteras sin pavimentar reforzadas con geoceldas. El método consistió en

calcular las respuestas de un pavimento, sometido a una carga monotónica, tales respuestas se calcularon a partir del método de elementos finitos. El modelo empírico, permitió a su vez, el cálculo de la tensión permanente de un material, tomando como base la tensión elástica, que es aquella que le ocurre a un material después de haberse sometido a una gran cantidad de repeticiones de carga. En una junta de transporte realizada en Estados Unidos, se analizaron bases reforzadas con geo sintéticos (geomalla y geotextil) utilizando el modelo ME, y se pudo establecer que se presentaban problemas similares a los encontrados en carreteras sin pavimentar reforzadas con geoceldas. (Barrera & Franco, 2019)

Otro estudio realizado en cuestión fue la implementación de pruebas de carga con ruedas de automóvil en cuatro tramos de carretera sin pavimentar, dos sin refuerzo, y dos con geocelda. Las geoceldas fueron instaladas a alturas diferentes 10 y 15 cm respectivamente, luego fueron cubiertas por material arcilloso con un porcentaje CBR del 5% utilizado como subrasante, los demás materiales usados en el montaje se les aplicó una compactación de 95%. Para la aplicación de la carga, se usó un rodillo en forma de tambor con ancho de 2,1 m y una fuerza posible de aplicar hasta de 10,3 ton. Después de 5000 ciclos se observó una deformación que mantenía constante en las probetas reforzadas con geocelda, cosa que no sucedió con las demás. Dos horas fueron suficientes para analizar el comportamiento de una carretera sin pavimentar reforzada con geocelda por medio del modelo de respuesta mecanicista. (Xiaoming, Han, Leshchinsky, & Parsons, 2013)

En el proyecto de grado «*Evaluación del uso de geoceldas sobre suelos arcillosos mediante modelación en centrífuga geotécnica*», Angélica María Viana Sepúlveda, 2018, *Universidad de los Andes*» donde se realizaron ensayos para investigar el efecto del uso de las geoceldas sobre suelos blandos usando arcilla blanca o caolín ante el fenómeno de consolidación a través de la modelación en centrífuga a escala reducida y análisis de imagen con los resultados obtenidos, se tuvieron los siguientes resultados:

- Se comprobó que la aplicación de geoceldas en suelos blandos es efectiva debido a que los asentamientos obtenidos en los modelos con refuerzo son significativamente menores a los modelos sin refuerzo.
- La efectividad aproximada de las geoceldas prototipo para disminuir las deformaciones en suelos de arcilla a través del tiempo es del 55.395%, es decir, los asentamientos se reducen a más de la mitad gracias al uso de geoceldas. En general, el suelo pasa de tener una deformación de 77.65mm sin geoceldas a 33.62mm con geoceldas a lo largo de un mismo intervalo de tiempo.
- El uso y manejo de modelación a escala reducida en centrífuga geotécnica demostró su eficiencia para identificar mecanismos de deformación en el suelo. Por lo tanto, se puede afirmar que los resultados obtenidos son confiables y se pueden usar para solucionar problemas geotécnicos a escala prototipo/rea
- La importancia del uso de herramientas de análisis de imagen como PIVlab en el área de la geotecnia es que permiten obtener información detallada sobre fenómenos como la consolidación. Lo anterior es debido a su algoritmo que permite la generación de vectores que describen de forma específica el sentido y magnitud de desplazamientos bidireccionales en el suelo según intervalos de tiempo específicos.
- La consolidación en suelos de arcilla es un fenómeno que se desarrolla lentamente a través del tiempo y que depende de una carga estática. Además, es causante de asentamientos que prevalecen incluso después de terminar procesos de construcción. Por esta razón, es importante realizar estudios como este que permita evaluar la efectividad del uso de alternativas, como las geoceldas, para reducir los asentamientos provocados por este fenómeno y de esta manera, garantizar la calidad y seguridad de las infraestructuras. (Viana Sepúlveda, 2018)

Por otra parte, (García Carrillo, 2020) realizó un diseño y análisis comparativo de dos estructuras de pavimento, una con el uso de materiales granulares sin refuerzo y la otra con el uso de geoceldas en la capa de base granular, para la vía que comunica al municipio de Flandes con el Espinal en el departamento del Tolima. Con la segunda se logró la disminución de los espesores de la capa granular, optimizando así su aplicación.

(Urresta Melo, 2015) hizo un diseño de pavimento para la carrera 12 del municipio de Funza, en el departamento de Cundinamarca, planteando dos diferentes propuestas: una con los elementos históricamente utilizados, como lo son dos capas de mezcla densa en caliente, dos capas granulares y un mejoramiento por las condiciones iniciales de la subrasante, y la otra con las mismas características, solo que incluyó el mejoramiento de la capa granular con geoceldas. En este diseño se logró obtener una buena disminución de los espesores de las capas granulares al incluir las geoceldas, con lo que se mejoraron las alternativas de diseño y costo para el proyecto.

## **7.2. Ejemplos de aplicación de Geoceldas**

Los sistemas de confinamiento celular (geoceldas) fueron utilizados por primera vez por Ingenieros del ejército de los EEUU, durante la guerra del Golfo, con la finalidad de lograr una rápida movilidad de sus tropas. Las geoceldas fueron empleadas para confinar la arena del lugar, lo cual aumentaba la capacidad de soporte, facilitando la creación de accesos para vehículos pesados, a altas velocidad de ejecución. Años después, se permitió su uso para aplicaciones civiles y se inició la producción comercial. Sin embargo, a pesar de su aplicación original, el desarrollo de las geoceldas en el mercado de la ingeniería se centró en el control de la erosión de suelos para la protección de canales y taludes. (Alvarado Amado, 2009).

Algunos antecedentes del uso de geoceldas se evidencia en documento: «La aplicación de geoceldas en américa latina» se presenta una experiencia en la aplicación y uso de geoceldas de polipropileno en cuatro sitios de construcción en América Latina diferentes, como

lo son; la protección de taludes, canales de hormigón, protecciones de geomembrana y estabilización del suelo, es así que para cada caso se presentan distintas aplicaciones que se pueden sintetizar en las siguientes:

- En el primer caso se presenta la aplicación de las geoceldas rellenas con un suelo arcilloso en un sistema de control de erosión.
- El segundo caso se presenta la aplicación de geoceldas rellenas de arena sin pavimentar y caminos pavimentados en la selva amazónica.
- El tercer caso enseña las geoceldas rellenas de hormigón en un canal construcción en la ciudad de Panamá.
- El cuarto caso de construcción presenta el uso de geoceldas también rellenas de hormigón, para proteger una geomembrana en un estanque de lixiviados en un vertedero en Sao Paulo.

Este estudio de aplicación de las geoceldas expresó diferentes ventajas que ofrecen estos sistemas en comparación con las soluciones consideradas convencionales, para la interpretación de esta nota se tienen en cuenta distintos talentos que nos puede ofrecer las geoceldas, las geoceldas se pueden usar en varias aplicaciones como lo son: como protección de taludes, protección de canales, muro de contención, protección de geomembrana y soporte de carga (Weil, 2016)

Otros casos de aplicación de Geoceldas, se presentan a continuación:

- **Construcción de la carretera No. 6 en Israel**

La carretera N°6 de Israel es una autovía nacional de 140 km de largo que cruza el país de norte a sur. Este proyecto fue operado por AECON, una de las compañías de infraestructura más grandes de Canadá, con un costo de \$1,4 mil millones de dólares.

Construida bajo los más altos estándares, el proyecto inicial incluía 140 km de carretera nueva,

140 km de servicio agro cultural, 13 intercambiadores, 150 puentes, 2 túneles mellizos, entre otras obras.

El desafío de esta obra era el de añadir un 3er carril de circulación en cada sentido en respuesta del incremento de demanda de tráfico de los últimos años. El terreno de fundación era un suelo que poseía un CBR que rondaba entre el 5% - 6% y un tráfico definido por ejes equivalentes (método ESAL) de  $W18 = 38 \cdot 10^6$  ejes.

La solución alternativa para el pavimento asfáltico consistía en colocar la misma subbase granular de 270 mm de espesor, seguido de una geocelda de NPA de 140 mm rellena del mismo material de la subbase y por sobre dicha capa la misma subbase granular de 100 mm del mismo suelo y 160 mm de asfalto. La solución alternativa tenía 2 objetivos:

- Reemplazar la base de piedra partida por un agregado granular local, de baja calidad (conformar una subbase de tipo A). Este material se usaría tanto para la base (240 mm) como para la subbase (270 mm). Ahorrando costos por un 37%.
- El espesor de la capa asfáltica se reduciría en de 200 mm a 160 mm constituyendo un ahorro de 20%. Se adoptaron las geoceldas NPA en la base de la estructura del pavimento relleno con 140 mm de material granular de calidad apta para subbase. Luego estas fueron humedecidas y compactadas.

Las conclusiones fueron:

- La geocelda de alto desempeño es una alternativa viable desde el punto de vista técnico frente a los diseños convencionales.
- La conveniencia técnico-económica de uso dependerá de la situación particular de cada proyecto: Material disponible, suelos locales, estado de la subrasante, condiciones de tráfico

- Es crítica la elección correcta del tipo de Geocelda para que soporte las cargas y no se deforme durante todo el período de vida útil.
  - La geocelda deberá tener una resistencia a tracción mayor al esfuerzo generado por el esfuerzo actuante
  - El Módulo de rigidez disponible deberá garantizar un límite de deformación tal que garantice el valor del MIF = 4 para toda la vida útil del proyecto
  - La Geocelda debe mantener una deformación elástica compatible con la capa suprayacente
  - La deformación total acumulada de la geocelda deberá mantenerse en un rango tal que el MIF calculado no pierda efectividad en el tiempo (Schvartzer & Da Ponte, s.f)
- **Protección contra socavación del puente del Rey, Panamá viejo**

Hace unos años el puente del Rey, parte del conjunto monumental histórico de Panamá viejo, estaba sufriendo una grave socavación en su base debido al paso del agua del río y corría peligro de caer en el río que hoy en día se llama río abajo. El trabajo para la protección del puente del rey se realizó con muros de contención de geoceldas rellenas con concreto para soportar el contacto con el agua y una capa de geoceldas en el área base del puente también rellena con concreto para proteger el puente contra la socavación. Todo este trabajo se realizó en seco desviando el río abajo por medio de un cajón temporal lo que permitió la construcción de los muros de contención con sus respectivas bases y la protección de la base del puente en suelo seco. (Abramovich, 2020)

- **Pavimento de la plaza city depot, vía Tocumen, Panamá**

City depot es un complejo de bodegas y locales comerciales construido en la Vía. Tocumen frente a la barriada llamada «El Crisol». Todo el pavimento de concreto de esta plaza comercial está construido sobre una estabilización de geoceldas, esta plaza cuenta con un área

de x m<sup>2</sup> de pavimento de concreto y asfalto que en su mayoría se utiliza para estacionamiento de vehículos medianos y pequeños. El uso de geoceldas en este caso en particular permitió que se pudiera instalar y confinar la capa base, aun con el alto nivel freático que existía en el suelo. (Abramovich, 2020)

- **Muros de contención en Llano Gardí, Panamá**

El turismo en el archipiélago de San Blas ha incrementado en los últimos años. En el año 2014, se construyó un muro con 27 m de altura, que permitió contener un grave deslizamiento ocurrido en la carretera en el km 27. hoy en día este muro de geoceldas, que tiene el récord en altura en Panamá, se encuentra completamente cubierto de vegetación y resulta prácticamente imposible verlo. (Abramovich, 2020)

- **Pavimento de Isla Contadora, Panamá**

En el año 2013 se realizó el proyecto de pavimentación de todas las vías de la isla y utilizaron geoceldas como estabilización para las vías de asfalto, reduciendo el tiempo y trabajo de instalación de la subbase y el volumen de piedra necesaria. (Abramovich, 2020)

### **7.2.1. En Colombia**

En Colombia, el uso de geosintéticos en obras de construcción, mantenimiento, mejoramiento y/o rehabilitación de pavimentos ha tenido un alto grado de desarrollo sobre todo en estas últimas dos décadas, debido en gran medida a los diferentes estudios que se han realizado en esta materia para lograr un mejor entendimiento acerca de las propiedades y comportamiento fisicomecánicas, instalación, aplicación, beneficios y limitaciones que poseen; encontrando resultados muy favorables relacionados con mejoras estructurales que se traducen en ahorros sustanciales, principalmente en el mantenimiento de obras de infraestructura vial; sin embargo, son pocos los proyectos de los que se tiene conocimiento en

los cuales se ha usado el concreto reforzado con geoceldas (GRC) para el mejoramiento de vías con bajos volúmenes de tránsito.

- **Localidad de Usaquén, barrio Niza Norte, Bogotá**

En la ciudad de Bogotá, la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UMV) realizó un estudio de caso con el uso de geoceldas con diferentes materiales de lleno en la localidad de Usaquén, barrio Niza Norte. Para el efecto determinó cinco tipos de estructuras, de las cuales la primera, segunda y tercera presentan un diseño convencional con material de subbase granular, base granular y capa asfáltica tipo MGR-19, y la cuarta y quinta presentan sistemas con geocelda.

Bajo estos parámetros, se llevó a cabo un plan de ensayos de laboratorio con el fin de evaluar las condiciones establecidas en los cinco tipos de diseño y así obtener datos in situ del comportamiento real de estas estructuras. Los resultados principales obtenidos por la (UMV, 2018), de las estructuras con confinamiento celular, indican que para el fresado «se registró un incremento en el coeficiente de balasto máximo entre la plataforma de soporte y el sistema de confinamiento celular lleno con fresado y sello de base granular tipo A de 103 a 104 MPa/m, equivalente al 1 %», y para la estructura con confinamiento celular más base granular tipo A indican que «se registró un incremento en el coeficiente de balasto máximo entre la plataforma de soporte y la parte superior del sistema de confinamiento celular y sello de 0,08m de base granular tipo A, de 72 a 111 MPa/m, equivalente al 35 % en el coeficiente de balasto».

También se realizó una comparación económica de las cinco alternativas, tras la que concluyeron que la intervención con la estructura «es favorable para los sectores V y IV, ya que los costos presupuestados de intervención para estos sectores fueron de \$ 58.868.832 y \$ 57.901.483, respectivamente, comparado con el sector III, el cual en el presupuesto ascendería a \$ 61.142.880 pesos»

Algunos otros casos de la implementación de pavimentos con Geoceldas en Colombia, se encuentran en el numeral 6.1 de este documento.

## **8. Metodología**

### **8.1. Delimitación**

El caso de estudio a analizar será el proyecto de pavimentación con concreto reforzado con geoceldas, de la vía terciaria de longitud 11,8 kilómetros entre el municipio de El Agrado – Muelle Guaraní, en el departamento del Huila.

Con el presente trabajo no se pretende realizar tramos experimentales o tramos de prueba para instrumentalizar, tomar muestras, y/o realizar ensayos de laboratorio.

### **8.2. Desarrollo Objetivo 1 «Recopilar los Estudios Previos y la Información Secundaria del Proyecto de Mejoramiento de la Vía El Agrado – Muelle Guaraní.»**

Para el desarrollo de este objetivo, tal como se menciona en el alcance, la metodología de trabajo es cualitativa. De este modo, para la recolección y el análisis de información se analizará principalmente la especificación particular elaborada en el marco del desarrollo del convenio INVIAS 1826 – 2020 y el artículo «CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia» en el año 2019, elaborado por el Ingeniero Joshua Schmalbach, donde se hace una descripción de la tecnología, especificaciones de materiales, control de calidad, cálculos para diseños e informe de la obra ejecutada.

Adicionalmente, se considera la información obtenida de diversas fuentes de internet, tales como comunicados de prensa, artículos de periódicos, actos administrativos expedidos por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, entre otras páginas web.

La recopilación y el análisis de esta información se encuentran detallados en el capítulo 9, donde se integran y discuten los datos relevantes para el desarrollo de esta investigación.

**8.3. Desarrollo Objetivo 2 «Inspeccionar la Superficie de Rodadura del Pavimento CRG, en el Tramo El Agrado – Muelle Guarani, en una Longitud de 11,8 Kilómetros a partir de Auscultación Visual.»**

Para cumplir con este objetivo, se llevará a cabo una investigación exploratoria y un análisis cualitativo, mediante una inspección visual del tramo El Agrado – Muelle Guarani, que abarca una longitud de 11,8 kilómetros. Esta inspección se realizará de acuerdo con los lineamientos del «Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos» (INVIAS y Universidad Nacional, 2006) y los conceptos expuestos en la revista «Patología de pavimentos articulados» por Carlos Hernando Higuera Sandoval y Óscar Fabián Pacheco Merchán, de la Universidad de Medellín (2010), como se presenta en el numeral 6.4.2.

El desarrollo, y los análisis de esta inspección visual, se encuentran en el capítulo 10, de este documento.

**8.4. Desarrollo Objetivo 3 «Realizar un Análisis Comparativo de los Costos Asociados a la Construcción de CRG y dos Alternativas Convencionales.»**

Con el fin de dar alcance a este objetivo, se establecerá como base el análisis de precios unitarios (APU) proporcionados por el INVIAS actualizados al presente año (2024), y precios de referencia del Instituto de Infraestructura y de Concesiones de Cundinamarca, considerando variables como materiales, mano de obra, herramientas y transporte, tanto para el sistema CRG como para placa huella y pavimento rígido. A partir de estos datos, se realizará un análisis comparativo de costos de construcción entre las tres alternativas. Para ello, se utilizarán herramientas estadísticas y matemáticas para cuantificar el problema de investigación.

El desarrollo de este objetivo se detalla en el capítulo 11, donde se presenta el análisis comparativo y los resultados obtenidos a partir de las metodologías aplicadas.

## **9. Estudios Previos e Información Secundaria del Proyecto de Mejoramiento de la Vía El Agrado – Muelle Guaraní**

En este apartado, se analiza principalmente la especificación particular desarrollada en el marco del convenio INVIAS 1826 – 2020 y el artículo «CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia» (2019), elaborado por el Ingeniero Joshua Schmalbach. Además, se consideran comunicados de prensa, artículos de periódicos, la Resolución No. 01727 del 05 de octubre de 2018 expedida por la ANLA, y diversas páginas web.

### **9.1. Especificación particular – Convenio INVIAS 1826 - 2020**

#### **9.1.1. Materiales a utilizar**

- a. Concreto
- b. Cemento hidráulico de alta resistencia temprana
- c. Adiciones suplementarias – Cenizas volantes
- d. Agregados
- e. Agregado fino
- f. Agregado grueso
- g. Agua
- h. Aditivos
- i. Geoceldas
- j. Acero para anclajes de Geocelda.

#### **9.1.2. Equipos**

Para definir el equipo de construcción de la capa de rodadura, el constructor debe tener en cuenta todos los aspectos relacionados con la logística de producción, transporte, colocación y las condiciones del proyecto, tales como el perfil de la vía y el espacio disponible. La selección del equipo más adecuado en términos de calidad y rendimiento debe considerar, entre otros, los siguientes aspectos:

- Perfil especificado para la vía.
- Ancho de calzada.
- Ancho de vaciado.
- Espesor de la capa de rodadura.
- Condiciones del entorno.
- Rendimiento requerido.

En todos los casos, el equipo debe ajustarse a lo dispuesto en la legislación vigente en materia ambiental, de seguridad, de salud y de transporte. Asimismo, se deberá cumplir con lo establecido en la NSR-10 en lo referente a la calidad, mezclado y colocación, así como la normativa NTC 3318/ASTM C94.

- a. Equipos para la elaboración de agregados y la producción del concreto
- b. Equipo para el transporte del concreto al sitio de las obras
- c. Equipo para la colocación del concreto
- d. Formaleta y obra falsa
- e. Vibradores

### **9.1.3. Ejecución de los trabajos**

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a. Consideraciones constructivas con relación al diseño de la capa de rodadura
- b. Explotación de materiales y elaboración de agregados
- c. Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo
- d. Almacenamiento de materiales
- e. Almacenamiento de los agregados pétreos
- f. Almacenamiento del material cementante y adiciones suplementarias
- g. Almacenamiento del material cementante y adiciones suplementarias

#### **9.1.4. Tramo de prueba**

Una vez aceptados por el interventor la fórmula de trabajo y el informe con el diseño de la mezcla, se procede a la ejecución de un tramo de prueba, utilizando el mismo equipo, velocidad de colocación del concreto, procedimientos de protección, curado y espesor.

- a. **Elementos que se deben probar:** El tramo sirve para verificar la colocación y fijación de Geoceldas, elaboración de la mezcla y comprobar que los medios de vibración disponibles son capaces de consolidar adecuadamente el concreto en todo el espesor de la capa de rodadura en la geocelda; que se cumplen las limitaciones sobre uniformidad y regularidad superficial y que el proceso de curado y protección del concreto fresco es adecuado.
- b. **Extensión del tramo de prueba:** La construcción del tramo de prueba debe tener una longitud mínima de diez metros (10 m) en un (1) carril.  
  
En caso de que los resultados del primer tramo no sean satisfactorios, este será demolido por cuenta del constructor, quien deberá construir los tramos que sean necesarios. Para ello, se podrán introducir variaciones en los equipos, métodos de ejecución o incluso en la dosificación de la mezcla, hasta obtener una capa de rodadura con las condiciones exigidas.
- c. **Calidad de la mezcla:** Para la validación del tramo de prueba, se consideran los resultados de las muestras tomadas para ensayos de resistencia a la compresión. De ser necesario, se extraerán tres (3) núcleos por zona en tres (3) áreas diferentes, con el fin de determinar la densidad del concreto endurecido (ASTM C642) y la resistencia a la compresión simple (INV E-410/ NTC 673), para un total de nueve (9) muestras por ensayo.

### 9.1.5. Proceso Constructivo

La superficie base sobre la cual se va a fundir el concreto reforzado con geoceldas debe cumplir con lo establecido en el artículo 330 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS (2022) referente a Base granular, cuando se trate de bases granulares; el artículo 340, cuando se trate sobre Base estabilizada con emulsión asfáltica; o el artículo 350, que se refiere a materiales granulares tratados con cemento como capa estructural, cuando la base ha sido tratada con cemento.

- a. **Preparación de la superficie existente:** En la ejecución de esta actividad se realiza escarificado, acordonado, extendido, nivelado y compactado del material existente y adicionado sobre la calzada, así como la conformación de cunetas y descoles.
- b. **Escarificado:** El primer paso una vez identificado, definido y asegurado el tramo a intervenir, es iniciar el proceso de escarificar, que consistente en remover la capa superficial de afirmado existente hasta una profundidad aproximada a los diez (10) centímetros. Este procedimiento tiene como objetivo aflojar la capa superficial del terreno.
- c. **Acordonado:** Una vez se ha removido y aflojado la capa superficial de afirmado, se procede a acordonar el material. Esta tarea consiste en recolectar longitudinalmente a un costado de la vía el material suelto.
- d. **Ampliación de la vía:** Si es necesaria la ampliación de la vía debido a que la calzada o alguno de los carriles no cumple con las dimensiones establecidas en los diseños, se deberá hacer un análisis y evaluación del suelo en el trazado de la vía. Esto implicará realizar el desmonte, descapote, retiro del material vegetal existente, así como su disposición final en un sitio autorizado.

Además, se realizará un análisis visual del estado del suelo y se evaluará la capacidad portante del suelo mediante el ensayo de CBR in situ, especialmente en las zonas o ejes de las cunetas, garantizando que la calzada completa cuente con la capacidad de soporte.

- e. **Extendido de materiales de Base o Sub Granular:** En esta tarea se verifica que la humedad del material sea la adecuada, si está muy alta, se procede a extender para arear o si está muy seca se humedecerá hasta alcanzar la humedad óptima. Con la cuchilla de la motoniveladora se realizan los procesos de areado o secado. El material se extiende de forma progresiva desde la parte externa (borde de vía) hacia el centro, buscando configurar el bombeo transversal.
- f. **Nivelación de material de Base o Sub base Granular:** Del mismo modo con la motoniveladora se realiza la tarea determinante de la calidad del trabajo del operador, el «cereo», es decir, llevar a ceros las cotas y niveles de la vía, con la cual se procura que no queden resaltos, depresiones y material de sobre tamaños dentro de la calzada. El proceso se repite hasta lograr una superficie totalmente nivelada cumpliendo con alineamientos y cotas preestablecidas por el diseño. Durante el proceso de extendido se deben conformar las cunetas y los descoles.
- g. **Compactación de material de Base o Sub base Granular:** Una vez que la superficie rasante del tramo de vía intervenido esté completamente nivelada, se procede al sellado y compactado del terreno, proceso que se ejecuta con vibro compactador autopropulsado. Luego, se continúa con los procesos de extendido y nivelado del material granular. La compactación inicia desde las zonas externas de la calzada hacia el eje de la vía, buscando confinar la mayor

cantidad de material granular en el centro de la vía. El número de pasadas del equipo de compactación está determinado por la densidad requerida del material instalado; en todo caso, no podrá ser inferior al 98% del Proctor Modificado (PM). Al terminar la compactación del tramo de vía, se limpian las cunetas, retirando el material rodado generado durante los procesos de extendido y nivelado.

- h. **Fabricación de anclajes para Geoceldas:** Antes de iniciar con la instalación de las geoceldas, se realiza un corte y figurado del acero en forma de gancho o recto, que es necesario para la elaboración de los anclajes utilizados para fijar las geoceldas a la subrasante. Estos anclajes se fabrican con barras de acero de diámetro 3/8" o 1/2" y una longitud de cincuenta (50) centímetros. El objetivo de estos anclajes es asegurar la fijación de las geoceldas a la rasante, evitando así su flotación durante el proceso de vaciado de concreto.
- i. **Instalación de las Geoceldas:** Para realizar la instalación de las geoceldas, se comienza con los trabajos en uno de los carriles, ya sea el derecho o el izquierdo, con el fin de no cerrar la vía en su totalidad. Se extienden las secciones, se aseguran y se unen mediante chapetas plásticas, que funcionan como dispositivo de conexión entre geoceldas. Es necesario tensionar las geoceldas utilizando templetes fabricados con barras de acero de 3/8", que se instalan en los extremos longitudinales y en los vértices (centro, extremo izquierdo y derecho de la vía, así como en los vértices de cunetas o en puntos de cambio de dirección). Estos templetes se fijan mediante anclajes que deben estar distanciados mínimo cada cuarenta (40) centímetros.
- Las celdas deben estar adecuadamente tensionadas, de tal forma que se logre una apariencia romboidal homogénea en todo el conjunto de las celdas que

componen las secciones instaladas. Es fundamental que el constructor asegure que en el momento de instalar las geoceldas, estas se mantengan lo más cercano posible a la estructura de base granular, evitando subir el espesor del pavimento.

- j. **Fundición del concreto:** Se deben tener en cuenta aspectos como perfil del pavimento, ancho de calzada, ancho de la fundida, espesor de la capa de rodadura, condiciones de sitio de colocación y las condiciones particulares del proyecto para seleccionar el sistema de colocación. La colocación debe empezar a lo largo del perímetro, en un extremo del área de trabajo, descargando cada amasada contra el concreto anteriormente colocado.
- k. **Integración monolítica de cunetas perimetrales:** El sistema de pavimentación utilizando concreto con geoceldas debe garantizar la simultaneidad en la construcción de las cunetas perimetrales, esto permitirá evitar problemas de socavaciones e inestabilidad en la estructura de relleno del pavimento.
- l. **Acabado superficial de la capa de rodadura construida:** Para el proceso de construcción del pavimento en concreto reforzado con Geoceldas el acabado superficial se da desde el momento del vibrado con regla vibratoria, logrando una superficie plana y ajustada a las cotas del proyecto dentro de las tolerancias permitidas.
- m. **Protección y curado del concreto:** Durante el tiempo de fraguado, el concreto debe ser protegido contra el lavado por lluvia, contra la insolación directa, el viento y la humedad ambiente baja.
- n. **Apertura al tránsito:** Los concretos especiales utilizados en la fundición de la capa de rodadura con el sistema de concreto reforzado con geoceldas, permiten

dar apertura al tránsito a partir del quinto día, siempre y cuando se cumplan requisitos mínimos como:

- El tránsito de obra y el tránsito vehicular no puede circular sobre el pavimento, mientras este no haya alcanzado una resistencia a la compresión mínima de 3000 PSI o 21 MPa.

## **9.2. Artículo «CRG, Concreto reforzado con geoweb vía El Agrado, Huila, Colombia», Schmalbach, 2019**

### **9.2.1. Generalidades**

La vía construida se ejecutó utilizando la tecnología CRG, con un ancho de calzada de cinco (5,5) metros, conformada monolíticamente con cuentas de noventa (90) centímetros y una pendiente del dos por ciento (2%), gestionando el agua mediante descargas a alcantarillas.

El sistema usó concreto de 3500 psi producido por la compañía Argos, y una Geocelda tipo GW30V producida por Presto *Geosystem*, las dimensiones de esta se muestran en la **Tabla 12**. Adicionalmente, se elaboró un tramo de prueba, en una longitud de 400 metros, según se ve en la En la **Figura 17**.

Tabla 12.

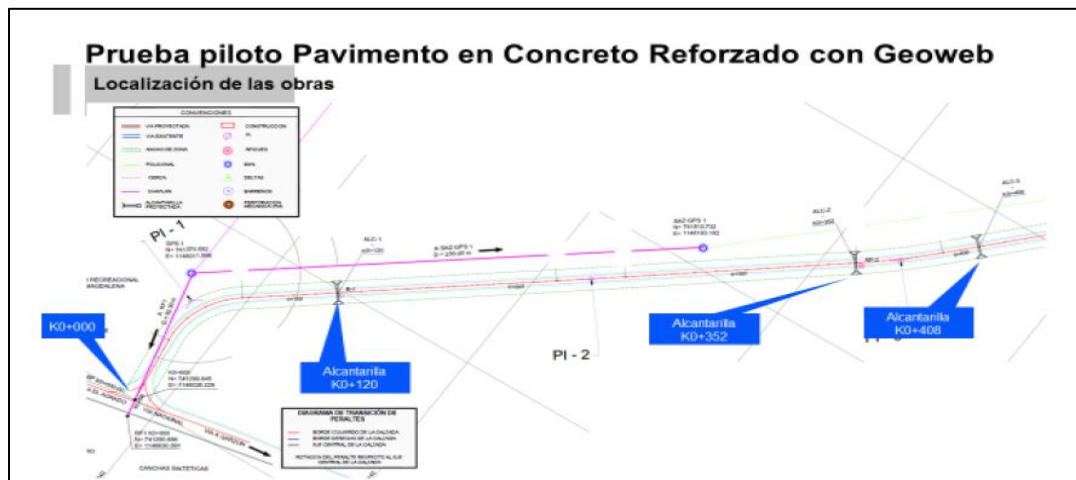
*Dimensiones Geocelda tipo GW30V*

TIPO TT				
Tipo de Celda	Dimensiones referenciales +- 10%		Densidad por $m^2$	Área referencial +- 1%
	Longitud	Ancho		
GW30V	287 mm (11.3 in)	320 mm (12.6 in)	18.2	460 $cm^3$ (71.3 $in^2$ )

Nota. Manual de diseño geométrico para vías veredales con pavimento de concreto reforzado con GEOWEB (CRG). Pág. 23

Figura 17.

*Localización de la obra*



Nota. CRG, Concreto reforzado con geoweb vía El Agrado, Huila, Colombia, Schmalbach R, 2019

**9.2.2. Estudios Realizados**

En el siguiente apartado se presentarán los estudios de suelos y tránsitos desarrollados para la construcción del pavimento con Geoweb, de acuerdo con Schmalbach R, 2019

**9.2.2.1. CBR de la Subrasante**

Los ensayos de CBR los realizó la empresa Construcsuelos Suministros Ltda. [Ver Anexo 4 – Reporte de Campo de CBR], los valores de CBR encontrados en campo fueron: 20.9%, 22.5% y 37.1%, lo que implica un Módulo Resiliente de la subrasante aproximadamente de 117 MPa, como se evidencia a continuación:

- **CBR Subrasante:** 20%. Ver Anexo 4 – Estudio de Suelos
- **Ecuación del MOP (2004) Chile:**

$$M_r \text{ Subrasante} = 22.1 * CBR^{0.55}$$

(MPa), para  $12\% < CBR < 80\%$

- **Ecuación de Ing. Reyes Lizcano (2003) Colombia:**

$$M_r \text{ Subrasante} = 5 CBR \text{ (MPa)}, \text{ para } CBR < 10\%$$

- **Ecuación Heukelom y Foster (1960) y Heukelom y Klomp (1962):**

$$M_r \text{ Subrasante} = 10 CBR \text{ (MPa)} \text{ o } 1500 CBR \text{ (PSI)}; \text{ para } CBR < 10\%$$

Teniendo en cuenta que el  $CBR > 10\%$  se utiliza la ecuación del MOP Chile:

$$M_r \text{ Subrasante} = 22.1 * 20^{0.55}$$

$$M_r \text{ Subrasante} = 115 \text{ MPa}$$

#### 9.2.2.2. Tránsito

Con el propósito de evaluar las condiciones actuales de movilidad vehicular en la vía objeto de análisis y corroborar que el nivel de tránsito de diseño sea consistente con lo medido en campo, se elaboró el estudio de tránsito, ya que esta variable desempeña un papel crucial en el diseño de cualquier estructura de pavimento. En primer lugar, se recolectó información primaria a través de aforos vehiculares continuos durante un período de 24 horas, a lo largo de

7 días consecutivos. Posteriormente, se procedió a la estimación del volumen de tránsito existente y su distribución por tipos de vehículos. Finalmente, se calculó el Tránsito Promedio Diario Semanal (TPDs), brindando un panorama claro y preciso de la demanda vehicular actual. Este enfoque integral asegura que el diseño del pavimento esté fundamentado en datos reales y proyecciones confiables.

**Análisis de la información primaria:** El formato utilizado en campo utilizado se muestra en la Tabla 13. El periodo de toma de información de volúmenes vehiculares se hizo por intervalos de 60 minutos, en el horario comprendido entre las 00:00 horas y las 24:00 horas. La estación de conteo se ubicó en el K0+150.

Tabla 13.

*Formato de campo – Conteos vehiculares*

FORMATO CONTEOS MANUALES DE TRÁNSITO - PROYECTO DE GRADO - GEOCELAS

AFORADOR:

ESTACION No. 001

FECHA:

AÑO: 2024

HORA	MOTOS										BUS - BUSETA			CAMIONES				AUTOMÓVIL, TAXI, CAMPERO, MICROBUSES, COLECTIVOS, PICK-UP.										
	CATEGORÍA 1										CATEGORÍA 2			2 EJES <small>Pesados y Grandes</small>		CATEGORÍA 3		CATEGORÍA 4		CAT. 5								
00.00 - 1.00	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	20	25	30	35	40
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	20	25	30	20	25	30	20	25	30	45	50	55	60	65	70	75	80
	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	35	40	45	35	40	45	35	40	45	85	90	95	100	105	110	115	120
	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	50	55	60	50	55	60	50	55	60	125	130	135	140	145	150	155	160
	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275	65	70	75	65	70	75	65	70	75	165	170	175	180	185	190	195	200
SUBTOTAL																												
1.00 - 2.00	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	20	25	30	35	40
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	20	25	30	20	25	30	20	25	30	45	50	55	60	65	70	75	80
	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	35	40	45	35	40	45	35	40	45	85	90	95	100	105	110	115	120
	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	50	55	60	50	55	60	50	55	60	125	130	135	140	145	150	155	160
	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275	65	70	75	65	70	75	65	70	75	165	170	175	180	185	190	195	200
SUBTOTAL																												
2.00 - 3.00	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	20	25	30	35	40
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	20	25	30	20	25	30	20	25	30	45	50	55	60	65	70	75	80
	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	35	40	45	35	40	45	35	40	45	85	90	95	100	105	110	115	120
	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	50	55	60	50	55	60	50	55	60	125	130	135	140	145	150	155	160
	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275	65	70	75	65	70	75	65	70	75	165	170	175	180	185	190	195	200
SUBTOTAL																												
3.00 - 4.00	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	20	25	30	35	40
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	20	25	30	20	25	30	20	25	30	45	50	55	60	65	70	75	80
	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	35	40	45	35	40	45	35	40	45	85	90	95	100	105	110	115	120
	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	50	55	60	50	55	60	50	55	60	125	130	135	140	145	150	155	160
	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275	65	70	75	65	70	75	65	70	75	165	170	175	180	185	190	195	200
SUBTOTAL																												

Nota. Elaboración propia

Seguidamente, en la Tabla 14 se presenta el Tránsito Diario (TD) calculado durante los

7 días.

Tabla 14.

Tránsito Diario

**EL AGRADO - MUELLE GUARANÍ**

DÍA	MOTOS	AUTOS	BUSES	C-2P	C-2G	C3
1	651	50	2	1	0	0
2	833	96	1	1	0	0
3	734	90	0	0	0	0
4	772	91	0	0	0	2
5	690	90	0	3	0	0
6	720	107	0	3	0	0

**EL AGRADO - MUELLE GUARANÍ**

DÍA	MOTOS	AUTOS	BUSES	C-2P	C-2G	C3
7	475	46	0	4	0	0
TOTAL VEHÍCULOS	4875	570	3	12	0	2
<b>TPD's</b>	697	82	1	2	0	1

*Nota.* Elaboración propia

Además, se obtiene la Composición vehicular en TPDs, según la clasificación de los vehículos presentada en la Figura 18 . Los resultados se presentan en la **Tabla 15**

Figura 18.

*Clasificación tipo de vehículo.*



*Nota.* Efecto del Tránsito en las estructuras de pavimento. Instituto de Desarrollo

Urbano – Dirección Técnica Estratégica

Tabla 15.

*Composición vehicular y TPDs*

ESTACIÓN	TRAMO	LONG. (Km)	TPDs	COMPOSICIÓN VEHICULAR (%)					TOTAL
				AUTOS	BUSES	C-2P	C-2P	C3	
EL AGRADO - K0+0150	EL AGRADO - MUELLE GUARANÍ	11,8	82	1	2	0	1	86	
			95%	1%	2%	0%	1%		

*Nota.* Elaboración propia

Mediante Conteos vehiculares se obtiene el TPD para vehículos pesados, el cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$TPD = \frac{(1 + r)^n - 1}{Ln(1 + r)} * TPDs$$

Donde,

r: Tasa de crecimiento (%)

n: Años proyectados (20 años)

Entonces,

$$TPDs = \frac{(1 + 0.03)^{20} - 1}{Ln(1 + 0.03)} * 4$$

$$TPDs = 109.9$$

De acuerdo con el resultado del TPD se va a la Tabla 16, y se obtiene que la categoría de la vía es T0 según la normativa INVIAS, lo cual es un valor típico para vías terciarias o vías con bajos volúmenes de tránsito.

Tabla 16.

*Clasificación de ejes por tipo de vía.*

Categoría	Tipo de vía	TPDs	Ejes acumulados de 8.2 t
To	(Vt)-(E)	0 a 200	< 1.000.000
T1	(V <sub>s</sub> ) – (M ó A) – (CC)	201 a 500	1.000.000 a 1.500.000
T2	(V <sub>p</sub> ) – (A) – (AP – MC – CC)	501 a 1.000	1.500.000 a 5.000.000
T3	V <sub>p</sub> ) – (A) – (AP – MC – CC)	1.001 a 2.500	5.000.000 a 9.000.000
T4	V <sub>p</sub> ) – (A) – (AP – MC – CC)	2.501 a 5.000	9.000.000 a 17.000.000
T5	V <sub>p</sub> ) – (A) – (AP – MC – CC)	5.001 a 10.000	17.000.000 a 25.000.000
T6	V <sub>p</sub> ) – (A) – (AP – MC – CC)	Más de 10.001	25.000.000 a 100.000.000

*Nota. INVIAS*

### 9.2.3. Aplicación del Método Racional

Una vez establecido el nivel de tránsito se procede a calcular las deformaciones admisibles, aplicando las siguientes ecuaciones:

- Para un nivel de tránsito menor a T3:

$$T < T3 = \varepsilon_{zadm} = 0.016 (NE)^{-0.222}$$

- Para un nivel de tránsito mayor o igual a T3:

$$T \geq T3 = \varepsilon_{zadm} = 0.012 (NE)^{-0.222}$$

Así, las cosas tenemos:

$$\varepsilon_{zadm} = 0.016 (1.00E + 06)^{-0.222}$$

$$\varepsilon_{zadm} = 7.45E - 04$$

Ahora bien, dentro de los parámetros importantes a definir para calcular las deformaciones mediante el método racional se encuentra el módulo de Poisson de los materiales que conforman cada una de las capas de la estructura, de los cuales se encontraron las referencias presentadas en la Tabla 17 a la Tabla 19.

Tabla 17.

Valores típicos para Concreto hidráulico

Material	Mín. y Máx. Módulo E, Ksi		Valor típico Módulo E, Ksi	Módulo Poisson $\nu$
	Mínimo	Máximo		
Concreto hidráulico	-	-	-	0.15 – 0.20
Concreto agrietado	200	800	500	0.20
Concreto fracturado	250	2000	1200	0.20

Nota. <https://www.mop.gob.sv/wp-content/uploads/2010/03/poisson.pdf>

Tabla 18.

Valores típicos para materiales de subbase y base

Material	Mín. y Máx. Módulo E, Ksi		Valor típico Módulo E, Ksi	Módulo Poisson ν
	Mínimo	Máximo		
Subbase Granular	5	30	20	0.20 – 0.40
Base Granular	5	50	30	0.20 – 0.40

*Nota.* <https://www.mop.gob.sv/wp-content/uploads/2010/03/poisson.pdf>

Tabla 19.

*Valores típicos para suelos*

Material	Módulo de elasticidad E (MPa)	Módulo Poisson ν
Arena suelta	10.5 – 24.0	0.20 – 0.40
Arena media	17.0 – 27.0	0.25 – 0.40
Arena densa	34.5 – 55.0	0.30 - 0.45
Arena muy densa	> 60.0	0.30 - 0.45
Limo arenoso	10.5 – 17.5	0.20 – 0.40
Arena y grava	69.0 – 175.0	0.15 – 0.35
Arcilla blanda	2.0 – 5.0	-
Arcilla media	5.0 – 10.0	0.20 - 0.50
Arcilla rígida	10.0 - 24.0	-

*Nota.* <https://www.mop.gob.sv/wp-content/uploads/2010/03/poisson.pdf>

En ese sentido los valores adoptados se presentan en la Tabla 20

Tabla 20.

*Valores de la relación de Poisson adoptados*

Módulo	Valor
Poisson concreto	0.20
Poisson subbase	0.40
Poisson subrasante	0.50

*Nota.* Elaboración Propia

Posteriormente, siguiendo la teoría multicapa con un planteamiento lineal elástico, se calculan los esfuerzos y deformaciones que tendrá cada capa. Para ello es necesario conocer el módulo de capa granular; por lo tanto, se tiene lo siguiente:

- **$E_{\text{subbase 1}} = K * Mr_{\text{subrasante}}$**

Donde, K está en el rango de (3-2) en función de la categoría del material, para nuestro caso 2.5

$$E_{\text{subbase1}} = 2.5 * 115 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{subbase1}} = 288 \text{ MPa (Espesor de 25 cm)}$$

- **E subbase 2 = K \*E subbase 1**

$$E_{\text{subbase 2}} = 2.5 * 288 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{subbase 2}} = 720 \text{ MPa (Espesor de 15 cm)}$$

Cabe resaltar que se dividen en dos secciones los módulos de la subbase, toda vez que, de acuerdo con los apiques realizados para la caracterización de los materiales de la estructura de pavimento existente se encontró un espesor de subbase granular de 40 centímetros, en ese sentido, siguiendo las recomendaciones de Rondón y Reyes (2022), los módulos se deben calcular para espesores de capas granulares que no superen los 25 centímetros en caso contrario se debe dividir esta capa.

En cuanto al módulo de elasticidad del concreto hidráulico, se aplicó la siguiente expresión, desarrollada por el Ing. Rodrigo Quimbay Herrera (Quimbay Herrera, s.f):

$$E_c = 3900 \sqrt{f_c}$$

$$E_c = 3900 \sqrt{25 \text{ MPa}}$$

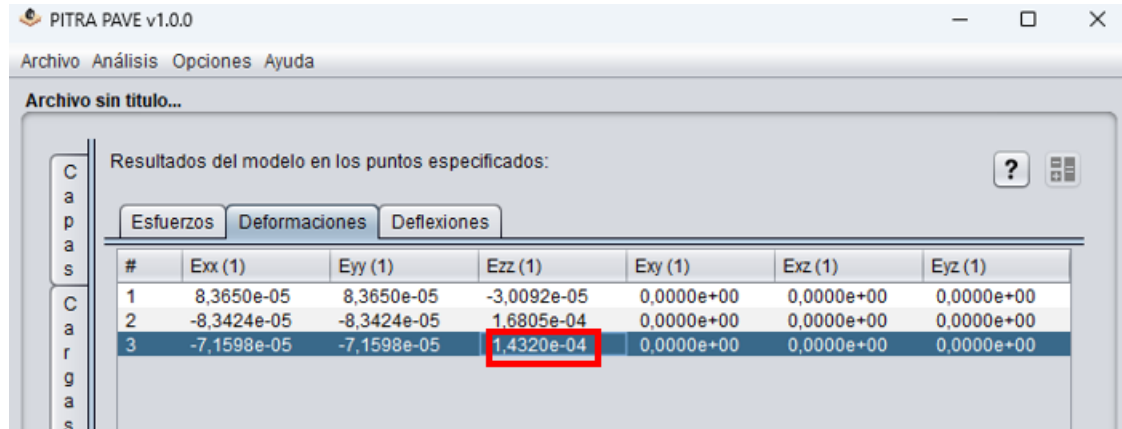
$$E_c = 19500 \text{ MPa}$$

Otras consideraciones a tener en cuenta para determinar la deformación que se generará en el punto inferior de la estructura, mediante el análisis racional, es que el espesor de la capa de rodadura será de 10 cm en concreto hidráulico, espesor de la subbase granular de 40 cm, la subrasante actuará como una estructura de soporte infinita de 115 MPa y la carga

típica será la de un vehículo C3 según la normativa INVIAS. Finalmente, se calcularon las deformaciones con ayuda del programa PITRA PAVE. Los resultados se pueden observar en la Figura 19

Figura 19.

### Análisis de Modelo Racional



Resultados del modelo en los puntos especificados:						
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	8,3650e-05	8,3650e-05	-3,0092e-05	0,0000e+00	0,0000e+00	0,0000e+00
2	-8,3424e-05	-8,3424e-05	1,6805e-04	0,0000e+00	0,0000e+00	0,0000e+00
3	-7,1598e-05	-7,1598e-05	1,4320e-04	0,0000e+00	0,0000e+00	0,0000e+00

Nota. Elaboración Propia

Los resultados encontrados son  $\epsilon_{z adm} > \epsilon_{z calc}$ :

$$7.45 > 1.43$$

Una vez verificado que el diseño cumple con las deformaciones admisibles, se debe calcular el esfuerzo a tracción; para esto, es necesario comprobar que la estructura no presentará falla por fatiga antes de alcanzar el número de repeticiones de carga de los ejes equivalentes, mediante el método de la PCA (*Portland Cement Association*) método aceptado en Colombia y certificado por la AASHTO (*America Association of State Highway And Transportation Officials*).

En ese orden de ideas, se determinó el Módulo de Rotura del concreto, el cual se obtiene mediante la siguiente correlación:

$$S_c = 2,7 \sqrt{f'c} = 2,7 \sqrt{250 \frac{Kg}{cm^2}} = 427 \frac{Kg}{cm^2} = 4.2 MPa$$

Donde,

$MR = S_c$  = Módulo de Rotura estimado para el concreto hidráulico

$f'c$  = resistencia a la compresión del concreto hidráulico; [25 MPa] [250 Kg/cm<sup>2</sup>]

$k$  = Constante que varía normalmente entre [2,0 - 2,7], para resistencias en Kg/cm<sup>2</sup>

Esta ecuación se obtiene de la correlación entre la resistencia la flexión y la resistencia a la compresión.

El módulo de rotura presenta valores que varían entre un 10% y un 20% de la resistencia a la compresión. Una relación aproximada, que puede utilizarse cuando no se disponga de ensayos de flexión es la siguiente:

$$MR = k (RC)^{\frac{1}{2}}$$

Donde,

MR: Módulo de rotura estimado para el concreto (kg/ cm<sup>2</sup>)

RC: Resistencia a la compresión obtenida en el concreto (kg/ cm<sup>2</sup>)

K: Constante que varía normalmente entre 2.0 y 2.7, para resistencias en (kg/ cm<sup>2</sup>) a 28 días. (Ing. Gerardo Rivera).

Luego, se calculó el esfuerzo de tensión del concreto, incluyendo la Geocelda, mediante la ecuación formulada por el Ingeniero Joshua Smalbach (2018):

$$\sigma_t = \frac{\frac{3L}{2} \left( \frac{R_s}{2} + \frac{720h - 21}{N_u} \right) - \frac{3 P_l a^3 \pi}{2}}{bh^2} = 0.86. MPa$$

Donde,

L: Longitud de la celda

$R_s$ : Reacción del suelo

h: Altura de la celda

$N_u$ : Número de llantas

b: Ancho de la celda

$P_l$ : Presión de la llanta

a: Radio de la llanta

Los valores para cada parámetro se resumen en la Tabla 21:

Tabla 21.

Valores de los parámetros para el cálculo del esfuerzo de tensión del concreto

Parámetro	Und	Valor	Observación
L	m	0.287	Obtenido de la especificación de la Geocelda GEOWEB GW30V
$R_s$	MPa/m	74.451	Valor correlacionado con el CBR* (Reyes & Rondón – 2022)
h	m	0.100	Obtenido de la especificación de la Geocelda GEOWEB GW30V
$N_u$	-	4.00	Eje Tándem camión C3
$P_l$	MPa	0.552	
a	m	0.120	
b	m	0.320	Obtenido de la especificación de la Geocelda GEOWEB GW30V

Nota: Autor: Ingeniero Joshua Smalbach

$$* R_s = 46 + 9.08[\log(CBR)]^{4.34}; \text{ para } CBR > 10\% R_s = 74.451 \text{ MPa}$$

Finalmente, se determinó el número de repeticiones admisibles con base en las siguientes fórmulas, encontrando que el número de repeticiones admisibles [ $N_f$ ] antes de que se produzca la falla por fatiga será ilimitado.

$$\frac{\sigma_t}{S_c} = 0.22$$

$$\frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55 \quad \text{Log}(N_f) = 11.737 - 12.077 \left(\frac{\sigma}{S_c}\right)$$

$$0.45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0.55 \quad N_f = \left(\frac{4.2577}{\left(\frac{\sigma}{S_c}\right) - 0.4325}\right)^{3.27}$$

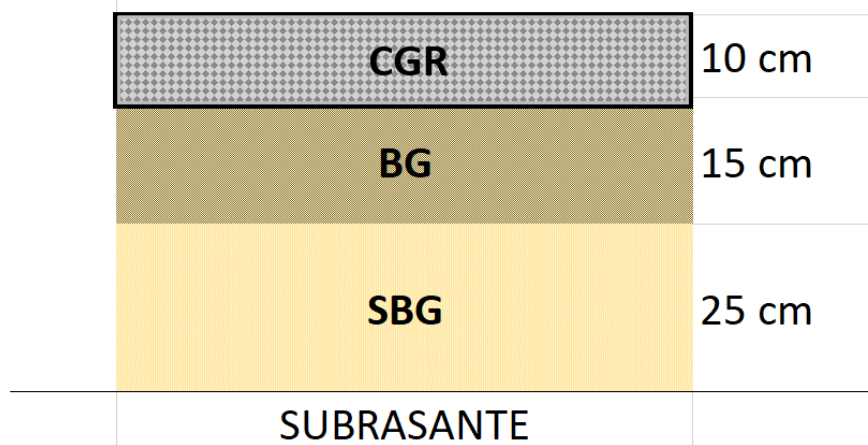
$$\frac{\sigma}{s_c} \leq 0.45$$

$N_f = \text{Ilimitado}$

A continuación, se presenta en la **Figura 20**, la estructura diseñada:

Figura 20.

*Estructura de pavimento en concreto reforzado con geoceldas*



*Nota:* Elaboración Propia

#### 9.2.4. Equipo

El equipo utilizado para la localización, replanteo y proceso constructivo fue el siguiente:

- Estación total, un GPS, dos (2) prismas con sus respectivos bastones, los cuales deben ir previamente aprobados por la Interventoría.
- Equipos de manejo del concreto; jaladores, regla vibratoria, escoba para textura del concreto.

#### 9.2.5. Información constructiva

En la **Figura 21** se presenta el tramo de Prueba del pavimento en concreto reforzado con Geoweb, CRG

Figura 21.

*Tramo de Prueba pavimento en concreto reforzado con Geoweb, CRG*



*Nota.* CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia, Schmalbach R., 2019

#### 9.2.5.1. Instalación de Geoweb:

Para el tramo de prueba se instalaron 700 m<sup>2</sup> en 135 metros de longitud de GRC, siguiendo las recomendaciones del manual de manejo e instalación de CRG dado por PRESTO GEOSYSTEM, se usaron estacas de varilla de acero de  $\frac{3}{4}$ " , se dejaron a lo largo de toda la vía pasando por el ojal de unión de la última celda varillas de  $\frac{3}{4}$ " para ser usadas como anclaje lateral y monolítico del bordillo. En las **Figura 22** a la **Figura 23** se presenta la instalación del Geoweb

Figura 22.

*Instalación de Geoweb*



*Nota.* CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia,

Schmalbach R., 2019

Figura 23.

Instalación de Geoweb (2)



*Nota.* Así avanza la obra de pavimentación de la vía entre el agrado a muelle guaraní,

La Nación, 2021

#### 9.2.5.2. Concreto:

El concreto utilizado fue de 24 MPa con un asentamiento de 7 “, según se presenta en la

Figura 28Figura 24

Figura 24.

Reporte de concretos

ESQUEMA DE LOS TIPOS DE FALLA										NORMA NTC-423-2019															
										CLASE DE CONCRETO: CONCRETO DE 350 Kg/cm <sup>2</sup> (6000PSI) y 245 Kg/cm <sup>2</sup> (3500PSI)															
										FECHA DE REPORTE: viernes, 22 de noviembre de 2019															
										REPORTE CONSOLIDADO															
FECHA DE FUNDICIÓN	HORA DE FUNDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	ASENTAMIENTO (Pulg)	CONTENIDO DE AIRE (%)	CODIGO REGISTRO	N° CILINDRO	D (mm)	L (mm)	AREA (mm <sup>2</sup> )	PESO (kg)	CARGA (KN)	EDAD (Días)	FECHA DE ROTURA	RESISTENCIA OBTENIDA				% DE EVOLUCIÓN	TIPO DE FALLA	PESO UNIT. (Kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA ESPECIFICADA			DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO FUNDIDO	
														Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>	PSI	Prom (PSI)				Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>	PSI		
20/10/2019						1	101.53	202.61	8112.1	3795	190.30	2	22/10/2019	22.9	228.0	3269	3296	66%	TIPO 5	2309					
20/10/2019						2	100.79	202.78	7977.8	3744	190.43	3	23/10/2019	33.3	333.6	3332			TIPO 2	2396					
20/10/2019	10:20	35.7°	8.14"	-	VIA GEO-A1	3	100.50	202.11	7807.5	3718	201.87	3	23/10/2019	24.8	247.7	3928	3538	71%	TIPO 2	2306					Fundición de concreto reforzado con GEOCELDAS (tipo RC-145) concreto A-1000, muestreo realizado en la DE-800000, Referencia: 82217341
20/10/2019						4	100.53	202.42	7852.5	3819	201.31	3	23/10/2019	24.6	246.5	3821			TIPO 5	2358					
20/10/2019						5	100.39	201.11	7894.4	3776	272.44	7	27/10/2019	33.4	333.5	4756	4684	94%	TIPO 5	2349	35	500	3000		
20/10/2019						6	100.27	201.31	7895.7	3810	260.97	7	27/10/2019	32.2	322.1	4600			TIPO 3	2397					
20/10/2019						7	101.53	202.88	8095.4	3782	357.79	28	17/11/2019	43.1	430.8	6154	6056	122%	TIPO 3	2294					
20/10/2019						8	100.72	202.66	7999.7	3821	345.81	28	17/11/2019	42.9	422.7	6028			TIPO 3	2374					
20/10/2019						9	100.38	202.63	7913.5	3782	245.53	2	22/10/2019	30.7	307.0	4386	4444	89%	TIPO 2	2364					
20/10/2019						10	100.75	202.91	7971.4	3818	227.87	2	22/10/2019	31.5	315.1	4502			TIPO 3	2359					
20/10/2019	10:30	31.9°	8"	-	VIA GEO-A2	11	101.15	201.65	8035.7	3800	279.74	3	23/10/2019	34.0	339.5	4851	4764	95%	TIPO 2	2345	35	500	3000		Fundición de concreto reforzado con GEOCELDAS (tipo RC-145) concreto A-1000, muestreo realizado en la DE-800000, Referencia: 82217342
20/10/2019						12	100.68	202.12	7960.5	3878	287.44	3	23/10/2019	32.7	327.6	4677			TIPO 2	2410					
20/10/2019						13	100.32	202.09	7903.5	3820	296.29	7	27/10/2019	48.0	488.4	6970	7193	144%	TIPO 3	2403					
20/10/2019						14	101.05	206.06	8019.0	3845	427.60	7	27/10/2019	51.9	518.5	7405			TIPO 3	2328					

Nota. CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia,

Schmalbach R., 2019

El concreto fue vertido en la matriz formada por el Geoweb. Adicionalmente, el concreto fue transportado desde Neiva hasta el Agrado en Mixer con volúmenes de 7m<sup>3</sup>.

Se tomaron cilindros, temperatura y asentamiento de cada Mixer, se rompieron cilindros a las 24, 48 y 72 horas para determinar la resistencia de cada lote de concreto. En la **Figura 25** y en la **Figura 26** se presenta el fundido de concretos en las geoceldas.

Figura 25.

Fundido de concretos



Nota. CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia,

Schmalbach R., 2019

Figura 26.

Fundido de concreto en la Geoceldas



*Nota.* Schmalbach R., 2019

El concreto se distribuyó en la matriz, se vibró, dio acabado buscado que el nivel no superara la altura de la pared de la celda y se procedió con antisol, siguiendo lo establecido por el manual de instalación. En la **Figura 27** a la **Figura 29** se presenta la continuación del fundido de concreto hasta su acabado.

Figura 27.

Fundido de concreto en las Geoceldas (2)



*Nota.* Schmalbach R., 2019

Figura 28.

*Procedimiento para dar el acabado al concreto*



*Nota.* CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia, Schmalbach R, 2019

Figura 29.

Acabado de concreto en la Geocelda



*Nota.* Schmalbach R, 2019

### **9.2.5.3. Cunetas y manejo de aguas pluviales:**

El manejo de aguas se trabajó con cuentas fundidas monolíticamente con los carriles de y la pendiente de la vía, se garantizó bombeo central con pendiente del 2% hacia los extremos, las cuentas terminaron en descargas hacia encoles del alcantarillado elaboradas con GRC

labrado en escalones a fin de disipar la energía del agua y controlar la erosión en la descarga.

En la **Figura 30** se presentan los descoles.

Figura 30.

*Descoles en GRC*



*Nota.* CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia, Schmalbach R, 2019

Las cunetas fueron de tipo triangular de forma en «V» con un ancho de 60 cm ancho x 18 cm alto, fundidas monólicamente con la calzada.

#### **9.2.6. Antes y Después**

En la **Figura 31** se presenta el tramo de prueba piloto en concreto reforzado con Geoweb donde se observa un muy acabado y comportamiento de la estructura de pavimento CRG en los primeros 400 metros lineales, por lo que se decide continuar el mejoramiento de la vía, con la misma estructura de pavimento y conservando la misma sección transversal.

Figura 31.

*Prueba Piloto Pavimento en Concreto reforzado con Geoweb*



22 de agosto de 2019.  
Inicio del tramo de prueba.  
Condiciones antes de obra



20 de noviembre de 2019.  
Inicio del tramo de prueba.  
Condiciones después de obra

*Nota.* CRG, Concreto reforzado con geo web vía El Agrado, Huila, Colombia,

Schmalbach R., 2019

### **9.2.7. Beneficios para la Región**

Este sistema reduce los tiempos de construcción, no requiere de la suspensión o desvío del tráfico mientras se adelanta la instalación, reduce los periodos de apertura vial, permite el paso de vehículos de carga, reduce las actividades de mantenimiento y mitiga la huella de carbono por el uso de menos agregado, hierro, cemento, formaletas en madera y cargas, menos viajes y emisiones, lo que se traduce en un menor impacto al medio ambiente a las comunidades de influencia y en la optimización y uso eficiente de los recursos. (La Nación, 2021)

### **9.2.8. Análisis Proyecto de Mejoramiento de la vía El Agrado – Muelle Guaraní con GRC**

1. La construcción de 11,8 kilómetros de GRC se hizo en un plazo total de ocho meses. Se puede alcanzar rendimientos del orden de 100 metros lineales por día de trabajo, lo que implica un 1 kilómetro cada 10 días laborales, generando así una reducción significativa de los tiempos de construcción.

2. El sistema CRG demostró que es posible construir la vía sin obstruir el tránsito, no se cerró en ningún momento la movilidad vehicular.

3. La reducción de espesor de concreto con respecto a otros tipos de pavimento se debe a la condición de confinamiento del concreto por la geocelda, esta absorbe la dilatación del concreto y también los esfuerzos a tensión, contribuyendo así a la disminución de la huella de carbono y de los costos del proyecto.

4. Reducción significativa de acero, debido a que el acero que se requiere sólo se utiliza para generar algunos puntos de anclaje.

5. Los sistemas de unión del Geoweb garantizan la integridad del sistema evitando efectos de rotura tipo cremallera.

6. Los costos son inferiores a los de placa-huella según los análisis realizados.

7. Se tiene una rodadura completa y no sólo dos huellas de 90 cm de tránsito como en el caso de la placa huella, mejorando así las condiciones de seguridad vial.

8. El tiempo de aprendizaje es corto, esto se debe en gran medida a que no se requieren conocimientos ni equipos especializados para la instalación de la geocelda, garantizando una buena continuidad en el tiempo constructivo y el uso de la mano de obra no calificada de la comunidad que reside en el sector.

## 10. Estudio de la Condición Superficial del Pavimento, en el Tramo El Agrado – Muelle Guaraní, en una Longitud de 11,8 Kilómetros a Partir de Auscultación Visual

De acuerdo con lo mencionado en el numeral 8.3, el autor de este documento desarrolló la auscultación visual en tramos de 100 metros a lo largo de la vía terciaria en estudio, según se observa en la **Figura 32**. A continuación, se presenta el procedimiento y los resultados encontrados en la visita.

Figura 32.

*Auscultación visual en tramos de 100 metros a lo largo de la vía terciaria en estudio*



*Nota.* Elaboración propia

### 10.1. Formato Utilizado

El formato utilizado para la recopilación de la información en campo se toma como referencia el propuesto en el Manual de Inspección Visual de Pavimentos del INVIAS. Se presenta el formato utilizado para el registro de los datos en la visita de inspección. Por tratarse de un tramo homogéneo en cuanto al tipo de pavimento, se dividió la longitud de la vía en tramos de 100 metros, con el fin de realizar una inspección detallada y manejable. En la

Tabla 22 se presenta el formato utilizado para la evaluación del pavimento reforzado con geoceldas

Tabla 22.

Formato para la evaluación del pavimento reforzado con geoceldas

FORMATO PARA LA EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO REFORZADO CON GEOCELDAS											
<b>DEPARTAMENTO:</b>		HUILA		<b>FECHA:</b>		23-jun-24		<b>CONCESIÓN:</b>		<b>K INICIAL:</b>	0+000
<b>MUNICIPIO:</b>		EL AGRADO		<b>LEVANTADO POR:</b>		W. SANTANDER		<b>MTTO INTEGRAL:</b>		<b>K FINAL:</b>	11+800
<b>NOMBRE DE LA VÍA:</b>		EL AGRADO - MUELLE GUARANÍ						<b>VIA Terciaria:</b>	X	<b>HOJA: 1 DE X</b>	
PATOLOGÍA											
Carril	Abscisa	Tipo	Severidad	Daño		Reparación		Foto	Aclaraciones		
				Largo (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Ancho (m)				
Número de calzadas: 1								COMENTARIOS: Levantamiento de información primaria para el desarrollo del Trabajo de Grado de la Maestría en Infraestructura Vial. Se toma como referencia el formato establecido en el Manual de Inspección Visual del INVIAS.			
Número de carriles por calzada:											
Ancho de carril:				Ancho de berma:							

*Nota.* Elaboración propia

## 10.2. Patologías Encontradas

Para mejor comprensión de este apartado, se presenta la siguiente tabla, donde se muestran el resumen de los tipos de daño, de acuerdo con lo establecido en el numeral 6.4.2.

En la **Tabla 23** se presentan los tipos de daños.

Tabla 23.

*Tipo de deterioros en el pavimento CRG*

DEFORMACIONES (3)			DESPRENDIMIENTOS (3)		
DESCRIPCIÓN	Cod	Ud.	DESCRIPCIÓN	Cod	Ud.
ABULTAMIENTOS	BA	m2	DESGASTE SUPERFICIAL	DS	m2
AHUELLAMIENTO RADIO ANCHO	AH	m2	BOMBEO DE AGUA EN JUNTAS	BAJ	m2
DEPRESIONES O HUNDIMIENTOS	DA	m2	<b>DESPRENDIMIENTOS (3)</b>		
<b>FRACTURAMIENTOS (3)</b>			DESPLAZAMIENTO DE BORDE	DB	m2
FRACTURAMIENTOS	FA	m2	DESPLAZAMIENTO DE JUNTAS	DJ	m2
FISURAS (1)			BERMAS (2)		
DESCRIPCIÓN	Cod	Ud.	DESCRIPCIÓN	Cod	Ud.
LONGITUDINALES	FL	ml	AFIRMADAS DEFECTUOSAS	BAD	m2
TRANSVERSALES	FTR	ml	PAVIMENTADAS DEFECTUOSAS	BPD	m2
MEDIA LUNA	FML	m2	<b>OTROS DAÑOS (3)</b>		
DE JUNTA	FJU	m2	DESCRIPCIÓN	Cod	Ud.
PARABÓLICAS	FPA	m2	ESCALONAMIENTO ENTRE BLOQUES	EB	m2
EN BLOQUE	FBL	m2	JUNTAS ABIERTAS	JA	m2
PIEL DE COCODRILO	PC	m2	VEGETACIÓN EN LA CALZADA	VC	m2
FISURACIÓN INCIPIENTE	FIN	m2			
FISUR. POR DESLIZAM. CAPAS	FDC	m2			
FISURAS INCIPIENTES	FIN	m2			
DESCRIPCION	Cod	Ud.	PRI	PRF	CANT
<b>FISURAS</b>	ABIERTAS	FA	m2		
	ABIERTAS	FA	m2		
	CERRADAS	FC	m2		
	TOTALES	FT	m2		

Nota. Elaboración propia

A continuación, se evidencian las patologías encontradas en la inspección.

- a. **Juntas abiertas – JA:** Este tipo de deterioros es el que se presenta en un mayor porcentaje, el cual se ocasiona debido a las juntas de construcción y también a los cambios volumétricos del concreto por la expansión y contracción por efecto de la temperatura. La **Figura 33** muestra la junta longitudinal con severidad alta sobre el eje de la vía por proceso constructivo y la **Figura 34** indica las juntas con severidad

baja en todo el ancho de la vía. El área total de daños encontrados corresponde a 646,39 m<sup>2</sup>, de los cuales el 66,5% pertenece al deterioro de juntas abiertas.

Figura 33.

Juntas longitudinales



*Nota.* Elaboración propia

Figura 34.

Juntas con severidad baja



*Nota.* Elaboración propia

- b. **Desgaste superficial – DS:** Durante la inspección visual del tramo de los 11,8 kilómetros de vía, este deterioro se presenta en un 30,5% del total del área con daños identificados, ocupando así el segundo lugar en cuanto a las patologías evidenciadas. El desgaste superficial puede estar relacionado con elevados volúmenes de tránsito, factores climáticos que potencializan la erosión y algunos factores químicos no tan frecuentes como derrames de combustibles, sin embargo, en el tramo inspeccionado se puede establecer que dicho desgaste está más relacionado con la calidad del concreto, toda vez que en la auscultación se encontró afectación en áreas que ocupan un sólo carril, tal como se puede evidenciar en la **Figura 35**, lo cual se debe a que durante el proceso constructivo se fundieron los carriles por media calzada con el fin de no generar cierre total la vía.

Figura 35.

Desgaste superficial



Nota. Elaboración propia

- c. **Ahuellamiento de radio ancho – AH:** Es importante recordar que el ahuellamiento principalmente se presenta por fatiga del material debido a la repetición de las

cargas que se presentan en la estructura del pavimento, ahora bien, este se evidencia visualmente como un hundimientos sobre la calzada, dichas deformaciones se pueden producir en la superficie de rodadura o en la subrasante de una carretera, en el primer caso se debe a una falla por fatiga de la carpeta del pavimento y generalmente se conoce como ahuellamiento de rueda o de radio corto, y cuando la falla por fatiga se presenta en la subrasante se conoce como ahuellamiento de radio ancho. En el caso en particular, el ahuellamiento evidenciado es el de radio ancho, es decir la falla se presentó en la subrasante de la estructura de pavimento, en un porcentaje de 2,28% del total del área de los deterioros auscultados. En las **Figura 36** y **Figura 37** se indica las zonas donde se evidenciaron, son dos sitios muy puntuales localizados casi al finalizar el tramo inspeccionado, en el K8+964 y en el K 9+585. Algunas de las causas pueden estar relacionadas con la calidad del suelo de soporte, es decir CBR bajos, o con deficiencias en la compactación del material granular de apoyo.

Figura 36.

Ahuellamiento de radio ancho (1)



*Nota.* Elaboración propia

Figura 37.

Ahuellamiento de radio ancho (2)



*Nota.* Elaboración propia

- d. **Fracturamiento –FA:** Este tipo de deterioro fue el que se evidenció en un menor porcentaje con relación a los otros, tan solo un 0.76% del total afectado presentó fracturamiento. La **Figura 38** , nos permite evidenciar el fracturamiento de algunos de los bloques en concreto. Este tipo de deterioro suele generarse principalmente por las altas cargas del tránsito o por defectos en la calidad del concreto, sin embargo, en el tramo auscultado se logró evidenciar que ese fracturamiento tiende a ser como superficial algo así como un descascaramiento lo que indica que está más asociado con la calidad del concreto.

Figura 38.

Fracturamiento



*Nota.* Elaboración propia

### **10.3. Procesamiento de Datos**

El primer paso consistió en la recopilación de datos, mediante una auscultación visual a lo largo de un tramo de vía de 11,8 kilómetros. Se utilizaron herramientas estándar de inspección, tales como cámara fotográfica, cinta métrica, odómetro, elementos de seguridad personal y formatos de campo, para documentar las observaciones detalladas del estado de la vía. Durante la auscultación se registraron las diversas características y condiciones de la vía según lo mencionado en el numeral 10.2. Luego, se procedió con la digitalización y organización de los datos con base en las observaciones registradas en los formatos de campo, para lo cual se emplearon hojas de cálculo de Microsoft Excel para organizar la información clasificándola por tipo de deterioro, localización y severidad.

Una vez digitalizados y organizados los datos fueron sometidos a un análisis detallado para identificar patrones y áreas deterioradas a lo largo del tramo de vía. El análisis de los datos se realizó mediante una técnica de análisis cuantitativo de deterioros, para esto se sumó el área total de los deterioros y se contrastó con el área total del tramo auscultado. A partir de

esta comparación, se calcularon los porcentajes de afectación. Los pasos específicos fueron los siguientes:

- Cálculo del área Total de Deterioros: Se sumaron las áreas afectadas por cada tipo de defecto identificando durante la inspección.
- Comparación con el Área Total del Tramo: Se contrastó el área total de los deterioros con el área total del tramo auscultado, lo que permitió determinar el porcentaje de afectación de cada tipo de defecto sobre la vía.
- Determinación de Deterioros Representativos: Basándose en el área total de los daños, se identificaron los deterioros más representativos. Esto se hizo analizando los porcentajes de afectación y destacando aquellos defectos que presentaban las mayores áreas afectadas.

Por ejemplo:

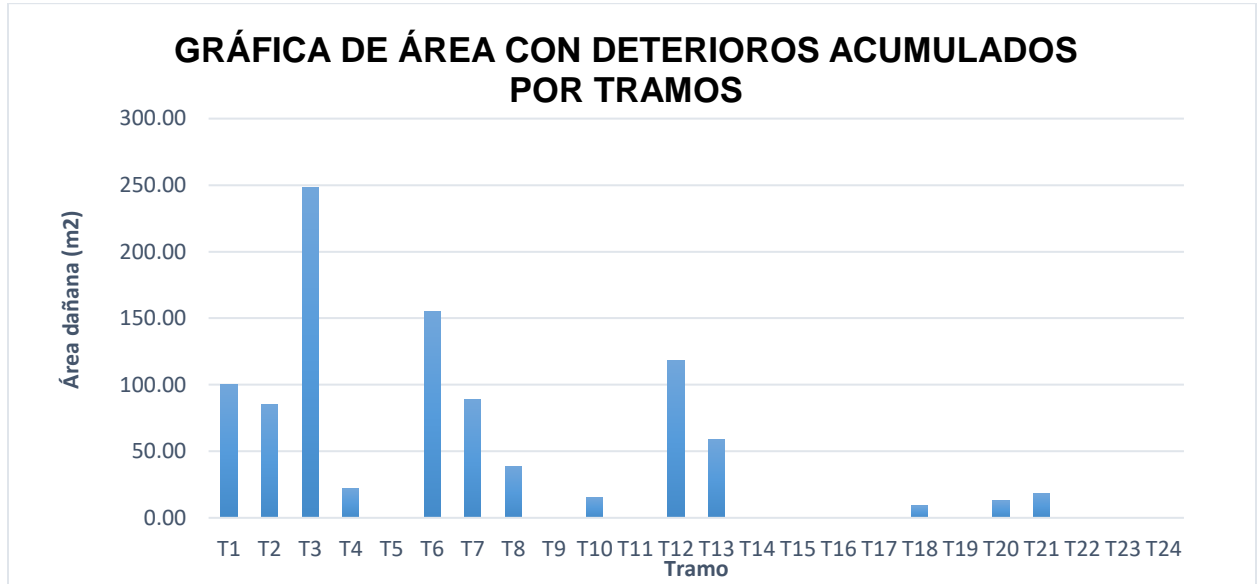
Si el área total del tramo es 50.000 m<sup>2</sup> y el área total de los deterioros es de 5.000 m<sup>2</sup>, el porcentaje de afectación total sería del 10%.

Asimismo, si el área afectada por JA -Juntas Abiertas- es de 400 m<sup>2</sup>, este tipo de deterioro representaría el 4% del área total de los daños.

Representando lo anterior gráficamente, se tiene Figura 39 y Figura 40:

Figura 39.

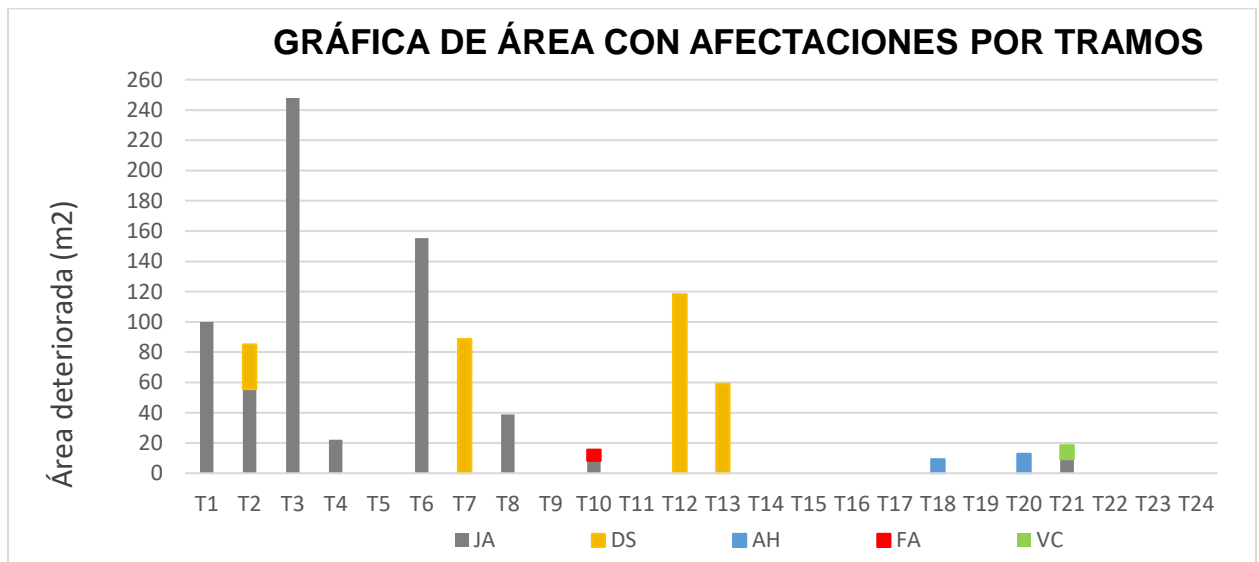
Gráfica de área con deterioros acumulados por tramos



Nota. Elaboración propia

Figura 40.

Gráfica de área con deterioros por tramos



Nota. Elaboración propia

#### 10.4. Resumen Inspección Visual de Deterioros

Tabla 24.

## Resumen inspección visual de afectaciones

K inicial	K final	TIPO DE DAÑO (*) CÓDIGO T/L	CANTIDAD (M2)	ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO (4)			OBSERVACIONES
				CÓDIGO CAUSA DEL DAÑO	CÓDIGO ESTRATEGIAS MANTENIM.	ACCIÓN A SEGUIR OPCIONAL	
				LADO	SEVERIDAD	OBSERV.	
0+266	0+282	JA	59,20			IZQ	BAJA
0+357	0+368	JA	40,70			IZQ	ALTA
0+552	0+560	DS	29,60			IZQ	MEDIA
0+711	0+723	JA	44,40			IZQ	ALTA
0+736	0+739	JA	11,10			DER	ALTA
1+024	1+049	JA	92,50			DER	ALTA
1+127	1+153	JA	96,20			DER	ALTA
1+264	1+280	JA	59,20			DER	ALTA
1+829	1+835	JA	22,20			DER/IZQ	MEDIA
2+612	2+640	JA	103,60			DER	MEDIA
2+995	3+009	JA	51,80			DER	ALTA
3+300	3+324	DS	88,80			IZQ	BAJA
3+500	3+510,5	JA	38,85			IZQ	MEDIA
4+646	4+648	FA	7,40			DER	BAJA
4+847	4+849,2	JA	8,14			DER	ALTA
5+872	5+904	DS	118,40			IZQ	BAJA
6+324	6+340	DS	59,20			DER	BAJA
8+964	8+966,5	AH	9,25			IZQ	BAJA
9+585	9+588,5	AH	12,95			DER/IZQ	ALTA
10+317	10+319,5	VC	9,25			DER/IZQ	BAJA
10+317	10+319,5	JA	9,25			DER/IZQ	ALTA
			971,99	M2			
			43660,00	M2			
			2,2%				
			646,39	M2	66.5%	% del total afectado	ÁREA CON JA, VC
			296,00	M2	30.5%	% del total afectado	ÁREA CON DS
			22,20	M2	2.28%	% del total afectado	ÁREA CON AH
			7,40	M2	0.76%	% del total afectado	ÁREA CON FA

Nota. Elaboración propia

## 10.5. Análisis de los resultados

### 1. Juntas Abiertas

- Proporción: 66.50% del área dañada.
- Posibles Causas:

**Contracción y Expansión:** El concreto se contrae y expande con los cambios de temperatura, lo que puede provocar la apertura de las juntas.

**Falta de Mantenimiento:** Las juntas deben ser selladas regularmente para evitar la entrada de agua y que se presente el fenómeno de bombeo, afectando las capas inferiores de la estructura del pavimento. Además, este deterioro permite no solo el ingreso de agua sino de materia orgánica lo que generará la aparición de vegetación en la calzada.

**Movimientos de la Subbase:** Si la subbase no es estable, puede causar movimientos que abran las juntas.

- Consecuencias:

**Infiltración de Agua:** Las juntas abiertas permiten la entrada de agua, lo que puede debilitar la subbase y provocar otros tipos de deterioro.

**Desgaste Acelerado:** La entrada de escombros y el movimiento de losas pueden acelerar el desgaste y causar fracturas.

**Reducción de la Vida Útil:** La falta de sellado de las juntas puede reducir significativamente la vida útil del pavimento.

**Recomendaciones:** Dado que las juntas abiertas no superan los 3mm debido al confinamiento del concreto en las geoceldas, se recomienda un sellado preventivo con un material flexible de baja viscosidad, como un sellador a base de poliuretano o silicona, que pueda penetrar bien en las juntas. Así mismo, se debe mantener una inspección regular acompañada de actividades de mantenimiento rutinario para evitar la acumulación de humedad y material orgánico.

## 2. Desgaste Superficial

- Proporción: 30.50% del área dañada.
- Posibles Causas:

**Tráfico Intenso:** El paso constante de vehículos, especialmente pesados, desgasta la superficie del concreto.

**Condiciones Climáticas:** La exposición a la lluvia, viento y cambios de temperatura contribuye al desgaste superficial.

**Calidad del Material:** El uso de materiales de baja calidad o una mezcla inadecuada puede resultar en un desgaste más rápido.

- Consecuencias:

**Reducción de la Fricción:** El desgaste puede reducir la fricción entre los neumáticos y la carretera, aumentando el riesgo de accidentes.

**Mayor Vulnerabilidad:** Una superficie desgastada es más vulnerable a otros tipos de daños, como fisuras y ahuellamientos.

**Necesidad de Reparaciones Frecuentes:** Aumenta la frecuencia y costo de mantenimiento y reparaciones.

**Recomendaciones:** En este caso es importante asegurar que durante el proceso constructivo la mezcla de concreto utilizada sea de alta calidad y los agregados pétreos cumplan la normatividad relacionada con la resistencia a la abrasión. También se recomienda implementar un programa de mantenimiento rutinario que incluya actividades de limpieza de calzada para evitar que el material suelto o granular que está sobre la calzada genere el desgaste superficial.

## 3. Ahuellamiento de Radio Ancho

- Proporción: 2.28% del área dañada.
- Posibles Causas:

**Carga Concentrada:** Áreas específicas pueden recibir más carga debido a frenadas, aceleraciones o giros de vehículos pesados.

**Deficiencia en la Construcción:** Un pavimento mal compactado o con una base inadecuada puede hundirse bajo cargas repetidas.

**Falta de Drenaje:** El agua acumulada puede debilitar el pavimento y contribuir al ahuellamiento.

- Consecuencias:

**Desnivel:** Puede crear desniveles que son incómodos y potencialmente peligrosos para los conductores.

**Acumulación de Agua:** Los ahuellamientos pueden acumular agua, incrementando el riesgo de hidroplaneo.

**Deterioro Acelerado:** El estrés adicional en las áreas hundidas puede acelerar otros tipos de deterioro, como fisuras.

**Recomendaciones:** Durante el proceso de construcción del pavimento se debe garantizar la calidad de los materiales granulares, así como una adecuada compactación. Sin embargo, una vez se presenta este tipo de daño se debe entrar a evaluar la deformación y la magnitud de la afectación en la calzada, con lo cual, se tomará la decisión de levantar o retirar el área afectada y mejorar la estructura de pavimento.

#### 4. Fracturamiento

- Proporción: 0.76% del área dañada.

- Posibles Causas:

Carga Excesiva: Vehículos que exceden el peso máximo permitido pueden causar fracturas.

Problemas en la Subbase: Una subbase inestable o débil no soporta adecuadamente el pavimento, causando fracturas.

Deficiencia en el Material: El uso de concreto de baja calidad o mezclas inadecuadas puede resultar en fracturas.

- Consecuencias:

Pérdida de Integridad Estructural: Las fracturas pueden comprometer la integridad estructural del pavimento, llevando a fallas más grandes.

Propagación del Daño: Las fisuras pueden expandirse con el tiempo, causando más deterioro.

Mayor Mantenimiento: Las fracturas requieren reparaciones inmediatas para evitar problemas mayores, incrementando los costos de mantenimiento.

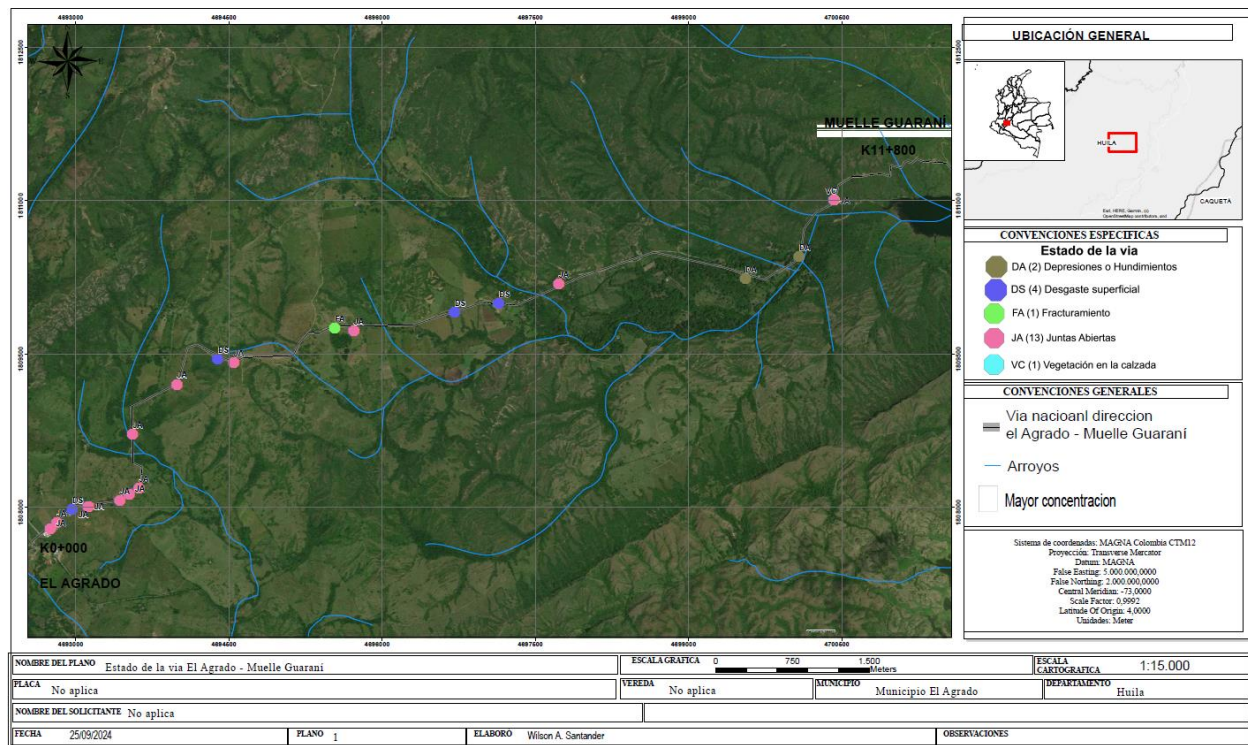
Recomendaciones: Para el fracturamiento en el pavimento de concreto reforzado con geoceldas, causado por cargas excesivas y problemas en la subbase, se recomienda reparar las áreas fracturadas mediante el reemplazo del concreto dañado con una mezcla de mayor resistencia. Además, verificar la estabilidad de la subbase y de ser necesario reemplazar y/o mejorar su compactación. Acompañar con programa de mantenimiento rutinario.

Por último, en la **Figura 41** se presenta la distribución espacial del estado de la vía, la cual se puede ver con mayor detalle en el **Anexo 6 - GEOLOCALIZACIÓN** se presenta una representación gráfica del estado de la vía, en la que se puede apreciar la distribución de los

daños de acuerdo con las áreas afectadas por cada una de las patologías encontradas en campo.

Figura 41.

*Distribución espacial del estado de la vía*



*Nota.* Elaboración propia

## 10.6. Cálculo del ICP – Índice de Condición del Pavimento

Con base en la metodología descrita en el numeral 6.4.3, se calculó el índice de Condición del Pavimento el cual se puede ver en detalle en el **Anexo 5 - AUSCULTACIÓN**; Sin embargo, en la Tabla 25 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 25.

*Cálculo del ICP vía El Agrado – Muelle Guarani*

K inicial	K final	TIPO DE DAÑO (*)	SEVERIDAD	ICE - ÍNDICE DE CONDICIÓN ESTRUCTURAL	ICF - ÍNDICE DE CONDICIÓN FUNCIONAL	CALIFICACIÓN ICP	NIVEL DE SERVICIO
		CÓDIGO					
0 + 200	0 + 300	JA	BAJA	92,00	77,00	4,0	BUENO
0 + 300	0 + 400	JA	ALTA	93,92	77,00	4,0	BUENO
0 + 500	0 + 600	DS	MEDIA	96,40	91,00	5,0	MUY BUENO
0 + 700	0 + 800	JA	ALTA	93,92	77,00	4,0	BUENO
0 + 800	0 + 900	JA	ALTA	96,00	77,00	4,0	BUENO
1 + 000	1 + 100	JA	ALTA	92,00	77,00	4,0	BUENO
1 + 100	1 + 200	JA	ALTA	92,00	77,00	4,0	BUENO
1 + 200	1 + 300	JA	ALTA	92,00	77,00	4,0	BUENO
1 + 800	1 + 900	JA	MEDIA	95,20	77,00	4,0	BUENO
2 + 600	2 + 700	JA	MEDIA	92,00	77,00	4,0	BUENO
2 + 900	3 + 000	JA	ALTA	92,00	77,00	4,0	BUENO
3 + 300	3 + 400	DS	BAJA	94,00	91,00	5,0	MUY BUENO
3 + 500	3 + 600	JA	MEDIA	93,92	77,00	4,0	BUENO
4 + 600	4 + 700	FA	BAJA	86,00	90,00	5,0	MUY BUENO
4 + 800	4 + 900	JA	ALTA	96,00	77,00	4,0	BUENO
5 + 800	5 + 900	DS	BAJA	94,00	91,00	5,0	MUY BUENO
6 + 300	6 + 400	DS	BAJA	94,00	91,00	5,0	MUY BUENO
8 + 900	9 + 000	AH	BAJA	76,00	52,00	3,0	REGULAR
9 + 500	9 + 600	AH	ALTA	76,00	52,00	3,0	REGULAR
10 + 300	10 + 400	VC	BAJA	96,00	77,00	4,0	BUENO
10 + 400	10 + 500	JA	ALTA	96,00	77,00	4,0	BUENO

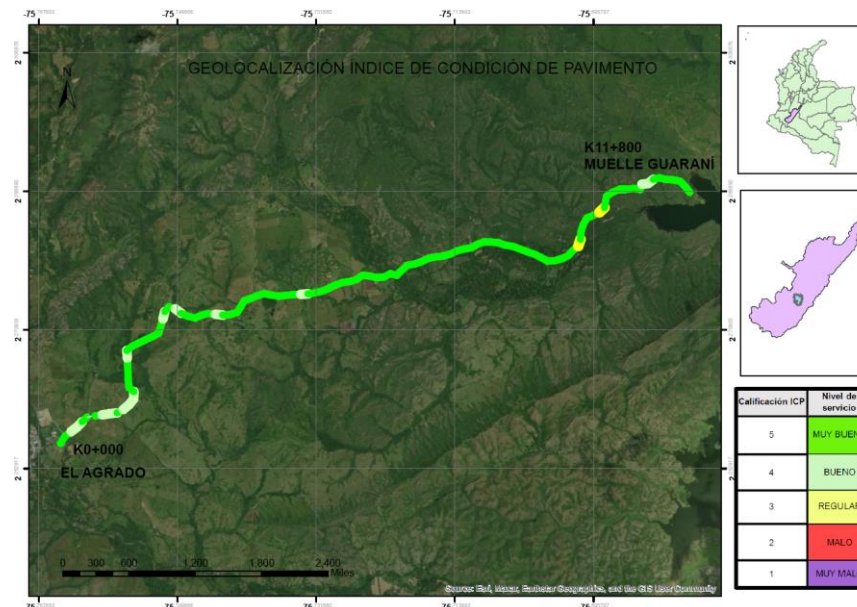
Nota. Elaboración Propia

Con base en los resultados obtenidos del ICP es preciso afirmar que el estado general de la vía El Agrado – Muelle Guarani está en buenas condiciones, toda vez que, la calificación predominante del ICP es de 4,0. Por otra parte, la relación del área total auscultada sobre el área total deteriorada corresponde a tan solo 2,2 %; lo que indica un muy buen desempeño y comportamiento estructural en los primeros 4 años de servicio y operación. Finalmente, los deterioros más significativos y frecuentes encontrados durante la auscultación le pertenecen a las juntas abiertas y el desgaste superficial, por lo que es recomendable implementar actividades de mantenimiento rutinario.

En la **Figura 42** se presenta la distribución espacial del índice ICP de la vía, lo cual permite evidenciar que cerca del 88% del tramo total de la vía está en un muy buen nivel de servicio, el 10% de la longitud total de la vía presenta un buen nivel de servicio y que tan solo el 2% de la longitud total del tramo vial está en condición regular de servicio.

Figura 42.

*Distribución espacial del índice ICP de la vía*



Nota. Elaboración propia

## 11. Análisis comparativo de costos de construcción de las alternativas

Para el desarrollo del análisis comparativo de los costos de construcción se establecieron tres alternativas para el mejoramiento de una vía terciaria; alternativa 1 placa huella, alternativa 2 CRG, alternativa 3 pavimento rígido; para cada una de ellas se realizó un análisis de precios unitarios con base en los precios de referencia 2024-1 del Instituto Nacional de Vías – INVIAS – y con precios de referencia del año 2024 del Instituto de Infraestructura y Concesiones de Cundinamarca – ICCU, los cuales se pueden visualizar con mayor detalle en el **Anexo 7 – PRESUPUESTOS**, Los precios de referencia en todos los casos aplican para la misma región del Departamento de Cundinamarca a saber la Provincia del Río Negro.

En la **Tabla 26** se observa que el valor total del presupuesto, con precios de referencia del INVIAS 2024-1, para la construcción de una placa huella de cien (100) metros de longitud, ancho de calzada de 3,9 metros y espesor de 15 centímetros, es de noventa millones trescientos sesenta y nueve mil cuatrocientos setenta y tres pesos colombianos (\$ 90'369 473).

Tabla 26.

*Presupuesto alternativa 1 - placa huella con precios INVIAS 2024-1*

ÍTEM DE PAGO	ESPECIFICACIONES INV		DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
	GENERAL 2022	PART					
<b>1, Descripción de la actividad: Placa Huella - L= 100m; A= 3,9m; E= 0,15m</b>							
310,1	310		CONFORMACIÓN DE CALZADA EXISTENTE	m2	390,00	\$ 1.933,00	\$ 753.870,00
311,1	311		AFIRMADO	m3	58,50	\$ 98.809,00	\$ 5.780.326,50
600,1,1	600		EXCAVACIONES VARIAS SIN CLASIFICAR	m3	7,55	\$ 38.397,00	\$ 289.897,35
630,1,4,1	630		CONCRETO CLASE D - f'c=21 MPa	m3	29,17	\$ 970.680,00	\$ 28.314.735,60
630,1,7	630		CONCRETO CICLÓPEO (CONCRETO CLASE D f'c = 21 MPa, 60% - AGREGADO CICLÓPEO 40%)	m3	12,70	\$ 462.635,00	\$ 5.875.464,50
671,3	671		CUNETA DE CONCRETO VACIADA IN SITU; INCLUYE LA CONFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE DE APOYO	m3	18,60	\$ 881.601,00	\$ 16.397.778,60
640,1	640		ACERO DE REFUERZO Fy 420 Mpa	Kg	4.900,00	\$ 6.726,00	\$ 32.957.400,00
						<b>VALOR TOTAL</b>	<b>90,369,473,00</b>

Nota. Elaboración Propia

En la **Tabla 27** se presenta el costo total del presupuesto, con precios de referencia INVIAS 2024-1, para el pavimento en concreto reforzado con geoceldas – CRG – por valor total de ochenta y nueve millones trescientos ochenta y siete mil seiscientos cuarenta y siete pesos (\$ 89'387,647). Las dimensiones contemplan un ancho de calzada de 3,9 metros e incluyen la conformación para la fundición de la cuneta monolíticamente, el espesor de la capa de rodadura de 10 centímetros.

Tabla 27.

*Presupuesto alternativa 2 - CRG con pecios INVIAS 2024-1*

ITEM DE PAGO	ESPECIFICACIONES INV		DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
	GENERAL 2022	PART					
<b>1, Descripción de la actividad: Concreto Reforzado con Geoceldas - L= 100m; A=3,9; E=0,10m</b>							
310,1	310		CONFORMACIÓN DE CALZADA EXISTENTE	m2	510,00	\$ 1,933,00	\$ 985,830,00
320,1,2	320		SUB BASE GRANULAR CLASE A	m3	58,50	\$ 159,149,00	\$ 9,310,216,50
1P		1P	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE PAVIMENTO EN CONCRETO HIDRÁULICO DE 21 MPa REFORZADO CON GEOCELDAS (E= 10 cm)	m2	470,00	\$ 168,280,00	\$ 79,091,600,00
						<b>VALOR TOTAL</b>	<b>89,387,647,00</b>

*Nota.* Elaboración propia

Finalmente, se calculó el costo de construcción para la alternativa 3, pavimento rígido, con precios INVIAS 2024-1, obteniendo un valor total de noventa y nueve millones cuarenta y tres mil trescientos veintisiete pesos (\$ 99'043,327,00), tal como se muestra en la **Tabla 28**. Las dimensiones corresponden a cien (100) metros de longitud, ancho de calzada 3,9 metros, espesor de la losa 15 centímetros, espesor de la base granular de 15 centímetros.

Tabla 28.

**Presupuesto alternativa 3 – Pavimento rígido con pecios INVIAS 2024-1**

ITEM DE PAGO	ESPECIFICACIONES INV		DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
	GENERAL 2022	PART					
<b>1, Descripción de la actividad: Pavimento Rígido MR-38 - L= 100m; A=3,9; E=0,15m</b>							
310,1	310		CONFORMACIÓN DE CALZADA EXISTENTE	m2	390,00	\$ 1,933,00	\$ 753,870,00
330,1,1	330		BASE GRANULAR CLASE A	m3	58,50	\$ 178,854,74	\$ 10,463,002,00
600,1,1	600		EXCAVACIONES VARIAS EN MATERIAL COMÚN SECO A AMNO (INCLUYE RETIRO DE SOBRESANTES A UNA DISTANCIA MENOR DE 5KM)	m3	7,55	\$ 38,397,00	\$ 289,897,00
500,1,2	500		PAVIMENTO EN CONCRETO HIDRÁULICO	m3	58,50	\$ 1,030,997,34	\$ 60,313,344,00
671,1	671		CUNETAS DE CONCRETO CLASE E, 2500 PSI FUNDIDA EN EL LUGAR	m3	14,40	\$ 881,601,00	\$ 12,695,054,00
640,1	640		SUMINISTRO FIGURADO Y ARMADO DE ACERO DE REFUERZO 60000 PSI	Kg	2,160,00	\$ 6,726,00	\$ 14,528,160,00
						<b>VALOR TOTAL</b>	<b>99,043,327,00</b>

*Nota.* Elaboración propia

Luego, se efectuó el mismo cálculo, pero ahora tomando como referencia la lista de precios unitarios ICCU 2024, Los resultados obtenidos se pueden evidenciar en las **Tabla 29** a

**Tabla 31.**

Por último, se presenta un cuadro de resumen junto con análisis de costos, para las tres alternativas con precios INVIAS e ICCU 2024.

Tabla 29.

**Presupuesto alternativa 1 - Placa huella con precios ICCU 2024**

ÍTEM DE PAGO	ESPECIFICACIONES ICCU		DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
	GENERAL 2024	PART					
<b>1, Descripción de la actividad: Placa Huella - L= 100m; A= 3,9m; E= 0,15m</b>							

ÍTEM DE PAGO	ESPECIFICACIONES ICCU		DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
	GENERAL 2024	PART					
310,1	310		CONFORMACIÓN DE CALZADA EXISTENTE	m2	390,00	\$ 1,516,20	\$ 591,318,00
311,1	311		AFIRMADO	m3	58,50	\$ 212,101,75	\$ 12,407,952,00
600,4P	600	4P	EXCAVACIONES VARIAS EN MATERIAL COMÚN SECO A AMNO (INCLUYE RETIRO DE SOBRESANTES A UNA DISTANCIA MENOR DE 5KM)	m3	7,55	\$ 80,740,31	\$ 609,589,00
630,4	630		CONCRETO CLASE D - f <sup>c</sup> =3000 psi (bases)	m3	29,17	\$ 1,048,968,3	\$ 30,598,406,00
630,7	630		CONCRETO CICLÓPEO CLASE G, 2000PSI 40%, RAJÓN PARA BASES	m3	12,70	\$ 709,532,39	\$ 9,011,061,00
671,1	671		CUNETAS DE CONCRETO CLASE E, 2500 PSI FUNDIDA EN EL LUGAR	m3	18,60	\$ 916,448,47	\$ 17,045,942,00
640,1	640		SUMINISTRO FIGURADO Y ARMADO DE ACERO DE REFUERZO 60000 PSI	Kg	4,022,8	\$ 11,226,53	\$ 45,162,871,00
<b>VALOR TOTAL</b>							<b>115,427,139,00</b>

*Nota.* Elaboración propia

Tabla 30.

*Presupuesto alternativa 2 - CRG con precios ICCU 2024*

ITEM DE PAGO	ESPECIFICACIONES		DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
	GENERAL 2024	PART					
<b>1, Descripción de la actividad: Concreto Reforzado con Geoceldas - L= 100m; A=3,9; E=0,10m</b>							
310,1	310		CONFORMACIÓN DE CALZADA EXISTENTE - (INCLUYE LA CONFORMACIÓN PARA CUNETAS)	m2	510,00	\$ 1,516,20	\$ 773,262,0
320,1,2	320		SUB BASE GRANULAR	m3	58,50	\$ 218,412,60	\$ 12,777,137,0
1P		1P	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE PAVIMENTO EN CONCRETO HIDRÁULICO DE 21 MPa REFORZADO CON GEOCELDAS (E= 10 cm) - (INCLUYE FUNDICIÓN DE CUNETAS MONOLÍTICAMENTE)	m2	510,00	\$ 188,478,00	\$ 96,123,780,0

VALOR TOTAL **109,674,179,0**

Nota, Elaboración propia

Tabla 31,

Presupuesto alternativa 3 – Pavimento rígido con precios ICCU 2024

ITEM DE PAGO	ESPECIFICACIONES ICCU		DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
	GENERAL 2024	PART					
<b>1, Descripción de la actividad: Pavimento Rígido MR-38 - L= 100m; A=3,9; E=0,15m</b>							
310,1	310		CONFORMACIÓN DE CALZADA EXISTENTE	m2	390,00	\$ 1,516,20	\$ 591,318,00
330,1	330		BASE GRANULAR	m3	58,50	\$ 244,257,16	\$ 14,289,044,00
600,4P	600	4P	EXCAVACIONES VARIAS EN MATERIAL COMÚN SECO A AMNO (INCLUYE RETIRO DE SOBRESANTES A UNA DISTANCIA MENOR DE 5KM)	m3	7,55	\$ 80,740,31	\$ 609,589,00
630,4	630		CONCRETO PARA PAVIMENTO RÍGIDO MR-38, INCLUYE SELLADO DE JUNTAS Y ACERO DE TRANSFERENCIA Y UNIÓN	m3	58,50	\$ 1,188,553,17	\$ 69,530,360,00
671,1	671		CUNETETA DE CONCRETO CLASE E, 2500 PSI FUNDIDA EN EL LUGAR	m3	14,40	\$ 916,448,47	\$ 13,196,858,00
640,1	640		SUMINISTRO FIGURADO Y ARMADO DE ACERO DE REFUERZO 60000 PSI	Kg	2,160,00	\$ 11,226,53	\$ 24,249,305,00
						<b>VALOR TOTAL</b>	<b>122,466,474,00</b>

Nota. Elaboración propia

Para comparar el costo inicial de las alternativas, evaluamos las diferencias de acuerdo con los precios de referencia (INVIAS e ICUU) para un tramo de 100 metros de longitud y ancho de calzada de 3,9 metros. En la **Tabla 32** se muestran los valores obtenidos para la alternativa 1 y 2 con los diferentes precios de referencia, encontrando que con los precios INVIAS 2024-1 la diferencia en costos entre la alternativa 1 (placa huella) y la alternativa 2 (CRG) es de tan solo el 1%, y con precios ICCU ésta diferencia se incrementa hasta un 5%.

En la **Tabla 33**, se realiza el mismo análisis, pero ahora entre la alternativa 2 (CRG) y la alternativa 3 (pavimento rígido), las diferencias de los costos entre la alternativa 2 y la alternativa 3 es de 11% con precios INVIAS y del 12% con precios ICCU.

Tabla 32.

*Costos iniciales para la alternativa 1 y 2*

Alternativas	Precio INVIAS (COP)	Precios ICCU (COP)
Placa Huella	\$ 90,369,473,00	\$ 115,427,139,00
CRG	\$ 89,387,647,00	\$ 109,674,179,00
Diferencia	1%	5%

*Nota.* Elaboración propia

Tabla 33.

*Costos iniciales para la alternativa 2 y 3*

Alternativas	Precio INVIAS (COP)	Precios ICCU (COP)
Pavimento Rígido	\$ 99,043,327,00	\$ 122,466,474,00
CRG	\$ 89,387,647,00	\$ 109,674,179,00
Diferencia	11%	12%

*Nota.* Elaboración propia

En la Tabla 34 a la Tabla 37 se realiza un cálculo de los costos de mantenimiento anual, con el fin de determinar el ahorro potencial a 10 años. Con base en los reportes de presupuestos del Departamento Nacional de Planeación, el costo de mantenimiento para placa huellas se estima entre el 4% y 6% del costo inicial anual y para los pavimentos en concreto hidráulico se estima en un 2,5%. Para nuestro caso se adopta un costo de mantenimiento para la placa huella del 5% del costo inicial anual como un promedio razonable.

Tabla 34.

*Cálculo de costo total en 10 años con precios INVIAS 2024*

<b>Alternativa</b>	<b>Costo de Construcción Inicial</b>	<b>Costo Estimado de Mantenimiento Anual</b>	<b>Costo Total en 10 años</b>
Placa Huella (INVIAS)	\$ 90,369,473,00	\$ 4,518,473,65	\$ 135,554,209,50
CRG (INVIAS)	\$ 89,387,647,00	\$ 2,234,691,18	\$ 111,734,558,75
Ahorro Potencial en 10 años			\$ 23,819,650,75

*Nota.* Elaboración propia

Tabla 35.

*Cálculo de costo total en 10 años con precios ICCU 2024*

<b>Alternativa</b>	<b>Costo de Construcción Inicial</b>	<b>Costo Estimado de Mantenimiento Anual</b>	<b>Costo Total en 10 años</b>
Placa Huella (ICCU)	\$ 115,427,139,00	\$ 5,771,356,95	\$ 173,140,708,50
CRG (ICCU)	\$ 109,674,179,00	\$ 2,741,854,48	\$ 137,092,723,75
Ahorro Potencial en 10 años			\$ 36,047,984,75

*Nota.* Elaboración propia

Tabla 36.

*Cálculo de costo total en 10 años con precios INVIAS 2024*

<b>Alternativa</b>	<b>Costo de Construcción Inicial</b>	<b>Costo Estimado de Mantenimiento Anual</b>	<b>Costo Total en 10 años</b>
Pavto, Rígido (INVIAS)	\$ 99,043,327,00	\$ 2,476,083,18	\$ 123,804,158,75
CRG (INVIAS)	\$ 89,387,647,00	\$ 2,234,691,18	\$ 111,734,558,75
Ahorro Potencial en 10 años			\$ 12,069,600,00

*Nota.* Elaboración propia

Tabla 37.

*Cálculo de costo total en 10 años con precios ICCU 2024*

Alternativa	Costo de Construcción Inicial	Costo Estimado de Mantenimiento Anual	Costo Total en 10 años
Pavto, Rígido (ICCU)	\$ 122,466,474,00	\$ 3,061,661,85	\$ 153,083,092,50
CRG (ICCU)	\$ 109,674,179,00	\$ 2,741,854,48	\$ 137,092,723,75
Ahorro Potencial en 10 años			\$ 15,990,368,75

*Nota.* Elaboración propia

Finalmente, se presenta un resumen financiero en la Tabla 38 y Tabla 39, donde se evidencia el ahorro entre la alternativa 1 y la alternativa 2, y la alternativa 2 y la alternativa 3 respectivamente.

Tabla 38.

*Resumen Financiero alternativa 1 y 2*

Categoría	Placa Huella	CRG	Ahorro al usar CRG	Porcentaje Ahorro (%)
Costo INVIAS Inicial	\$ 90,369,473,00	\$ 89,387,647,00	\$ 981,826,00	1%
Costo ICCU Inicial	\$ 115,427,139,00	\$ 109,674,179,00	\$ 5,752,960,00	5%
Costo Total en 10 años INVIAS	\$ 135,554,209,50	\$ 111,734,558,75	\$ 23,819,650,75	21%
Costo Total en 10 años ICCU	\$ 173,140,708,50	\$ 137,092,723,75	\$ 36,047,984,75	26%

*Nota.* Elaboración propia

Tabla 39.

*Resumen Financiero alternativa 2 y 3*

Categoría	Pavimento Rígido	CRG	Ahorro al usar CRG	Porcentaje Ahorro (%)
Costo INVIAS Inicial	\$ 99,043,327,00	\$ 89,387,647,00	\$ 9,655,680,00	11%

Costo Inicial ICCU	\$	122,466,474,00	\$	109,674,179,00	\$	12,792,295,00	12%
Costo Total en 10 años INVIAS	\$	123,804,158,75	\$	111,734,558,75	\$	12,069,600,00	11%
Costo Total en 10 años ICCU	\$	153,083,092,50	\$	137,092,723,75	\$	15,990,368,75	12%

*Nota.* Elaboración propia

## 12. Análisis Multicriterio

En este capítulo se llevará a cabo un análisis multicriterio de las tres alternativas: **placa huella, pavimento reforzado con Geoceldas** y **pavimento rígido**. Este análisis no se limitará solo a la comparación de costos, como se evidenció en el capítulo 11, sino que también evaluará aspectos técnicos y constructivos de cada alternativa. Así las cosas, se evaluarán los siguientes ítems: Costos, viabilidad técnica, y facilidad de construcción.

Se realizará una matriz multicriterio, la cual consiste en un arreglo de filas y columnas que enfrentadas permiten realizar una elección, que con base en la selección, ponderación y aplicación de criterios debería ser la mejor.

Se establecerán unos puntajes desde el 1 al 5, siendo 1 la calificación más baja y 5 la calificación más alta, según se evidencia en la **Tabla 40**.

Tabla 40.

*Puntaje matriz multicriterio*

Escala Numérica	Escala verbal
[0,0 - 1,0]	No preferible
[1,1 - 2,0]	Moderadamente preferible
[2,1 - 3,0]	Entre moderada y fuertemente preferible
[3,1 - 4,0]	Fuertemente preferible
[4,1 - 5,0]	Extremadamente preferible

*Nota.* Elaboración propia

Teniendo los puntajes estipulados, a cada ítem se le asignará un valor según su importancia, el cual está basado en los siguientes criterios:

- **Costos:** Como se evidenció en el capítulo 11, tomando como base los precios de referencia del INVIAS 2024-1, donde las diferencias de costos entre las tres alternativas son menores, se tiene que la alternativa más económica es la alternativa 2, pavimento

reforzado con geoceldas – GRC – con \$ 89'387.647 (COP); en segundo lugar está la alternativa 1, placa huella, con \$ 90'369.473 (COP); mientras que en tercer lugar se encuentra la alternativa 3, pavimento rígido, con \$ 99'043.327 (COP). Todas las alternativas contemplan una longitud de 100 metros con una misma sección transversal.

Con base en lo anterior, al pavimento reforzado con geoceldas, se le otorgará la calificación más alta, es decir, un puntaje de cinco (5), a la placa huella se le asignará una calificación de cuatro (4) y al pavimento rígido una calificación de tres (3). Éste ítem tendrá un peso porcentual del **50%** de la calificación total.

- **Viabilidad Técnica:** En el desarrollo del presente trabajo se identificaron algunos beneficios acerca del uso del CRG; no obstante, la placa huella tiene una mayor ventaja sobre las demás cuando se trata de mejoramiento de vías terciarias, toda vez que se encuentra regulada y existe una amplia información técnica acerca del diseño y proceso constructivo. En ese orden de ideas la placa huella recibirá la mayor calificación, es decir, cinco (5). Por otra parte, si bien el diseño y construcción de un pavimento rígido se encuentra bien documentado, técnicamente requiere de estudios más especializados para su diseño por lo que no es una alternativa muy atractiva, no obstante, se le asigna una calificación de cuatro punto ocho (4.8). Finalmente, en el capítulo 9 del presente trabajo, se mostró que la alternativa de CRG cuenta con una metodología de diseño definida, sin embargo, al ser una alternativa nueva, con información técnica escasa y con pocos casos ejecutados en Colombia, genera una gran incertidumbre en la adopción de esta alternativa, por tal motivo, se le asignará una calificación de tres punto cinco (3.5), obteniendo así la calificación más baja. Este ítem tendrá menos peso en la matriz (10%), porque en la teoría técnicamente todas las alternativas propuestas son viables.

- **Facilidad de Construcción:** Para la evaluación de este ítem, se tendrá en cuenta lo descrito en capítulo 9 del presente trabajo, en particular lo referente al proceso constructivo, evidenciado que las vías con CRG son de fácil construcción, debido a que no requieren equipo especializado, emplean poca mano de obra, reducen los espesores de agregados y concretos, tiene altos rendimientos de instalación, requieren bajo mantenimiento. Adicionalmente, como se menciona en el numeral 9.2.8, el tiempo de aprendizaje para la utilización de este sistema es relativamente corto, esto se debe en gran medida a que no se requieren conocimientos ni equipos especializados para la instalación de la geocelda, garantizando una buena continuidad en el tiempo constructivo y el uso de la mano de obra no calificada de la comunidad que reside en el sector.

Como complemento a este inciso, el Ingeniero Schmalbach en su documento «GRC, Concreto Reforzado con Geoweb, Vía El Agrado, Huila, Colombia, 2019,» menciona que se genera una reducción significativa de los tiempos de construcción, con rendimientos del orden de 80m<sup>2</sup> / día / hombre.

Siendo así, se ha podido analizar, que la placa huella al igual que el pavimento rígido requieren mayor uso de concreto, equipos y herramientas específicas para la nivelación, colocación y vibrado, formaletas y equipos de corte para las juntas en el caso de los pavimentos rígidos. En ese sentido, debido a que un factor importante durante el mejoramiento de vías terciarias es evitar cierres totales prolongados, se asignan las siguientes calificaciones, CRG cuatro punto dos (4.2); placa huella tres punto ocho (3.8) y pavimento rígido dos punto cinco (2.5). Este ítem tendrá un valor ponderado del **(40%)**.

### 12.1. Resultados Análisis Multicriterio

Al llevar a cabo el análisis multicriterio, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 41, los cuales muestran que, la mejor calificación la obtuvo la alternativa 2, CRG (4.5); en segundo lugar, está la alternativa 1, placa huella (4.0) y en tercer lugar la alternativa 3, pavimento rígido, (3.0). Esto se debe a que la construcción de pavimento en concreto reforzado con geoceldas es la mejor alternativa en términos de costos y facilidad de construcción, con una calificación de cinco (5.0) y cuatro punto dos (4.2) respectivamente.

Tabla 41.

*Evaluación Matriz Multicriterio*

ALTERNATIVA		CRITERIO									TOTAL GENERAL
		COSTO	Peso	Total	VIABILIDAD TÉCNICA	Peso	Total	FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN	Peso	Total	
1	PLACA HUELLA	4,0	50%	2,00	5,0	10%	0,50	3,8	40%	1,52	4,0
2	GRC	5,0	50%	2,50	3,5	10%	0,35	4,2	40%	1,68	4,5
3	PAVTO, RÍGIDO	3,0	50%	1,50	4,8	10%	0,48	2,5	40%	1	3,0

*Nota.* Elaboración propia

Adicionalmente, la Tabla 41 muestra que en términos de viabilidad técnica la placa huella es la alternativa con mejor calificación por encima de las otras dos y la de menor calificación en este criterio es el CRG; esto tiene sentido, toda vez que, la placa huella a logrado consolidarse en la mayor parte de las entidades públicas, siendo la alternativa preferida en los proyectos de mejoramientos de vías terciarias que se adelantan a nivel nacional. Gran parte de esta preferencia se debe a que entidades públicas como el Instituto Nacional de Vías, el Departamento Nacional de Planeación, el Instituto de Infraestructura y Concesiones de Cundinamarca, entre otros, cuentan con manuales y/o cartillas que contienen información técnica referente al diseño y procesos de construcción, lo que facilita su uso y aplicación, generando una alta confiabilidad en el gremio de la construcción y de las aseguradoras.

### 13. Discusiones y Conclusiones

**Desempeño General del Pavimento:** El Concreto Reforzado con Geoceldas (GRC) ha demostrado un rendimiento sobresaliente en los primeros 4 años, con solo un 2,2% de área dañada. Esta tecnología se muestra prometedora para vías terciarias, proporcionando durabilidad superior a un menor costo.

**Juntas Abiertas y Desgaste Superficial:** Aunque el GRC ha mostrado un bajo porcentaje de daño en general, los problemas de juntas abiertas y desgaste superficial son significativos, La necesidad de mantenimiento regular y la evaluación continua de estos problemas son cruciales para maximizar la vida útil del pavimento.

**Ahuellamiento y Fracturamiento:** Los problemas de ahuellamiento y fracturamiento, aunque menos prevalentes, deben ser monitoreados. Las recomendaciones para mejorar el drenaje y la calidad de la construcción pueden ayudar a mitigar estos problemas.

**Comparación con Adoquines:** A diferencia de los adoquines, que no soportan esfuerzos cortantes y pueden ser más propensos a problemas estructurales bajo cargas dinámicas, el CRG se beneficia de la estructura de geoceldas que permite una mejor distribución de esfuerzos y una mayor resistencia al corte. Las perforaciones horizontales en las geoceldas mejoran su capacidad para resistir esfuerzos cortantes, minimizando el riesgo de cizallamiento y contribuyendo a una mayor estabilidad del pavimento.

**Importancia del Material de Geocelda:** El tipo de material utilizado para las geoceldas, generalmente polímeros o geosintéticos, es crucial para la durabilidad del CRG. Es importante analizar el módulo de almacenamiento del material, ya que este determinará su resistencia y longevidad. Además, la ficha técnica del material debe ser revisada para identificar los factores que afectan la rigidización de las geoceldas, Un diseño adecuado es esencial, ya que el CRG

funciona como un sistema de confinamiento celular, donde el concreto aporta la resistencia a la compresión y las geoceldas soportan los esfuerzos de tensión y tracción.

Implicaciones para Futuras Aplicaciones: La información obtenida sugiere que el CRG podría ser una alternativa valiosa para futuros proyectos de pavimentación de vías terciarias, especialmente en regiones con presupuestos limitados. Es recomendable realizar estudios adicionales y pruebas prolongadas para optimizar esta tecnología y ajustar las prácticas de construcción y mantenimiento según los resultados obtenidos.

## 14. Lista De Referencias

Abramovich, L. (junio de 2020). *6 Obras de GEOCELDAS que TU sueles pasar por alto.*

Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/6-obras-de-geoceldas-que-tu-sueles-pasar-por-alto-larisa-abramovich/>

Alvarado Amado, M. (2009). Estado del Arte de los Geosintéticos para el Diseño de Obras Cviles; Maracaibo, Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta.

Ambrosio, R. (Julio de 2018). *Geosintéticos en carreteras.* Obtenido de

<https://es.slideshare.net/rocioolgamatosambros/geosinteticos-en-carreteras>

Auscultación en carreteras nacionales y evaluación superficial en carreteras, Gobierno de México. (2020).

Bancolombia. (2022). *Vías terciarias en Colombia: un reto para el desarrollo del país.*

Barrera, D., & Franco, H. (2019). Estudio del comportamiento de geo-celdas elaboradas a partir de llantas usadas, mediante pruebas de carga cíclicas en vías no pavimentadas. Universidad de Ibagué.

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.

Beyer, A. (2022). La Historia de las geoceldas. Presto Geosystems.

<https://www.prestogeo.com/blog/the-history-of-geocells/>.

Biblioteca nacional del Perú. (12 de diciembre de 2017). *Conferencia para conocer el arte de las Schicras de Caral en la BNP* . Obtenido de <https://www.bnp.gob.pe/conferencia-para-conocer-el-arte-de-las-shicras-de-caral-en-la->



La Nación. (diciembre de 2021). *Así avanza la obra de pavimentación de la vía entre el agrado a muelle guaraní.*

La Nación. (enero de 2022). *Enel-Emgesa hace entrega de 11,8 kilómetros de vía entre El Agrado y Puerto Guaraní.*

La República. (febrero de 2019). *Del total de la red vial terciaria con la que cuenta Colombia, 96% está en mal estado.*

La Voz de la Región. (Diciembre de 2018). *Red vial terciaria en El Agrado a punto de colapsar por causa de las lluvias.*

La voz de la Región. (junio de 2023). *El Agrado prepara proyecto para la intervención de vías.*

Lineamientos de Política para la Gestión de la Red Terciaria, CONPES 3857. (2016, p.18).

López, D., & García, C. (2020). Incidencia de las patologías del concreto hidráulico en el pavimento rígido tramo Plaza de Armas-Jirón Leguía y Jirón San Martín en el distrito de Tarapoto.

Ministerio de Transporte. (2022, p.37). Transporte en cifras.

Mongua, G., & Suárez, V. (2022, p. 34).

Mongua, G., & Suárez, V. (2022, p.31). Comportamiento Mecánico del Concreto Hidráulico Reforzado con Fibras Pet Recicladas y su Implementación en la Construcción de Losas de Pavimento Rígido (Doctoral dissertation, Universidad Santo Tomás).

Mongua, G., & Suárez, V. (2022, p.33).

Mongua, G., & Suárez, V. (2022, p.34). Comportamiento Mecánico del Concreto Hidráulico Reforzado con Fibras Pet Recicladas y su Implementación en la Construcción de Losas de Pavimento Rígido (Doctoral dissertation, Universidad Santo Tomás).

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. Boca Raton FL, United States.

Protection, S. (s.f.). manual para vías y patios de maniobras con pavimento de concreto reforzado con Geoweb (CRG).

Quimbay Herrera, R. (s.f). *ESTIMACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO Y DEL MORTERO MEDIANTE TCTM*. Obtenido de [://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21528/modulo\\_elasticidad\\_concreto.pdf](://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21528/modulo_elasticidad_concreto.pdf)

Resolución 0127 . (2018).

Schmalbach, J. (2023). Análisis mecanicista de un pavimento con GRC (Hormigón Armado Geoweb). En Geosintéticos: liderando el camino hacia un planeta resiliente (págs. 1321-1327). Prensa CRC.

Schvartzter, F., & Da Ponte, S. (s.f). Utilización de geoceldas de alto desempeño en estructuras de pavimentos flexibles. estado del arte para la XXXIX<sup>o</sup> reunión del asfalto – encuentro binacional.

Sock, D. (2019). Geoceldas de aleación nano polimérica (NPA): última generación de geosintéticos aplicados a refuerzos de suelos en obras viales.

Soil Protection SAS. (2021). manual para vías y patios de maniobras con pavimento de concreto reforzado con Geoweb (CRG).

Torres Peceros, H. (2021). Análisis y conservación de muros de tierra modelada en contextos arqueológicos del antiguo Perú.

UMV, U. A. (2018). Evaluación del uso de la tecnología de confinamiento celular como una alternativa ambiental y económica sostenible en la conservación de la malla vial local de Bogotá D.C.

Urresta Melo, Y. (2015). Análisis de alternativas de diseño con geo-celdas, en estructuras de pavimento. Estudio de caso carrera 12, Funza - Cundinamarca. Bogotá: Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Ingeniería de Pavimentos. Universidad Militar Nueva Granada.

Viana Sepúlveda, A. (2018). Evaluación del uso de geoceldas sobre suelos arcillosos mediante modelación en centrífuga geotécnica. Universidad de los Andes.

Weil, E. (2016). *The application of the CISG in Latin America. Internationales Handelsrecht*, 15(6). Obtenido de <https://doi.org/10.9785/ihr-2015-0603>

Wikipedia. (enero de 2024). *Agrado*.

Wikipedia. (s.f). *Agrado*. Obtenido de *Agrado*.

Xiaming, Y., & Han, J. (2013). Geocell-reinforced granular fill under static and cyclic loading: A synthesis of analysis. *Geotechnical Engineering*.

Xiaoming, Y., Han, Leshchinsky, D., & Parsons, R. L. (2013). A three-dimensional mechanistic-empirical model for geocell-reinforced unpaved roads. *Acta Geotechnica*, 8(2).

Zornberg, Z. (2019). Funciones y aplicaciones de geosintéticos en carreteras. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Texas en Austin.