

INFORME DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

VÍA LIMONAR

Preparado para:



por:



Diciembre de 2025

FICHA TÉCNICA

Nombre del Informe: Informe de Evaluación Estructural de Pavimentos / Vía Limonar		Código Interno Proyecto (APSA): 25-020-01-A
Nombre del Proyecto al cual Pertenece: Vía Limonar		Tipo de Versión del Informe: Informe final
Identificación del Mandante: TERRINORTE EICE GIRARDOTA	Contraparte Técnica: Mauricio Montoya. Andrea Martínez Arias.	Clasificación: Evaluación estructural de pavimentos
Identificación del Ejecutante: Consultores en Administración de Pavimentos APSA S. A. S. Carrera 80 # 39 – 157, Oficina 803. Medellín, Colombia.	Gerente Técnico: David Saldaña M.	Fecha (última modificación): 2 de diciembre de 2025
	Ingeniero de Proyecto: Samuel Salgado Jasmín Tobón	Número de páginas 45 páginas de informe
Resumen: En el presente informe se integran los resultados obtenidos a partir de tres metodologías complementarias aplicadas a la evaluación estructural del pavimento en la vía Limonar: exploración geotécnica mediante calicatas, evaluación de espesores con tecnología de Georradar (GPR) y análisis de deflexiones mediante Deflectometría de Impacto (FWD). La exploración geotécnica permitió identificar la composición y estratificación del pavimento existente, detallando el espesor y las características físicas de cada una de las capas que lo conforman (carpeta asfáltica, base, subbase, entre otras). Estos datos sirvieron como referencia directa para validar e interpretar los perfiles obtenidos por Georradar, tecnología que permite estimar de manera continua y no destructiva los espesores de las capas del pavimento a lo largo del corredor vial. A su vez, los resultados de la Deflectometría de Impacto complementan el análisis estructural al proporcionar información sobre el comportamiento mecánico del pavimento en servicio. En particular, se calcularon parámetros clave como la Deflexión Máxima Normalizada (ajustada a 40 kN y 20 °C), el Módulo Resiliente de la Subrasante y el Número Estructural Efectivo (NE), estimado según la metodología AASHTO para pavimentos flexibles.		

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS	7
3. DEFINICIÓN DE CARRILES	8
4. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN.....	9
4.1. Exploración Geotécnica	9
4.2. Evaluación de Espesores con Georradar (GPR)	12
4.3. Evaluación Estructural con Deflectómetro de Impacto	19
4.3.1. Procesamiento de la información del FWD	21
4.3.2. Sectorización del pavimento existente mediante el método de diferencias acumuladas	24
5. RESULTADOS	26
5.1. Exploración Geotécnica	26
5.1.1. Calicata 1	26
5.1.2. Calicata 2	28
5.1.3. Calicata 3	29
5.2. Evaluación de Espesores con Georradar (GPR)	32
5.3. Evaluación Estructural con Deflectómetro de Impacto	34
5.3.1. Sectores homogéneos.....	37
6. COMENTARIOS FINALES	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación y distribución de calicatas	10
Tabla 2. Resolución en la técnica de Georradar.....	12
Tabla 3. Características técnicas del Georradar.....	16
Tabla 4. CBR de laboratorio	31
Tabla 5. Tipos de pavimento	33
Tabla 6. Valores característicos de cada sector	38
Tabla 6. Valores característicos de cada sector	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del proyecto	6
Figura 2. Definición de Carriles	8
Figura 3. Ubicación y distribución de calicatas	9
Figura 4. Operación del GPR	14
Figura 5. Visualización de un objetivo	14
Figura 6. Componentes del FWD	19
Figura 7. Esquema de Medición con el FWD	20
Figura 53. Delimitación de sectores homogéneos por el método de las diferencias Acumuladas.....	25
Figura 8. Espesores Estructura de Pavimento	32
Figura 9. D ₀ Normalizada a 40 kN y 20 °C	34
Figura 10. M _R Ajustado.....	35
Figura 11. Número Estructural Efectivo	36
Figura 11. Sectorización del pavimento.....	37
Figura 11. CBR (FWD vs LABORATORIO).....	40

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Excavación de la calicata	10
Fotografía 2. Medidas de seguridad	11
Fotografía 3. Relleno y compactación de calicatas	11
Fotografía 4. Georradar marca MALA.	17
Fotografía 5. Prospección con Georradar	18
Fotografía 6. Evaluación Estructural con Deflectómetro de Impacto	20
Fotografía 7. Excavación de la calicata No. 1.....	26
Fotografía 8. Relleno y compactación de la calicata No. 1	27
Fotografía 9. Estratos observados en la calicata No. 1	27
Fotografía 10. Excavación de la calicata No. 2.....	28
Fotografía 11. Relleno y compactación de la calicata No. 2	28

Fotografía 12. Estratos observados en la calicata No. 2	29
Fotografía 13. Excavación de la calicata No. 3.....	29
Fotografía 14. Relleno y compactación de la calicata No. 3	30
Fotografía 15. Estratos observados en la calicata No. 3	30

ANEXOS

Anexo A. Calicatas
Anexo B. GPR
Anexo C. FWD

1. INTRODUCCIÓN

La vía Limonar, ubicada en el municipio de Girardota (Antioquia), se origina en la Autopista Norte, a la altura de la parcelación El Limonar (PR 13+350 de la Ruta 2510 en sentido Girardota – Medellín), y se extiende a lo largo de aproximadamente 11 kilómetros, conectando las veredas rurales de El Limonar, La Holanda (parte baja y parte alta) y Portachuelo. Esta vía constituye un corredor estratégico de conectividad interveredal, con proyección hacia los municipios de San Pedro de los Milagros y Don Matías.

Actualmente, el tramo presenta un alto grado de deterioro estructural y superficial, evidenciado por fisuras, pérdida de capa de rodadura, asentamientos y deficiencias en el sistema de drenaje.

El área de influencia directa está conformada por zonas agropecuarias, con actividades como ganadería, producción lechera y cultivos agrícolas; así como zonas de uso residenciales y recreativos, representados en fincas de descanso, parcelaciones campestres y centros turísticos. Esta condición multipropósito le confiere a la vía una alta relevancia socioeconómica dentro del territorio rural del municipio.

En la Figura 1 se muestra un esquema general de la ubicación de la vía Limonar, la cual comprende los tramos A y B (La Holanda Parte Alta y Baja respectivamente).



Figura 1. Ubicación del proyecto

Fuente: Elaboración propia

2. OBJETIVOS

Los principales objetivos de la asesoría técnica son:

- Caracterizar las propiedades del suelo de la vía Limonar mediante la exploración de calicatas con el fin de determinar los espesores de la estructura de pavimentos existente.
- Realizar la medición de los espesores de la estructura del pavimento mediante georradar.
- Realizar mediciones de deflectometría de impacto con FWD en pavimento flexible utilizando cargas de 40 kN.
- Procesar los resultados del FWD mediante retrocálculo según la metodología AASHTO, para obtener la Deflexión Máxima Normalizada (ajustada a 40 kN y 20 °C), el Módulo Resiliente de la Subrasante y el Número Estructural Efectivo (NE).

3. DEFINICIÓN DE CARRILES

La definición de los carriles se realiza con base en el sentido Autopista Norte - Vereda La Holanda. Definiendo la abscisa 0+000 en la Autopista Norte, por lo tanto, el abscisado crece en dirección Sur-Norte, desde Autopista Norte hacia la Vereda La Holanda. A continuación, se presenta un esquema ilustrativo de esta definición.

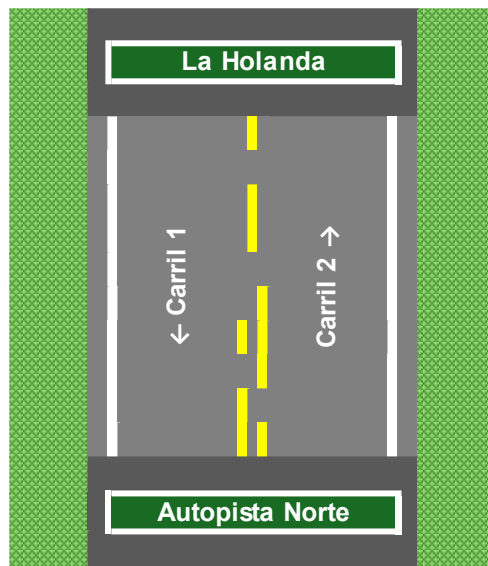


Figura 2. Definición de Carriles

Fuente: Elaboración propia.

4. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN

A continuación, se presentan las tres metodologías complementarias aplicadas en la evaluación estructural del pavimento en la vía Limonar, las cuales corresponden a la exploración geotécnica mediante calicatas, la evaluación de espesores con tecnología de Georradar (GPR) y el análisis de deflexiones mediante Deflectometría de Impacto (FWD).

4.1. Exploración Geotécnica

Para la caracterización geotécnica del pavimento existente, se llevó a cabo un programa de excavación de calicatas, permitiendo una evaluación directa de la estructura del pavimento y sus diferentes capas. Estas intervenciones se realizaron en puntos estratégicamente seleccionados a lo largo de la vía en estudio con base en los sectores homogéneos identificados a partir de las diferencias acumuladas de la deflectometría, priorizando su ubicación en sectores en recta.

A continuación, se presenta una figura y una tabla con la ubicación de las calicatas.

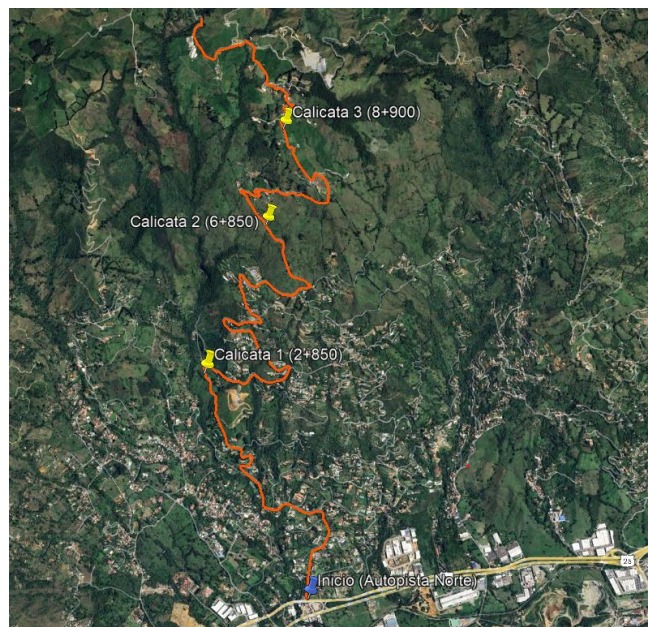


Figura 3. Ubicación y distribución de calicatas
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Ubicación y distribución de calicatas

Calicata	Abscisa
No. 01	2+850
No. 02	6+850
No. 03	8+900

Fuente: Elaboración propia.

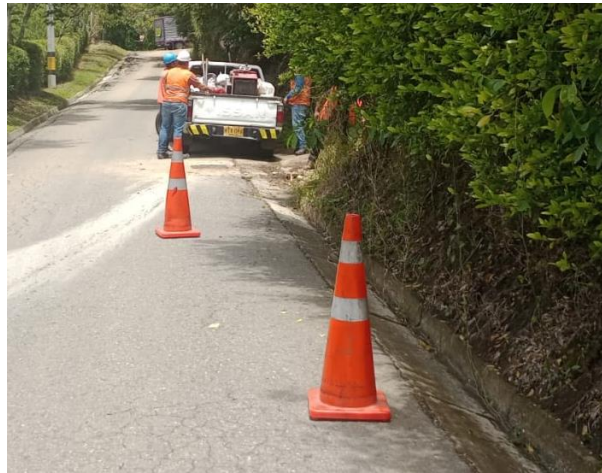
La excavación se efectuó de manera manual con herramientas como pico, pala y barreta, alcanzando una profundidad aproximada de 100 centímetros o la necesaria para identificar la totalidad de las capas estructurales del pavimento. En cada calicata, se registraron espesores de la carpeta asfáltica y materiales granulares, así como características visuales del material, presencia de humedad y posibles signos de deterioro.



Fotografía 1. Excavación de la calicata

Fuente: Tomado en terreno.

Dado que las excavaciones se realizaron en la vía, se implementaron medidas de seguridad vial para minimizar riesgos. Se dispuso de señalización preventiva con conos y avisos de advertencia.



Fotografía 2. Medidas de seguridad

Fuente: Tomado en terreno.

Una vez completada la inspección y el registro de datos, las calicatas fueron rellenas con el mismo material extraído, siguiendo un proceso de compactación por capas para restituir la estabilidad del terreno. Este procedimiento se llevó a cabo conforme a las especificaciones técnicas del proyecto, asegurando que la intervención no afectara la funcionalidad de la vía.



Fotografía 3. Relleno y compactación de calicatas

Fuente: Tomado en terreno.

4.2. Evaluación de Espesores con Georradar (GPR)

La técnica de georradar utiliza ondas electromagnéticas para inspeccionar el suelo. El sistema de adquisición de datos por medio de una antena en una frecuencia fija emite ondas que viajan a través del suelo, en donde estas chocan con los diferentes elementos que se encuentran enterrados y parte de la energía de la onda se refleja y parte se refracta. El equipo por medio de un receptor capta la respuesta de cada una de estas ondas y despliega la respuesta en una pantalla, lo cual permite que esta información sea almacenada para un posterior tratamiento de los datos.

La técnica del georradar, al igual que otras técnicas geofísicas, tiene dentro de sus posibilidades y alcance una resolución que le permite detectar a cierta profundidad la ubicación de objetivos; los cuales deben cumplir con ciertas características para que puedan ser identificados. Dentro de estas características se tiene su tamaño, puesto que dentro de los estudios y pruebas realizadas con el georradar se tienen establecidos límites de los tamaños mínimos que debería tener cada objetivo para poder lograr ser visualizado por el equipo georradar. Es así como en el documento “Method Ground Penetrating Radar - GPR”, se presenta una tabla de resolución para los objetivos.

Tabla 2. Resolución en la técnica de Georradar

Resolution						
Lithology	v(m/ns)	50 MHz	100 MHz	250 MHz	400 MHz	500 MHz
Dry sand	0.135	1.35	0.675	0.27	0.16875	0.135
Wet sand	0.07	0.7	0.35	0.14	0.0875	0.07
Dry clay	0.16	1.6	0.8	0.32	0.2	0.16
Wet clay	0.06	0.6	0.3	0.12	0.075	0.06
Silt	0.09	0.9	0.45	0.18	0.1125	0.09
Water	0.03	0.3	0.15	0.06	0.0375	0.03

Table 2: Calculation of the vertical resolution (metre) at different frequencies and lithologies.

Fuente: Method Ground Penetrating Radar - GPR

La tabla muestra una dependencia de la litología, es decir del tipo de suelo sobre el cual se lleva a cabo la prospección con el georradar, que determina el alcance en resolución

que logra obtener el equipo GPR en la detección de objetivos de mayores dimensiones, con respecto a los valores mínimos que se muestran en la tabla.

Este tipo de comportamiento se presenta, debido a que la técnica de georradar se ve afectada por la composición del terreno lo cual incide en la penetración de la energía emitida por la antena del georradar y por ende disminuye su profundidad de exploración, es así que para terrenos con alto contenido de arcilla y residuos metálicos no se logra alcanzar a una gran profundidad dadas las propiedades físicas de este material. Ante este tipo de suelo se opta siempre por utilizar antenas de frecuencia media baja, como las antenas de 500MHz ó 250MHz.

La antena del georradar emite ondas electromagnéticas que penetran en el suelo y al encontrar un cambio de material generan una respuesta (ver figura 12) que es captada de nuevo por el receptor de la antena y la unidad de adquisición de datos que a su vez se muestra en el monitor. Estos radargramas que se despliegan en pantalla son el resultado de colocar cada una de las señales de respuesta una junta a la otra, con lo cual se aprecia en conjunto una figura en dos dimensiones. En la escala horizontal está el espacio recorrido por el equipo y en la escala vertical la profundidad de penetración del GPR de acuerdo a la frecuencia de la antena y la configuración que se esté utilizando para la adquisición de datos. A su vez los radargramas pueden mostrar formas hiperbólicas que representan posibles objetivos o líneas continuas que pueden representar cambios de estratos de materiales.

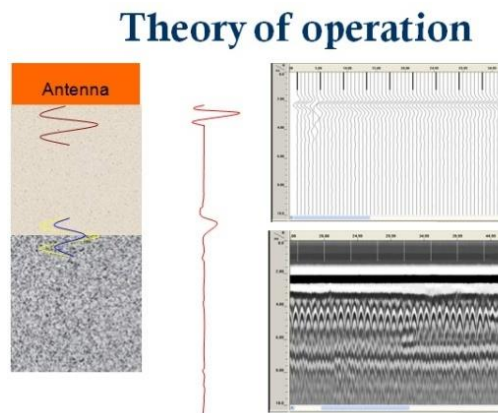


Figura 4. Operación del GPR

The Hyperbola shape

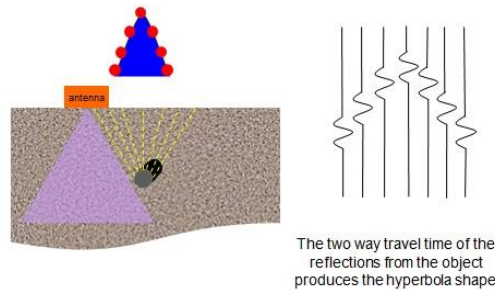


Figura 5. Visualización de un objetivo

Al utilizar antenas de frecuencia media baja se logra una profundidad de penetración mayor, pero al mismo tiempo se tiene un efecto colateral y es la pérdida de resolución, en lo que respecta a la búsqueda de objetivos pequeños o se presenta el caso de objetivos que están muy cercanos el uno del otro y que sean observados como un sólo objetivo de mayor tamaño.

Debido a este tipo de limitación que presenta la técnica se plantean alternativas, como la adquisición de datos con dos antenas. Una de frecuencia media baja (250MHz ó 500MHz) en combinación con una antena de alta frecuencia (800MHz ó 1200MHz) para que ayude en la posible identificación de posibles objetivos superficiales, por lo tanto, entre mayor sea la profundidad de penetración los objetivos de menor tamaño no podrán ser observados por esta técnica.

En terrenos con un alto nivel freático las señales electromagnéticas pierden alcance en profundidad, por lo cual se aprecia una clara disminución en la profundidad de exploración de la técnica de georradar. También en sitios con cuerpos de agua dulce no es recomendable realizar la prospección, ya que el agua no permite que las señales penetren en el suelo, y en cuerpos de agua salada la técnica de georradar no es

recomendable puesto que la señal es completamente atenuada por el agua salada lo cual no permite visualizar ningún posible objetivo. Mientras que en concreto y/o asfalto, la técnica de georradar presenta un buen comportamiento; lo que permite la visualización de los posibles objetivos que allí puedan encontrarse.

El georradar modelo ProEx (Professional Explorer) es el de más alta especificación técnica fabricado por Mala GeoScience, Suecia, siendo esta última la empresa líder a nivel mundial en la fabricación de georradares y antenas de frecuencias bajas, medias y altas.

Este georradar, además de trabajar en modos multicanal, multifrecuencia y abarcar todo el espectro de antenas, tiene la posibilidad de guardar los datos crudos en memoria para luego hacer la descarga en un computador. Una vez descargados los datos crudos de georradar se pueden post-procesar mediante algoritmos de inversión, filtros y demás técnicas de procesamiento de señales que se encuentran disponibles en los softwares dedicados para tales como el RadExplorer y RADAN.

Este post-procesamiento permite mejorar la relación señal/ruido y así mejorar los datos del georradar respecto de su visualización en las pantallas de visualización de los sistemas de interpretación en tiempo real de los georradares de baja especificación.

Con la mejora en los datos adquiridos, las condiciones para llevar a cabo la tarea de interpretación se facilitan al poder realizarlo desde un computador en relación al trabajo en campo, permitiendo disminuir el nivel de error al identificar y unir anomalías puntuales para convertirlas en anomalías lineales (tuberías y refuerzos). Cuando el ámbito de trabajo corresponde a zonas urbanas, plantas, refinerías o yacimientos, la interpretación en tiempo real suele ser muy difícil por el gran nivel de congestión de tuberías y cables. En el caso de perfiles en dos dimensiones para identificar las capas se precisa realizar filtros que permitan visualizar las posibles capas que puedan existir en la vía.

La presencia de muchas líneas enterradas (tuberías y cables) hace difícil la correlación de las anomalías puntuales, complicando de sobremanera la definición de las trazas (anomalías lineales). Esto último solamente se puede hacer en el computador mediante la utilización del software especializado que permite ir observando la disposición espacial de las anomalías puntuales en un plano en planta automático (eventual alineación de las anomalías puntuales para conformar una anomalía lineal: tubería o refuerzo).

La detección de anomalías y objetivos como tuberías está sujeta a la resolución de la antena que se utilice durante la prospección geofísica para la adquisición de datos, también al tipo de suelo sobre el cual se realiza la prospección y a las condiciones climáticas del momento y condiciones de acceso al sitio objeto de estudio; todo esto en conjunto determina cuáles serán los posibles objetivos que pueden ser detectados/vistos por el equipo georradar y también, como hace referencia la teoría de la técnica georradar, en torno a la resolución mínima de cada antena.

Las mediciones de Georradar fueron realizadas con el equipo marca MALA, las características técnicas del equipo se presentan a continuación.

Tabla 3. Características técnicas del Georradar.

Georradar
MALA, modelo ProEx
Antena: Es compatible con toda la gama de antenas MALA (baja, media y alta frecuencia)
Baterías: 5 horas dependiendo de la configuración
Almacenamiento: El Monitor MALA XV es una plataforma de adquisición de datos basada en Windows para adquirir datos y almacenar los datos crudos de georradar para su posterior post procesamiento.
Multicanal: Hardware de Doble Canal (Dual hardware channel); Cuatro canales de datos. Soporta máximo ocho (8) antenas
Configuraciones: Soporta configuración de antena simple, múltiple o arreglos de antenas
Diseño modular
Condiciones de Operación: IP67
Temperatura de Operación: -20° hasta +50°C / 0° hasta 120°F

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 4. Georadar marca MALA.
Fuente: Tomado en terreno





Fotografía 5. Prospección con Georradar
Fuente: Tomado en terreno

4.3. Evaluación Estructural con Deflectómetro de Impacto

El Falling Weight Deflectometer (FWD) es un equipo utilizado para medir la deflexión de la superficie de rodadura bajo la acción de un impacto simulado de carga. El FWD (ver Figura 6) aplica una carga dinámica a través de un peso que cae sobre la superficie, lo que permite obtener la respuesta de deflexión del pavimento. Esta medición es crucial para el análisis estructural, ya que proporciona información sobre la rigidez del pavimento y su capacidad para soportar las cargas de tráfico.

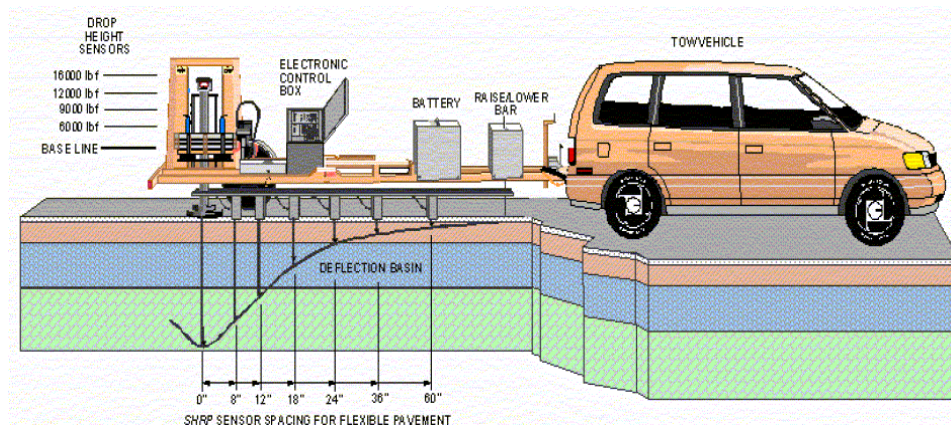


Figura 6. Componentes del FWD

Fuente: Documento técnico.

Se trata de un ensayo no destructivo, que simula el comportamiento del pavimento ante el paso de los vehículos pesados. Puede ser utilizado en pavimentos de asfalto, hormigón o una composición de ambos, o bien, sobre cualquier capa de un pavimento en construcción. A través del análisis de este cuenco se obtiene información de la rigidez de la estructura de pavimentos y su suelo de fundación, siendo ella muy importante para definir la condición de la estructura a lo largo de un proyecto. Lo anterior es fundamental para evaluar actividades relacionadas con la rehabilitación, mantención o control de calidad.

Las distancias de los geófonos al centro del plato de carga fueron: 0, 8, 12, 18, 24, 36 y 60 pulgadas y el radio del plato de 15 cm. Se midieron los dos carriles, con una

separación longitudinal de 100 m, quedando a los tres bolillos a 50 m (ver Figura 7). En cada punto de evaluación se ejecutaron dos golpes a una carga de 40 kN.

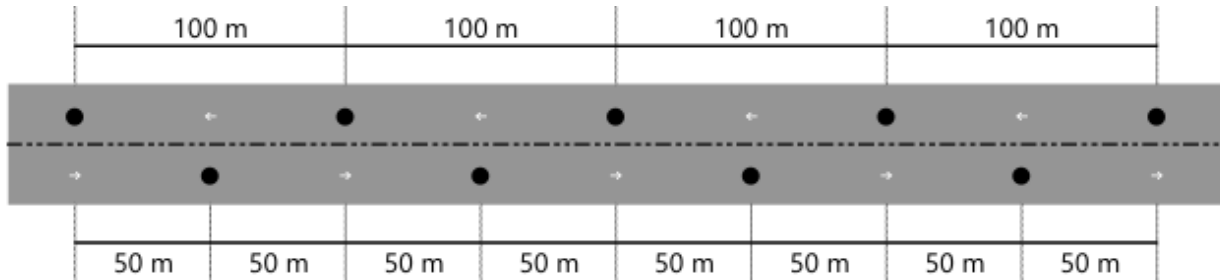


Figura 7. Esquema de Medición con el FWD
Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 6. Evaluación Estructural con Deflectómetro de Impacto
Fuente: Tomado en terreno

4.3.1. Procesamiento de la información del FWD

La información obtenida con el FWD fue procesada mediante la metodología AASHTO para calcular los parámetros estructurales, como el módulo resiliente (M_R) y el número estructural efectivo (NE).

4.3.1.1. Método AASHTO

Por medio de este método se determinan el módulo resiliente de la subrasante (M_R) y el número estructural del pavimento (SN). De acuerdo con lo descrito en la norma AASHTO 93, para cada punto de deflectometría, el M_R se obtiene mediante un proceso iterativo que utiliza las deflexiones medidas en los geófonos correspondientes. Una vez calculado el M_R , este se utiliza para determinar el SN del mismo punto, la determinación del SN se basa en la suposición de que la capacidad estructural del pavimento es función de su espesor total y su rigidez general. Según la norma AASHTO 93, a distancias suficientemente grandes de la carga, las deflexiones medidas en la superficie del pavimento se deben únicamente a la deformación de la subrasante, y también son independientes del tamaño de la placa de carga. Esto permite el retrocálculo del módulo de resiliencia de la subrasante (M_R) a partir de una única medición de la deflexión y la magnitud de la carga. Cabe señalar que no se necesita un ajuste de temperatura para determinar el módulo resiliente (M_R), ya que la deflexión utilizada se debe únicamente a la deformación de la subrasante. La deflexión utilizada para retrocalcular el módulo de la subrasante debe medirse lo suficientemente lejos como para proporcionar una buena estimación del módulo de la subrasante, independiente de los efectos de las capas superiores, pero también lo suficientemente cerca como para que no sea demasiado pequeña para medirse con precisión. El módulo efectivo de toda la estructura del pavimento E_p (todas las capas del pavimento por encima de la subrasante) puede determinarse a partir de la deflexión medida en el centro de la placa de carga.

El proceso iterativo se desarrolla siguiendo la siguiente secuencia:

1. Determinar el valor de M_R utilizando la información de la deflexión obtenida en el geófono más alejado, ubicado a una distancia r , utilizando la siguiente ecuación.

$$M_R = \frac{0.24 P}{d_r r}$$

Donde:

M_R = módulo resiliente de la subrasante retrocalculado, en psi

P = carga aplicada, en libras

d_r = deflexión medida a una distancia r desde el centro de la carga, en pulgadas

r = distancia desde el centro de la carga, en pulgadas

Ecuación 1. Módulo resiliente de la subrasante retrocalculado

Fuente: AASHTO 93.

2. Calcular E_p a partir de la deflexión medida en el centro del plato de carga. Este se obtiene mediante iteraciones sucesivas de posibles valores, hasta que se cumpla la igualdad de la siguiente ecuación.

$$d_0 = 1.5 p a \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^3 \sqrt{\frac{E_p}{M_R}}}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\}$$

Donde:

d_0 = deflexión medida en el centro de la placa de carga (y ajustada a una temperatura estándar de 68 °F o 20 °C), en pulgadas

p = presión de la placa de carga, en psi.

a = radio de la placa de carga, en pulgadas

D = espesor total de las capas de pavimento por encima de la subrasante, en pulgadas

M_R = módulo resiliente de la subrasante, en psi

E_p = módulo efectivo de todas las capas de pavimento por encima de la subrasante, en psi

Ecuación 2. Deflexión normalizada

Fuente: AASHTO 93.

3. Verificar la distancia mínima r del geófono utilizado en la iteración. Si no se cumple esta condición, se procede al siguiente geófono y se repiten los pasos de

verificación. La distancia mínima se puede determinar utilizando la siguiente relación:

$$r \geq 0.7 a_e$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}$$

Donde:

- a_e = radio del bulbo de esfuerzos en la interfaz entre la subrasante y el pavimento, en pulgadas
- a = radio de la placa de carga, en pulgadas
- D = espesor total de las capas de pavimento por encima de la subrasante, en pulgadas
- E_p = módulo efectivo de todas las capas de pavimento por encima de la subrasante, en psi

Ecuación 3. Radio del bulbo de esfuerzos

Fuente: AASHTO 93.

4. Una vez obtenido el M_R retrocalculado, debe ajustarse para que sea coherente con el valor medido en laboratorio utilizado para el suelo de ensayo de carretera AASHTO en el desarrollo de la ecuación de diseño de pavimentos flexibles. Se recomienda que los valores de M_R retrocalculados se multipliquen por un factor de corrección $C = 0.33$ para su uso en la determinación del número estructural (SN) para fines de diseño cuando se utiliza una carga de FWD de aproximadamente 9,000 libras o 40 kN.

$$M_R \text{ diseño} = C \left(\frac{0.24 P}{d_r r} \right)$$

Donde:

$C = 0.33$ (recomendado)

Ecuación 4. M_R retrocalculado

Fuente: AASHTO 93.

5. Calcular el número estructural (SN). La relación entre SN, espesor y rigidez es:

$$SN_{\text{eff}} = 0.0045 D \sqrt[3]{E_p}$$

Donde:

D = espesor total de las capas de pavimento por encima de la subrasante, en pulgadas
E_p = módulo efectivo de todas las capas de pavimento por encima de la subrasante, en psi

Ecuación 5. Número estructural

Fuente: AASHTO 93.

4.3.2. Sectorización del pavimento existente mediante el método de diferencias acumuladas

Para explicar el proceso de sectorización del pavimento utilizando el método de diferencias acumuladas, primero debemos comprender el fundamento de este método.

El método de diferencias acumuladas, descrito en el Apéndice J de la guía de diseño de pavimentos AASHTO 1993, es un procedimiento estadístico que busca establecer sectores homogéneos en función de una variable medida a lo largo del tramo en estudio. Esta variable, llamada Zx, representa la diferencia entre el área bajo la curva de respuesta a cualquier distancia y el área total desarrollada por la respuesta promedio de todo el tramo hasta la misma distancia.

La clave para la sectorización radica en el comportamiento de Zx en función de la distancia a lo largo del tramo en estudio. Cuando se grafica Zx en función de la longitud, los puntos donde la pendiente de la línea que representa la variación de Zx con la longitud cambia de signo indican los límites de los sectores homogéneos.

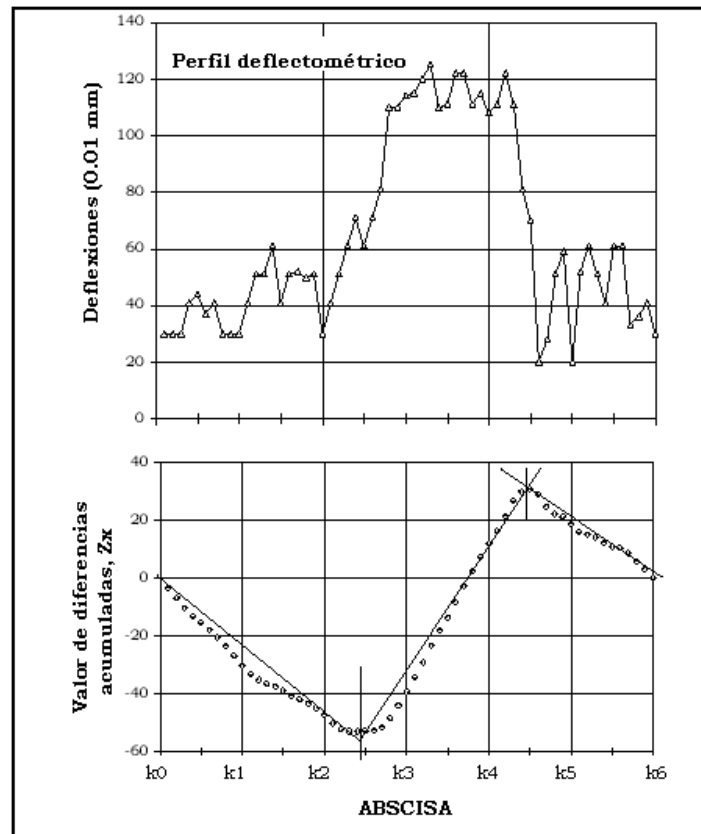


Figura 8. Delimitación de sectores homogéneos por el método de las diferencias Acumuladas.

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras, Anexo E, Figura E.1.

Ahora, en cuanto al proceso específico de sectorización en tramos homogéneos del pavimento, se utiliza el método de diferencias acumuladas. Esto implica graficar Z_x en función de la longitud e identificar los puntos donde la pendiente cambia de signo, lo que indica los límites de los sectores homogéneos. Es importante destacar que la variable de entrada para obtener Z_x es la deflexión normalizada a una carga de 40 kN, dado que esta es la principal característica estructural del pavimento.

5. RESULTADOS

5.1. Exploración Geotécnica

A continuación, se presentan los resultados de las calicatas ejecutadas en la vía Limonar abarcando la información recopilada sobre la estratigrafía del terreno y la estructura del pavimento en cada ubicación evaluada.

5.1.1. Calicata 1

Ubicada en la abscisa 2+850, la calicata presenta una capa asfáltica de 0.05 metros, seguida por una capa de 0.13 metros de grava arcillosa con arena, con partículas de tamaño máximo de 2" de origen aluvial de color café grisáceo y una capa de 0.27 metros compuesta por una grava arcillosa con arena, de tamaño máximo 2" de color café oscuro con vetas de color amarillo, presenta residuos de asfalto.



Fotografía 7. Excavación de la calicata No. 1

Fuente: Tomado en terreno.



Fotografía 8. Relleno y compactación de la calicata No. 1
Fuente: Tomado en terreno.



Fotografía 9. Estratos observados en la calicata No. 1
Fuente: Tomado en terreno.

5.1.2. Calicata 2

Ubicada en la abscisa 6+850, la calicata presenta una capa asfáltica de 0.06 metros, seguida por una capa de 0.14 metros compuesta por una grava arcillosa con arena, con partículas de tamaño máximo de 3" de origen aluvial de color café y una capa de 0.20 metros compuesta por una grava limosa con arena con partículas de tamaño máximo de 2" de color café oscuro con vetas de color amarillo con presencia de raíces.



Fotografía 10. Excavación de la calicata No. 2

Fuente: Tomado en terreno.



Fotografía 11. Relleno y compactación de la calicata No. 2

Fuente: Tomado en terreno.



Fotografía 12. Estratos observados en la calicata No. 2
Fuente: Tomado en terreno.

5.1.3. Calicata 3

Ubicada en la abscisa 8+900, la calicata presenta una capa asfáltica de 0.07 metros, seguida por una capa de 0.08 metros compuesta por una grava con arcilla y arena con partículas de tamaño máximo 2" de color café grisáceo y una capa de 0.23 metros compuesta por arena limosa con gravas de tamaño máximo $\frac{3}{4}$ " de color café anaranjado.



Fotografía 13. Excavación de la calicata No. 3
Fuente: Tomado en terreno.



Fotografía 14. Relleno y compactación de la calicata No. 3
Fuente: Tomado en terreno.



Fotografía 15. Estratos observados en la calicata No. 3
Fuente: Tomado en terreno.

Se tomaron muestras de material en cada una de las calicatas ejecutadas y para cada una de las capas que componía la estructura del pavimento y se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- **INV E 122:2013** Determinación en laboratorio del contenido de agua (Humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo agregado.
- **INV E 125:2013** Determinación del límite líquido de los suelos.
- **INV E 126:2013** Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- **INV E 123:2013** Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.
- **INV E 148:2013** CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada.

Los resultados a detalle de cada uno de estos ensayos pueden ser consultados en el Anexo A. Calicatas.

ENSAYO DE CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO)

Los resultados obtenidos en el ensayo de CBR (California Bearing Ratio) realizado sobre muestras inalteradas del material se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4. CBR de laboratorio

Calicata No.	Localización	Descripción	CBR (%)
1	K2 + 850	Arcilla de baja compresibilidad, de plasticidad media de color café con vetas de color rojizo.	7,86
2	K6 + 850	Arena arcillosa, de plasticidad media de color café con vetas de color rojizo.	4,15
3	K8 + 900	Arena limosa, de plasticidad media de color café con vetas de color rojizo.	9,81

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de los ensayos en laboratorio.

5.2. Evaluación de Espesores con Georradar (GPR)

Es importante destacar que la mayor parte de la vía está conformada por pavimento flexible. No obstante, en el kilómetro 9+650 se registra un tramo en placa huella con una longitud aproximada de 330 metros, seguido por un tramo en afirmado de cerca de 920 metros. A continuación, se presentan los espesores correspondientes a la estructura del pavimento, diferenciando los tramos con longitudes significativas de cada tipo de pavimento, los segmentos cortos en afirmado (debido a la pérdida de la carpeta asfáltica) o placa huella no fueron considerados de manera individual debido a su escasa representatividad.

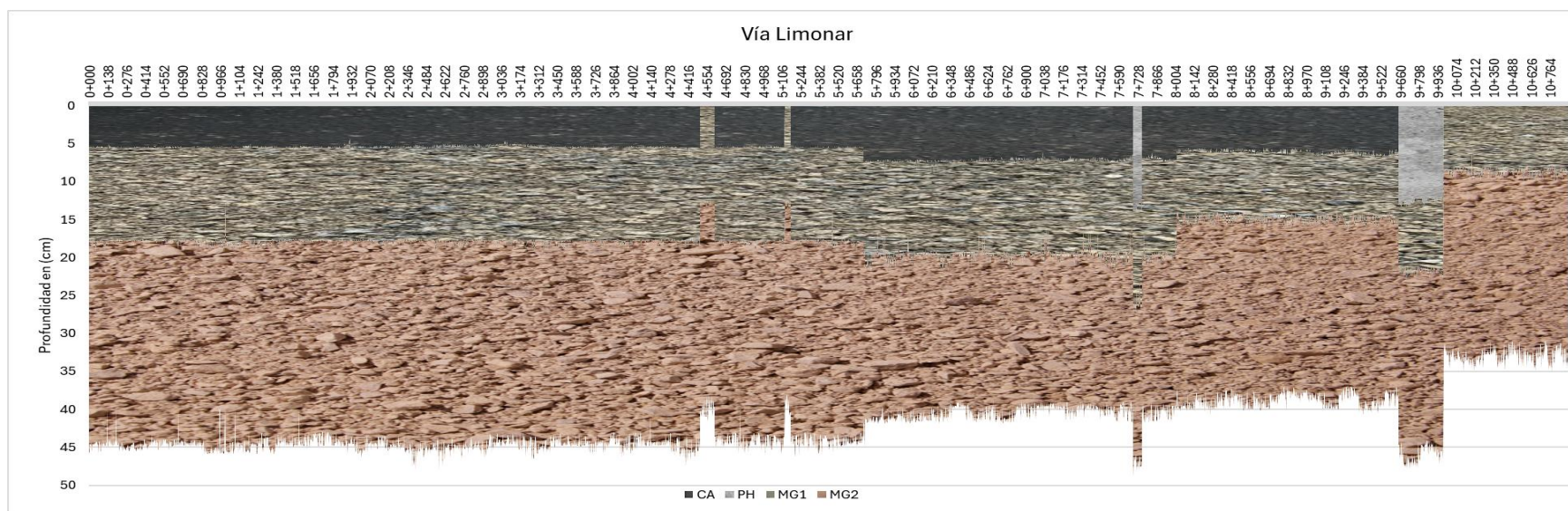


Figura 9. Espesores Estructura de Pavimento

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Tipos de pavimento

Abscisa Inicial	Abscisa Final	Longitud (m)	Tipo de pavimento	Observación
0+000	4+500	4,500	Asfalto	Se presentan pequeños tramos de Placa huella
4+500	4+610	110	Afirmado (Pérdida de CA)	
4+610	5+125	515	Asfalto	
5+125	5+170	45	Afirmado (Pérdida de CA)	
5+170	7+695	2,525	Asfalto	Se presentan pequeños tramos de Placa huella
7+695	7+760	65	Placa huella	
7+760	9+650	1,890	Asfalto	
9+650	9+980	330	Placa huella	
9+980	10+900	920	Afirmado	

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Evaluación Estructural con Deflectómetro de Impacto

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el FWD donde se incluyen los siguientes parámetros:

- Deflexión máxima normalizada a 40 kN y 20 °C
- Módulo Resiliente Ajustado (M_R Ajustado)
- Número Estructural Efectivo (NE)

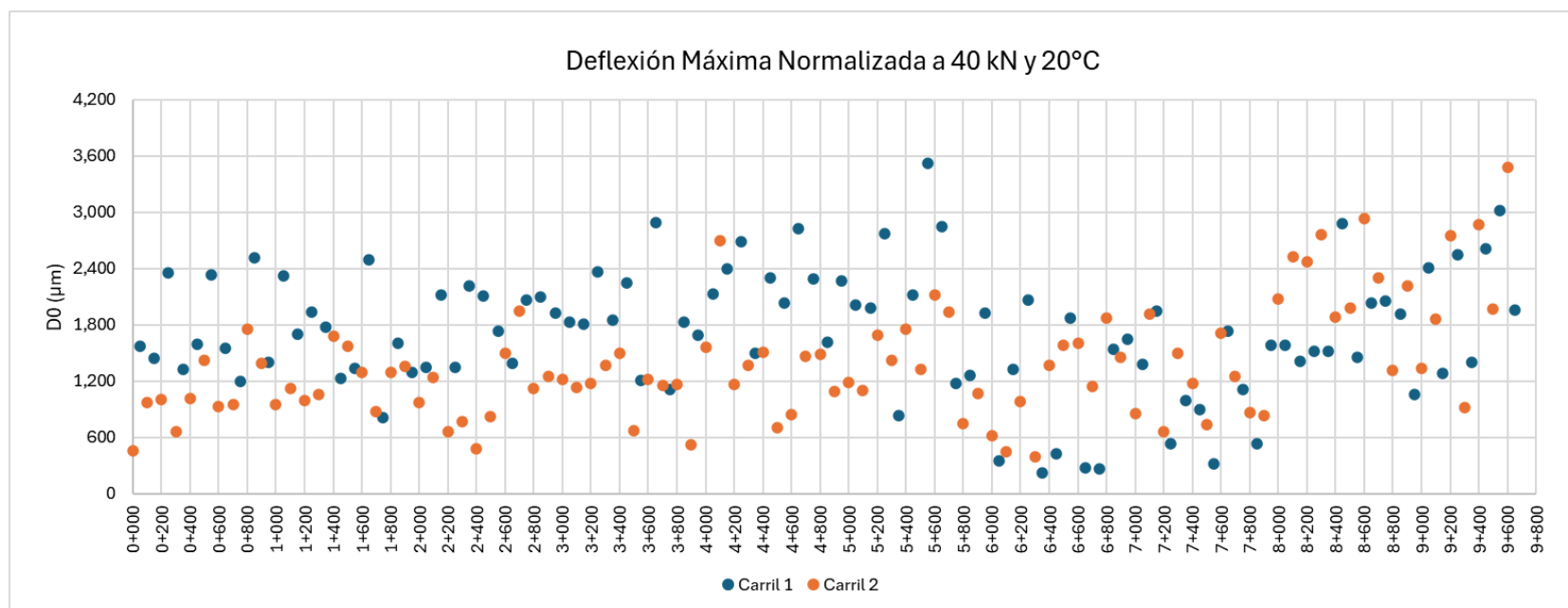


Figura 10. D_0 Normalizada a 40 kN y 20 °C

Fuente: Elaboración propia.

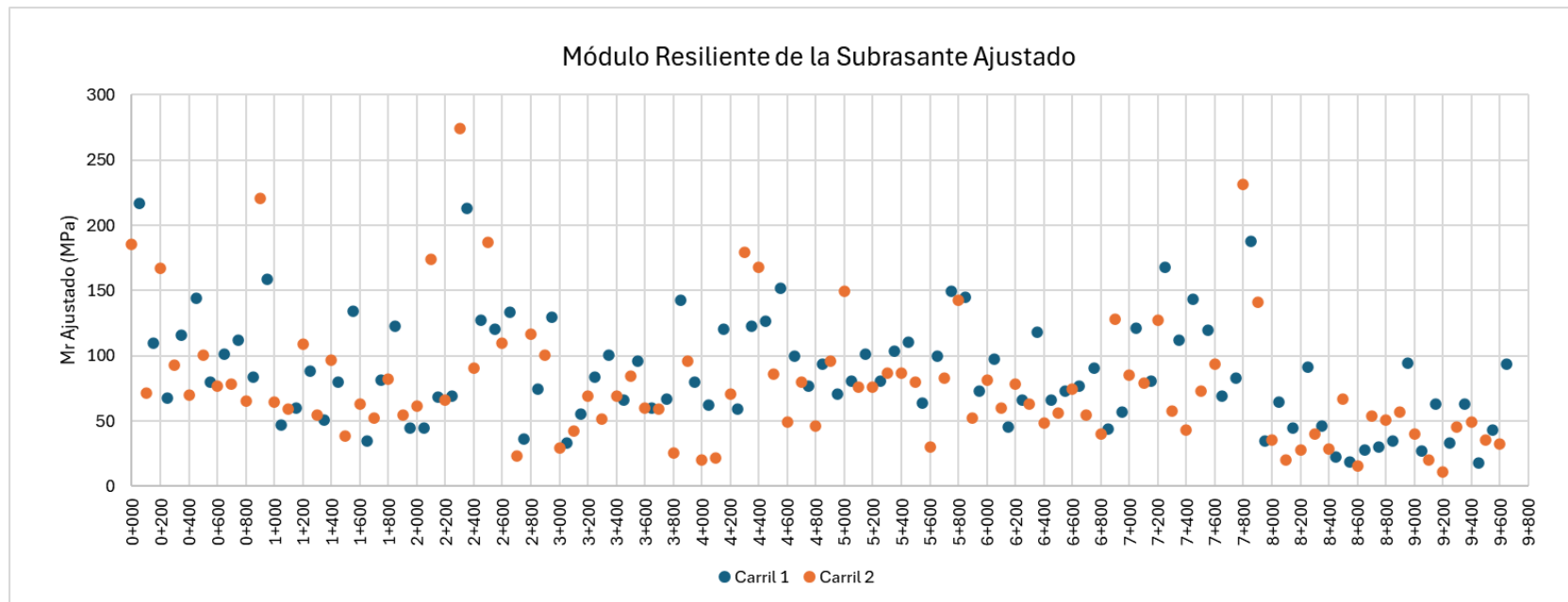


Figura 11. M_R Ajustado

Fuente: Elaboración propia.

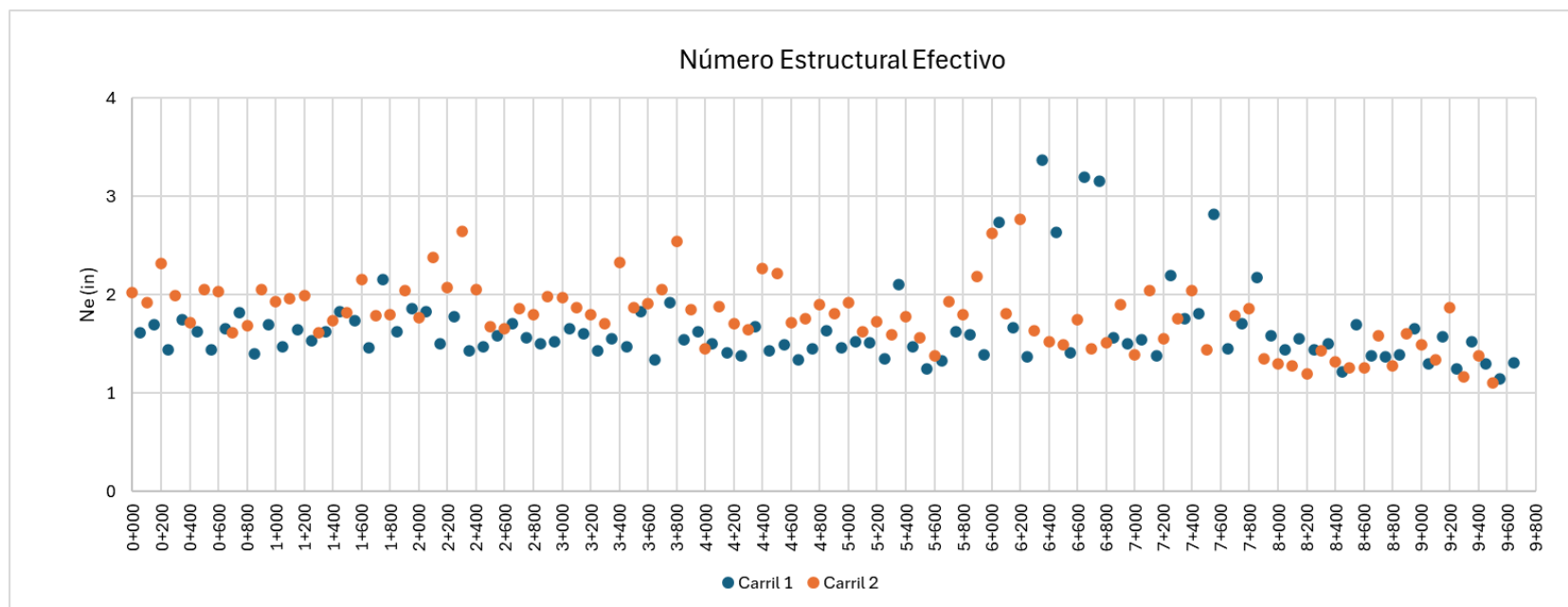


Figura 12. Número Estructural Efectivo
Fuente: Elaboración propia.

5.3.1. Sectores homogéneos

A continuación, se presenta un resumen de la sectorización resultante a partir del método de diferencia acumuladas de la deflexión máxima normaliza y los valores característicos de cada sector.

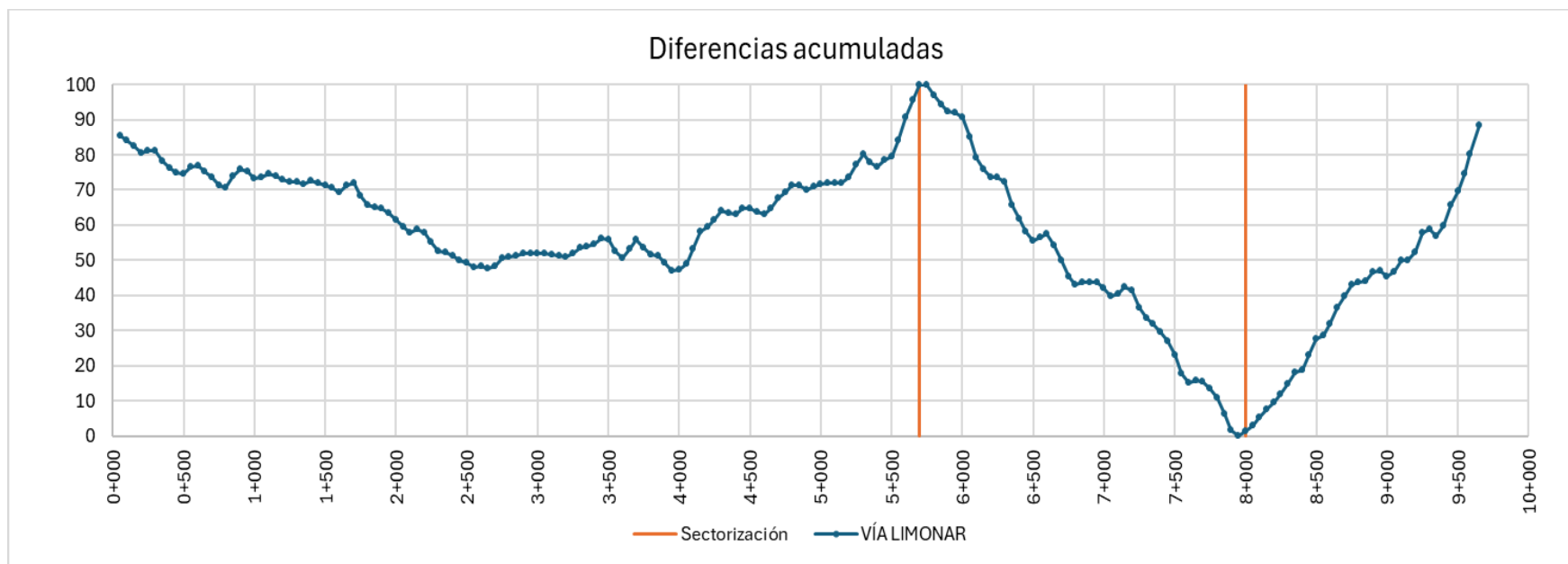


Figura 13. Sectorización del pavimento

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Valores característicos de cada sector

SECTORES HOMOGÉNEOS								Módulo Resiliente (MPa)	California Bearing Ratio (%)	Número Estructural Actual (cm)
Sector	Tipo de Pavimento	Abscisa Inicial	Abscisa Final	Longitud [m]	Estructura de pavimento existente (cm)					
					CA	BG	SBG			
1	Asfalto	0+000	5+950	5,950	5.4	12.5	26.6	90.71	12.9	4.44
2	Asfalto	5+950	8+000	2,050	7.1	12.6	20.7	90.19	12.8	4.79
3	Asfalto	8+000	9+650	1,650	6.1	8.9	23.7	42.53	4.0	3.53
4	Concreto	9+650	9+980	330	12.5	9.3	24.1	-	-	-
5	Afirmado	9+980	10+900	920		8.8	24.1	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que a partir del Módulo Resiliente Ajustado de la subrasante y de la fórmula de correlación entre el CBR y el M_R propuesta por la AASHTO, se obtiene el valor de CBR para cada uno de los puntos evaluados con deflectometría de impacto.

$$M_R = 2555 \times CBR^{0.64}$$

- M_R: valor del Módulo Resiliente, en libras por pulgada cuadrada (psi)
- CBR: en porcentaje.

6. COMENTARIOS FINALES

En el presente informe se documentó el desarrollo y los resultados de la exploración geotécnica mediante calicatas, la evaluación de espesores con tecnología de Georradar (GPR) y el análisis de deflexiones mediante Deflectometría de Impacto (FWD) en la vía Limonar ubicada en el municipio de Girardota (Antioquia).

Con respecto a las exploraciones geotécnicas, se presentó el registro fotográfico correspondiente, detallando cada etapa del proceso, desde la marcación del punto de excavación hasta la identificación de los diferentes estratos del suelo.

El análisis del perfil obtenido permitió caracterizar las capas estructurales del pavimento, evidenciando variaciones en la composición de la base, subbase y subrasante. Las exploraciones se han realizado de acuerdo con el alcance solicitado por el cliente, recomendándose no generalizar las caracterizaciones de los estratos debido a la distancia entre sectores.

Es importante destacar que la mayor parte de la vía está conformada por pavimento flexible entre la abscisa 0+000 y 9+650 (se presentan algunos tramos cortos de placa huella). No obstante, en el kilómetro 9+650 se registra un tramo en placa huella con una longitud aproximada de 330 metros, seguido por un tramo en afirmado de cerca de 920 metros.

La información obtenida con el FWD fue procesada mediante la metodología AASHTO, obteniendo así los parámetros estructurales del pavimento tales como la Deflexión Máxima Normalizada (D_{0n}), el Módulo Resiliente Ajustado de la Subrasante (M_R) y el Número Estructural Efectivo (NE).

La definición de los sectores homogéneos del pavimento (sectorización), se llevo a cabo mediante el método de diferencias acumulado con base en la deflexión máxima normalizada. A continuación, se presentan los valores característicos de cada sector.

Tabla 7. Valores característicos de cada sector

SECTORES HOMOGÉNEOS								Módulo Resiliente (MPa)	California Bearing Ratio (%)	Número Estructural Actual (cm)
Sector	Tipo de Pavimento	Abscisa Inicial	Abscisa Final	Longitud [m]	Estructura de pavimento existente (cm)					
					CA	BG	SBG			
1	Asfalto	0+000	5+950	5,950	5.4	12.5	26.6	90.71	12.9	4.44
2	Asfalto	5+950	8+000	2,050	7.1	12.6	20.7	90.19	12.8	4.79
3	Asfalto	8+000	9+650	1,650	6.1	8.9	23.7	42.53	4.0	3.53
4	Concreto	9+650	9+980	330	12.5	9.3	24.1	-	-	-
5	Afirmado	9+980	10+900	920		8.8	24.1	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta una figura donde se comparan los valores de CBR obtenidos a partir de la correlación entre el Módulo Resiliente Ajustado de la Subrasante obtenido del retrocalculo de la deflectometría de impacto, y del CBR obtenido en laboratorio.

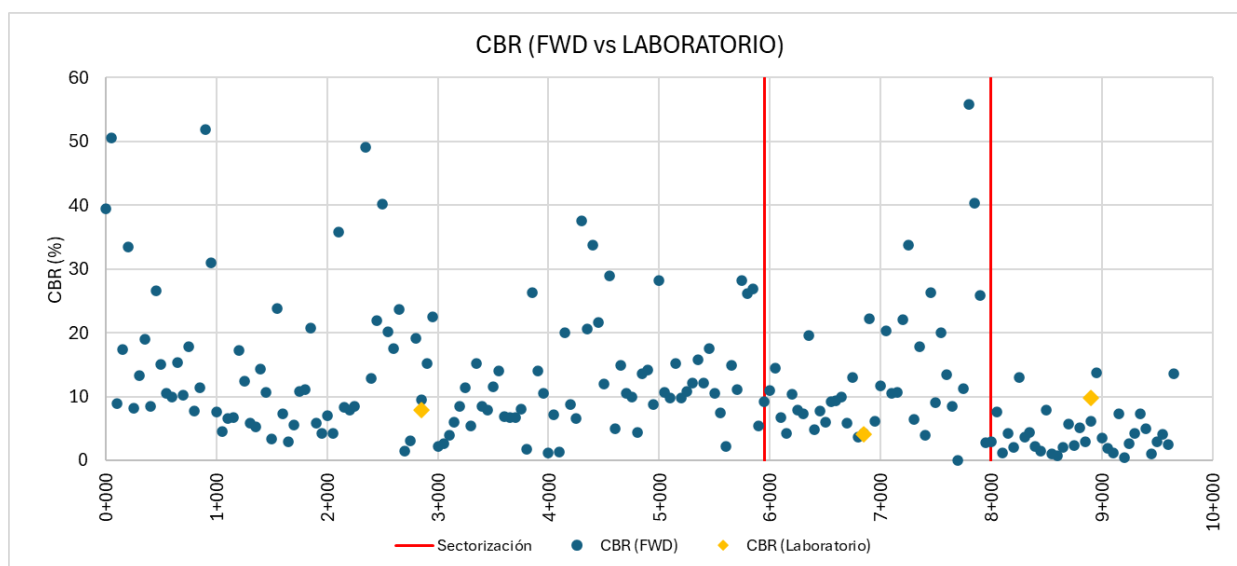


Figura 14. CBR (FWD vs LABORATORIO)

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los valores de CBR obtenidos en laboratorio presentan una tendencia similar a los valores estimados mediante la correlación con el módulo resiliente (M_R) para los puntos específicos de ensayo. No obstante, se evidencia una variabilidad significativa del CBR a lo largo de cada sector, lo cual indica la heterogeneidad del suelo en los sectores analizados.

Por esta razón, se recomienda adoptar los valores promedio de CBR derivados de los ensayos de deflectometría de impacto (FWD), ya que estos representan de manera más integral el comportamiento mecánico del terreno in situ. En contraste, el uso exclusivo de los valores de laboratorio podría subestimar o sobrestimar la capacidad de soporte real del suelo en determinados sectores, afectando la representatividad del diseño estructural del pavimento.

Anexo A. Calicatas

Anexo B. GPR

Anexo C. FWD