

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE  
LA VÍA TERCIARIA EN LA VEREDA LLANO GRANDE EN EL MUNICIPIO DE GATEQUE,  
BOYACÁ.**

Israel Guillermo Arias González, María Alejandra Sánchez Salcedo.



Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería

Universidad La Gran Colombia

Bogotá

2025

**Evaluación de alternativas para el mejoramiento estructural de la vía terciaria en la vereda llano grande en el municipio de Guateque, Boyacá.**

**Israel Guillermo Arias González, María Alejandra Sánchez Salcedo.**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director Sandra Paola Sánchez Millán**



**Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería**

**Universidad La Gran Colombia**

**Bogotá**

**2025**

**Tabla de contenido**

<b>RESUMEN</b> .....	<b>10</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>13</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>15</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
OBJETIVO GENERAL .....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN .....	20
MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN .....	20
DISEÑO DE LA ESTABILIZACIÓN .....	21
FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN .....	21
NORMATIVA Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....	22
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>23</b>
1. FASE 1. ESTUDIO PRELIMINAR EN CAMPO .....	23
1.1. 1.1. Inspección y levantamiento topográfico del tramo .....	23
2. FASE 2. PROPUESTA DE MEJORAMIENTO .....	23
1.2. 2.1. Elaboración de ensayos de laboratorio para caracterización del terreno .....	23
1.3. 2.2 Selección de Materiales para mejoramiento y estabilización .....	24
3. FASE 3. EVALUACIÓN DE COSTOS .....	24
<b>CAPÍTULO I: ESTUDIO PRELIMINAR EN CAMPO</b> .....	<b>25</b>

1.1.	METODOLOGÍA .....	26
1.1.1.	<i>Planeación del Levantamiento Topográfico</i> .....	27
1.1.2.	<i>Reconocimiento del Terreno</i> .....	27
1.1.3.	<i>Medición de Campo</i> .....	27
1.1.4.	<i>Toma de Datos</i> .....	28
1.1.5.	<i>Procesamiento de Datos:</i> .....	28
1.1.6.	<i>Análisis y Elaboración de Planos:</i> .....	28
1.2.	EQUIPOS UTILIZADOS .....	29
1.3.	SISTEMA DE COORDENADAS .....	29
1.4.	DETALLES DEL LEVANTAMIENTO.....	31
1.5.	<i>Convenciones</i> .....	32
<b>CAPÍTULO II: PROPUESTA DE MEJORAMIENTO.....</b>		<b>33</b>
2.1.	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA GENERAL .....	33
2.1.1.	<i>Estratigrafía</i> .....	34
2.1.2.	GEOMORFOLOGÍA.....	35
2.2.	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	36
2.3.	INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO.....	37
2.3.1.	<i>Descripción de los apiques y ensayos exploratorios</i> .....	38
2.4.	REALIZACIÓN DE ENSAYOS .....	39
2.4.1.	<i>Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado (INV E-122-13)</i> .....	39
2.4.2.	<i>Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13) y Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (INV E-126-13)</i> .....	41
2.4.3.	<i>Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua (INV E-128-13)</i> .....	47

2.4.5. *Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz No 200 en los agregados pétreos mediante lavado (INV E – 214 – 13).....50*

2.4.6. *Determinación de los tamaños de las partículas de suelos (INV E – 123 – 13)*

51

2.4.7. *Ensayo Penetrómetro Dinámico de Cono PDC (INV-E-172.13).....55*

### **CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO .....61**

3.1. PROPUESTA NO. 1: MEZCLA DE CENIZA CON 6% DE CAL .....62

3.2. RELACIÓN HUMEDAD - PESO UNITARIO SECO .....62

3.3. RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO CBR.....63

3.4. PROPUESTA NO. 2: MEZCLA DE CENIZA CON 10% DE CAL .....65

3.4.1. *Relación humedad - Peso unitario seco .....65*

3.4.2. *Relación de soporte del suelo CBR.....66*

3.4.3. *Propuesta No. 3 – Suelo cemento al 9% .....69*

3.4.4. *Propuesta No. 4 – Suelo cemento al 5% .....71*

### **CAPÍTULO IV: DESARROLLO PRESUPUESTAL DE LAS PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO.....74**

4.1. PROCESO CONSTRUCTIVO .....74

4.1.1. *Estabilización con cemento (5%).....74*

4.1.2. *Estabilización del suelo con cal, 10% .....76*

4.2. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE PROPUESTA DE MEJORAMIENTO NO. 1 .....78

4.2.1. *Localización y replanteo topográfico para obras de infraestructura vial .....79*

4.2.2. *Estabilización con suelo cemento.....80*

4.3. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE PROPUESTA DE MEJORAMIENTO NO. 2.....81

4.3.1. *Localización y replanteo topográfico para obras de infraestructura vial .....82*

4.3.2. <i>Estabilización de suelo con cal</i> .....	83
4.4. SÁBANA DE CANTIDADES .....	84
4.4.1. <i>Ítem 1.01 Localización y replanteo topográfico para obras de infraestructura vial</i> .....	84
4.4.2. <i>Ítem 1.02 Estabilización con suelo cemento/Estabilización de suelo con cal.</i> .....	85
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>86</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>88</b>

### Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Ubicación satelital de la vía a intervenir .....	25
<b>Figura 2</b> Definición del área de cobertura de la proyección CTM12 origen central.....	30
<b>Figura 3</b> Convenciones usadas en el plano .....	32
<b>Figura 4</b> Localización de la formación Areniscas de las Juntas Kiaj.....	34
<b>Figura 5</b> Localización de la formación Areniscas de las Juntas Kiaj.....	36
<b>Figura 6</b> Fotografías de sondeos realizados .....	37
<b>Figura 7</b> Equipo de PDC utilizado en campo.....	39
<b>Figura 8</b> Registro fotográfico - Ensayo de Límites de Atterberg .....	42
<b>Figura 9</b> Límite líquido .....	43
<b>Figura 10</b> Carta de plasticidad, sondeo 1.....	44
<b>Figura 11</b> Límite líquido, sondeo 2.....	46
<b>Figura 12</b> Carta de plasticidad, sondeo 2.....	47
<b>Figura 13</b> Curva de calibración .....	49

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> Valores para el falso este y falso norte CTM 12 .....	30
<b>Tabla 2</b> Parámetros de proyección.....	31
<b>Tabla 3</b> Códigos del levantamiento .....	31
<b>Tabla 4</b> Localización de la formación Areniscas de las Juntas Kiaj .....	36
<b>Tabla 5</b> Contenido de humedad, % .....	40
<b>Tabla 6</b> Resultados obtenidos para el límite líquido, sondeo 1 .....	42
<b>Tabla 7</b> Resultados obtenidos para el límite plástico, sondeo 1 .....	42
<b>Tabla 8</b> Resultados LL, LP, IP sondeo 1 .....	44
<b>Tabla 9</b> Resultados obtenidos para límite líquido, sondeo 2.....	45
<b>Tabla 10</b> Resultados obtenidos para límite plástico, sondeo 2 .....	45
<b>Tabla 11</b> Calibración de matraz.....	48
<b>Tabla 13.</b> Resultados de material que pasa por el tamiz No. 200.....	50
<b>Tabla 14.</b> Resultados sondeo 1.....	51
<b>Tabla 15.</b> Resultados sondeo 2.....	52
<b>Tabla 16.</b> Resultados SONDEO 3 .....	53
<b>Tabla 17.</b> Resultados SONDEO 1 .....	56
<b>Tabla 18.</b> Resultados SONDEO 2.....	57
<b>Tabla 19.</b> Resultados SONDEO 3 .....	58
<b>Tabla 20.</b> Resultados propuesta No. 1 .....	62
<b>Tabla 21.</b> Resultados de compactación.....	63
<b>Tabla 22.</b> Resultados de penetración - CBR .....	63
<b>Tabla 23. Resultados propuesta No. 2</b> .....	65
<b>Tabla 24.</b> Resultados de compactación.....	66
<b>Tabla 25.</b> Resultados de penetración 10,25 y 56 golpes .....	67

Tabla 26 Resultados de ensayo de resistencia, suelo cemento 9%.....	70
Tabla 27 Resultados de ensayo de resistencia, suelo cemento 5%.....	72
Tabla 28 Sábana de cantidades propuesta de mejoramiento N° 1 .....	84
Tabla 29 Sábana de cantidades propuesta de mejoramiento N° 2 .....	84
Tabla 30 Cantidades .....	85

## Resumen

El presente estudio evalúa dos alternativas para el mejoramiento estructural de la vía terciaria que conecta la vereda Llano Grande con el casco urbano de Guateque, Boyacá, con el fin de optimizar su capacidad portante y garantizar su durabilidad. La investigación se desarrolló en tres fases: levantamiento topográfico, caracterización geotécnica del suelo y análisis técnico-económico de las propuestas. Los resultados de los ensayos de laboratorio (contenido de humedad, límites de Atterberg, granulometría y CBR) evidenciaron suelos con alto contenido de finos y plasticidad media, susceptibles a deformaciones y pérdida de resistencia en condiciones de humedad. Se plantearon dos alternativas: estabilización con suelo-cemento al 5% y estabilización con cal al 10%. El análisis comparativo determinó que la estabilización con suelo-cemento ofrece un mejor desempeño estructural y una relación costo-beneficio más favorable, considerando la durabilidad y menores costos de mantenimiento. Se recomienda implementar esta solución junto con un adecuado sistema de drenaje y un plan de mantenimiento preventivo, buscando mejorar la conectividad rural, reducir costos de transporte y fortalecer la productividad agrícola de la región.

**Palabras clave:** Vía terciaria, estabilización de suelos, suelo-cemento, cal, CBR, granulometría, plasticidad, Boyacá, Guateque, mejoramiento vial.

### **Abstract**

This study evaluates two alternatives for the structural improvement of the tertiary road connecting the Llano Grande village with the urban center of Guateque, Boyacá, aiming to enhance its bearing capacity and ensure long-term durability. The research was carried out in three phases: topographic survey, geotechnical characterization of the soil, and a technical-economic analysis of the proposed alternatives. Laboratory tests (moisture content, Atterberg limits, grain size distribution, and CBR) revealed soils with a high fines content and medium plasticity, susceptible to deformations and loss of strength under wet conditions. Two alternatives were proposed: stabilization with 5% soil-cement and stabilization with 10% lime. The comparative analysis determined that soil-cement stabilization provides better structural performance and a more favorable cost-benefit ratio, considering durability and lower maintenance costs. It is recommended to implement this solution alongside an adequate drainage system and a preventive maintenance plan, aiming to improve rural connectivity, reduce transportation costs, and strengthen the region's agricultural productivity.

**Keywords:** Tertiary road, soil stabilization, soil-cement, lime, CBR, grain size distribution, plasticity, Boyacá, Guateque, road improvement.

## Introducción

La inversión en infraestructura es fundamental para el crecimiento económico, pero su impacto es complejo y requiere una planificación estratégica y una regulación efectiva por parte del Estado (Barbero, 2003). En este sentido, las vías de comunicación, especialmente las carreteras, desempeñan un papel crucial al conectar a las comunidades, facilitar el comercio y fomentar el crecimiento económico. Sin embargo, en muchas regiones, las deficiencias en la infraestructura vial limitan el potencial de desarrollo y generan desigualdades.

En Colombia, y más específicamente en la región de Guateque y la Provincia de Oriente, esta problemática se manifiesta de manera evidente. A pesar de los esfuerzos gubernamentales por impulsar el desarrollo rural, las comunidades de esta zona aún enfrentan desafíos significativos debido al estado de sus vías. La falta de mantenimiento y la inadecuada infraestructura vial impiden el acceso a mercados, servicios básicos y oportunidades de desarrollo, perpetuando ciclos de pobreza y limitando las posibilidades de crecimiento.

La presente investigación se centra en el análisis de la situación de la vía que conduce a la vereda Llano Grande, identificando las principales problemáticas y proponiendo soluciones técnicas para su mejoramiento. La metodología empleada para el desarrollo del presente proyecto consistirá en una revisión de documentos técnicos y de estudios de casos similares, se analizarán las diferentes alternativas para el mejoramiento de vías. Para lo anterior se tomarán factores como como la tipología de suelo, las condiciones climáticas y el tráfico vehicular.

Este trabajo busca aportar al conocimiento científico y técnico en el campo de la ingeniería civil, ofreciendo una propuesta de solución concreta y viable para un problema real. Además, se espera que los resultados de esta investigación sirvan como referencia para futuros proyectos de infraestructura vial en zonas rurales de Colombia.

### **Planteamiento del problema**

Los grandes desafíos nacionales, regionales y globales se reflejan en las principales teorías sobre desarrollo económico y social, las cuales establecen el contexto para el progreso humano (Reyes, 2009). En este contexto, las carreteras son esenciales para el desarrollo de las comunidades, debido a que facilitan el transporte de personas y bienes, permitiendo a los habitantes cubrir sus necesidades de movilidad y acceder a servicios básicos como trabajo, educación, alimentación y salud (Mendez, 2021).

Este estudio se llevará a cabo en el municipio de Guateque, donde el avance de la producción agrícola y la comercialización de los productos se ve limitado por el deficiente estado de la infraestructura vial. Esta condición genera una situación de vulnerabilidad para la población, obstaculizando el progreso y el desarrollo de las comunidades rurales, así como la mejora en su calidad de vida, lo que impacta negativamente en el crecimiento económico y social de la región. En este contexto, la movilización y la organización comunitaria se presentan como elementos fundamentales para impulsar la transformación del sector agrícola y construir un futuro más próspero para los campesinos de Guateque y de la Provincia de Oriente (Alcaldía Municipal de Guateque, 2015).

En este contexto, surge como el planteamiento del mejoramiento de la vía que conduce a la vereda Llano Grande, donde se concentran las mayores afectaciones. Esta propuesta, basada en la aplicación de conocimientos técnicos, busca mejorar las condiciones de movilidad de personas y carga de productos, así como la seguridad para el transporte de estos, contribuyendo así al bienestar de la comunidad y al desarrollo económico de la región.

### **Justificación**

De acuerdo con el plan de desarrollo municipal “Razones para confiar”, La comunidad ha solicitado enfáticamente la mejora de las vías, especialmente en las zonas rurales, donde el deterioro de la red terciaria dificulta el acceso a centros de salud, escuelas y mercados. Un estudio reciente reveló que el mal estado de las vías ha incrementado los costos de producción agrícola y ha limitado el desarrollo del turismo local. Para abordar esta problemática, se propone un plan de trabajo conjunto entre la municipalidad y las Juntas de Acción Comunal, que incluya la pavimentación de los tramos más críticos, la instalación de señalización adecuada y la creación de un fondo de mantenimiento vial.

El plan de desarrollo municipal revela una rica diversidad agrícola en Guateque. La producción se centra en cultivos tradicionales como maíz, frijol y yuca, pero también se destaca por la variedad de hortalizas, como tomate, arracacha, calabacín y pimentón, así como cultivos de mayor valor agregado como el café. Además, la actividad pecuaria es significativa, con una importante población de aves de corral y ganado bovino de doble propósito, lo que indica un potencial considerable para la producción de alimentos y la generación de ingresos.

Sin embargo, “La producción agrícola en los últimos años ha venido en un fuerte descenso” (Alcaldía municipal de Guateque, 2020), por lo cual se demuestra la urgente necesidad de modernizar la red vial terciaria en Guateque se erige como un pilar fundamental para impulsar el desarrollo socioeconómico de la región. La precaria condición de las vías, especialmente en zonas rurales como la vereda Llano Grande, representa un obstáculo significativo para el progreso agrícola y el bienestar de sus habitantes.

### **Antecedentes**

La ingeniería civil enfrenta diversos retos, especialmente relacionados con las características geotécnicas de los suelos, tanto a nivel nacional como internacional, ya que estos suelen presentar condiciones poco favorables para la construcción de carreteras que sean duraderas y eficientes. Ante esta problemática, se plantea la necesidad de mejorar las condiciones del suelo como una alternativa técnica viable.

Por lo tanto, se implementan tipos de mejoramiento dependiendo las condiciones de los suelos en vías terciarias, se han presentado diferentes investigaciones que han demostrado que se puede mejorar la capacidad portante y la resistencia del suelo, entre ellos cabe mencionar las siguientes investigaciones

Quintero, C. (2022), en su investigación titulada “Caracterización en el diseño de pavimentos utilizando como material sostenible agregados pétreos y RCD en vías terciarias”, realizada en la ciudad de Tunja, destaca que, a través de diversos procesos de clasificación de materiales, es posible emplear los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como una alternativa viable para el diseño de bases y subbases granulares en la construcción de vías terciarias. Según el autor, mediante ensayos de laboratorio se identificaron los residuos con propiedades físicas y mineralógicas más adecuadas, los cuales mantienen un comportamiento mecánico similar al de los materiales granulares tradicionales. Además, se resalta como resultado una reducción aproximada del 15% en los costos de ejecución.

Por su parte, Jeampier, J. J., Guevara Camus, L., & Choque Flores, L. (2023) analizaron en “Comparative study of the chemical additives Consolid 444 and Con-Aid for the improvement of the subgrade in clay soils” que por intermedio de la adición de productos químicos en este caso aditivos como

Colsolid 444 y Con-Aid, se logra mejorar las condiciones de los suelos proporcionando una capacidad de soporte en los suelos arcillosos, esta investigación fue realizada en la provincia de Bongará en Perú, por intermedio de diferentes ensayos de laboratorio se logró su objetivo de comparación obteniendo como resultado un incremento en el CBR de 5.49% a un 28.65% con Consolid 444 y un 24.34% con Con-Aid, estos valores fueron verificados mediante un los tiempos de curado a los 7, 14 y 28 días generando como resultados el aumento de California Bearing Ratio.

Cabe considerar por otra parte, Ospina-García, M. Á., Chaves-Pabón, S. B., & Jiménez-Sicachá, L. M. (2020). Realizaron un aporte significativo en su investigación titulada "Improvement of clayey subgrades through the addition of steel waste" donde se evaluaron el comportamiento de un suelo arcilloso al ser mezclado con escoria de acería, lo cual permitió mediante ensayos de laboratorio que se presenta como una alternativa de mejoramiento de la subrasante para la construcciones viales, donde la escoria de acería reduce considerablemente la principal característica de estos suelos que es la plasticidad y aumenta el valor del CBR en un 378.92%, lo cual hace que esta metodología sea de gran interés para los procesos constructivos viales.

Por otra parte, Del Castillo, R. D., & Orobio, A. (2020). Demostraron que la implementación de Aceite de Motor Usado en suelos finos ejecutado en la ciudad de Cali mediante la "Investigación exploratoria sobre el efecto del aceite de motor usado en un suelo fino de subrasante", se realizó la clasificación de los aceites que permitieran un mejor comportamiento del suelo y reduciendo así el impacto ambiental producido por el manejo de estos aceites, se obtienen resultado del mejoramiento y disminución de los límites líquidos y plásticos, como también el aumento de la densidad seca máxima, la disminución de la humedad óptima y por lo cual se propone como una alternativa de mayor investigación para aplicación de uso ingenieril en la estabilización de suelos.

Finalmente, Barbarán, J. L. (2021). Realiza un aporte de manera internacional desde Perú, mediante su investigación titulada “Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba – departamento de San Martín” el cual logra identificar las problemáticas presentadas en los suelos arcillosos y propone mediante la utilización de ceniza de cascara de arroz obteniendo mediante ensayos de laboratorio de la muestra mezclada en diferentes porcentajes de un 5% hasta un 15% demostrando que la resistencia obtenida del CBR al 95%, aumento la resistencia del suelo y se proyecta una buen material estabilizante.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Evaluar dos alternativas para el mejoramiento estructural de la vía terciaria ubicada en la vereda Llano Grande del municipio de Guateque, Boyacá.

### **Objetivos Específicos**

Realizar un levantamiento topográfico detallado de la vía, incluyendo pendientes, curvas, tipo de suelo y estado actual del pavimento.

Analizar en detalle las dos opciones de mejoramiento propuestas, considerando aspectos técnicos y económicos.

Realizar un análisis económico detallado que permita comparar los costos de inversión y mantenimiento de cada una de las alternativas propuestas, así como los beneficios que generarán en términos de reducción de costos de transporte, aumento de la productividad agrícola y mejora en la calidad de vida de los habitantes de la vereda.

Elaborar un informe técnico que presente los resultados de la evaluación de las dos alternativas, incluyendo un análisis comparativo de sus ventajas y desventajas.

### **Marco Teórico**

La estabilización de subrasantes es una práctica fundamental en la ingeniería geotécnica que busca mejorar las propiedades mecánicas de los suelos de fundación, optimizando su desempeño bajo las cargas impuestas por las estructuras. Esta técnica se ha vuelto cada vez más relevante debido al aumento de la demanda de infraestructura y la necesidad de construir sobre suelos de baja calidad.

Los antecedentes consultados coinciden en señalar que la correcta definición de los parámetros del suelo es un paso fundamental en el proceso de estabilización. Estos parámetros influyen directamente en la selección del método de estabilización, la dosificación de los aditivos y la evaluación del desempeño a largo plazo de la obra. La heterogeneidad de los suelos, evidenciada en sus perfiles, es un factor fundamental que influye en su comportamiento geotécnico. En este estudio, el término 'suelo' se utiliza de manera amplia para abarcar cualquier material terroso, desde los más cohesivos hasta los más granulares (Badillo, 2007).

La estabilización del suelo en este proyecto se llevará a cabo en la subrasante, una capa esencial del pavimento que se encuentra directamente sobre el terreno natural. Es importante recordar que el pavimento es una estructura compuesta por múltiples capas, cada una con características y funciones específicas (Montejo, 2002). La estabilización de la subrasante no solo mejora sus propiedades mecánicas, sino que también influye en el comportamiento de las capas superiores, como la base y el recubrimiento, contribuyendo a un mejor desempeño general del pavimento y a una mayor durabilidad de la infraestructura (Bowles, 1996).

La subrasante es la capa de suelo natural o mejorada que se encuentra directamente debajo de una estructura y que soporta las cargas transmitidas por ella. Su comportamiento influye directamente en el desempeño de la obra, por lo que es fundamental evaluar sus características y, en caso de ser necesario, mejorarlas mediante técnicas de estabilización (Das, 2011).

La literatura científica, representada por trabajos como los de Cabana (2017), Terrones (2018), Huamani (2021) y Huatay et al. (2023), coincide en señalar que la caracterización física de los suelos, a través de la determinación de su textura, granulometría y clasificación, es un paso esencial para comprender su comportamiento y evaluar su aptitud para diferentes usos.

Arredondo Verdú (2011), menciona que históricamente, el suelo ha servido como soporte para vías de comunicación. Sin embargo, la creciente demanda de infraestructuras exige suelos con propiedades mecánicas cada vez más elevadas. Ante esta necesidad, se han desarrollado diversas técnicas de mejora del suelo:

### **Mecanismos de Estabilización**

La estabilización de suelos involucra una serie de procesos físicos y químicos que modifican las propiedades del suelo. Los mecanismos principales incluyen:

- **Cementación:** Es un proceso geológico y geotécnico mediante el cual los granos minerales de un suelo se unen o cementan entre sí, formando una masa más cohesiva y resistente. Este proceso puede ocurrir de forma natural a lo largo de millones de años, o puede ser inducido artificialmente en ingeniería civil para mejorar las propiedades mecánicas de un suelo (Craig, 1997).
- **Floculación:** es un proceso físico-químico en el que pequeñas partículas suspendidas en un líquido se aglomeran para formar partículas más grandes, denominadas flóculos. Estos flóculos son lo suficientemente pesados para sedimentar o ser fácilmente separados del líquido mediante procesos como la filtración (Bowles, 1996).
- **Relleno de vacíos:** Los estabilizantes pueden llenar los poros del suelo, reduciendo su porosidad y aumentando su densidad.

### **Métodos de Estabilización**

Los métodos de estabilización se pueden clasificar en función del agente estabilizante utilizado:

**Estabilización mecánica:** Compactación, densificación y preconsolidación.

**Estabilización química:**

- **Cal:** Reacciona con las arcillas, formando compuestos más estables y aumentando el pH del suelo.
- **Cemento:** Forma una matriz cementante que une las partículas del suelo, mejorando su resistencia y durabilidad.
- **Mezclas cal-cemento:** Combinan las ventajas de ambos agentes.
- **Aditivos químicos:** Polímeros, resinas, silicatos, entre otros, que mejoran propiedades específicas del suelo.

**Estabilización térmica:** Calentamiento del suelo para modificar su estructura y propiedades.

**Estabilización con geotextiles:** Uso de geotextiles para reforzar el suelo y mejorar su drenaje.

### Diseño de la Estabilización

El diseño de una estabilización de subrasante implica:

- **Exploración y caracterización del suelo:** Se realizan ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, como la granulometría, límites de Atterberg, densidad, y resistencia.
- **Selección del método de estabilización:** Se elige el método más adecuado en función de las características del suelo, las cargas a soportar, y los costos.
- **Diseño de la mezcla:** Se determina la cantidad óptima de estabilizante y las condiciones de mezclado.
- **Control de calidad:** Se realizan ensayos de control durante la construcción para verificar que las mezclas cumplan con los requisitos de diseño.

### Factores que Influyen en la Elección del Método de Estabilización

La elección del método de estabilización depende de varios factores, entre ellos:

- **Tipo de suelo:** La naturaleza del suelo (arcilloso, arenoso, limoso) influye en la selección del estabilizante.
- **Condiciones climáticas:** La humedad, temperatura y precipitación pueden afectar el desempeño de los estabilizantes.
- **Cargas a soportar:** Las cargas a las que estará sometida la subrasante determinan la resistencia requerida.
- **Disponibilidad de materiales:** La disponibilidad y costo de los estabilizantes en la zona son factores importantes.
- **Consideraciones ambientales:** Se deben evaluar los impactos ambientales de los diferentes métodos y materiales.

### **Normativa y Especificaciones Técnicas**

La estabilización de subrasantes está regulada por diversas normas y especificaciones técnicas, como las emitidas por el American Society for Testing and Materials (ASTM), el Instituto Geotécnico de España (IGE), y para efectos de esta investigación, las especificaciones generales para la construcción de carreteras del INVIAS.

La estabilización de subrasantes es una técnica esencial para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos y garantizar la durabilidad y seguridad de las infraestructuras. La selección del método de estabilización adecuado requiere un análisis detallado de las características del suelo, las condiciones del proyecto y los factores ambientales. El uso de herramientas numéricas y el cumplimiento de las normas técnicas son fundamentales para asegurar el éxito de estas obras.

## Metodología

La metodología implementada para la siguiente investigación se compone de una serie de pasos sistemáticos que permiten evaluar las condiciones actuales del suelo en la vereda Llano Grande del municipio de Guateque, Boyacá; identificar las técnicas de mejoramiento adecuadas y determinar la efectividad de las medidas implementadas.

Por lo tanto, se proponen las siguientes fases:

### 1. Fase 1. Estudio preliminar en campo

#### 1.1.1.1. Inspección y levantamiento topográfico del tramo

Se realizará la respectiva visita de campo para obtener una evaluación inicial, análisis de la ubicación y condiciones de la vía, el estado actual de terreno identificando:

- Condiciones del terreno actuales
- Análisis de tipo de tráfico usual de la vía
- Necesidades locales específicas de los pobladores
- Toma de muestras del suelo mediante sondeos
- Levantamiento topográfico: Toma de información topográfica con el apoyo de receptores GNSS, donde se buscarán puntos geolocalizados y/o información satelital para plasmar el estado actual del terreno a evaluar y el procesamiento de información obtenida en campo, con el levantamiento realizado por medio de receptores GNSS se realiza el procesamiento de datos, donde se procesa la información con el software Civil 3D, para materializar inicialmente las curvas de nivel.

### 2. Fase 2. Propuesta de Mejoramiento

#### 1.2.2.1. Elaboración de ensayos de laboratorio para caracterización del terreno

Se realizarán los ensayos de terreno para caracterizar materiales encontrados actualmente en la vía, y de tal manera determinar cuál es el tratamiento que se utilizará en el mejoramiento de estos, asegurando que cumplan con los requisitos de resistencia, durabilidad y comportamiento frente a cargas y condiciones ambientales. Los ensayos propuestos son:

- Granulometría INV E- 213
- Límite Líquido INV E -125
- Límite Plástico INV E-126
- California Bearing Ratio (CBR) INV E-148

#### *1.3.2.2 Selección de Materiales para mejoramiento y estabilización*

De acuerdo con las características técnicas encontradas en cada punto crítico se plantean las especificaciones adecuadas para el respectivo mejoramiento.

### **3. Fase 3. Evaluación de Costos**

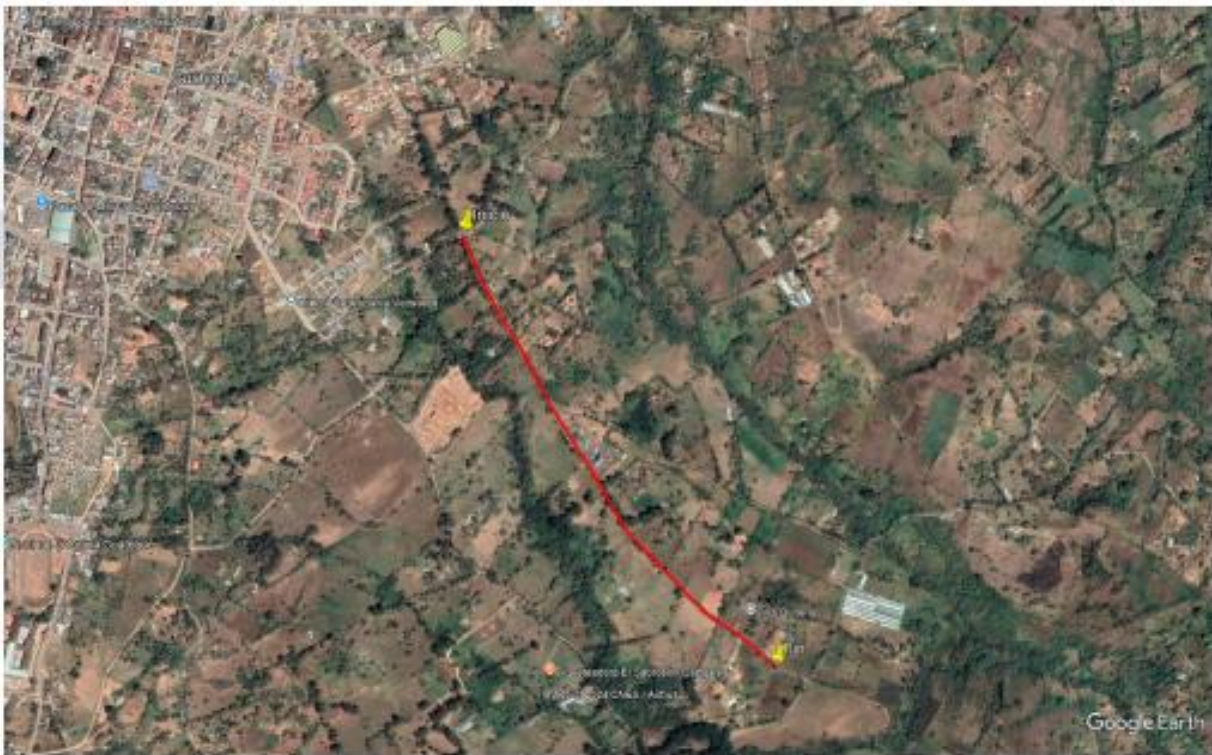
Se realizará la cuantificación de cantidades de las propuestas de acuerdo con el diseño y las especificaciones técnicas establecidas, llevando a cabo una evaluación integral del proyecto, que incluirá un costo detallado de todos los recursos necesarios y un análisis de los tiempos de ejecución. Los resultados obtenidos permitirán realizar ajustes y comparar los costos con los beneficios esperados, considerando la durabilidad y mejora de las condiciones de la vía.

## CAPÍTULO I: Estudio preliminar en campo

Se llevó a cabo un levantamiento topográfico detallado en la vereda Llano Grande, una zona rural del municipio de Guateque, Boyacá. Esta área se distingue por su geografía desafiante, marcada por terrenos montañosos y ondulados que presentan complejidades topográficas considerables para cualquier proyecto de ingeniería o planificación.

El estudio se centró específicamente en un tramo de vía terciaria, crucial para la conectividad local. Este segmento comenzó en las coordenadas geográficas Latitud:  $5^{\circ}0'14.90''N$  y Longitud:  $73^{\circ}28'3.63''O$ . El levantamiento se extendió por una distancia de 0.98 kilómetros, culminando en las coordenadas Latitud:  $4^{\circ}59'49.64''N$  y Longitud:  $73^{\circ}27'45.34''O$ . La información recopilada es fundamental para comprender las características del terreno y planificar futuras intervenciones en esta importante vía rural.

**Figura 1.** *Ubicación satelital de la vía a intervenir*



**Fuente:** Imagen adaptada de Google Earth.

En la figura 1, se detalla una vista satelital detallada que abarca tanto una porción del área urbana del municipio de Guateque, Boyacá, como su contraparte rural circundante. Dentro de esta representación, se destaca claramente una zona demarcada en color rojo, que corresponde a la vía específica seleccionada para la presente investigación. Es importante subrayar la relevancia estratégica de esta vía, ya que la visualización satelital permite inferir su vital conexión y facilidad de acceso con el casco urbano del municipio. Esta conectividad es un factor crucial que resalta la importancia de la investigación propuesta. Asimismo, la imagen incluye dos íconos amarillos, que actúan como marcadores visuales precisos. Estos iconos señalan, respectivamente, el punto de inicio y el punto final del tramo de la vía que será objeto de estudio, cuyas coordenadas geográficas exactas fueron especificadas previamente.

### **1.1. Metodología**

La radiación del terreno se llevó a cabo utilizando una estación total GTS 225, equipada con una tablet electrónica que decodificaba los datos de manera eficiente. Esta tecnología elimina la necesidad de realizar cálculos manuales de la excentricidad vertical y la reducción de distancias, optimizando así el proceso de recolección de datos. Las distancias inclinadas, medidas con el distanciómetro integrado, fueron corregidas por refracción, temperatura y altura sobre el nivel del mar, garantizando la precisión en los resultados obtenidos. La tablet cuenta con el programa FieldGenius, reconocido por su interfaz, permitiendo al operador ingresar los datos necesarios de forma sencilla y rápida. Este software minimiza los cálculos tediosos, facilitando la labor del topógrafo y aumentando la eficacia en la toma de datos y el diseño del plano topográfico. La implementación de esta tecnología no solo agiliza el proceso de radiación del terreno, sino que también asegura la precisión y la integridad de los datos recolectados, esenciales para la elaboración de planos topográficos detallados y precisos. La combinación de la estación total GTS

225 y el programa FieldGenius representa un avance significativo en las metodologías topográficas modernas, mejorando la eficiencia y la exactitud en el trabajo de campo.

El levantamiento topográfico del terreno se llevó a cabo siguiendo una serie de pasos meticulosamente planificados para garantizar la precisión y fiabilidad de los datos recopilados. A continuación, se describen las etapas principales del proceso:

#### *1.1.1. Planeación del Levantamiento Topográfico*

**Revisión de Información Previa:** Se realizó una revisión exhaustiva de los planos y mapas existentes del área de estudio. También se consideraron imágenes satelitales y datos geoespaciales disponibles.

**Determinación de Objetivos:** Se definieron claramente los objetivos del levantamiento, incluyendo la extensión del área a estudiar, la precisión requerida y los detalles específicos a capturar.

#### *1.1.2. Reconocimiento del Terreno*

**Visita Previa al Sitio:** Se realizó una visita al sitio para identificar puntos de control naturales y artificiales, así como posibles obstáculos que podrían afectar la precisión de las mediciones.

**Selección de Puntos de Control:** Se seleccionaron puntos de control estratégicos que fueron señalizados y georreferenciados para servir como referencias durante el levantamiento.

#### *1.1.3. Medición de Campo*

**Instrumentación:** Se utilizó una estación total, que permite medir distancias, ángulos horizontales y verticales con alta precisión.

#### 1.1.4. Toma de Datos

**Establecimiento de Puntos de Control:** Se instalaron y georreferenciaron puntos de control utilizando la estación total. Estos puntos sirvieron como referencia para todas las mediciones subsecuentes.

**Levantamiento Detallado:** Con la estación total, se midieron distancias y ángulos a diversos puntos del terreno, capturando coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) de cada punto de interés.

**Registro de Detalles Topográficos:** Se registraron características del terreno como cambios de pendiente, límites de propiedades, ubicaciones de estructuras existentes, cuerpos de agua, y cualquier otro elemento relevante.

#### 1.1.5. Procesamiento de Datos:

**Transferencia de Datos:** Los datos recopilados en campo fueron transferidos desde la estación total a un software de procesamiento topográfico.

**Corrección y Ajuste:** Se aplicaron correcciones necesarias para ajustar los datos y se realizaron ajustes de red para asegurar la coherencia y precisión de las mediciones.

**Generación de Modelos Digitales:** Se crearon modelos digitales de elevación (DEM) y planos topográficos a partir de los datos obtenidos.

#### 1.1.6. Análisis y Elaboración de Planos:

**Análisis Topográfico:** Se analizaron los datos para identificar características topográficas relevantes, como pendientes, alturas, y formas del terreno.

**Elaboración de Planos:** Se elaboraron planos topográficos detallados, incluyendo curvas de nivel, perfiles y secciones transversales del terreno.

## 1.2. Equipos utilizados

**Estación Total GTS 225:** tienen un rango de medición de distancia con alcance de 3.000m sobre un sólo prisma (GTS-225: 2.000m), manteniendo gran precisión  $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppmxD})$  emc. (GTS-229:  $\pm (3\text{mm} + 3\text{ppmxD})$  emc.). En cuanto al tiempo de medida de distancia, los datos se actualizan a gran velocidad, 1.2 segs en el modo fino de medida (0.7 segs en modo grueso y 0.4 segs en modo tracking).

**Prisma de Reflector:** Utilizado en conjunto con la estación total para medir distancias con alta precisión.

**Estaca y Baliza:** Para marcar y señalizar los puntos de control en el terreno.

**Software de Procesamiento:** AutoCAD Civil 3D y Leica Geo Office para la transferencia, procesamiento y análisis de datos topográficos.

## 1.3. Sistema de coordenadas

El sistema de coordenadas CTM12, se establece como un estándar de referencia espacial en Colombia para la representación bidimensional de la superficie terrestre (IGAC, 2021). Fundamentado en la proyección transversal de Mercator, este sistema transforma eficientemente las coordenadas geográficas, expresadas en términos de latitud y longitud, en coordenadas planas (X,Y). Este proceso de transformación simplifica los cálculos y análisis espaciales, vitales para diversas aplicaciones en ingeniería, cartografía y geodesia. El CTM12 utiliza el meridiano  $81^\circ$  Oeste como su eje central, lo que proporciona un punto de referencia clave para las conversiones geográficas. Además, incorpora un factor de escala específico diseñado para minimizar las distorsiones inherentes a cualquier proyección cartográfica. Esto garantiza una mayor precisión en la representación y el análisis de datos espaciales. La adopción del CTM12 en Colombia responde a la necesidad de un sistema uniforme y preciso que facilite la interoperabilidad y el intercambio de información geoespacial entre diferentes entidades y disciplinas. Al permitir una representación más exacta de la superficie terrestre, el CTM12 mejora la

planificación y ejecución de proyectos, optimiza el manejo de recursos y contribuye significativamente al desarrollo sostenible del país.

**Figura 2** Definición del área de cobertura de la proyección CTM12 origen central



Nota: La línea vertical central coincide con el meridiano promedio entre los puntos más occidental y más oriental de la parte continental. Las líneas laterales ubican a  $\pm 6^\circ$  y delimitan el área de aplicación. Fuente: Tomado de "Origen Nacional", por Instituto Geográfica Agustín Codazzi, 2021. (<https://origen.igac.gov.co/>)

Un punto dentro la zona de cobertura de la proyección CTM12 es representado mediante un par de coordenadas planas este y norte. Para evitar la utilización de coordenadas negativas y facilitar la distinción entre las coordenadas norte y este, al punto de origen de la proyección se asignan los siguientes valores.

**Tabla 1** Valores para el falso este y falso norte CTM 12

Parámetro	Valor
Falso Este	5 000 000 m
Falso Norte	2 000 000 m

Nota: Estos valores son cruciales para el establecimiento de un sistema de coordenadas plano y coherente, que permite localizar puntos de manera eficiente en la superficie terrestre. **Fuente:** Tomado de “Resolución No. 370 de 2021”, por Instituto Geográfica Agustín Codazzi, 2021.  
([https://redgeodesica.igac.gov.co/documentos/resolucion\\_370\\_de\\_2021.pdf](https://redgeodesica.igac.gov.co/documentos/resolucion_370_de_2021.pdf))

**Tabla 2** *Parámetros de proyección*

Parámetro	CTM12 (Origen Bogotá)	CTM12 (Origen Central)
Tipo de Proyección	Transversa de Mercator	
Elipsoide asociado	GRS80	
Meridiano central de referencia	74°04'39.0285" W	72°58'22" W
Latitud de origen	4°35'46.3215" N	
Unidades	Metros	
Falso este	5 000 000	
Falso norte	2 000 000	
Factor de escala del meridiano central	0.9992	

**Fuente:** Tomado de “Resolución No. 370 de 2021”, por Instituto Geográfica Agustín Codazzi, 2021.  
([https://redgeodesica.igac.gov.co/documentos/resolucion\\_370\\_de\\_2021.pdf](https://redgeodesica.igac.gov.co/documentos/resolucion_370_de_2021.pdf))

El sistema CTM 12, con sus coordenadas norte y este, es una herramienta fundamental para la gestión territorial en Colombia. Su precisión y adaptabilidad lo convierten en el sistema de referencia más utilizado en el país. Al comprender los principios básicos de este sistema, se pueden realizar análisis espaciales más precisos y tomar decisiones mejor informadas en diversos campos.

#### 1.4. Detalles del levantamiento

Para efectos del levantamiento de terreno se tomaron un total de 546 detalles, que corresponden a los códigos:

**Tabla 3** *Códigos del levantamiento*

DETALLE	CÓDIGO
Base	BS
Cuneta	CN
Terreno Natural	TN
Borde de vía	BV
Cerca	CR
Acceso	ACC

Poste eléctrico	PTE
Eje vial	EJE
Placa huella	BH
Caja	CJA

Nota: Asignar códigos a los puntos de un levantamiento topográfico es crucial porque permite organizar la información de campo, automatizar el dibujo de elementos en planos, facilitar el procesamiento de datos para modelos 3D y asegurar la coherencia en la representación de los elementos. Esto optimiza el trabajo en campo, reduce errores, mejora la comprensión del levantamiento para terceros y facilita la gestión a largo plazo de la información geoespacial, haciendo el proceso más eficiente y preciso. **Fuente:** Elaboración propia.

### 1.5. Convenciones

En la elaboración de los planos fue necesario la implementación de diferentes convenciones para representar de manera clara y comprensible diversos elementos y características del levantamiento pueda interpretar correctamente la información representada.

**Figura 3** Convenciones usadas en el plano

CONVENCIONES	
	Vía
	Cuneta
	Cerca
	Curva Maestra
	Curva Intermedia
	Placa Huella
	Caja

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO II: Propuesta de mejoramiento

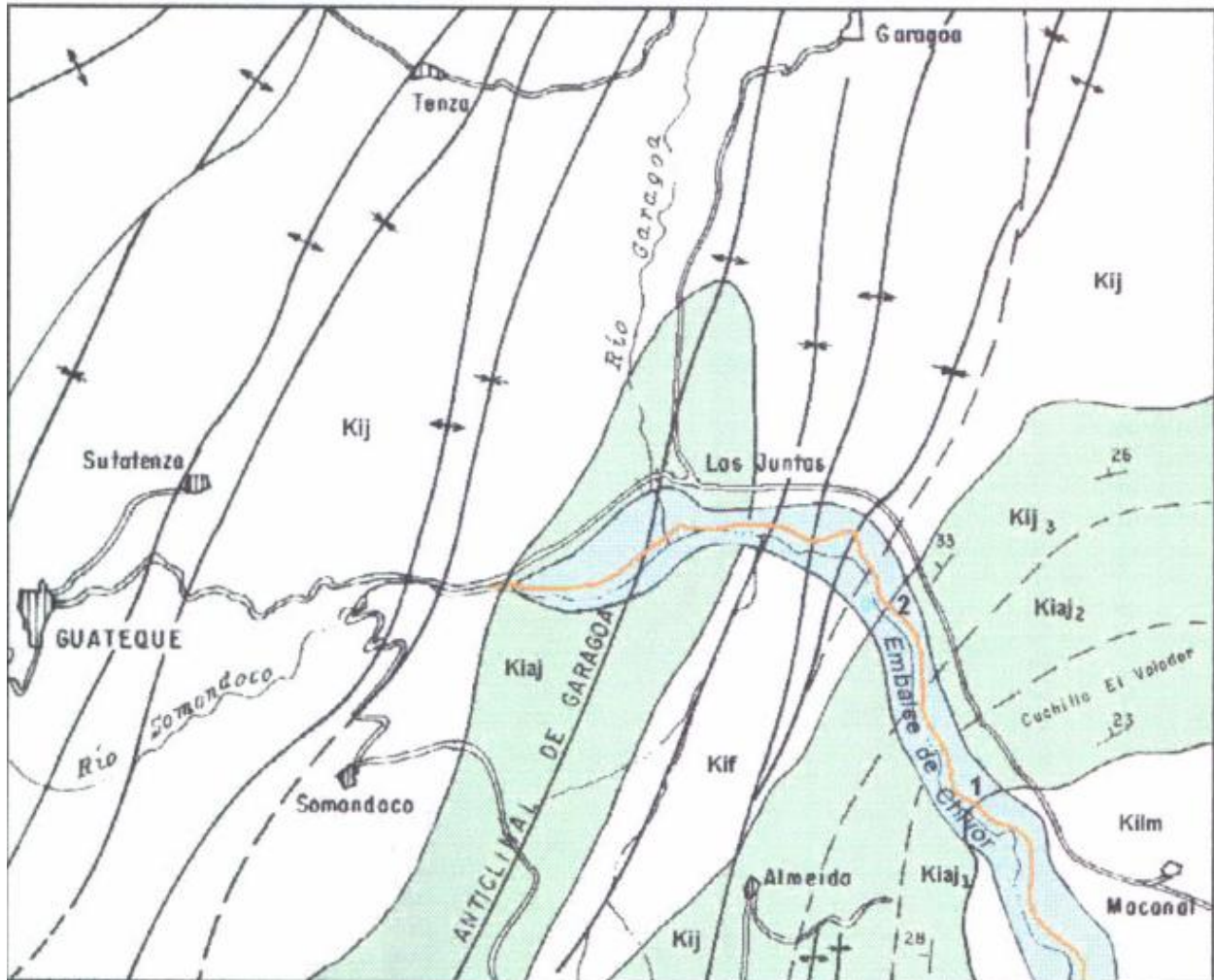
Los estudios geológicos constituyen un punto de partida fundamental para comprender las características del terreno en una zona determinada. Estos estudios permiten analizar tanto la composición del subsuelo, es decir, qué tipos de rocas y minerales lo conforman, como su estructura interna, incluyendo la presencia de fallas, plegamientos, tipos de rocas (sedimentarias, ígneas o metamórficas) y su distribución en profundidad.

Uno de sus propósitos esenciales es proporcionar información clave para la toma de decisiones en áreas como la ingeniería civil, la gestión de riesgos naturales, la planificación territorial y la explotación de recursos naturales.

### 2.1. Descripción Geológica General

La geología, es decir, el estudio de la Tierra y sus procesos es un factor crucial y determinante para el desarrollo de cualquier territorio. No es un elemento pasivo, sino una variable activa que puede influir de manera significativa ya sea positiva o negativamente, en las actividades socioeconómicas de una comunidad. Esto se debe a que la geología no solo define la disponibilidad de recursos naturales (como suelos fértiles, agua subterránea o minerales), sino que también introduce posibles amenazas geológicas.

La zona de estudio pertenece a la formación **Areniscas de las Juntas (Kiaj)**, que corresponde en la base a estratos de areniscas con algunas intercalaciones de lutitas; en la parte media lutitas y limolitas y en la parte superior areniscas con intercalación de lutitas y limolitas (Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas, 2010).

**Figura 4** Localización de la formación Areniscas de las Juntas Kiaj

Nota: Se presenta en la imagen un mapa geológico de la zona de estudio, donde se detallan cada una de las formaciones rocosas cercanas al municipio de Guateque. **Fuente:** INGEOMINAS, 2010.

### 2.1.1. Estratigrafía

La ubicación de Guateque al borde de la cordillera le confiere una geología compleja y diversa, con rocas de distintas edades y formaciones más recientes producto de la acción del agua, el hielo y la gravedad.

En la zona que abarca la Plancha 210-Guateque, la secuencia de capas de roca más antigua que se encuentra en la parte inferior de la columna estratigráfica está compuesta principalmente por arena y lodo. Estas rocas, que datan del Paleozoico superior pertenecen a una unidad geológica conocida como el Grupo Farallones. (Segovia & Renzoni, 1965), sobre la cual descansan inconformemente las unidades

basales del Cretácico inferior (Formación Batá o Santa Rosa y Chivor) en las cuales se registra los primeros avances del mar Cretácico sobre esta región (Ingeominas, 2010)

La región fue inundada por el mar hace millones de años, mientras la tierra se separaba en una cuenca de tipo "rift". Esto resultó en la acumulación de una gruesa secuencia de rocas sedimentarias, que incluye las formaciones Lutitas de Macanal, Las Juntas, Fómeque y la parte inferior de la Formación Une, sobre las unidades basales más antiguas. (Etayo, et al., 1969; Fabre, 1987; Etayo et al., 1997; Sarmiento 2001; Mora et al., 2006). La actividad de fallas y el hundimiento desigual de la tierra durante la formación de la cuenca provocaron que las capas de rocas sedimentarias resultantes tuvieran espesores variables y cambiaran de tipo lateralmente. (Guerra, 1972; Mora et al., 2006), hecho que según Ingeominas, 2010 "es evidente en las formaciones del piso Berriasiano (Batá y Santa Rosa), las cuales corresponden a unidades coetáneas y heterópicas. La Formación Chivor (estratigráficamente encima de la Formación Santa Rosa e importante por sus niveles de yeso) hace parte también de la fase de sedimentación sinrift".

### **2.1.2. Geomorfología**

La geomorfología tiene por objeto, la descripción de las formas del terreno, su génesis, evolución, naturaleza de los materiales, clasificación de los paisajes, morfología y la explicación y descripción de los procesos geomorfológicos modeladores (Strahler, A. N., Strahler, A. H., 1984).

La Plancha 210-Guateque abarca una compleja zona de transición entre montaña y piedemonte en la Cordillera Oriental, con un relieve variado que incluye valles pronunciados y algunas áreas más suaves. Presenta un rango altitudinal considerable y su hidrografía está dominada por ríos que alimentan la cuenca del Meta (Ingeominas, 2010).

## 2.2. Localización de la zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en la vereda Llano Grande del municipio de Guateque. En este tramo correspondiente, se plantean realizar dos sondeos, en los cuales se tomarán muestras para ensayos CBR, por el método PDC y ensayos de caracterización.

**Tabla 4** Localización de la formación Areniscas de las Juntas Kiaj

Nombre	Apique	Nomenclatura	Coordenada Norte	Coordenada Este
Vereda Llano Grande	1	PDC 1	2110465.4870m	4948458.7660m
	2	PDC 2	2110730.1350m	4948301.1930m

Nota: Se tomaron las coordenadas de los sondeos, en base a la topografía previamente realizada. **Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 5** Localización de la formación Areniscas de las Juntas Kiaj



Nota: La imagen presenta una vista satelital de la localización de los sondeos realizados en la vereda Llano Grande del municipio de Guateque, Boyacá. **Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 6** *Fotografías de sondeos realizados*

### 2.3. Investigación del subsuelo

Para determinar la composición del perfil del subsuelo presente en los sitios donde se plantea el estudio, se efectuaron dos ensayos de CBR por PDC, recolectando las muestras y empacadas en papel aluminio y vinipel para su posterior identificación y ejecución de ensayos en el laboratorio permitiendo establecer el tipo de material encontrado, su espesor y características macroscópicas, así como las

condiciones del agua subterránea de la capa de material del subsuelo atravesado. La exploración realizada en cada sitio se efectuó siguiendo los lineamientos establecidos en la normatividad INVIAS.

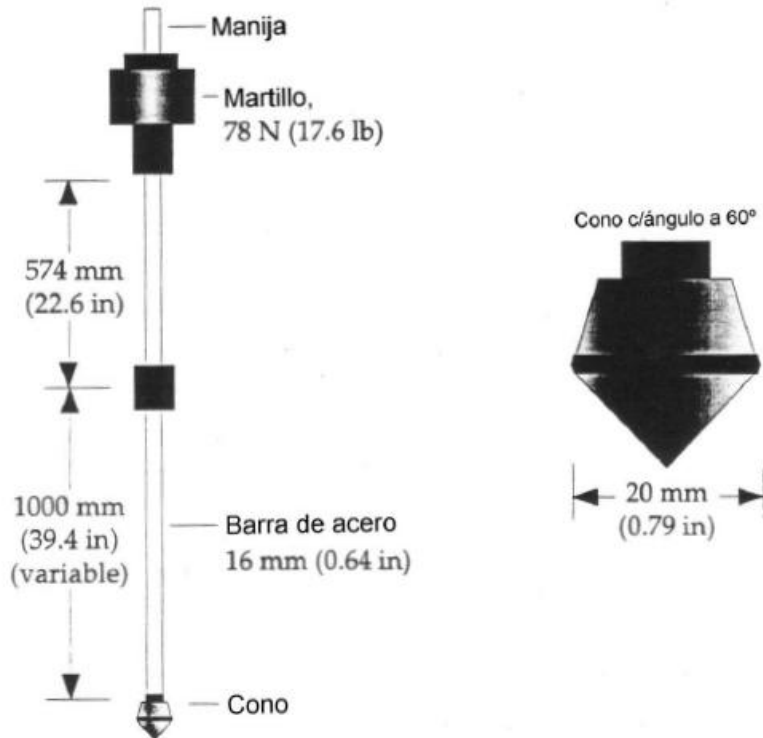
A la totalidad de las muestras colectadas, se les clasificó y referenció, de tal manera que se facilitara sobre las mismas la ejecución de un programa de ensayos de laboratorio, que permitiera conocer sus características geomecánicas para establecer mediante modelos las propiedades de esfuerzo y deformación del material. El programa de ensayo del laboratorio consta de los siguientes ensayos:

- Contenido de agua – Humedad natural (INV E-122)
- Límites de Atterberg (INV E-125 e INV E-126)
- Ensayo de gravedad específica (INV E-128)
- Ensayo pasa tamiz 200 (INV E-214)
- Ensayo CBR (INV E-172)

### *2.3.1. Descripción de los apiques y ensayos exploratorios*

#### **Penetración Dinámica de Cono (PDC)**

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia que tiene el suelo para definir el diseño de la estructura. Para iniciar la toma del ensayo, el operador sostiene el dispositivo a través de la manija, en una posición vertical o a plomo levanta y libera el martillo de manera que caiga a la altura especificada. El encargado de registrar la información mide y registra la penetración total para un determinado número de golpes o la penetración por cada golpe.

**Figura 7** Equipo de PDC utilizado en campo

Nota: En la figura 7 se presenta el equipo de penetración utilizado para la recolección de muestras necesarias para los ensayos a ejecutar. **Fuente:** Tomado de "Pavimentos- Todo lo que debes conocer sobre pavimentos", por Ingeniero Hugo, 2011. (<https://libro-pavimentos.blogspot.com/2011/05/ensayo-de-penetracion-dinamica-con-cono.html>)

## 2.4. Realización de ensayos

Según INVIAS (2011), los trabajos de campo deberán contener una descripción de la organización de los mismos, así como características principales. De lo anterior se destaca que la profundidad de los apiques y/o sondeos realizados, deberá ser como mínimo 1.50 m, teniendo en cuenta el análisis del estado actual de la vía. Debido a las condiciones topográficas, geológicas y las disposiciones del proyecto en el área de estudio, los apiques realizados se desarrollaron hasta máximo 1.50 m de profundidad.

### 2.4.1. Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado (INV E-122-13)

El presente ensayo se realiza llevando una muestra del material extraído a un horno a  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  y se seca hasta alcanzar una masa constante. Al obtener la diferencia entre la masa del material antes del

horno y después de secado, se considera que esa masa pérdida es el agua que tiene el material inicialmente (INVIAS, 2013).

Este parámetro es importante para la determinación de los índices más significativos del suelo, entre ellos, el nivel freático. Muchas de las estructuras que se deben realizar, conllevan un grado de dificultad más alto con la presencia de un contenido de humedad alto en el suelo. El contenido de agua se usa en gran parte de ecuaciones que relacionan las fases aire, agua y sólidos en un volumen determinado de material (INVIAS, 2013).

Para determinar el contenido de agua del material extraído en la vereda Llano Grande del municipio de Guateque, se siguieron las especificaciones dadas en la normativa INVIAS (véase la siguiente ecuación).

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c}$$

Donde:

- $w$ : Contenido de humedad.
- $W_1$ : Masa del recipiente con el espécimen húmedo, g
- $W_2$ : Masa del recipiente con el espécimen seco, g
- $W_c$ : Masa del recipiente con el espécimen seco, g

Como resultado del ensayo realizado, se presenta a continuación la siguiente tabla:

**Tabla 5** *Contenido de humedad, %*

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	W Cápsula (g)	W cáp + muestra húmeda (g)	W Cáp + Muestra seca (g)	Humedad (%)	Hum. Promedio (%)
1	1	1,5	47,6	1175,2	1009,9	17,18%	18,59%
	2	1,5	45,9	1476,2	1245,9	19,19%	
	3	1,5	58,1	1169	988,4	19,41%	
2	1	1,5	45,7	1020,5	869	18,40%	24,62%

	2	1,5	42,8	1441	1110,1	31,00%	
	3	1,5	56,7	1069	870,1	24,45%	
3	1	1,5	42,80	1168,70	1045,20	12,32%	14.77%
	2	1,5	45,90	1152,50	1010,30	14,74%	
	3	1,5	46,80	1251,69	1070,30	17,71%	

Nota: Se presentan los valores obtenidos en laboratorio para las muestras recogidas en los dos sondeos realizados. Se toma como referencia el valor promedio para la humedad del punto tomado. **Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.4.2. Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13) y Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (INV E-126-13)

Los Límites de Atterberg, establecidos por la normativa INVIAS (INV E-125-13 e INV E-126-13), son ensayos geotécnicos clave para caracterizar suelos finos, marcando las fronteras entre sus estados líquido, plástico y semisólido. El Límite Líquido (LL) es el contenido de humedad donde el suelo se comporta como un fluido, determinado con el dispositivo de Casagrande al observar el cierre de una ranura a 25 golpes. Por otro lado, el Límite Plástico (LP) es la humedad mínima en la que el suelo aún puede moldearse sin desmoronarse, identificado al enrollar el suelo hasta formar un cilindro de 3.2 mm que comienza a fracturarse (INVIAS, 2013).

A partir de estos dos valores, se calcula el Índice de Plasticidad (IP) mediante la siguiente ecuación:

$$IP = LL - LP$$

Este índice representa el rango de humedad en el que un suelo es plástico, sirviendo como un indicador crucial de su cohesión y la magnitud de los cambios de volumen que puede experimentar. Un IP alto sugiere un suelo muy plástico, mientras que un IP bajo o nulo (si  $LP \geq LL$ ) indica un suelo poco o no plástico. Estos límites son esenciales para la clasificación de suelos y el diseño de diversas obras de ingeniería civil, como cimentaciones y terraplenes.

**Figura 8** Registro fotográfico - Ensayo de Límites de Atterberg

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 6** Resultados obtenidos para el límite líquido, sondeo 1

LÍMITE LÍQUIDO			
Sondeo	1		
Ensayo	1	2	3
Número de golpes	13	24	32
W cápsula + suelo humedo (g)	44	44	46
W cápsula + suelo seco (g)	35	36	37
W cápsula	14	15	15
Contenido de agua %	44%	42%	40%

Nota: Se tomaron los datos respectivos, observados en laboratorio. Los cuales se les realizó el debido cálculo del porcentaje de humedad. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 7** Resultados obtenidos para el límite plástico, sondeo 1

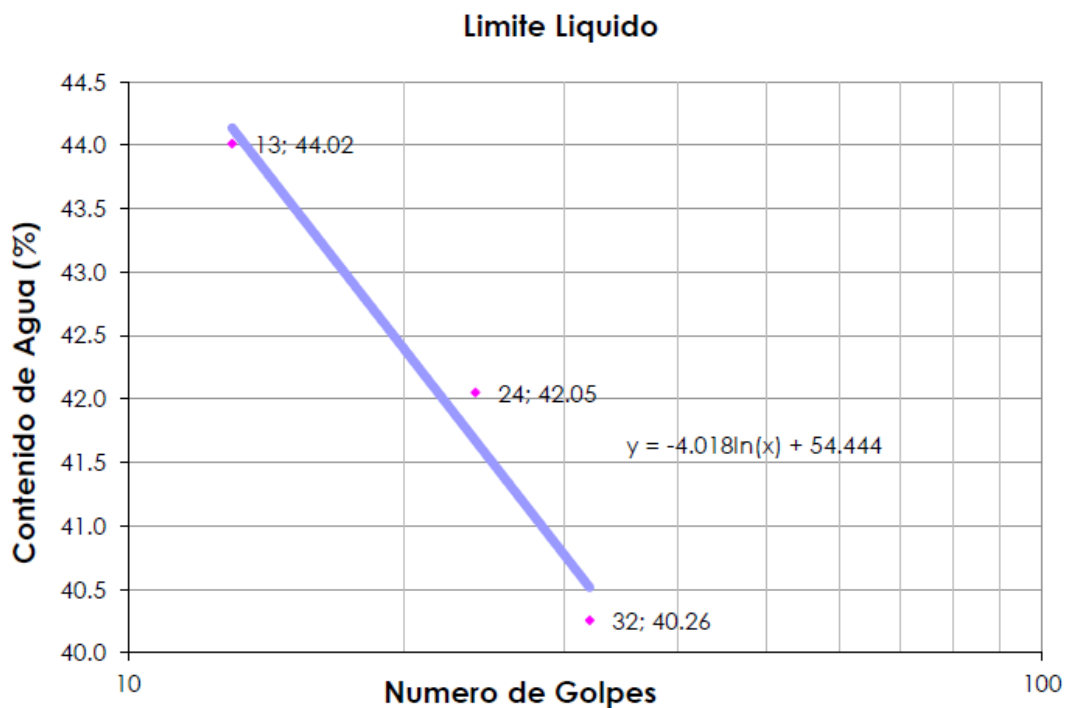
LÍMITE PLÁSTICO		
Sondeo 1	1	
Ensayo	1	2
W cápsula + suelo humedo (g)	26	27

W cápsula + suelo seco (g)	23	23
W cápsula	8	9
Contenido de agua %	23%	24%

siNota: Se realizó el respectivo procedimiento para la realización de los cilindros con espesor aproximado de 3 a 5 mm. Los datos de esta tabla son tomados en laboratorio y calculados respecto a la ecuación de humedad. **Fuente:** Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos y mostrados en las tablas 6 y 7, se realizan las siguientes gráficas, de las cuales se obtienen los resultados del límite líquido, plástico y el índice de plasticidad:

**Figura 9** Límite líquido



**Fuente:** Elaboración propia.

La figura 9 evidencia los resultados obtenidos, demostrando resultados consistentes ya que siguen una tendencia logarítmica al estar cerca de la línea de tendencia marcada en azul. No obstante, a partir de la obtención de la línea de tendencia, se determinará el límite líquido al ser interpolado en el golpe número 25, de acuerdo con la ecuación de la gráfica.

La interpolación para obtener el valor del límite líquido se realiza de la siguiente manera:

$$f(25) = -4.018 \ln(25) + 54.444$$

$$f(25) = LL = 41.51$$

A partir de lo anterior, se presentan los siguientes resultados para el sondeo 1:

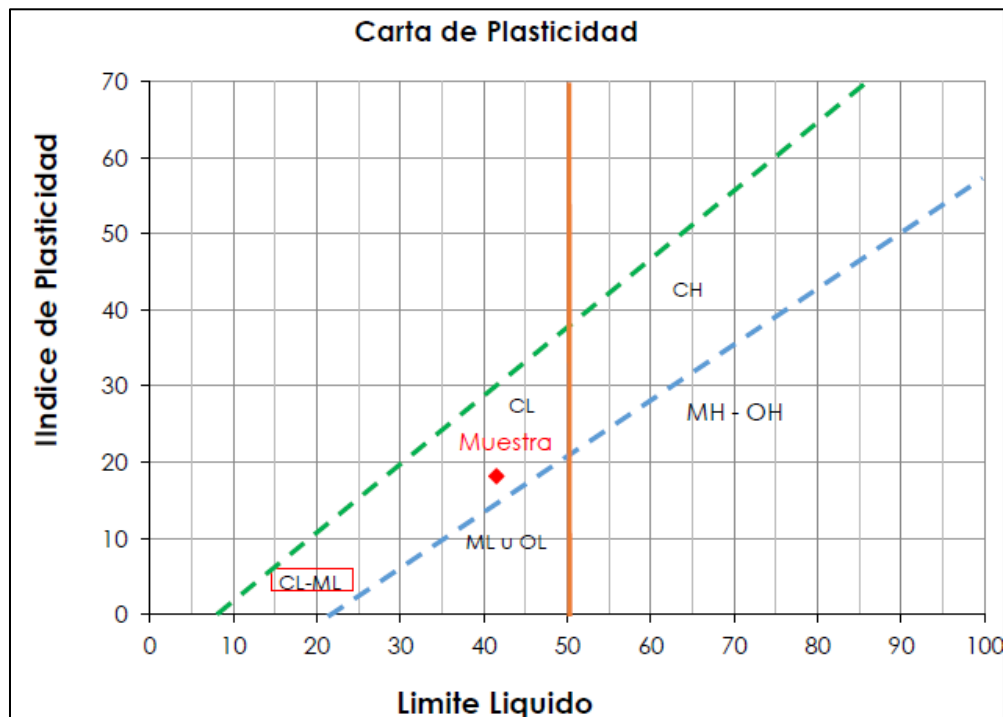
**Tabla 8** Resultados LL, LP, IP sondeo 1

VARIABLE	VALOR
Límite líquido	42
Límite plástico	23
Índice de plasticidad	18

Nota: El límite plástico se calculó con el promedio del contenido de agua para las dos muestras, las cuales se muestran en la tabla 7. Por otra parte, el índice de plasticidad es un valor que se obtiene a partir de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. **Fuente:** Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos anteriormente, se puede ubicar el valor del límite líquido en la carta de plasticidad y así, obtener el índice de liquidez, el comportamiento y la clasificación del suelo. A continuación, se muestra la gráfica de la carta de plasticidad:

**Figura 10** Carta de plasticidad, sondeo 1



Nota: La Figura 10 es la ubicación de la muestra obtenida en la carta de plasticidad, la cual sirve para clasificar el suelo dentro de la clasificación SUCS. **Fuente:** Elaboración propia.

La clasificación del suelo respecto a la carta de plasticidad es de una arcilla inorgánica de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas dobles, arcillas limosas; con un límite líquido menor a 50.

**Tabla 9** Resultados obtenidos para límite líquido, sondeo 2

LÍMITE LÍQUIDO			
Sondeo	2		
Ensayo	1	2	3
Número de golpes	12	22	32
W cápsula + suelo húmedo (g)	40	45	55
W cápsula + suelo seco (g)	33	38	46
W cápsula	12	15	15
Contenido de agua %	33%	31%	30%

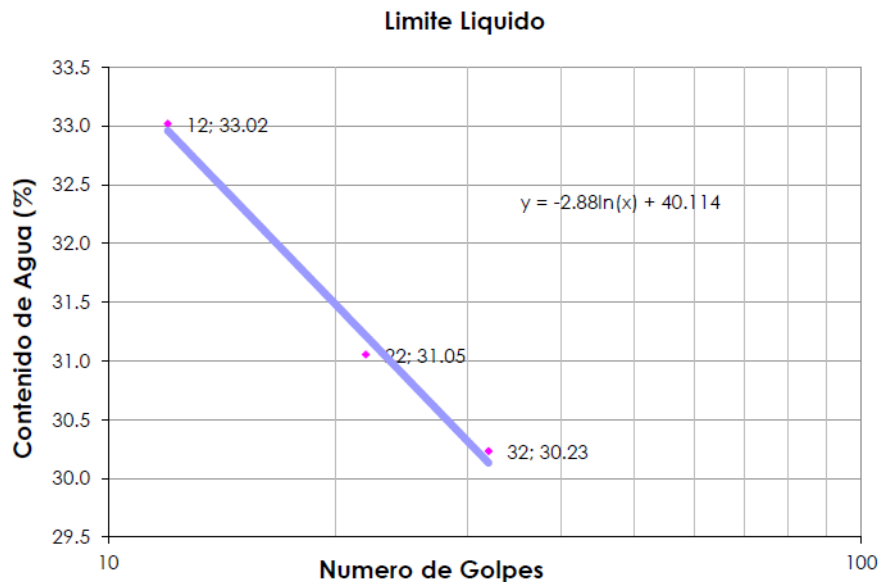
Nota: Se tomaron los datos respectivos, observados en laboratorio. Los cuales se les realizó el debido cálculo del porcentaje de humedad. **Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 10** Resultados obtenidos para límite plástico, sondeo 2

LÍMITE PLÁSTICO		
Sondeo 1	2	
Ensayo	1	2
W cápsula + suelo húmedo (g)	26	26
W cápsula + suelo seco (g)	23	23
W cápsula	8	8
Contenido de agua %	19%	20%

Nota: Se realizó el respectivo procedimiento para la realización de los cilindros con espesor aproximado de 3 a 5 mm. Los datos de esta tabla son tomados en laboratorio y calculados respecto a la ecuación de humedad. **Fuente:** Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos y mostrados en las tablas 9 y 10, se realizan las siguientes gráficas, de las cuales se obtienen los resultados del límite líquido, plástico y el índice de plasticidad:

**Figura 11** Límite líquido, sondeo 2

Nota: Se presentan los resultados obtenidos en la presente gráfica, en la cual se demuestran resultados consistentes teniendo en cuenta que siguen una tendencia logarítmica al estar cerca de la línea de tendencia marcada en azul. No obstante, a partir de la obtención de la línea de tendencia, se determinará el límite líquido al ser interpolado en el golpe número 25, de acuerdo a la ecuación de la gráfica. Fuente: Elaboración propia.

La interpolación para obtener el valor del límite líquido se realiza de la siguiente manera:

$$f(25) = -2.88 \ln(25) + 40.114$$

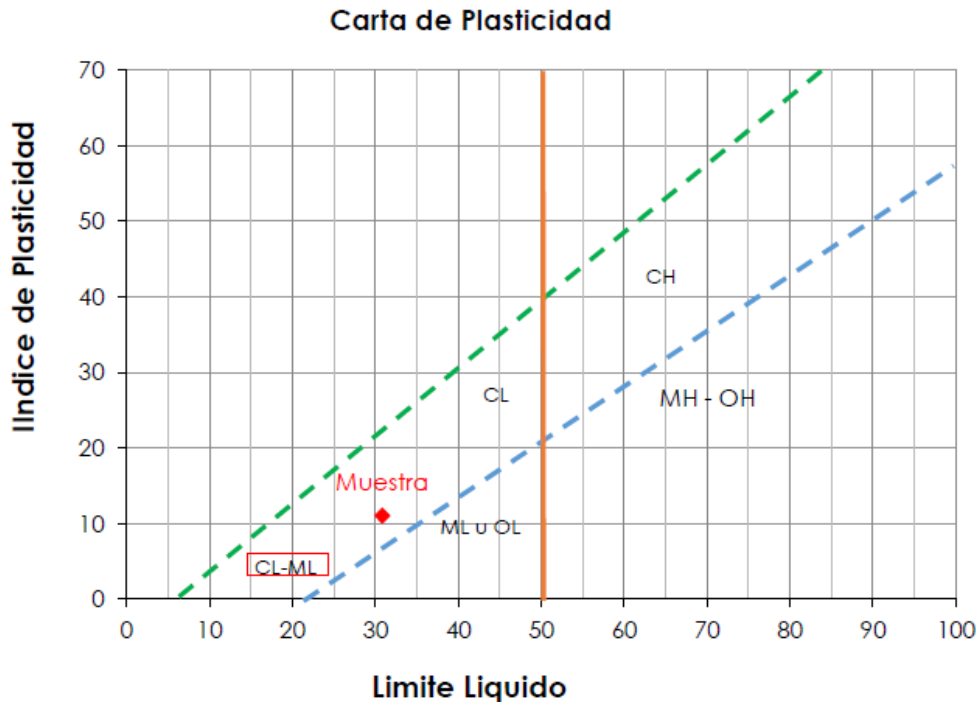
$$f(25) = LL = 30.84$$

A partir de lo anterior, se presentan los siguientes resultados para el sondeo 2:

VARIABLE	VALOR
Límite líquido	31
Límite plástico	20
Índice de plasticidad	11

Nota: El límite plástico se calculó con el promedio del contenido de agua para las dos muestras, las cuales se muestran en la tabla 10. Por otra parte, el índice de plasticidad es un valor que se obtiene a partir de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos anteriormente, se puede ubicar el valor del límite líquido en la carta de plasticidad y así, obtener el índice de liquidez, el comportamiento y la clasificación del suelo. A continuación, se muestra la gráfica de la carta de plasticidad:

**Figura 12** Carta de plasticidad, sondeo 2

Nota: La Figura 10 es la ubicación de la muestra obtenida en la carta de plasticidad, la cual sirve para clasificar el suelo dentro de la clasificación SUCS. Fuente: Elaboración propia.

La clasificación del suelo respecto a la carta de plasticidad es de una arcilla inorgánica de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas dobles, arcillas limosas; con un límite líquido menor a 50.

#### 2.4.3. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua (INV E-128-13)

La gravedad específica de los sólidos de un suelo (también conocida como peso específico relativo) es la relación entre el peso unitario de los sólidos del suelo y el peso unitario del agua a una temperatura específica, comúnmente a 4 °C, donde el agua tiene su densidad máxima. Matemáticamente, se expresa como:

$$G_s = \frac{\text{Peso unitario de los sólidos}}{\text{Peso unitario del agua}}$$

Esta propiedad es fundamental en la ingeniería geotécnica, ya que se utiliza para calcular otras propiedades volumétricas del suelo, como la porosidad y el grado de saturación (Das, B. M., 2010).

Tomando como referencia los procedimientos establecidos en la sección 100 del INVIAS, se realiza lo siguiente:

#### 2.4.4. Calibración del matraz

Se registró el peso del matraz lleno de agua destilada a diferentes temperaturas. Esto se utiliza para determinar el volumen exacto del matraz según la densidad del agua a cada temperatura. La relación está graficada en una curva de calibración (masa vs temperatura) con una ecuación de regresión:

**Tabla 11** Calibración de matraz

CALIBRACIÓN DEL MATRAZ	
Temperatura (°C)	W Matraz + Agua (g)
21,5	725,2
22,9	725
25,6	724,6
27,8	724,2
29,3	724
31,5	723,7

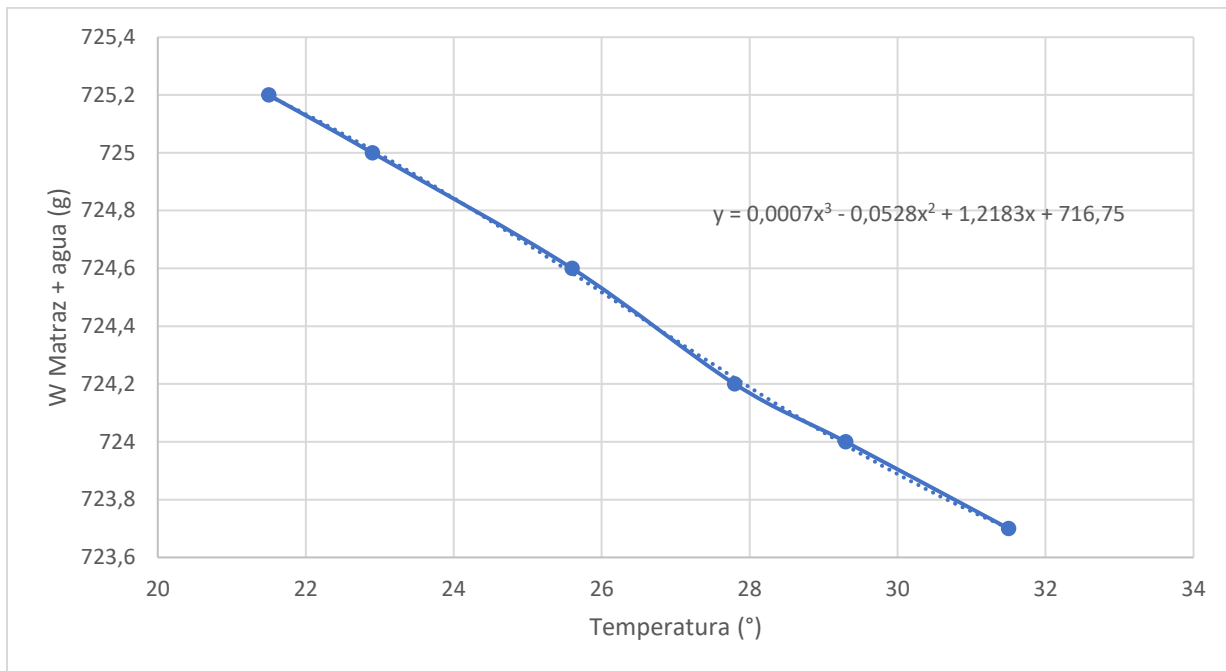
Nota: Se obtienen los valores de la masa del matraz + agua, con ayuda de la tabla 128-2 “Densidad de agua y coeficiente de corrección por temperatura” de la Sección 100 del INVIAS. En esta tabla se muestran los valores de densidad del agua en función de la temperatura a la que es expuesta. A partir de cálculos hechos, tomando como referencia que el matraz tiene un peso de 227.9 g y un volumen de 498.35 cm<sup>3</sup>, se realizan los diferentes despejes para la obtención de cada valor. **Fuente:** Elaboración propia.

Con base en los valores presentados en la Tabla 11, hemos generado una gráfica detallada para representar visualmente la relación entre las variables. Para capturar con precisión la dinámica de los datos, hemos aplicado una línea de tendencia polinomial de grado 3.

Esta elección de una función polinomial de tercer grado nos permite un ajuste flexible y preciso a la distribución de los puntos obtenidos. Esto significa que la curva no solo sigue la dirección general de los datos, sino que también es capaz de reflejar cambios y fluctuaciones más sutiles en la tendencia. Este

enfoque nos ayuda a identificar patrones y comportamientos subyacentes que podrían no ser evidentes con una línea de tendencia más simple.

**Figura 13** Curva de calibración



Nota: En la figura 13 se observan los puntos obtenidos en base a la tabla 11, con la respectiva línea de tendencia y la ecuación del gráfico. Esta gráfica y ecuación, permitirán a continuación, ajustar el valor del peso del matraz + agua, según la temperatura en la que se realizó el ensayo por medio de una interpolación. **Fuente:** Elaboración propia.

A partir de los datos obtenidos anteriormente, se procede a realizar el cálculo de la gravedad específica, teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_1 - W_2}$$

Donde:

- **W<sub>s</sub>**: Peso de la muestra seca
- **W<sub>1</sub>**: Peso del matraz con agua
- **W<sub>2</sub>**: Peso del matraz con agua + suelo

De esta manera, se obtienen los siguientes resultados para cada sondeo:

$$G_s(\text{Sondeo 1}) = \frac{48.6}{48.6 + 725.6 - 756.2} = 2.7$$

$$G_s(\text{Sondeo 2}) = \frac{48.9}{48.9 + 725.52 - 756.2} = 2.68$$

2.4.5. *Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz No 200 en los agregados pétreos mediante lavado (INV E – 214 – 13)*

La determinación del material que pasa el tamiz No 200 mediante lavado, se realiza para tener un control de calidad de los agregados pétreos utilizados, permitiendo identificar la presencia de partículas finas como arcillas y limos que pueden afectar negativamente la adherencia entre los agregados y el cemento o asfalto, disminuyendo la resistencia y durabilidad de las mezclas.

Teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la norma INV E – 214-13, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 12.** Resultados de material que pasa por el tamiz No. 200

VARIABLE	VALOR S1	VALOR S2	VALOR S3
W capsula (g)	74.90	46.70	44.50
W capsula + muestra sin lavar (g)	272.30	271.30	378.30
W capsula + muestra lavada (g)	135,80	150.10	57.70
W capsula + muestra retenida en el tamiz N°4	114.60	111.10	50.30
W de finos (g)	136.50	121.20	220.60
% Fino	69.15	53.96	94.35
% Arena	10.74	17.36	3.17
% Grava	20.11	28.67	2.48
Tipo de material	FINO	FINO	FINO

**Fuente:** Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se puede evidenciar que existe un alto contenido de finos en los sondeos realizados, especialmente en las muestras S1 y S3, cuyos porcentajes de material que pasa el tamiz No. 200 superan el 69% y 94%, respectivamente. Este alto contenido de finos indica una deficiente gradación del material, lo que puede afectar negativamente las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas donde se utilice, como concreto o mezclas asfálticas. Además, la baja proporción de grava y arena en dichas muestras refuerza la clasificación del material como predominantemente fino, lo cual puede comprometer la estabilidad estructural y aumentar la demanda de agua o aditivos en el diseño de mezclas.

#### 2.4.6. Determinación de los tamaños de las partículas de suelos (INV E – 123 – 13)

La determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas en una muestra de agregado, permite conocer cómo se distribuyen las partículas por tamaño y con base en esto, tomar decisiones técnicas sobre su uso. Se clasifica el material en gravas, arenas y finos según el porcentaje que pasa por cada tamiz.

Para realizar este procedimiento, se hace un tamizado manual sacudiendo el tamiz o tamices con un movimiento lateral y vertical, de forma que la muestra se mantenga en movimiento, alrededor de un minuto, para posteriormente determinar la masa de cada fracción retenida.

Teniendo en cuenta este procedimiento, se obtuvieron los siguientes resultados:

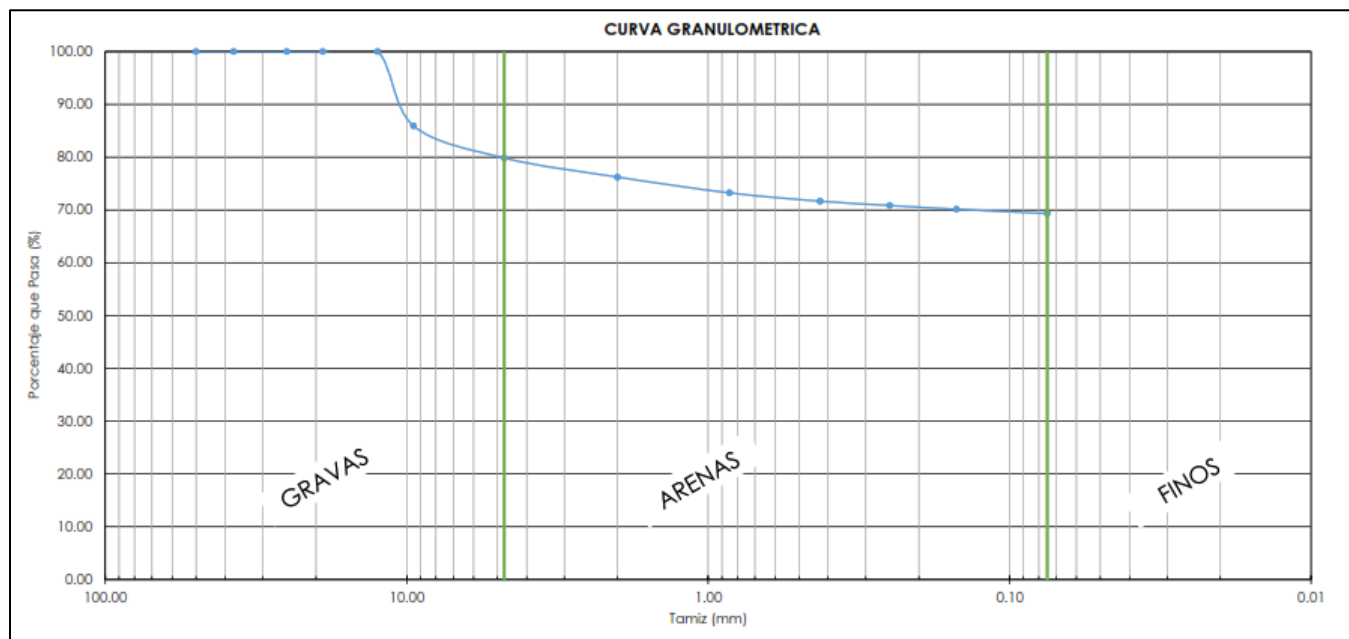
#### SONDEO 1

**Tabla 13.** Resultados sondeo 1

No. Tamiz	Tamiz (mm)	Masa retenida (g)	Retenido (%)	Pasante (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
2"	50,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,500	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1"	25,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	19,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,500	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	27,70	14,07	85,93	14,07	85,93
4	4,750	12,00	6,09	93,91	20,16	79,84
10	2,000	7,10	3,61	96,39	23,77	76,23
20	0,850	5,90	3,00	97,00	26,76	73,24
40	0,425	3,10	1,57	98,43	28,34	71,66
60	0,250	1,60	0,81	99,19	29,15	70,85
100	0,150	1,40	0,71	99,29	29,86	70,14
200	0,075	1,60	0,81	99,19	30,68	69,32
<b>FONDO</b>	0,000	136,50	69,32	30,68	100,00	0,00

**Fuente:** Elaboración propia

- Masa inicial (g): 197.4
- Masa final (g): 196.0
- Error (%): 0.25

**Figura 14.** Curva granulométrica SONDEO 1

**Fuente:** Elaboración propia

## SONDEO 2

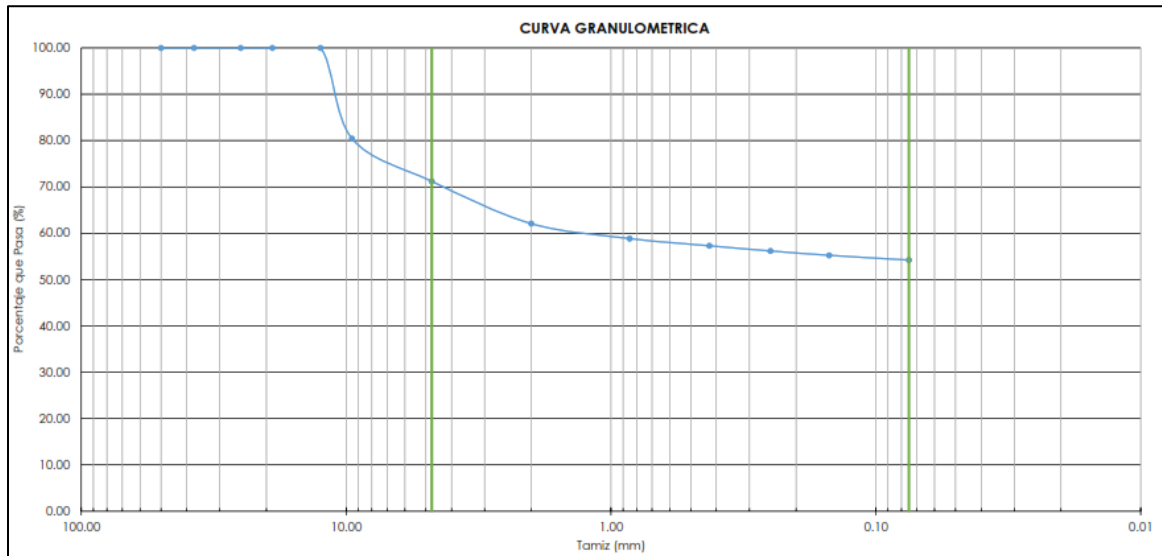
**Tabla 14.** Resultados sondeo 2

No. Tamiz	Tamiz (mm)	Masa retenida (g)	Retenido (%)	Pasante (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
2"	50,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,500	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1"	25,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	19,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,500	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	43.80	19.59	80,41	19,59	80,41
4	4,750	20.60	9.21	90,79	28,80	71,20
10	2,000	20.40	9.12	90,88	37,92	62,08
20	0,850	7.20	3.22	96,78	41,14	58,86
40	0,425	3.50	1.57	98,43	42,71	57,29
60	0,250	2.50	1.12	98,88	43,83	56,17
100	0,150	2.10	0.94	99,06	44,77	55,23
200	0,075	2.30	1.03	99,97	45,80	54,20
<b>FONDO</b>	0,000	121.20	54.20	45,80	100,00	0,00

**Fuente:** Elaboración propia

- Masa inicial (g): 224.6
- Masa final (g): 223.6
- Error (%): 0.45

**Figura 15.** Curva granulométrica SONDEO 2



Fuente: Elaboración propia

### SONDEO 3

**Tabla 15.** Resultados SONDEO 3

No. Tamiz	Tamiz (mm)	Masa retenida (g)	Retenido (%)	Pasante (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
2"	50,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,500	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1"	25,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	19,000	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,500	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	12,71	12,71	87,29	12,71	87,29
4	4,750	11,76	11,76	88,24	24,47	75,53
10	2,000	9,02	9,02	90,98	33,49	66,51
20	0,850	3,08	3,08	96,92	36,57	63,43
40	0,425	3,60	3,60	96,40	40,17	59,83
60	0,250	2,78	2,78	97,22	42,95	57,05
100	0,150	2,56	2,56	97,44	45,51	54,49
200	0,075	1,82	1,82	98,18	47,33	52,67
<b>FONDO</b>	0,000	52,67	52,67	47,33	100,00	0,00



Desde el punto de vista técnico, los suelos con estas características granulométricas no son aptos para servir como soporte directo de capas estructurales sin un tratamiento de mejoramiento. Su alto porcentaje de finos favorece la retención de agua, lo cual reduce la capacidad portante y aumenta el riesgo de deformaciones permanentes bajo cargas vehiculares. Esto concuerda con los resultados de los ensayos de límites de Atterberg, que también reflejaron índices de plasticidad significativos en los dos primeros sondeos, reforzando la necesidad de estabilización del suelo.

Por lo tanto, se concluye que es indispensable implementar medidas de mejoramiento de la subrasante, como la estabilización con materiales granulares adecuados o mediante aditivos químicos, para garantizar el desempeño estructural de la vía y prolongar su vida útil. Asimismo, estos resultados justifican la propuesta técnica de la investigación, que busca mitigar los problemas asociados a los suelos finos predominantes en la zona de estudio.

#### *2.4.7. Ensayo Penetrómetro Dinámico de Cono PDC (INV-E-172.13)*

El ensayo de penetrómetro dinámico de cono (PDC) es una prueba in situ utilizada para determinar la resistencia y consistencia de los suelos, principalmente en la subrasante de vías. Consiste en hincar un cono metálico estándar en el suelo mediante golpes de un martillo de peso y altura específicos. A medida que el cono penetra en el terreno, se registra el número de golpes requerido para alcanzar una profundidad determinada o la penetración obtenida por cada golpe. Se realiza con el fin de obtener un perfil de resistencia relativa del suelo, permitiendo estimar su capacidad portante y variabilidad estratigráfica. Datos importantes para el diseño y evaluación de la estructura del suelo.

Realizando el procedimiento descrito y siguiendo la norma INV – E – 172 – 13, se obtuvieron los siguientes resultados:

#### **SONDEO 1:**

##### **CARACTERISTICAS DEL EQUIPO:**

Peso del martillo (kg): 8 kg

**CARACTERISTICAS DEL TERRENO:**

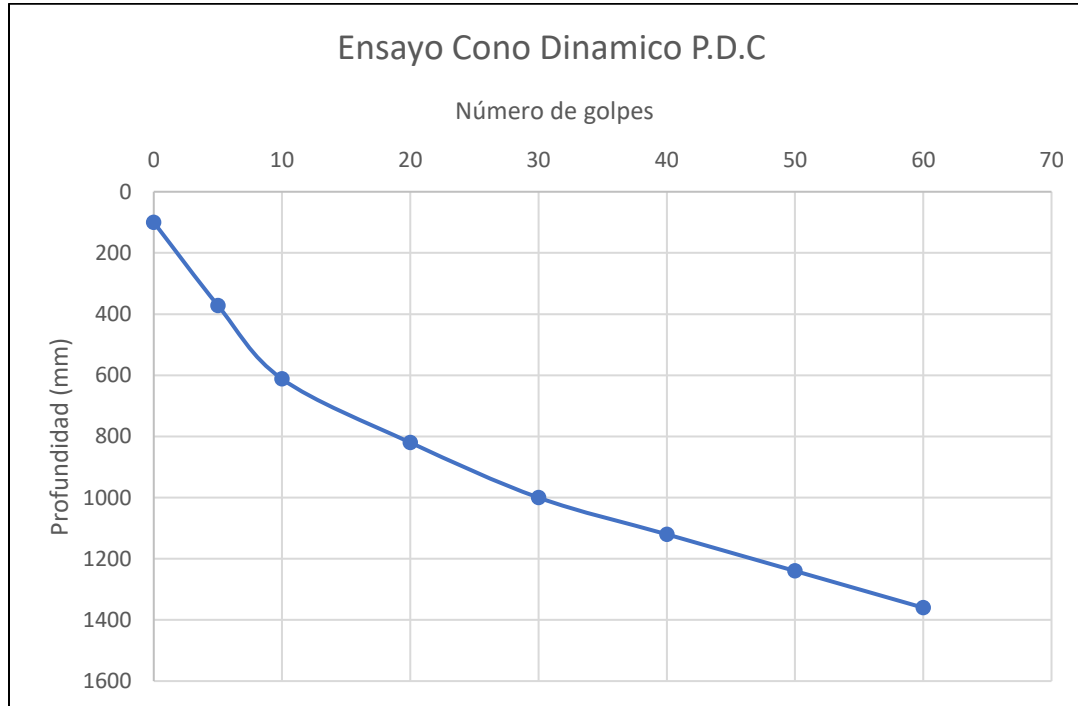
Humedad natural (%): 18.59

**Tabla 16.** Resultados SONDEO 1

Número de golpes	Número de golpes acumulado	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC mm/golpe	CBR %	CBR % RECOMENDADO
0	0	100	0	0		0		2.4
5	5	372	272	54	1	54	2.11	
5	10	612	240	48	1	48	2.51	
10	20	820	208	20.8	1	20.8	8.10	
10	30	1000	180	18	1	18	9.91	
10	40	1120	120	12	1	12	17.49	
10	50	1240	120	12	1	12	17.49	
10	60	1360	120	12	1	12	17.49	

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 17.** Curva ensayo cono dinámico PDC – Sondeo 1



**Fuente:** Elaboración propia

**SONDEO 2:**

**CARACTERISTICAS DEL EQUIPO:**

Peso del martillo (kg): 8 kg

**CARACTERISTICAS DEL TERRENO:**

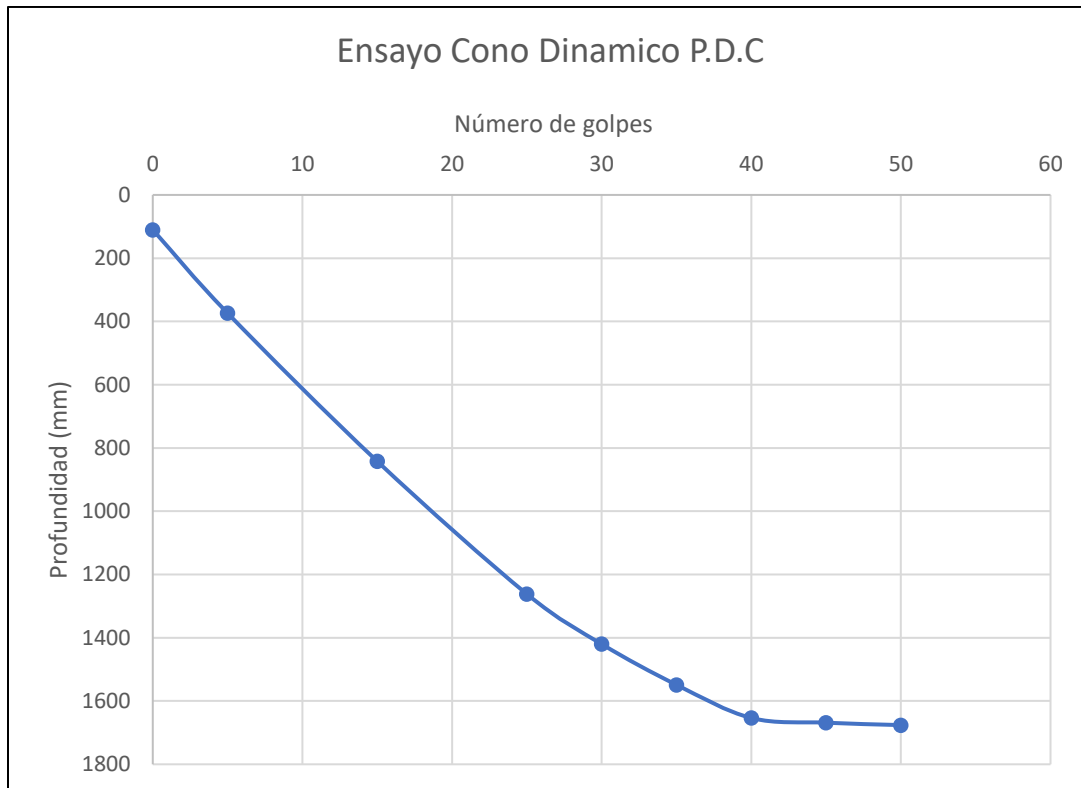
Humedad natural (%): 24.62

**Tabla 17.** Resultados SONDEO 2

Número de golpes	Número de golpes acumulados	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC mm/golpe	CBR %	CBR % RECOMENDADO
0	0	110	0	0		0		2.9
5	5	374	264	53	1	53	2.20	
10	15	842	468	47	1	47	2.60	
10	25	1262	420	42	1	42	3.03	
5	30	1420	158	32	1	32	4.50	
5	35	1549	129	26	1	26	6.00	
5	40	1654	105	21	1	21	8.00	
5	45	1669	15	3	1	3	121.79	
5	50	1676	8	2	2	3	121.79	

Fuente: Elaboración propia

**Figura 18.** Curva ensayo cono dinámico PDC – Sondeo 2



**Fuente:** Elaboración propia

### SONDEO 3:

#### CARACTERISTICAS DEL EQUIPO:

Peso del martillo (kg): 8 kg

#### CARACTERISTICAS DEL TERRENO:

Humedad natural (%): 14.77

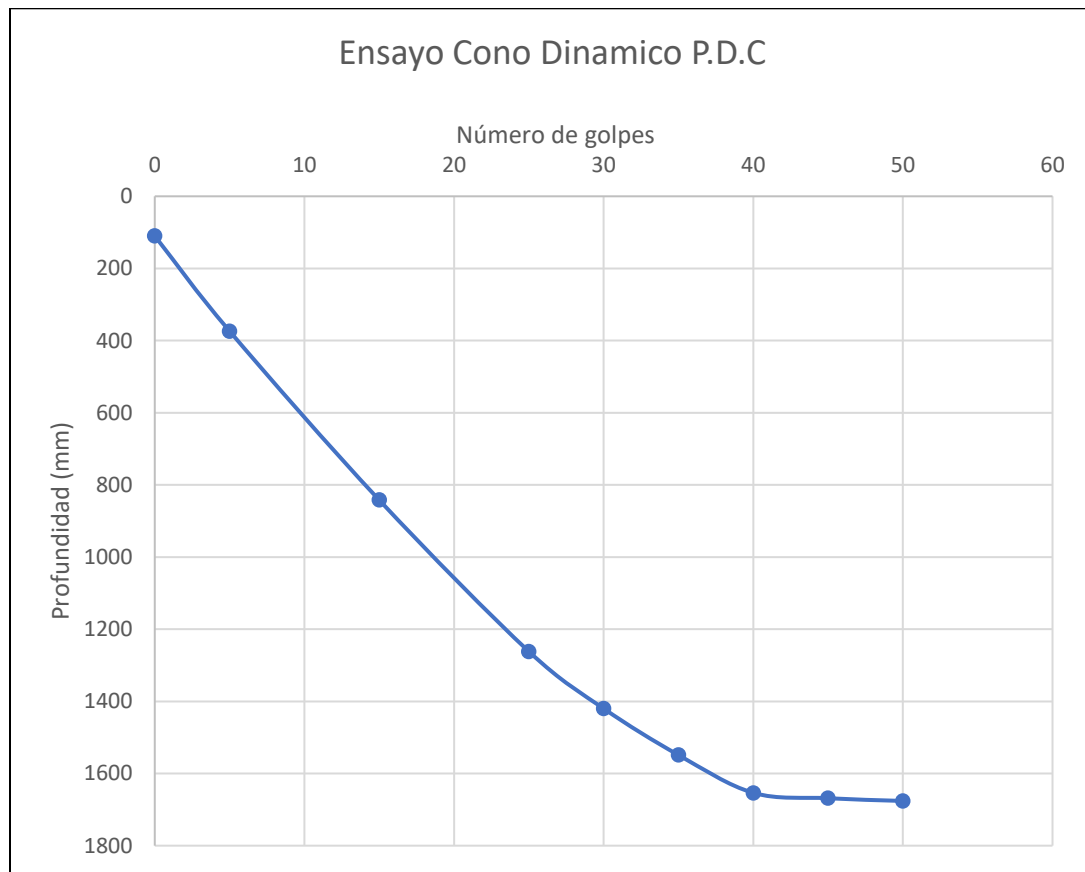
**Tabla 18.** Resultados SONDEO 3

Número de golpes	Número de golpes acumulados	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC mm/golpe	CB R %	CBR % RECOMENDADO
0	0	110	0	0		0		2.7
5	5	383	273	55	1	55	2.10	
5	10	623	241	48	1	48	2.50	
5	15	846	223	45	1	45	2.79	
10	25	1139	293	29	1	29	5.00	

10	35	1370	231	23	1	23	7.00
10	45	1527	157	16	1	16	12.00
10	55	1629	102	10	1	10	22.00
10	65	1660	31	3	2	6	45.00

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 19.** Curva ensayo cono dinámico PDC – Sondeo 3



**Fuente:** Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante el ensayo de penetrómetro dinámico de cono reflejan una capacidad portante baja en los suelos de la zona estudiada, presentando valores de CBR estimados de 2.4% para el Sondeo 1, 2.9% para el Sondeo 2 y 2.7% para el Sondeo 3. Estos valores son significativamente menores al umbral mínimo de CBR=5% que se considera aceptable para subrasantes de vías con tráfico bajo, según los criterios del Manual de Diseño de Pavimentos de INVIAS (2013).

Estos valores bajos de CBR implican que la subrasante presenta una capacidad estructural insuficiente para soportar directamente las cargas del tránsito. En este contexto, se hace indispensable implementar técnicas de mejoramiento ya que, de lo contrario, el desempeño funcional y estructural de la vía se verá comprometido, reduciendo significativamente su vida útil.

### **CAPÍTULO III: Análisis de propuestas de mejoramiento**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de laboratorios realizados a las muestras de suelo de la vía en la vereda Llano Grande, evidencian condiciones desfavorables para el soporte de la estructura del pavimento. Los ensayos granulométricos mostraron un alto contenido de finos, los límites de Atterberg reflejaron índices de plasticidad elevados y los valores de CBR determinados mediante penetrómetro dinámico de cono confirman una baja capacidad portante de la subrasante. Estos resultados, sumados al comportamiento plástico y la susceptibilidad a la humedad de los suelos analizados, hacen indispensable plantear propuestas de mejoramiento que garanticen la estabilidad y funcionalidad de la vía.

Por esta razón, a continuación, se realizará el análisis de diferentes propuestas de mejoramiento que permitan seleccionar la solución más adecuada y eficiente para las condiciones del terreno y necesidades del tramo de la vía que se está estudiando.

Entre las alternativas más efectivas y ampliamente utilizadas se encuentran la adición de cal y cemento, que permiten reducir la plasticidad, aumentar la resistencia al corte y mejorar la capacidad de soporte de los suelos finos (Little, 1995; Thompson, 1966). La estabilización con cal es especialmente efectiva en suelos arcillosos, donde provoca reacciones químicas de floculación, aglomeración y formación de cementantes a largo plazo (Sherwood, 1993). Por su parte, el uso de cemento contribuye a incrementar significativamente la resistencia y rigidez del suelo, mejorando su comportamiento bajo cargas cíclicas (Portland Cement Association, 2003).

Por lo tanto, se plantean diferentes propuestas de mejoramiento mediante la incorporación de distintos porcentajes de cal y cemento, con el objetivo de determinar la dosificación óptima que proporcione una subrasante estable, resistente y adecuada para soportar las cargas del tránsito proyectado, garantizando la durabilidad y funcionalidad de la vía.

### 3.1. Propuesta No. 1: Mezcla de Ceniza con 6% de CAL

A la muestra de suelo seleccionada de la vía Llano Grande se le realizó una mezcla de ceniza con 6% de CAL, obteniendo los siguientes resultados:

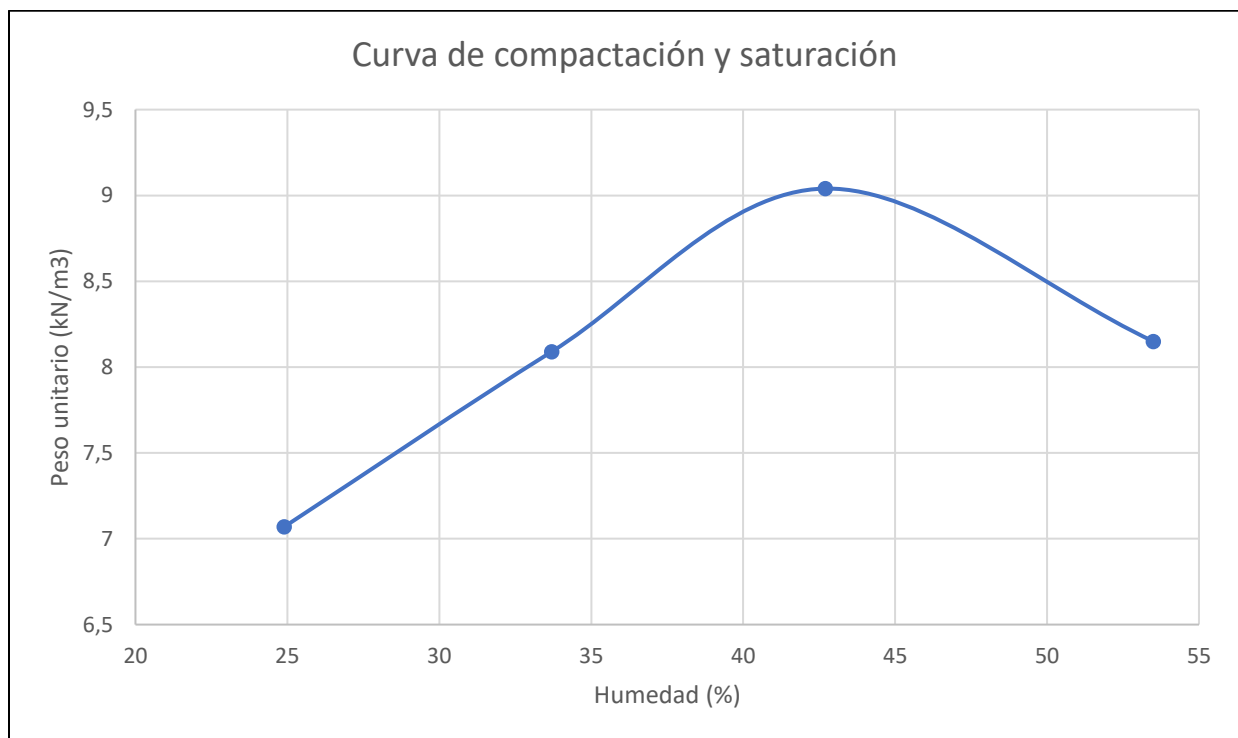
### 3.2. Relación humedad - Peso unitario seco

**Tabla 19.** Resultados propuesta No. 1

Descripción	Unidad	1	2	3	4
Masa molde + base + suelo compactado	g	4686	4876	5076	5038
Masa del molde + base	g	3838	3838	3838	3838
Masa húmeda compacta	g	848	1038	1238	1200
Humedad	%	24,9	33,7	42,7	53,5
Masa seca	g	679	777	868	782
Densidad humedad	kg/m <sup>3</sup>	901	1103	1316	1275
Densidad seca	kg/m <sup>3</sup>	721	825	922	831
Peso unitario seco	yd	7,07	8,09	9,04	8,15

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 20.** Curva de compactación y saturación



**Fuente:** Elaboración propia

- Densidad máxima de laboratorio (kg/m<sup>3</sup>): 931
- Peso unitario máximo de laboratorio (kN/m<sup>3</sup>): 9.13
- Humedad optima (%): 45.2

### 3.3. Relación de soporte del suelo CBR

Tabla 20. Resultados de compactación

COMPACTACIÓN 10 GOLPES		COMPACTACIÓN 25 GOLPES		COMPACTACIÓN 56 GOLPES	
Masa molde (g)	6848	Masa molde (g)	6862	Masa molde (g)	8526
Masa molde + muestra (g)	9380	Masa molde + muestra (g)	9484	Masa molde + muestra (g)	11261
Masa muestra húmeda (g)	2532	Masa muestra húmeda (g)	2622	Masa muestra húmeda (g)	2735
Volumen molde (cm <sup>3</sup> )	2008	Volumen molde (cm <sup>3</sup> )	2041.5	Volumen molde (cm <sup>3</sup> )	2059
Humedad de compactación (%)	42.7	Humedad de compactación (%)	42.7	Humedad de compactación (%)	42.7
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	884	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	900	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	931
Humedad después de compactación (%)	42.7	Humedad después de compactación (%)	42.7	Humedad después de compactación (%)	42.7
Humedad después de saturación (%)	66	Humedad después de saturación (%)	62	Humedad después de saturación (%)	52.2
Promedio de saturación (%)	50.5	Promedio de saturación (%)	49.1	Promedio de saturación (%)	45.9
Sobrecarga (kg)	4.54	Sobrecarga (kg)	4.54	Sobrecarga (kg)	4.54

Fuente: Elaboración propia

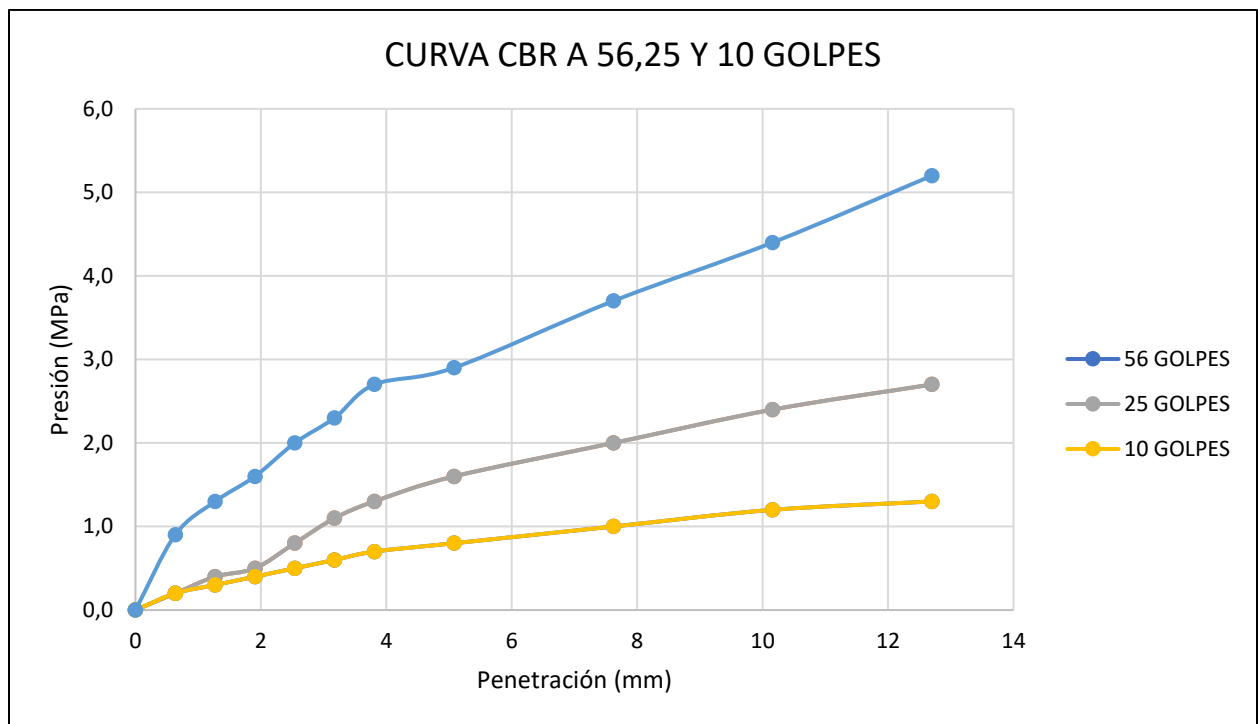
Tabla 21. Resultados de penetración - CBR

PENETRACIÓN 10 GOLPES			PENETRACIÓN 25 GOLPES			PENETRACIÓN 56 GOLPES		
Deformación (mm)	Lectura del equipo kN	Carga sobre la muestra MPa	Deformación (mm)	Lectura del equipo kN	Carga sobre la muestra MPa	Deformación (mm)	Lectura del equipo kN	Carga sobre la muestra MPa
0	0.000	0.0	0	0.000	0.0	0	0.000	0.0
0.635	0.407	0.2	0.635	0.500	0.2	0.635	1.775	0.9
1.27	0.650	0.3	1.27	0.760	0.4	1.27	2.563	1.3
1.905	0.861	0.4	1.905	1.110	0.5	1.905	3.332	1.6
2.54	1.044	0.5	2.54	1.658	0.8	2.54	4.060	2.0
3.175	1.225	0.6	3.175	2.190	1.1	3.175	4.759	2.3

3.81	1.390	0.7	3.81	2.585	1.3	3.81	5.433	2.7
5.08	1.532	0.8	5.08	3.252	1.6	5.08	6.001	2.9
7.62	2.090	1.0	7.62	4.081	2.0	7.62	7.491	3.7
10.16	2.440	1.2	10.16	4.887	2.4	10.16	9.000	4.4
12.7	2.706	1.3	12.7	5.574	2.7	12.7	10.504	5.2
<b>CBR a 2.54 mm (%)</b>		<b>7.43</b>	<b>CBR a 2.54 mm (%)</b>		<b>11.80</b>	<b>CBR a 2.54 mm (%)</b>		<b>28.91</b>
<b>CBR a 5.08 mm (%)</b>		<b>7.27</b>	<b>CBR a 5.08 mm (%)</b>		<b>15.44</b>	<b>CBR a 5.08 mm (%)</b>		<b>28.48</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Curva CBR a 56, 25 y 10 golpes



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta estos resultados, se puede evidenciar como con 10 golpes, el CBR es de (7.4%), indicando un suelo con pobre capacidad de soporte, apenas adecuado para caminos de bajo tránsito, pero mejorando significativamente el suelo que se tenía inicialmente. Con 25 golpes, el CBR aumenta significativamente (11.8-15.4%), mejorando la capacidad de soporte hasta un nivel considerado regular, aún insuficiente para vías con tránsito pesado y con 56 golpes, el CBR se eleva mucho (28.9-28.5%), lo que ya representa un material con capacidad de soporte buena para subrasante o subbase en vías rurales o de tránsito moderado, según la clasificación general de CBR (20-30% = buena capacidad).

Esto nos permite concluir que, el suelo mejorado con ceniza y 6% de cal muestra una alta dependencia de la energía de compactación para alcanzar resistencias aceptables. Con baja compactación (10 golpes) el comportamiento es insuficiente, mientras que al aumentar la energía (56 golpes) se obtiene un CBR casi 4 veces mayor, logrando un suelo apto para capas de subrasante reforzada. La reducción de humedad de saturación con mayor compactación es un indicador positivo de menor vulnerabilidad a la humedad, importante en suelos finos.

### 3.4. Propuesta No. 2: Mezcla de Ceniza con 10% de CAL

#### 3.4.1. Relación humedad - Peso unitario seco

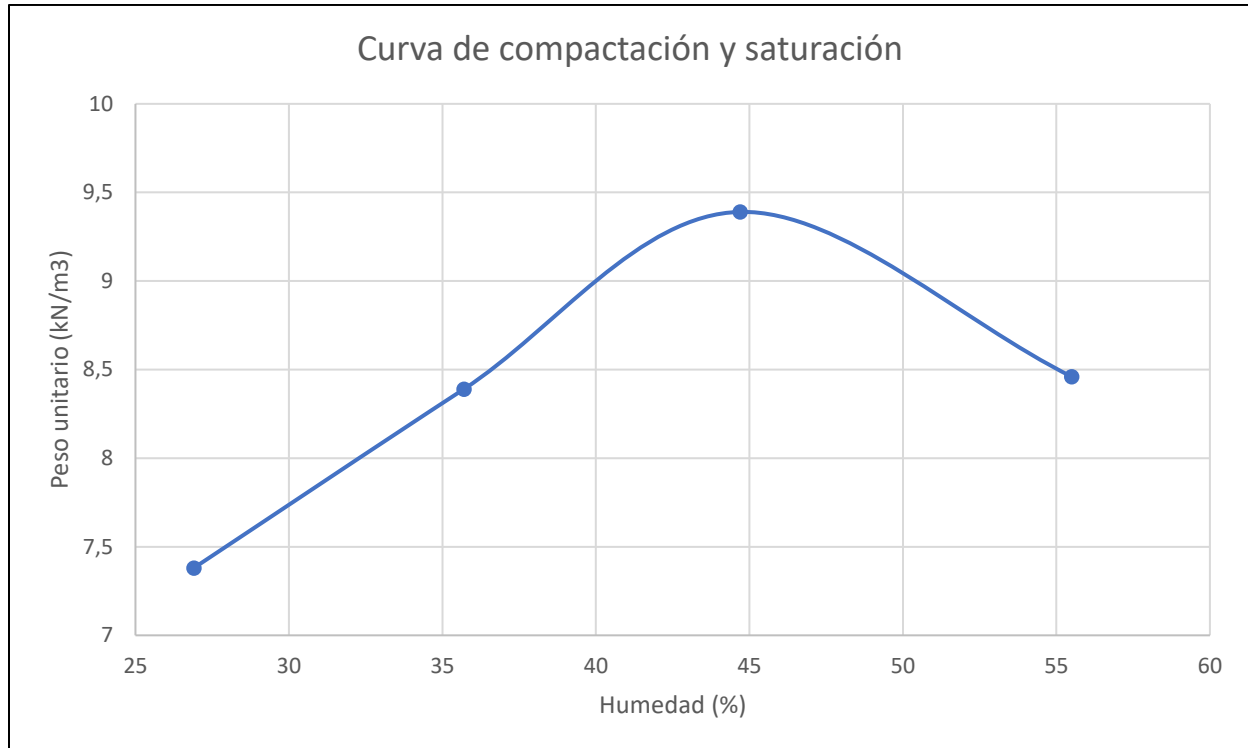
**Tabla 22. Resultados propuesta No. 2**

Descripción	Unidad	1	2	3	4
Humedad	%	26,9	35,7	44,7	55,5
Densidad seca	kg/m <sup>3</sup>	752	858	960	865
Peso unitario seco	γ <sub>d</sub>	7,38	8,39	9,39	8,46

**Fuente:** Elaboración propia

- Densidad máxima de laboratorio (kg/m<sup>3</sup>): 960
- Peso unitario máximo de laboratorio (kN/m<sup>3</sup>): 9.39
- Humedad optima (%): 44.7

**Figura 20.** Curva de compactación y saturación



**Fuente:** Elaboración propia

Estos resultados, nos permiten comparar con los resultados de la propuesta No. 1 con una mezcla de ceniza y cal al 6%, el aumento de esta al 10%, mejora la densificación del suelo, elevando tanto la densidad seca como el peso unitario, lo cual se traduce en un suelo más estable y resistente. La necesidad de mayor humedad óptima debe considerarse en obra para evitar errores en la cantidad de agua durante la compactación.

#### 3.4.2. Relación de soporte del suelo CBR

**Tabla 23.** Resultados de compactación

<b>COMPACTACIÓN 10 GOLPES</b>		<b>COMPACTACIÓN 25 GOLPES</b>		<b>COMPACTACIÓN 56 GOLPES</b>	
Masa molde (g)	6839	Masa molde (g)	6791	Masa molde (g)	8526
Masa molde + muestra (g)	9408	Masa molde + muestra (g)	9520	Masa molde + muestra (g)	11300
Masa muestra húmeda (g)	2560	Masa muestra húmeda (g)	2660	Masa muestra húmeda (g)	2780
Volumen molde (cm <sup>3</sup> )	2008	Volumen molde (cm <sup>3</sup> )	2041.5	Volumen molde (cm <sup>3</sup> )	2059

COMPACTACIÓN 10 GOLPES		COMPACTACIÓN 25 GOLPES		COMPACTACIÓN 56 GOLPES	
Humedad de compactación (%)	44.7	Humedad de compactación (%)	44.7	Humedad de compactación (%)	44.5
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	912	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	930	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	960
Humedad después de compactación (%)	44.7	Humedad después de compactación (%)	44.7	Humedad después de compactación (%)	44.7
Humedad después de saturación (%)	60	Humedad después de saturación (%)	56	Humedad después de saturación (%)	47
Promedio de saturación (%)	47	Promedio de saturación (%)	46	Promedio de saturación (%)	43
Sobrecarga (kg)	4.54	Sobrecarga (kg)	4.54	Sobrecarga (kg)	4.54

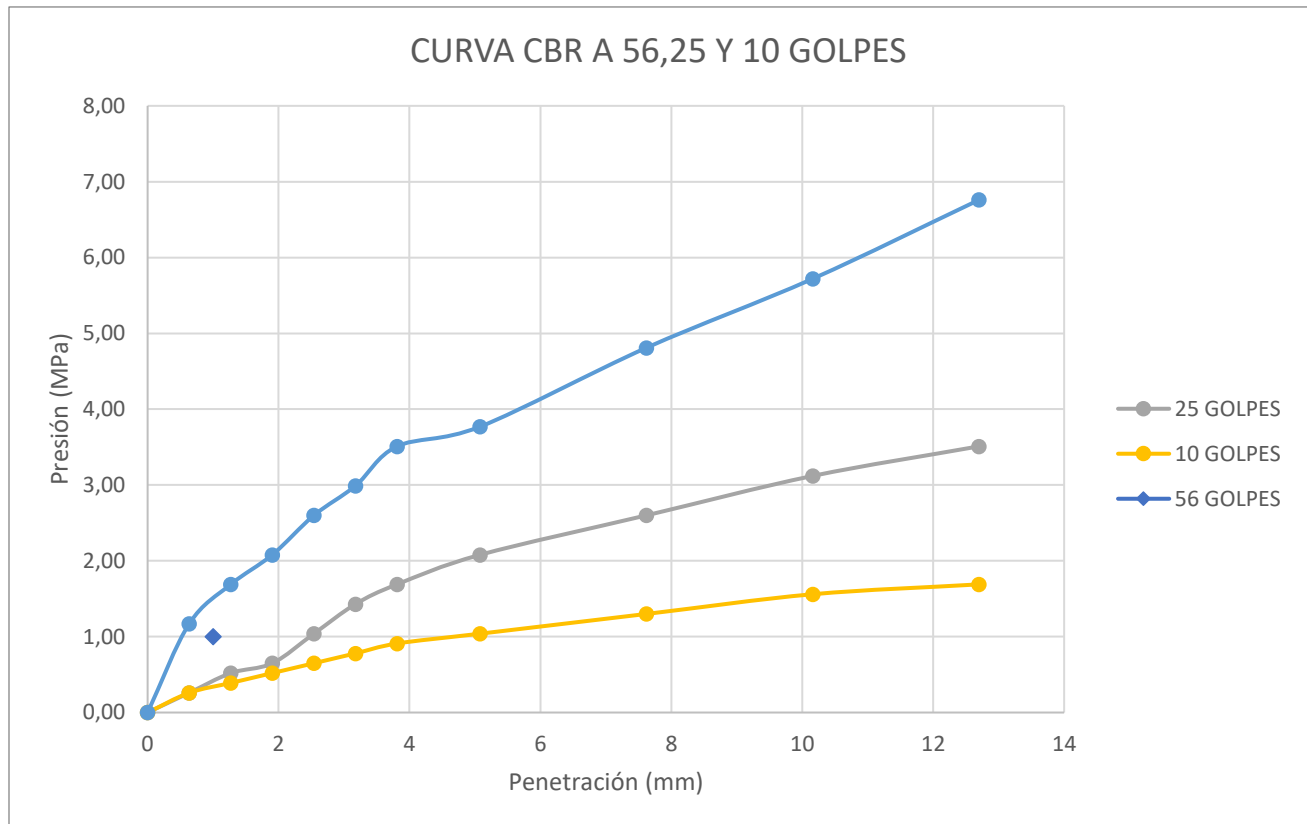
Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Resultados de penetración 10,25 y 56 golpes

PENETRACIÓN 10 GOLPES			PENETRACIÓN 25 GOLPES			PENETRACIÓN 56 GOLPES		
Deformación (mm)	Lectura del equipo kN	Carga sobre la muestra MPa	Deformación (mm)	Lectura del equipo kN	Carga sobre la muestra MPa	Deformación (mm)	Lectura del equipo kN	Carga sobre la muestra MPa
0	0.000	0.00	0	0.000	0.00	0	0.000	0.00
0.635	0.530	0.26	0.635	0.650	0.26	0.635	2.310	1.17
1.27	0.845	0.39	1.27	0.988	0.52	1.27	3.330	1.69
1.905	1.119	0.52	1.905	1.443	0.65	1.905	4.330	2.08
2.54	1.357	0.65	2.54	2.155	1.04	2.54	5.280	2.60
3.175	1.593	0.78	3.175	2.847	1.43	3.175	6.190	2.99
3.81	1.907	0.91	3.81	3.360	1.69	3.81	7.060	3.51
5.08	1.992	1.04	5.08	4.227	2.08	5.08	7.800	3.77
7.62	2.717	1.30	7.62	5.305	2.60	7.62	9.740	4.81
10.16	3.172	1.56	10.16	6.353	3.12	10.16	11.700	5.72
12.7	3.518	1.69	12.7	7.246	3.51	12.7	13.650	6.76
<b>CBR a 2.54 mm (%)</b>	<b>9.7</b>	<b>CBR a 2.54 mm (%)</b>	<b>15.30</b>	<b>CBR a 2.54 mm (%)</b>	<b>37.60</b>			
<b>CBR a 5.08 mm (%)</b>	<b>9.45</b>	<b>CBR a 5.08 mm (%)</b>	<b>20.1</b>	<b>CBR a 5.08 mm (%)</b>	<b>37</b>			

Fuente. Elaboración propia

Figura 22. Curva CBR a 56, 25 y 10 golpes



**Fuente.** Elaboración propia

Se observa un crecimiento exponencial en la capacidad portante conforme aumenta la energía de compactación (número de golpes), pasando de valores bajos de CBR con 10 golpes (~7%) a valores cercanos al 30% con 56 golpes, lo que demuestra la importancia del grado de compactación para mejorar el desempeño del suelo.

Con 10 golpes, el CBR <10% indica un suelo con pobre capacidad portante, apenas aceptable como subrasante en vías de bajo tránsito. Con 25 golpes, el CBR entre 11% y 15% mejora significativamente, permitiendo su uso como subrasante en vías con tránsito bajo o moderado y con 56 golpes, el CBR cercano al 30% ubica el suelo en una categoría adecuada para funcionar como subbase en vías de tráfico moderado a alto, siempre que otros parámetros (plasticidad, expansión) sean controlados.

### 3.4.3. Propuesta No. 3 – Suelo cemento al 9%

El suelo-cemento es una técnica de estabilización en la que se mezcla el suelo existente con cemento Portland, agua y, opcionalmente, aditivos, para crear una capa rígida o semi-rígida que mejora notablemente las propiedades mecánicas del suelo original.

La mezcla suelo-cemento resulta en una estructura de partículas cementadas que incrementa la resistencia a la compresión, la capacidad portante, reduce la plasticidad y mejora la durabilidad frente a ciclos de humedad y sequedad.

La estabilización de suelos con cemento es una técnica ampliamente respaldada por normas internacionales como ASTM D1633 y especificaciones nacionales como INVIAS 2013, que recomiendan contenidos de cemento entre 4% y 12% para mejorar significativamente la capacidad portante, durabilidad y comportamiento volumétrico del suelo en capas de soporte de vías (McDowell, 1959; Sherwood, 1993; FHWA, 2012)."

En esta propuesta el contenido de suelo – cemento será del 9%, esto debido a:

- Tipo y granulometría del suelo,
- Nivel de tránsito previsto para la vía,
- Requisitos de resistencia especificados.

Un contenido de **9% de cemento** es relativamente alto, recomendado cuando el suelo base es limoso, arcilloso o de baja calidad, se requiere alcanzar una alta resistencia a la compresión, se espera un tránsito moderado a alto en la vía o se busca minimizar deformaciones permanentes o fallas prematuras.

Este porcentaje asegura que el suelo-cemento actúe como una capa estabilizada rígida (subbase o base), prolongando la vida útil del pavimento.

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento, conforme a lo establecido en la norma INV E-614-2013. Este procedimiento tiene como propósito principal evaluar la capacidad mecánica del material compuesto por suelo estabilizado con cemento, bajo

condiciones controladas de laboratorio. Es importante resaltar que el ensayo no proporciona una medida exacta de la resistencia a la compresión como lo haría un ensayo en materiales homogéneos como el concreto, sino que ofrece una medida relativa, útil para comparar la calidad del suelo-cemento entre diferentes mezclas, condiciones de curado o proporciones de estabilizante.

Este tipo de ensayo permite analizar el comportamiento del material frente a cargas de compresión simple, lo cual es fundamental para determinar su idoneidad en aplicaciones de ingeniería civil, tales como bases y subbases de pavimentos, plataformas estructurales y estructuras de contención. Los resultados obtenidos son una referencia clave en los procesos de diseño y control de calidad de obras que involucren técnicas de estabilización de suelos.

Asimismo, el ensayo permite establecer si el contenido de cemento utilizado y el método de compactación son adecuados para garantizar una resistencia mínima requerida, de acuerdo con los criterios técnicos y normativos del proyecto.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

*Tabla 25 Resultados de ensayo de resistencia, suelo cemento 9%*

Espécimen N°	Edad de ensayo (días)	Diámetro promedio (mm)	Longitud promedio (mm)	Masa del cilindro (g)	Área sección transv (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (kN)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia nominal (Mpa)	Resistencia (%)
1	7	102,05	120,00	2051	8179	33,7	4,1	2,5	165,0
2	7	101,05	118,55	1981	8020	34,0	4,2	2,5	169,5
3	7	101,05	121,00	2074	8020	32,3	4,0	2,5	161,0
4	7	101,50	117,00	2000	8091	34,9	4,3	2,5	172,3
5	7	101,00	118,50	2001	8012	33,3	4,2	2,5	166,3
6	7	101,55	116,85	2013	8099	31,8	3,9	2,5	157,0

La resistencia alcanzada, en términos porcentuales con respecto a la resistencia nominal, varía entre 157,0% y 172,3%. Esto evidencia que todos los especímenes superan con holgura el mínimo requerido, lo que sugiere una adecuada dosificación del cemento, así como un buen proceso de compactación y curado.

Los resultados del ensayo muestran que todos los especímenes de suelo-cemento cumplen satisfactoriamente con la resistencia mínima requerida a los 7 días de curado, alcanzando valores que superan este umbral en más del 50% en todos los casos. Esta tendencia indica una mezcla bien formulada y un proceso constructivo adecuado en cuanto a compactación, contenido de agua y cantidad de cemento estabilizante.

Además, la homogeneidad de los resultados (baja dispersión de los valores de resistencia) demuestra consistencia en el proceso de fabricación de los cilindros y en las condiciones del ensayo.

#### *3.4.4. Propuesta No. 4 – Suelo cemento al 5%*

La realización del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros moldeados de suelo-cemento con una dosificación del 5% de cemento se plantea con el fin de evaluar la viabilidad técnica y económica de reducir el contenido de estabilizante, sin comprometer el desempeño estructural del material.

Si bien los resultados obtenidos con el 9% de cemento cumplen ampliamente los requisitos normativos y de resistencia, es fundamental determinar si un menor porcentaje de cemento, en este caso, el 5% puede proporcionar una resistencia suficiente para los fines del proyecto, particularmente cuando se trata de aplicaciones como subbases, bases estabilizadas, plataformas o capas de mejoramiento.

Esta evaluación busca:

- Optimizar recursos al reducir el consumo de cemento, lo cual puede traducirse en ahorros económicos significativos en proyectos de gran volumen.
- Validar la dosificación mínima necesaria para garantizar la resistencia especificada ( $\geq 2,5$  MPa a los 7 días).
- Comparar el comportamiento mecánico entre distintas dosificaciones y así establecer curvas de diseño o parámetros de control de calidad.
- Evitar sobredimensionamiento, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles en términos técnicos, económicos y ambientales.

En este sentido, el ensayo con 5% de cemento permitirá obtener datos confiables y representativos que respalden, o no, su aplicación, asegurando que la mezcla propuesta mantenga la integridad estructural, durabilidad y estabilidad requeridas para el tipo de obra prevista.

Los resultados obtenidos del ensayo con un porcentaje del 5% de cemento fueron los siguientes:

*Tabla 26 Resultados de ensayo de resistencia, suelo cemento 5%*

Especimen N°	Edad de ensayo (días)	Diametro promedio (mm)	Longitud promedio (mm)	Masa del cilindro (g)	Área sección transv (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (kN)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia nominal (Mpa)	Resistencia (%)
1	7	101,05	120,00	2151	8030	25,3	3,08	2,5	123,0
2	7	102,60	118,55	1998	8115	25,5	3,15	2,5	126
3	7	102,60	121,00	2054	8117	24,2	3,00	2,5	120,0
4	7	102,50	117,00	1996	8085	26,2	3,23	2,5	129
5	7	101,55	118,50	2010	8015	25,0	3,15	2,5	126
6	7	102,50	116,85	2005	8118	23,9	2,93	2,5	117,0

Teniendo en cuenta la resistencia a la compresión, se puede determinar que todos los especímenes con 5% de cemento presentan resistencias superiores a 2,5 MPa, que es el valor mínimo establecido como criterio de aceptación para este tipo de mezcla y la resistencia promedio se ubica en 3,09 MPa, lo cual representa una disminución del 25% respecto al promedio obtenido con el 9% (4,12 MPa), pero sigue siendo técnicamente aceptable.

Se evidencia que la variabilidad de los resultados es baja, lo que indica consistencia en la mezcla y en el proceso de compactación, incluso con la reducción del contenido de cemento.

Se observa que aun con una menor cantidad de cemento, el suelo estabilizado logra desarrollar una resistencia significativa, lo que sugiere que el suelo tiene buena reactividad con el cemento incluso a dosis moderadas.

Los resultados estimados indican que una dosificación de 5% de cemento es técnicamente viable, ya que permite cumplir con los requerimientos mínimos de resistencia mecánica para suelo-

cemento. Esta alternativa representa una opción eficiente y sostenible, con beneficios potenciales en reducción de costos de materiales, sin sacrificar la calidad estructural del material estabilizado.

## **CAPÍTULO IV: Desarrollo presupuestal de las propuestas de mejoramiento**

La estabilización de suelos para el mejoramiento de vías comienza con la identificación de las propiedades físicas y mecánicas del terreno existente. Sin embargo, este diagnóstico inicial solo permite comparar distintas alternativas de intervención y realizar un análisis detallado que conduzca a determinar el tipo de mejoramiento más adecuado.

En el presente proyecto se intervendrá la capa de subrasante en dos tramos viales ubicados en la vereda Llano Grande, municipio de Guateque. En este capítulo se estudiarán dos opciones de mejoramiento, con el fin de seleccionar la más conveniente desde el punto de vista técnico y económico.

Con base en lo anterior, se describe a continuación el proceso constructivo propuesto, el cual establece los ítems o actividades a ejecutar.

### **4.1. Proceso constructivo**

Tomando como referencia el Manual de Estabilización de Suelos con Cemento y Cal (2013), se establece el siguiente proceso constructivo, que varía dependiendo el material con el que se pretende mejorar el suelo:

#### *4.1.1. Estabilización con cemento (5%).*

##### *4.1.1.1. Preparación del terreno*

El proceso constructivo actual contempla la remoción de la capa superficial, seguida de una escarificación del suelo a 20 cm de su espesor. Esta labor de descapote se efectuará antes de realizar la nivelación inicial del terreno y su correspondiente humectación, con el fin de alcanzar el nivel óptimo de compactación. El contenido de humedad requerido se determinará con base en los resultados de los ensayos de compactación modificada previamente realizados.

#### 4.1.1.2. Esparcido del cemento

El cemento a utilizar será esparcido sobre la superficie mediante equipo manual, evitando en todo momento su exposición prolongada a la humedad antes de realizar la mezcla. No obstante, se debe tener presente que el porcentaje a utilizar es de 5%, en relación al peso total del suelo a mejorar, por lo cual se deberá esparcir el cemento de forma homogénea, con el fin, de que se cumplan los estándares de calidad pedidos.

#### 4.1.1.3. Mezclado

El suelo se mezclará con cemento utilizando una motoniveladora sobre la capa escarificada de 20 cm, asegurando su uniformidad. Este procedimiento deberá ejecutarse en un lapso máximo de dos horas tras el esparcido del material, para evitar que el cemento inicie su fraguado durante ese tiempo.

#### 4.1.1.4. Humectación y compactación

Tras evaluar las condiciones actuales del terreno, será necesario regular la humedad y la cantidad de agua a aplicar, de manera que el suelo alcance las condiciones ideales para su compactación. Luego, se realizarán ensayos de densidad in situ para confirmar que dichos parámetros se cumplan.

#### 4.1.1.5. Curado

El suelo deberá permanecer constantemente humectado durante un período mínimo de siete días, garantizando así que conserve la humedad necesaria para un adecuado proceso de curado. Esta medida es fundamental para prevenir la formación de fisuras y asegurar que el material alcance la resistencia y estabilidad requeridas, evitando fallas prematuras en la estructura.

#### 4.1.1.6. Control de calidad

Será necesario efectuar ensayos de plasticidad, densidad y CBR, con el propósito de evaluar las características mecánicas del suelo y comprobar que presenta una composición homogénea. Estos análisis permitirán verificar la reducción de su plasticidad, asegurando que el material cumpla con las especificaciones técnicas y garantizando su desempeño óptimo en la estructura proyectada.

#### 4.1.2. Estabilización del suelo con cal, 10%

##### 4.1.2.1. Preparación del terreno

El proceso constructivo actual contempla la remoción de la capa superficial, seguida de una escarificación del suelo a 20 cm de su espesor. Esta labor de descapote se efectuará antes de realizar la nivelación inicial del terreno y su correspondiente humectación, con el fin de alcanzar el nivel óptimo de compactación. El contenido de humedad requerido se determinará con base en los resultados de los ensayos de compactación modificada previamente realizados.

##### 4.1.2.2. Esparcido de la cal

Utilizando correctamente los elementos de protección personal, se procederá a distribuir la cal de forma uniforme sobre toda la superficie que se pretende mejorar. Esta aplicación controlada garantiza una cobertura homogénea del material, favoreciendo una reacción química adecuada con el suelo y contribuyendo a optimizar sus propiedades mecánicas y de resistencia.

##### 4.1.2.3. Mezclado inicial

La cal deberá mezclarse con el suelo empleando una estabilizadora o motoniveladora, asegurando una integración uniforme del material. En caso de ser necesario, se aplicará riego con agua para activar la reacción química, facilitando el proceso de estabilización. Posteriormente, se realizará una mezcla

preliminar que permitirá iniciar la reacción de floculación, mejorando la estructura y trabajabilidad del suelo.

#### 4.1.2.4. Tiempo de maduración

El suelo tratado con cal deberá permanecer en reposo durante un período de entre 24 y 48 horas, permitiendo que el material actúe químicamente y disminuya la plasticidad natural del terreno. Durante este lapso, será indispensable restringir el paso de tráfico pesado, a fin de no interrumpir ni alterar el proceso de reacción, garantizando así la efectividad del tratamiento y la calidad final del suelo estabilizado.

#### 4.1.2.5. Mezclado final y compactación

El material previamente tratado deberá ser remezclado con el fin de lograr una completa homogeneización de sus componentes. Posteriormente, se procederá a su compactación mediante rodillo, hasta alcanzar al menos el 95% de la densidad establecida en el ensayo Proctor Modificado. Durante este proceso, será fundamental controlar el contenido de humedad, evitando así la aparición de fisuras superficiales que puedan comprometer la calidad y durabilidad de la capa estabilizada.

#### 4.1.2.6. Curado

El suelo deberá permanecer constantemente humectado durante un período mínimo de siete días, garantizando así que conserve la humedad necesaria para un adecuado proceso de curado. No obstante, el suelo deberá taparse en caso de una probabilidad de lluvia, debido a que se puede afectar el contenido de humedad óptimo y podrá lavarse la cal.

#### 4.1.2.7. Control de calidad

Será necesario efectuar ensayos de plasticidad, densidad y CBR, con el propósito de evaluar las características mecánicas del suelo y comprobar que presenta una composición homogénea. Estos análisis

permitirán verificar la reducción de su plasticidad, asegurando que el material cumpla con las especificaciones técnicas y garantizando su desempeño óptimo en la estructura proyectada.

#### **4.2. Análisis de precios unitarios de propuesta de mejoramiento No. 1**

Una vez definido el procedimiento para la estabilización con suelo-cemento, se elaboraron los correspondientes análisis de precios unitarios, tomando como base los valores de referencia establecidos por la Gobernación de Boyacá. Estos precios fueron utilizados como guía para estimar los costos asociados, garantizando que el presupuesto se ajuste a las condiciones económicas y normativas vigentes en la región.

Adicionalmente, se realizó una modificación en la cantidad de material correspondiente al ítem 1.02 del presente presupuesto, con el propósito de ajustarla a los volúmenes determinados en el estudio efectuado. Esta corrección busca garantizar la coherencia entre el cálculo de materiales y las necesidades reales del proyecto, optimizando así la precisión y eficiencia en la planificación de recursos.





#### **4.3. Análisis de precios unitarios de propuesta de mejoramiento No. 2**

Una vez definido el procedimiento para la estabilización con suelo-cemento, se elaboraron los correspondientes análisis de precios unitarios, tomando como base los valores de referencia establecidos por la Gobernación de Boyacá. Estos precios fueron utilizados como guía para estimar los costos asociados, garantizando que el presupuesto se ajuste a las condiciones económicas y normativas vigentes en la región.

Adicionalmente, se realizó una modificación en la cantidad de material correspondiente al ítem 1.02 del presente presupuesto, con el propósito de ajustarla a los volúmenes determinados en el estudio efectuado. Esta corrección busca garantizar la coherencia entre el cálculo de materiales y las necesidades reales del proyecto, optimizando así la precisión y eficiencia en la planificación de recursos.





#### 4.4. Sábana de cantidades

Tabla 27 Sábana de cantidades propuesta de mejoramiento N° 1

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO N° 1						
N°	Ítem Gob.	Descripción	Und	Cant.	V. Unit.	V. Total
1	PRELIMINARES					
1,01	3.01.08	LOCALIZACION Y REPLANTEO TOPOGRÁFICO PARA OBRAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL	KM	0,2262	\$ 5.263.700,44	\$ 1.190.649,04
1,02	APU #1	ESTABILIZACIÓN CON SUELO CEMENTO.	M3	226,2	\$ 114.862,56	\$ 25.981.911,52
TOTAL DE CONTRATO						\$ 27.172.560,56

Tabla 28 Sábana de cantidades propuesta de mejoramiento N° 2

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO N° 2						
N°	Ítem Gob.	Descripción	Und	Cant.	V. Unit.	V. Total
1	PRELIMINARES					
1,01	3.01.08	LOCALIZACION Y REPLANTEO TOPOGRÁFICO PARA OBRAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL	KM	0,2262	\$ 5.263.700,44	\$ 1.190.649,04
1,02	APU #1	ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON CAL	M3	226,2	\$ 232.100,86	\$ 52.501.214,98
TOTAL DE CONTRATO						\$ 53.691.864,02

La sábana de cantidades constituye el documento en el que se relacionan los ítems propuestos de acuerdo con el proceso constructivo definido para la obra. En este listado, cada actividad o partida se presenta con su valor unitario, el cual fue previamente establecido en el capítulo anterior. Cabe resaltar que dicho valor unitario ya contempla la inclusión de los costos indirectos, calculados en un 30%, así como la aplicación de un factor por distancia del 15%.

Este factor por distancia corresponde a un porcentaje adicional que se aplica al valor unitario con el fin de cubrir los sobrecostos derivados de la ubicación del proyecto respecto a la capital del departamento, tales como el transporte de materiales, desplazamiento de personal y logística general. Para el presente proyecto, este porcentaje se fijó en un 15%, siguiendo las disposiciones y referencias consignadas en el listado más reciente de precios oficiales publicado por la Gobernación de Boyacá.

Por otra parte, las cantidades se determinaron de la siguiente manera:

##### 4.4.1. Ítem 1.01 Localización y replanteo topográfico para obras de infraestructura vial

Debido a que la unidad de medida para esta actividad es el kilómetro, el cálculo se realiza así:

$$Cant (km) = \frac{L_1 + L_2}{1000}$$

Donde:

- L1: Longitud del tramo 1, en metros.
- L2: Longitud del tramo 2, en metros.
- Se determina un factor de conversión de 1/1000.

4.4.2. *Ítem 1.02 Estabilización con suelo cemento/Estabilización de suelo con cal.*

En cuanto al ítem de estabilización, para ambos casos, la unidad de medida será el metro cúbico.

Este volumen se calculará de la siguiente manera:

$$Cant = (L_1 + L_2) * A * h_m$$

Donde:

- L1: Longitud del tramo 1, en metros.
- L2: Longitud del tramo 2, en metros.
- A: Ancho de calzada.
- Hm: Espesor de mejoramiento.

Como datos principales se presenta la siguiente tabla:

*Tabla 29 Cantidades*

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
Longitud de tramo 1	M	119.63
Longitud de tramo 2	M	106.57
Ancho de calzada	M	5
Espesor de mejoramiento	M	0.2

### **Conclusiones y recomendaciones**

Los resultados de los ensayos de laboratorio (contenido de humedad, límites de Atterberg, granulometría y CBR) evidencian que los suelos de la vía en estudio presentan un alto contenido de finos y plasticidad media, lo que los hace susceptibles a deformaciones y pérdida de resistencia bajo condiciones de humedad elevada.

La alternativa de estabilización con cal mostró mejoras en la plasticidad y trabajabilidad del suelo; sin embargo, el desempeño mecánico y la relación costo-beneficio de la estabilización con suelo-cemento resultaron superiores.

La ubicación geográfica, la topografía y las condiciones de acceso influyen significativamente en la logística del proyecto, justificando el factor de distancia del 15% incluido en los costos.

El análisis económico demostró que la inversión inicial en la alternativa de suelo-cemento se compensa con una mayor durabilidad y menores costos de mantenimiento en el ciclo de vida de la vía.

La implementación de un control estricto de la humedad y la compactación en obra es determinante para garantizar el comportamiento esperado de la estructura vial.

La mejora de esta vía no solo tendrá un impacto técnico, sino también social y económico, al facilitar el transporte de productos agrícolas y mejorar la conectividad de la vereda con el casco urbano.

Adoptar la alternativa de estabilización con suelo-cemento al 5%, siguiendo los procedimientos y dosificaciones establecidos en el estudio, y garantizando un estricto control de calidad durante la mezcla, colocación y compactación.

Complementar la intervención con un adecuado sistema de drenaje longitudinal y transversal para minimizar la infiltración de agua en la subrasante y prolongar la vida útil de la vía.

Evaluar el comportamiento de la vía durante al menos dos ciclos invernales posteriores a la intervención, registrando asentamientos, fisuras o fallas, para retroalimentar futuros proyectos de mejoramiento vial en la región.

Considerar, en proyectos futuros, la utilización de materiales locales o reciclados (RCD) como opción sostenible, siempre que cumplan con los parámetros mecánicos y de durabilidad requeridos.

### Referencias Bibliográficas

Alcaldía Municipal de Guateque. (2015). Esquema de ordenamiento territorial. Guateque, Boyacá.

Alcaldía Municipal de Guateque. (2020). Plan de desarrollo municipal “Razones para confiar”. Guateque, Boyacá.

ASTM International. (2017). ASTM D1633-17: Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1633-17>

Barbarán, J. L. (2021). Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba – departamento de San Martín. <https://doi.org/10.19083/tesis/654616>

Bowles, J. E. (1996). Foundation analysis and design. McGraw-Hill.

Cabana, M. (2017). Mejoramiento de la relación de soporte (CBR) al adicionar el estabilizante químico cal a la subrasante de la carretera no pavimentada de bajo tránsito [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo].

Craig, R. F. (1997). Soil mechanics. Spon Press.

Das, B. M. (2011). Principles of geotechnical engineering. Cengage Learning.

Del Castillo, R. D., & Orobio, A. (2020). Investigación exploratoria sobre el efecto del aceite de motor usado en un suelo fino de subrasante. *Informes de la Construcción*, 72(558), e336. <https://doi.org/10.3989/ic.69016>

Huamani, Y. (2021). Mejoramiento de suelo limo arcilloso para incrementar el valor soporte del CBR en subrasante aplicando caseína [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo].

Huatay, D., et al. (2023). Mejoramiento del CBR en subrasante arcillosa mediante el uso de antracita en proporción de 5%, 10% y 15% en la carretera a Tartar Grande Baños [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte].

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras – Artículo 330: Suelo-cemento. INVIAS.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012). Normas de ensayo de materiales para carreteras. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-normas-de-ensayo-de-materiales-para-carreteras>

Jeampier, J. J., Guevara Camus, L., & Choque Flores, L. (2023). Comparative study of the chemical additives Consolid 444 and Con-Aid for the improvement of the subgrade in clay soils. *Revista de la Universidad Peruana Unión*, 21(1), 1–10. <https://doi-org.bibliodigital.ugc.edu.co/10.51372/gacetatecnica242.7>

Juárez Badillo, E. (2007). Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos (Tomo 1). Limusa.

Little, D. N. (1995). Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. National Lime Association.

Méndez Cerna, J. (2021). Estabilización de suelo arcilloso para el mejoramiento de la subrasante adicionando cloruro de sodio, tramo Primorpampa - Cascapara, Yungay, Ancash 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo].

Montejo, A. (2002). Ingeniería de pavimentos (2.<sup>a</sup> ed.). Ágora.

Ospina-García, M. Á., Chaves-Pabón, S. B., & Jiménez-Sicachá, L. M. (2020). Improvement of clayey subgrades through the addition of steel waste [Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero]. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 9(2), 121–132. <https://doi-org.bibliodigital.ugc.edu.co/10.19053/20278306.v11.n1.2020.11692>

Portland Cement Association. (2003). Soil-cement construction handbook.

Quintero, C. (2022). Caracterización en el diseño de pavimentos utilizando como material sostenible agregados pétreos y RCD en vías terciarias [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Colombia]. <https://hdl.handle.net/10983/30063>

Reyes, G. (2009). Teorías de desarrollo económico y social: articulación con el planteamiento de desarrollo humano. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Nariño*.

Sherwood, P. (1993). Soil stabilization with cement and lime. HMSO, Transport Research Laboratory.

Terrones, A. (2018). Estabilización de suelos arcillosos adicionando cenizas de bagazo de caña para el mejoramiento de subrasante en el sector Barraza [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo].

Thompson, M. R. (1966). Lime reactivity of Illinois soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*.