

EVALUACIÓN MECÁNICA Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS LATERÍTICOS
ESTABILIZADOS CON CEMENTO PARA MEJORAMIENTO DE TALUDES Y
TERRAPLENES: CASO ESTUDIO LA PRIMAVERA, VICHADA.



DAVID SANTIAGO CASTAÑEDA BAQUERO
SANTIAGO BELLO ACUÑA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO

2025

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL SUELO LATERÍTICO ESTABILIZADO CON
CEMENTO PARA SU USO EN EL MEJORAMIENTO O REHABILITACIÓN EN
ESTABILIZACIÓN DE TALUDES Y TERRAPLENES EN EL MUNICIPIO LA
PRIMAVERA EN EL DEPARTAMENTO DEL VICHADA.

DAVID SANTIAGO CASTAÑEDA BAQUERO
SANTIAGO BELLO ACUÑA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero civil

Aprobado por:

Ing. Mg. ANDRÉS FERNANDO SANTOS GRANADOS
Magíster en Dirección y Gestión de Proyecto Tutor Universidad

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO

2025

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O. P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Mg. Luis Fernando DÍAZ CRUZ

Decano de la Facultad Ingeniería Civil

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, quienes con amor, paciencia y apoyo incondicional nos acompañaron durante todo este proceso. A nuestros padres, por ser nuestra fuente constante de motivación, por enseñarnos el valor del esfuerzo y por creer en nosotros incluso en los momentos más difíciles. También dedicamos este logro a todos aquellos que de una u otra forma, nos brindaron su respaldo y palabras de aliento en los momentos de mayor exigencia.

Este trabajo es el reflejo del compromiso, la perseverancia y el deseo de superación que nos han inculcado desde siempre.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Dios, por darnos la vida, la salud, y la sabiduría necesaria para culminar con éxito esta importante etapa de nuestra formación profesional.

De manera muy especial, agradecemos al decano de la Facultad, Ingeniero Luis Fernando Díaz Cruz, por su constante apoyo, orientación y disposición para ayudarnos durante el desarrollo de este trabajo de grado. Su acompañamiento y confianza fueron fundamentales para que este proyecto se pudiera llevar a cabo de manera satisfactoria.

A nuestras familias, gracias por su amor incondicional, por ser nuestro principal soporte en los momentos difíciles, y por motivarnos a seguir adelante. A nuestros amigos y compañeros, por su compañerismo, apoyo y momentos valiosos en todo el proceso.

También extendemos nuestro agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado, Ingeniero Andrés Fernando Santos Granados, por su guía técnica, paciencia y compromiso con nuestra formación académica.

A todos los docentes y personal administrativo que formaron parte de nuestro proceso educativo, gracias por compartir su conocimiento y por contribuir al crecimiento de nuestra carrera como futuros ingenieros.

Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract.....	11
Glosario.....	12
Introducción.....	14
1. Planteamiento del problema	15
2. Objetivos	16
2.1. Objetivo general.....	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. Marco teórico	17
3.1. Infraestructura vial rural en Colombia.....	17
3.1.1 Infraestructura vial en el departamento del Vichada	18
3.2. Suelos lateríticos	18
3.3. Ripio como material de construcción	20
3.4. Estabilización de suelos	21
3.4.1 Estabilización de suelos con cemento.....	22
3.4.2 Estabilización con productos químicos.....	22
3.4.3 Suelos estabilizados con cloruro de sodio	22
3.4.4 Estabilización de suelos dispersivos con el uso de cemento.....	23
3.5. Ensayo Proctor	23
3.5.1 Ensayo de Proctor normal.....	24
3.6. Ensayo de compresión inconfínada	25
4. Metodología.....	27
4.1. Caracterización del material	27
4.2. Plan de dosificación	27
4.3. Ensayo de compresión inconfínada (UCS).....	28
5. Análisis de resultados	29
5.1. Caracterización del material	29
5.1.1 Ensayo granulométrico	29

5.1.2	Límites de Atterberg	31
5.1.3	Clasificación SUCS y AASTHO	32
5.1.4	Ensayo de Proctor	33
5.1.5	Ensayo de compresión inconfínada (UCS)	40
Conclusiones		46
6.	Referencias	48

Lista de Tablas

	Pág.
<i>Tabla 1 Granulometría</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2 Limite liquido.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3 Limite plástico</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4 Proctor a 0% de cemento</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 5 Proctor a 5% de cemento</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 6 Proctor a 10% de cemento</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 7 Proctor a 15% de cemento</i>	<i>36</i>

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1 Localización de las tropicales y áreas tibias.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2 Estructura del pavimento en algunas vías de Lagos, Nigeria.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3 Ejemplo curva compactación.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4 Determinación método ensayo compactación Proctor estándar.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5 Máquina ensayo compresión incofinada.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6 Curva granulométrica.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7 Práctica Limite líquido.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8 Curva de compactación a 0% de cemento.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9 Curva de compactación a 5% de cemento.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10 Curva de compactación a 10% de cemento.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11 Curva de compactación a 15% de cemento.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 12 Ensayo de Proctor a más de 20% de agua.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 13 Muestras para ensayo de compresión incofinada.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14 Curvas de compactación con cemento.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15 Curva de deformación a 0% de cemento-1.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16 Curva de deformación a 0% de cemento-2.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 17 Curva de deformación a 5% de cemento-1.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 18 Curva de deformación a 5% de cemento-2.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 19 Curva de deformación a 10% de cemento-1.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20 Curva de deformación a 10% de cemento-2.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 21 Curva de deformación a 15% de cemento-1.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22 Curva de deformación a 15% de cemento-2.....</i>	<i>45</i>

Resumen

Este proyecto de investigación evalúa el comportamiento mecánico de un suelo laterítico del municipio de La Primavera, Vichada, comúnmente conocido como "ripio", al ser estabilizado con cemento para su posible aplicación en obras de infraestructura vial, específicamente en la mejora de taludes y terraplenes. El material, fue sometido a ensayos de caracterización como granulometría, límites líquido y plástico e índice de plasticidad, los cuales indicaron una baja plasticidad y bajo contenido de finos, clasificado como arena mal graduada con grava (SP) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y la American Society for Testing and Materials (ASTM). Posteriormente, se diseñó la mezcla con diferentes porcentajes de cemento, tomados de 0%, 5%, 10% y 15%, luego se realizaron ensayos de Proctor normal por el método B para determinar la humedad óptima de compactación de las cuales fueron 12.4%, 14.7%, 16.8% y 13.7% respectivamente. Se prepararon muestras curadas durante 7 días y finalmente evaluadas mediante el ensayo de compresión inconfínada aplicando una carga constante de 0.01 kN. Los resultados obtenidos para cada porcentaje de cemento fueron debidamente pasados a esfuerzo mediante la fuerza máxima tabulada de cada porcentaje en el ensayo de compresión inconfínada, esto dejando un valor de esfuerzo de 0.67Mpa para 0%, 0.37Mpa para 5%, 1.16Mpa para 10% y por ultimo 5.03Mpa para 15% de cemento, esto dejando como referencia que la estabilización se comportó de manera eficaz, al dar una mejoría en las características mecánicas del material, donde se da por hecho que el porcentaje de 15% es el que mejor comportamiento tuvo.

Palabras Clave: Suelos lateríticos, estabilización, humedad óptima, taludes, tiempo curado, plasticidad.

Abstract

This research project evaluates the mechanical behavior of a lateritic soil from the municipality of La Primavera, Vichada, commonly known as “ripio”, when stabilized with cement for its possible application in road infrastructure works, specifically in the improvement of slopes and embankments. The material was subjected to characterization tests such as granulometry, liquid and plastic limits and plasticity index, which indicated low plasticity and low fines content, classified as poorly graded sand with gravel (SP) according to SUCS and ASTM. Subsequently, mixes were designed with different cement percentages of 0%, 5%, 10% and 15%, and normal Proctor tests were performed to determine the optimum compaction moisture, which were 12.4%, 14.7%, 16.8% and 13.7%, respectively. Samples were prepared and cured for 7 days and finally evaluated by the unconfined compression test. The results obtained for each percentage of cement were duly converted to stress by means of the maximum force tabulated for each percentage in the unconfined compression test, leaving a stress value of 0.67Mpa for 0%, 0.37Mpa for 5%, 1.16Mpa for 10% and finally 5.03Mpa for 15% cement, leaving as a reference that the stabilization behaved effectively, giving an improvement in the mechanical characteristics of the material, where it is assumed that the percentage of 15% is the one with the best performance.

Key Word- Lateritic soils, stabilization, optimum moisture, slopes, curing time, plasticity.

Glosario

-AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials): Organización que define normas y métodos de ensayo para materiales utilizados en obras viales, incluyendo suelos.

-CBR (California Bearing Ratio): Ensayo que evalúa la capacidad de soporte de un suelo mediante la penetración de un pistón estándar.

-Cemento Portland: Aglomerante hidráulico compuesto principalmente de cal, sílice, alúmina y óxidos de hierro, que al mezclarse con agua endurece y mejora la resistencia de suelos.

-Compactación: Proceso de densificación del suelo mediante energía mecánica para reducir vacíos y aumentar su resistencia.

-Compresión Inconfinada (UCS): Ensayo que determina la resistencia máxima a compresión de una muestra de suelo cilíndrica sin confinamiento lateral.

-Curado: Proceso mediante el cual una mezcla estabilizada mantiene condiciones óptimas de humedad y temperatura para permitir la hidratación del cemento.

-Densidad Seca: Peso del suelo seco por unidad de volumen. Es un parámetro clave en la compactación.

-Estabilización de Suelos: Técnica de mejoramiento de suelos que busca modificar sus propiedades mecánicas mediante aditivos como cemento, cal o asfaltos.

-Finos: Fracción del suelo que pasa por el tamiz No. 200 (material menor a 0,075 mm), incluyendo arcillas y limos.

-Gradación: Distribución del tamaño de partículas en un suelo, obtenida mediante análisis granulométrico.

-Humedad Óptima: Contenido de humedad que permite alcanzar la máxima densidad seca en un suelo compactado.

-INVIAS (Instituto Nacional de Vías): Entidad estatal colombiana encargada de establecer normas y especificaciones técnicas para proyectos viales.

-Límites de Atterberg: Conjunto de ensayos que definen el comportamiento plástico de los suelos: límite líquido, límite plástico y límite de contracción.

-Material Granular: Suelo compuesto principalmente por arenas y gravas, con baja o nula plasticidad.

-Módulo de Elasticidad: Relación entre esfuerzo y deformación en la zona elástica del comportamiento del material.

-Plasticidad: Propiedad de los suelos finos que les permite deformarse sin romperse cuando contienen cierta humedad.

-Proctor (Ensayo): Prueba de laboratorio que permite determinar la relación entre contenido de humedad y densidad seca, utilizada para definir parámetros óptimos de compactación.

-Ripio: Material granular natural compuesto de mezcla de arena, grava y fragmentos pétreos, comúnmente utilizado como afirmado en vías terciarias rurales.

-SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos): Sistema internacional que clasifica los suelos en función de su gradación y plasticidad.

Introducción

La infraestructura vial en regiones alejadas de fuentes para transformación de material apropiados para la ingeniería como en el departamento del Vichada, el cual enfrenta importantes desafíos técnicos y logísticos debido a la disponibilidad limitada de materiales convencionales y las condiciones geotécnicas propias de la zona. En este contexto, el aprovechamiento de materiales locales como los suelos lateríticos que son abundantes en el municipio de La Primavera representa una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad y poder reducir los costos en la construcción de obras de ingeniería civil.

Uno de estos materiales, conocido localmente como "ripio", es un suelo de origen laterítico con características granulométricas dominadas por arenas y gravas, con un bajo contenido de finos y plasticidad. A pesar de su disponibilidad y su uso en la región, su comportamiento geotécnico natural presenta limitaciones en la aplicación directa en obras civiles que demandan características mínimas como resistencia y estabilidad en taludes y terraplenes.

En respuesta a esta problemática, esta investigación plantea la estabilización del ripio mediante la adición de cemento como una estrategia para mejorar su capacidad portante y resistencia a esfuerzos de corte. El estudio incluye la caracterización física del suelo, la determinación de las condiciones óptimas de compactación mediante el ensayo Proctor normal y la evaluación de la resistencia mecánica a través del ensayo de compresión inconfiada, luego de un proceso de curado. Este análisis permite valorar la mejora del material estabilizado frente al no tratado, proporcionando así criterios técnicos para su eventual implementación en la construcción y rehabilitación de obras de infraestructura vial en zonas rurales.

1. Planteamiento del problema

El material ripio el cual es un suelo laterítico que se encuentra en grandes cantidades en el departamento del Vichada, el uso de este material suele tener una corta duración después de su construcción a causa de las lluvias, ya que por su alto contenido de arenas afecta la duración útil del material. En este trabajo, se llevó a cabo estudios e investigaciones del material ripio en su estado natural y estabilizado con cemento donde se comparó sus comportamientos estáticos mediante un ensayo de compresión inconfiada para poder realizar la comparación de los esfuerzos de cargas axiales entre el material en estado natural y las muestras estabilizadas para lograr determinar si hubo mejora del suelo y así validar su uso en el mejoramiento o rehabilitación de taludes y terraplenes en el municipio La primavera en el departamento del Vichada.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento del suelo laterítico estabilizado con cemento mediante el ensayo de compresión inconfiada, para su uso y aprovechamiento en el mejoramiento o rehabilitación en estabilización de taludes y terraplenes.

2.2. Objetivos específicos

-Determinar las propiedades físicas mediante ensayos de caracterización por límites de Atterberg, granulometría y Proctor estándar.

-Diseñar el plan de dosificación que determine la cantidad de cemento que debe llevar cada muestra para lograr una mezcla homogénea.

-Evaluar el comportamiento estático de los especímenes una vez estabilizados mediante la aplicación del ensayo de compresión inconfiada.

-Comparar la respuesta del suelo estabilizado con cemento, evaluando las propiedades mecánicas del material granular.

3. Marco teórico

3.1. Infraestructura vial rural en Colombia

La importancia de mejorar la cobertura y la calidad de las vías terciarias de un país es el rol que tiene esta red para el impulso del desarrollo socioeconómico de zonas rurales y de poblaciones que se encuentran apartadas de las grandes urbes. Sin embargo, para que este tipo de proyectos sea exitoso es necesario contar con buenos diseños geométricos y de pavimentos, así como con tecnologías apropiadas que se adapten simultáneamente a los estándares de calidad mundiales y a las realidades locales (Caro & Caicedo, 2017).

La extensión vial colombiana es de 205,745 km de los cuales 18,323 km hacen parte de la red primaria, 45,137 de la red secundaria y para la red terciaria se tiene 142,284 km,

Es claro que para que haya un crecimiento económico y social, se debe tener buena infraestructura vial la cual permita la comunicación en cada parte del país, esto permite que el crecimiento económico en las regiones y municipios, se potencialice, permitiendo a las poblaciones expandirse localmente y regionalmente, mejorando la calidad de vida, reducción de tiempos de viaje, crecimiento económico, mayor presencia del estado, ampliación de los servicios públicos, seguridad y educación, permitiendo así mismo la atracción del turismo.

Existen grandes extensiones del territorio nacional que no cuentan con un mínimo de infraestructura de transporte. En el caso de la totalidad de la red vial, Colombia cuenta con un índice de 17.8 Km por cada 100 Km² de territorio, valor cercano al promedio latinoamericano; pero a nivel de la red terciaria el indicador nacional es de 12.8 Km por cada 100 Km² de territorio, y existe una gran dispersión a nivel de departamentos con relación a este indicador, pues existen departamentos con un indicador superior a 20 Km/100 Km², como Quindío, Boyacá, Cundinamarca, Risaralda, Huila, Tolima, Atlántico, Caldas, Córdoba, Sucre, Santander, Cauca, Bolívar, Valle, Magdalena y Antioquia; existen departamentos entre 12.8 y 20 Km/100 Km² como Norte de Santander, Nariño y San Andrés; los demás están por debajo de 9 Km/100 Km²; es decir que el 68 % del territorio tiene menos de 12.8 Km/100 Km² (Narváez, 2017).

3.1.1 *Infraestructura vial en el departamento del Vichada*

La falta de desarrollo vial en el Vichada es el resultado de la poca disponibilidad de materiales que cumplan con las especificaciones del INVIAS, por lo cual se trabaja con materiales y suelos existentes en la zona ya que traer materiales de otras regiones que si cumplan con los requisitos mínimos hace que los proyectos de infraestructura vial se vuelvan más costosos, el transporte de material de otras regiones llega a tardar más de 36 horas con las vías en un estado considerable que permita el tránsito de vehículos y camiones, el problema empieza cuando son las temporadas de lluvia la cual tienden a durar alrededor de 8 meses al año, haciendo que las vías ya no se encuentren en óptimas condiciones por excesos de precipitación las cuales alcanzan en algunas zonas un poco más de un metro de altura.

La red vial del departamento cuenta con una cobertura de 2,683.19 km de la cual 85.95 km son primarias en las cual predominan 60.95 km en afirmado y 9.30 km pavimentados, 1,562.67 km de vías secundarias teniendo 1,263.1 km en tierra o destapados y 1,034.57 km de red vial terciaria. Esto demuestra que el departamento carece de una red vial que permita la comunicación y transporte eficiente, cómodo y seguro para los usuarios y habitantes del departamento.

Las redes de infraestructura vial existentes en el Departamento del Vichada son, en su mayoría, vías secundarias y terciarias de comunicación departamental e interdepartamental. De acuerdo con el Plan Vial Departamental del Vichada para el periodo 2011-2019, en la actualidad se transportan aproximadamente 500 toneladas de carga pesada por mes de las cuales son materia prima, materiales de construcción, entre otros. No obstante, la red vial del departamento tiene inconvenientes frecuentes por el mal estado de las vías debido a los climas que afronta la región y los tipos de vehículos que se movilizan por estas (Caro & Caicedo, 2017).

3.2. Suelos lateríticos

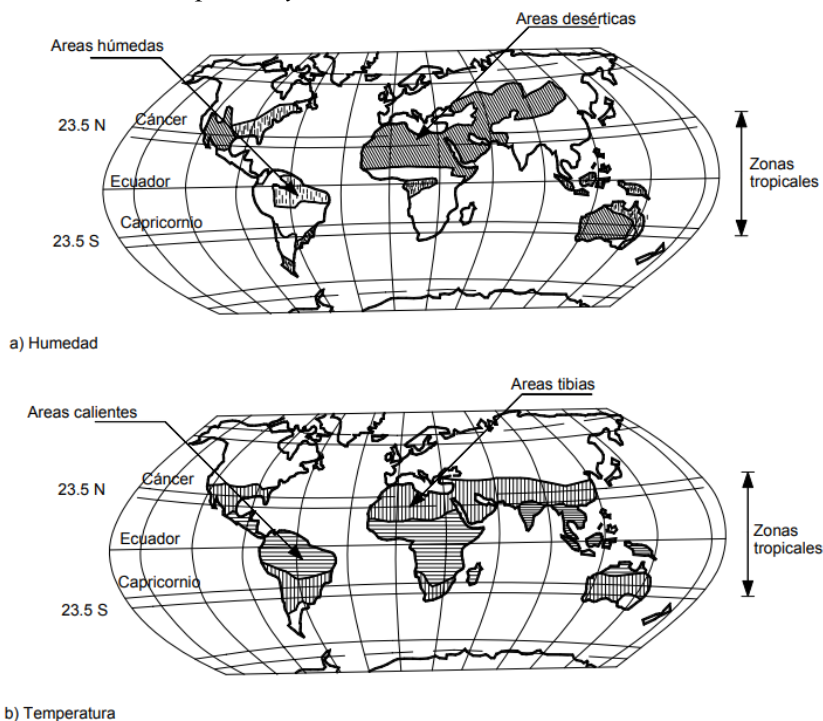
Los suelos lateríticos son suelos rojizos o amarillentos gracias a sus contenidos de hierro lo cual se llegan a formar en la superficie o muy cerca de estas en las zonas tropicales y subtropicales alrededor del mundo por la meteorización. El nombre laterítico viene del latín “later” que significa ladrillo. Utilizado por primera vez en la india como un material de construcción, el cual en estado fresco tiene baja resistencia al corte, pero que después de pasar por diferentes ciclos

de condiciones húmedas y secas, lo hace más resistente. Compuestos principalmente por óxidos de aluminio, silicio y hierro y en fases cristalinas de cuarzo, caolinita, ilmenita y hematita (Rodrigue, y otros, 2022).

Menciona (Jaime, 2009) en su libro deslizamientos, Vol. I, son estos suelos comúnmente rojizos gracias a la meteorización de las rocas ígneas y el posterior lavado de los materiales más finos el cual forma un material más gravoso. Determinado como suelos residuales, en zonas tropicales, permite la infiltración de agua y activándose fácilmente en los deslizamientos de taludes y laderas. El comportamiento ingenieril de los suelos residuales es muy diferente a los que son transportados y depositados, ya que sus propiedades es una variedad de combinaciones de los ambientes encontrados en las zonas trópicas, relacionados con el clima, la lluvia, cambios de temperaturas, el drenaje, vegetación, edad del suelo y los niveles de meteorización alcanzados por el suelo.

De acuerdo con (Jaime, 2009) la mayoría de los deslizamientos presentados son deslizamientos poco profundos y rápidos del suelo residual sobre la roca, pero cambia cuando los perfiles de meteorización son muy profundos y pueden presentarse deslizamientos rotacionales.

Figura 1 Localización de las tropicales y áreas tibias.



Nota. Adaptado de (Jaime, 2009)

Las propiedades geotécnicas de los suelos tropicales van variando para cada país y cada región del país, la meteorización o la falta de litificación trae como resultados materiales con discontinuidades y superficies de debilidad con posibilidad de movimiento por deslizamiento (Jaime, 2009).

Los suelos lateríticos son el resultado de un proceso llamado laterización, de intemperismo que ocurre en regiones tropicales, de altas temperaturas y lluvias abundantes. El proceso de laterización está caracterizado por la rápida descomposición de feldespato y minerales de hierro y óxidos de magnesio (Tavares, Weiss, Souza, & Costa, 2015).

3.3. Ripio como material de construcción

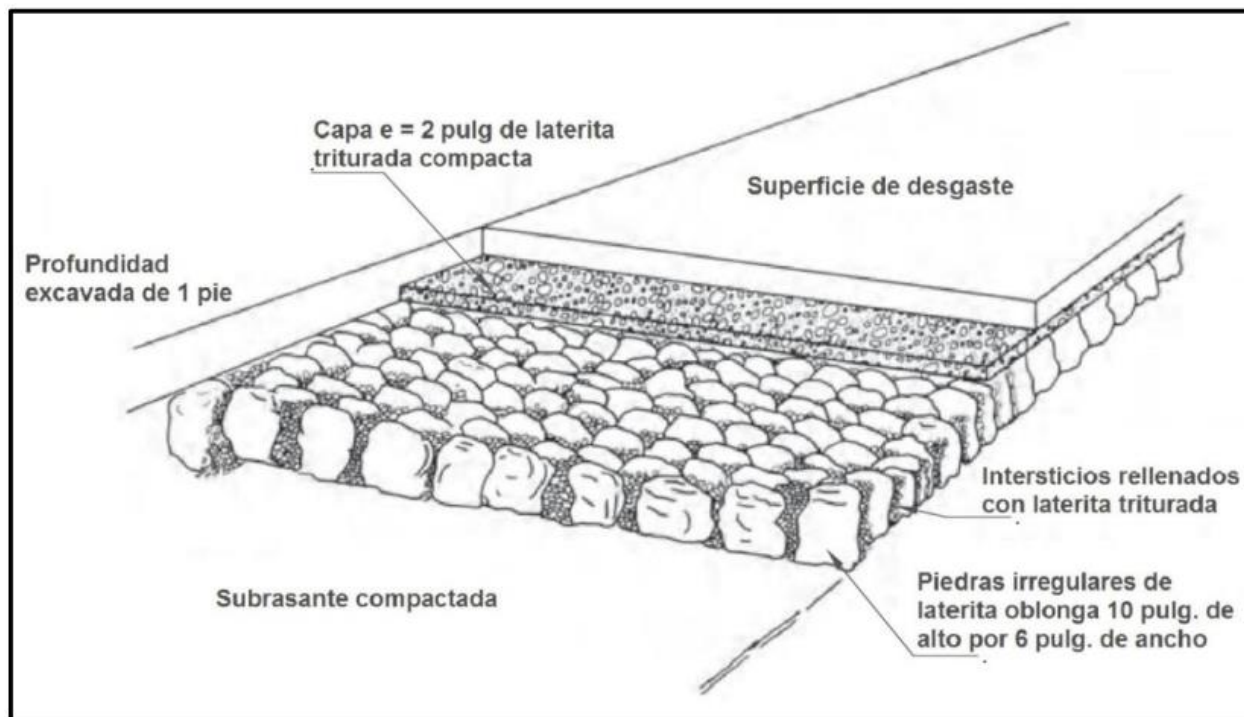
El uso de los suelos residuales lateríticos, en este caso el ripio es usado en vías en los lugares del país, como en el departamento del Meta y del Vichada, donde no se encuentran materiales que estén estandarizados y aceptados por la norma, por lo cual ha sido de forma casi que obligada la utilización del “ripio” como material de construcción gracias a su gran presencia en estas regiones. En el departamento del Vichada es común encontrar que las vías se realicen con este material, debido a sus extensas longitudes de vías, se vuelve inviable el transporte de material de canteras que no se encuentran cerca, por lo cual hay que transportarlos desde lugares alejados a la zona, siendo un gran reto para la región conseguir comunicación entre municipios y los otros departamentos, por lo cual si hablamos en temas de costos, habría que conseguir mejorar o estabilizar el material para que cumpla con las especificaciones mínimas que indica el INVIAS.

A nivel de América de sur, Brasil se destaca por realizar numerosos trabajos sobre la clasificación y uso de los suelos lateríticos, enfocando sus esfuerzos de investigación principalmente en el uso de este material para pavimentos. En el ámbito nacional, se le ha dado uso a la arcilla laterítica como material de terraplén con resultados no muy buenos principalmente en los departamentos del Vichada y Meta.

(Benjamin, 1970) expone la técnica que se utiliza, empleando material laterítico, para la construcción de la calzada de las calles y las vías arteria en la ciudad de Lagos, Nigeria. De acuerdo con el autor, las rocas (de 6 x 12 in) son colocadas en posición vertical de manera adyacente una a la otra y los espacios o huecos que quedan entre las mismas son rellenadas con laterita triturada

que posteriormente es compactada. Se adiciona laterita triturada hasta alcanzar un espesor de 2 in. por encima de la roca. La geometría y la instalación de la roca laterítica se realiza de forma manual, por lo que es un proceso demorado.

Figura 2 Estructura del pavimento en algunas vías de Lagos, Nigeria.



Nota. Adaptado de (Benjamin, 1970)

3.4. Estabilización de suelos

La necesidad de estabilizar los suelos es una técnica ampliamente usada en el ámbito de la ingeniería con el propósito principal de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales del terreno para hacerlos más aptos para el soporte de estructuras, tránsito vehicular, taludes, terraplenes, entre otras. Estos procesos buscan optimizar las características de los materiales como la resistencia al corte, infiltración, durabilidad, reducir deformidad y su susceptibilidad a la humedad de los suelos naturales. Esta necesidad surge en regiones en las que las condiciones del terreno no cumplen con requisitos mínimos para usos constructivos, viales y agrícolas, por lo cual se han desarrollado diversas formas de estabilización las cuales cada una tiene un objetivo diferente y resultados diferentes dependiendo del tipo de proyecto a realizarse.

3.4.1 *Estabilización de suelos con cemento*

El cemento es un conglomerado hidráulico que al entrar en contacto con el agua se forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia incluso bajo el agua. Por lo tanto, el cemento ha sido usado en diferentes investigaciones gracias a la mejora de la resistencia de los materiales, permitiendo que los suelos se vuelvan más resistentes a la carga de esfuerzos reduciendo la deformación del material.

La mezcla de suelo con cemento es considerada como una técnica de estabilización de suelos granulares que conlleva un proceso de hidratación en el cual se desarrolla una red de enlaces entre las partículas del suelo, esto acarrea un aumento en la capacidad portante y un notable incremento en la resistencia mecánica del terreno. Dicha técnica se encuentra establecida en la normatividad del INVIAS y del IDU con en el artículo 350 de las especificaciones generales de construcción de carreteras (Jonatan, 2019).

3.4.2 *Estabilización con productos químicos*

En la actualidad se ha aplicado un gran número de productos químicos con este fin, la mayoría de ellos con resultados satisfactorios. Aunque es poco común, la estabilización con productos ácidos está adquiriendo en la actualidad bastante difusión y experimentación. De los ácidos que han demostrado ser efectivos para modificar favorablemente algunos suelos, algunos son económicamente competitivos contra otros productos más comunes; sin embargo, como en el caso de los otros productos hasta aquí mencionados, se debe contar con la asesoría de especialistas en la materia, tanto durante la etapa de diseño como de construcción de la estabilización, pues en este caso se involucran peligros tanto para las personas como para los equipos (Paul, Alfonso, José, & Edda, 2002).

3.4.3 *Suelos estabilizados con cloruro de sodio*

(El-Metwally & Mohamed, 1987) en su trabajo doctoral, realizó el estudio de tres mezclas de suelo. En todos ellos observó mejoras de los valores de resistencia a la compresión, a la tensión,

de valor relativo de soporte e incluso en los valores de módulo de resiliencia. Cabe mencionar, sin embargo, que en varios casos agregó un 2% de cal además del cloruro de sodio.

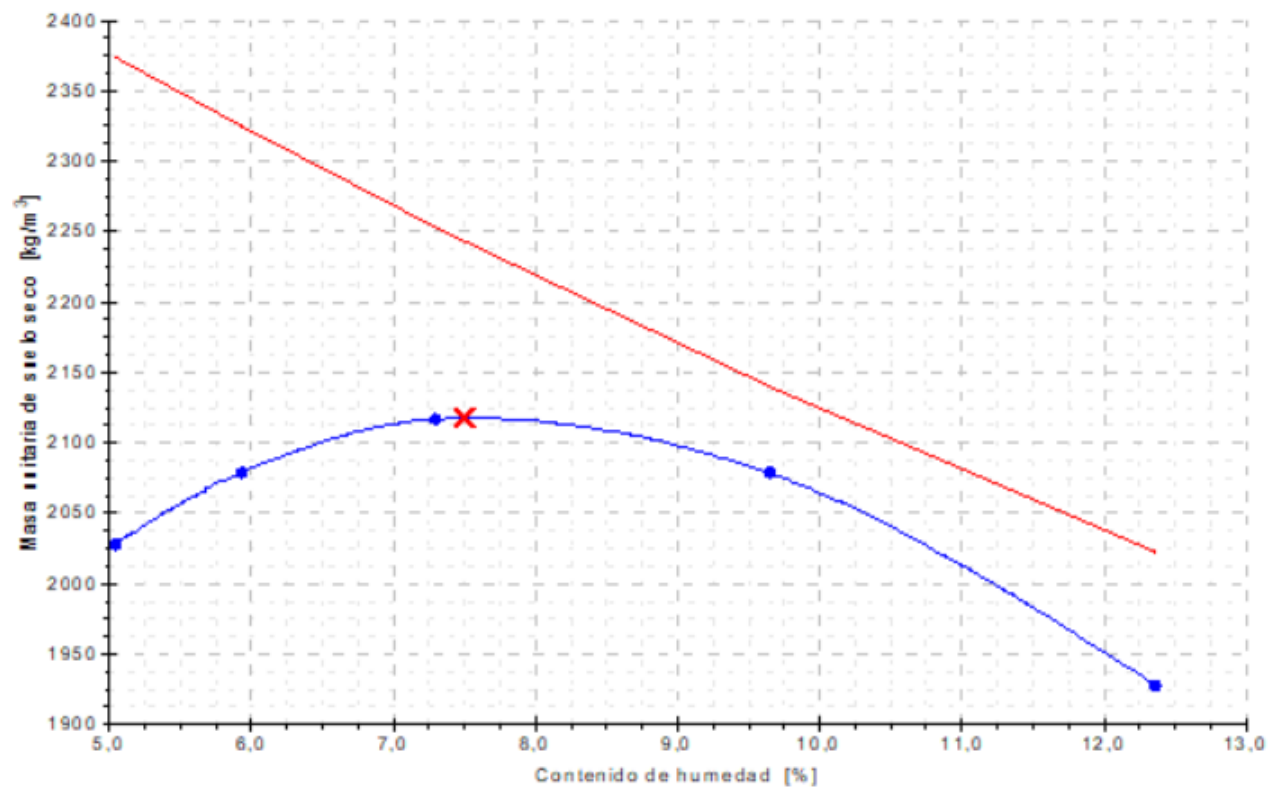
3.4.4 *Estabilización de suelos dispersivos con el uso de cemento*

(Mary, 2021) demuestra mediante su trabajo de investigación, la mejoría del suelo mediante la adición de cemento en proporciones de 2%, 4%, 6% y 8% con respecto a la masa del material, encontrando así una mejoría significativa de la capacidad portante (CBR), la resistencia a la compresión uniaxial y máxima densidad seca, mostrando así una disminución en la dispersividad, en el contenido de humedad óptima y en los límites de consistencia.

3.5. Ensayo Proctor

El ensayo de compactación se realiza para encontrar los valores de relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos, con el fin de determinar la humedad óptima y la densidad óptima del suelo del cual se genera una mezcla homogénea alcanzando su mayor grado de compactación, siendo un parámetro esencial para el diseño y construcción de estructuras en infraestructura vial, taludes, terraplenes y cimentaciones. Existiendo dos tipos de ensayo, ensayo de Proctor estándar y Proctor modificado, cada uno adaptado a diferentes condiciones de carga y exigencia en la compactación. El conocimiento de los valores encontrados realizados los laboratorios son importantes en la ingeniería para lograr garantizar la estabilidad y durabilidad de las obras cuando se tratan suelos que requieren procesos de estabilización o mejoramiento.

Figura 3 Ejemplo curva compactación



Nota. Adaptado de (Finesoftware, s.f.)

3.5.1 Ensayo de Proctor normal

Para la realización de este ensayo se debe determinar principalmente el método a usar y sus condiciones para poder realizar los diferentes métodos, estos determinados por los ensayos de granulometría realizados en los que especifica la cantidad retenida en diferentes tipos de tamices, para el método A y método B se determina que el 25% o menos del material debe quedar retenido en los tamices No. 4 y 3/8" respectivamente, si estas condiciones no se llegan a cumplir, se debe usar el método C solo si este cumple con el 30% o menos de la masa del material retenida en el tamiz 3/4".

Figura 4 Determinación método ensayo compactación Proctor estándar

MÉTODO	A	B	C
DIÁMETRO DEL MOLDE	101.6 mm (4")	101.6 mm (4")	152.4 mm (6")
MATERIAL	Pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4)	Pasa tamiz de 9.5 mm (3/8")	Pasa tamiz de 19.0 mm (3/4")
CAPAS	3	3	3
GOLPES/CAPA	25	25	56
USO	Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Ver numeral 1.4)	Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8") (Ver numeral 1.4)	Si 30% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 19.0 mm (¾") (Ver numeral 1.4)

Nota. Adaptado de (Instituto Nacional de Vías, s.f.)

Durante el desarrollo del ensayo, se colocan tres capas de muestras del suelo con los porcentajes de agua y agente estabilizante (si se va a usar) seleccionado, dentro de un molde sometiendo cada capa a 25 o 56 golpes con un martillo de 24.5 N que cae desde una altura de 305 mm produciendo aproximadamente una energía de compactación de 600 kN-m/m³. Este procedimiento se realiza con diferentes porcentajes de humedad para poder concluir mediante la curva de compactación la humedad y densidad optima a usar para los ensayos consiguientes.

3.6. Ensayo de compresión inconfiada

El ensayo de compresión inconfiada es uno de los métodos más utilizados en la geotecnia para evaluar la resistencia de las muestras a compresión axial de suelos cohesivos no drenados, sin aplicación de presiones laterales de confinamiento. Su simplicidad y rapidez lo convierte en una herramienta eficiente para determinar la capacidad portante de materiales arcillosos, su comportamiento mecánico y los efectos de tratamientos de estabilización en el uso de aditivos y aglutinantes.

El ensayo consiste en someter la muestra de forma cilíndrica, previamente moldeada o extraída del suelo de forma inalterada, a una carga axial creciente hasta el momento en que falla la muestra. Los resultados obtenidos de este permiten calcular la resistencia máxima a la compresión simple, parámetros para evaluar la viabilidad de su uso en estructuras como

terraplenes, taludes y estructuras o bases de pavimento. En resumen, este ensayo permite comparar el comportamiento del suelo natural frente al suelo estabilizado, permitiendo concluir sobre la investigación en términos de encontrar la mejora de su resistencia mecánica.

Figura 5 Máquina ensayo compresión incofinada.



4. Metodología

4.1. Caracterización del material

Para determinar las características del material arcilloso laterítico "ripio" se realiza la toma de muestras del suelo, para así realizar los ensayos reglamentados por el Instituto Nacional de Vías, INVIAS para determinar sus características físicas y mecánicas del material granular en su estado inalterado. Estos datos recolectados se tomarán como punto de comparación una vez realizada la implementación del aditivo al material granular.

- Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos: Ensayo a realizar mediante los parámetros determinados por la norma INV E - 123 - 13, clasificación mediante granulometría.

- Clasificación de los suelos: A partir de la determinación de los tamaños de las partículas se procede a clasificar mediante dos metodologías estándar, SUCS Y AASTHO.

- Determinación del límite líquido del suelo: Procedimiento realizado para determinado el contenido de humedad con el que pasa de un estado plástico a un estado líquido de la muestra mediante la norma INV E - 125 - 13.

- Determinación del límite plástico e índice de plasticidad: Ensayo realizado para determinar la humedad en la que el suelo pasa de un estado semisólido a plástico mediante la norma INV E - 127 - 13.

- Relaciones de humedad: Realizado para determinar el contenido de humedad óptima mediante la utilización del método B de la norma INV E - 141 - 13.

4.2. Plan de dosificación

Una vez caracterizado el material, se estableció el plan de dosificación del agente químico (cemento), logrando una correcta distribución garantizando una muestra homogénea en la que todas las partículas del material arcilloso entren en contacto con el agente estabilizante.

- Cemento: La cantidad de cemento necesaria para estabilizar una mezcla de suelo depende principalmente de la plasticidad y la granulometría del material base. Para suelos con alta plasticidad, generalmente arcillosos, se requieren dosis entre el 15% y 20% en peso del suelo para garantizar una adecuada resistencia y durabilidad. En cambio, para suelos poco plásticos o

materiales granulares como arenas o ripios, la dosis recomendada suele estar en un rango menor, aproximadamente entre el 2% y 6%, buscando optimizar la mezcla para obtener la resistencia deseada sin sobredosificación.

En este estudio, dada la clasificación del material como una arena mal gradada, se seleccionaron porcentajes de cemento de 5%, 10% y 15% para evaluar el comportamiento mecánico, considerando que es necesario un contenido algo mayor para compensar la baja cohesión y plasticidad del suelo.

Realizado las mezclas con el agente estabilizante se llevarán las muestras a la humedad óptima de compactación encontrada mediante el ensayo de relación de humedades utilizando el método B que nos indica 3 capas, cada una de 25 golpes para así elaborar los especímenes de ensayo siendo 8 especímenes, de los cuales serán 2 especímenes por cada porcentaje de cemento y 2 del material sin estabilizar.

4.3. Ensayo de compresión inconfiada (UCS)

El ensayo de compresión inconfiada tiene como finalidad determinar la resistencia a la compresión no confinada de un suelo, especialmente útil en suelos estabilizados, ya que permite evaluar el efecto del aditivo (en este caso, cemento) sobre la resistencia mecánica del material.

Este ensayo se realizó conforme a lo establecido en la norma INV E – 152 – 13 (INVIAS). Se aplicó tanto al suelo natural como a las muestras estabilizadas con 5%, 10% y 15% de cemento. Para ello, se prepararon muestras del suelo natural y de mezclas con adiciones, compactadas a su humedad óptima determinada previamente mediante el ensayo Proctor normal. Las probetas fueron moldeadas en tubos de PVC con un diámetro de 2 pulgadas y una altura de 4 pulgadas. Una vez moldeadas, las muestras se dejan en curado durante 7 días a temperatura ambiente, luego se retiran las muestras de los moldes y se someten a la máquina de compresión axial (Masterload).

5. Análisis de resultados

5.1. Caracterización del material

La caracterización del suelo representa una etapa esencial para establecer las condiciones físicas y mecánicas iniciales del material utilizado. En este caso, se evaluó un suelo laterítico, conocido localmente como ripio, proveniente del municipio de La Primavera, en el departamento del Vichada (Colombia). Este material se encuentra disponible en la región y es empleado en la construcción de vías terciarias, taludes y terraplenes.

Con el objetivo de determinar su viabilidad como base para procesos de estabilización con cemento, se realizaron diversos ensayos de laboratorio orientados a conocer su comportamiento natural. Estos incluyen análisis granulométrico, límites de Atterberg, clasificación según los sistemas SUCS y AASHTO, así como el ensayo de Proctor normal. Los resultados obtenidos permiten establecer una línea base sobre la cual se evalúa el impacto de la estabilización, y constituyen un insumo clave para el diseño de mezclas mejoradas orientadas al mejoramiento o rehabilitación de taludes y terraplenes.

5.1.1 Ensayo granulométrico

El ensayo de granulometría permitió determinar la distribución de tamaños de las partículas del material. De acuerdo con la curva granulométrica obtenida, el suelo presenta una mala graduación, lo que indica que no existe una adecuada proporción entre partículas gruesas y finas.

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), este tipo de distribución corresponde a una arena mal graduada (SP). Esta clasificación sugiere que el suelo posee baja cohesión y alta permeabilidad.

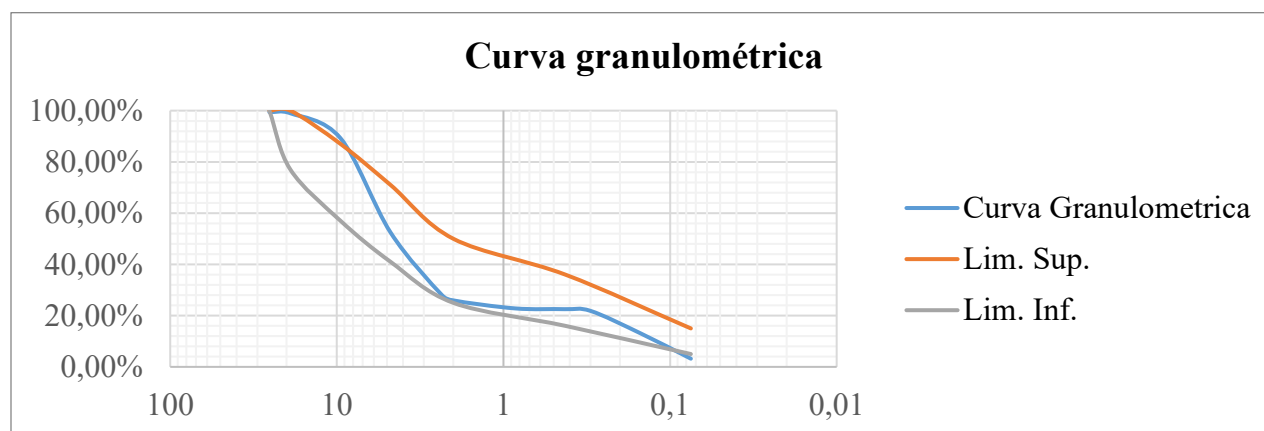
Este ensayo se llevó a cabo con una muestra de 5kg del material, el cual tuvo que ser secado al aire libre previamente al ensayo, ya que venía un poco húmedo desde su lugar de origen.

Tabla 1 Granulometría

ABERTURA (mm)	TAMIZ	PESO TAMIZ. (g)	PESO TOTAL	RETENIDO (g)	RETENIDO %	Acumulado	PASA %
25.4	1	448.1	477.4	29.3	0.6	29.3	99.41%
19	3//4	433.6	455.3	21.7	0.4	51.0	98.97%
9.5	3//8	445.44	928.4	482.96	9.7	534.0	89.22%
4.76	4	445.7	3159.42	1822.32	36.8	2356.3	52.45%
2.36	8	680.6	2559.01	1197.81	24.2	3554.1	28.27%
2	10	389.9	505.57	115.67	2.3	3669.8	25.94%
0.85	20	628.55	1412.17	155.07	3.1	3824.8	22.81%
0.43	40	313.3	327.57	14.27	0.3	3839.1	22.52%
0.3	50	563.7	597.4	33.7	0.7	3872.8	21.84%
0.15	100	496	931.7	435.7	8.8	4308.5	13.05%
0.075	200	474.5	963.1	488.6	9.9	4797.1	3.19%
-----	Final	314.4	472.4	158	3.2	4955.1	0.00%
TOTAL				4955.1	100.0		

Durante el ensayo se evidenció que era un material bastante especial, debido a que tenía mucha variedad de tamaños de partículas y una textura arenosa, pero que a simple vista parece que fuera muy arcilloso y en realidad no lo es. Gracias a esto se evidenció que este material posee un 46.96% de gravas, 49.26% de arenas y 3.19% de finos.

Figura 6 Curva granulométrica



Recopilados todos los datos, se realiza el cálculo de la distribución granulométrica con los datos D60, D30 y D10 para después calcular su coeficiente de uniformidad Cu y curvatura Cc.

5.1.2 Límites de Atterberg

Se determinaron los límites de plasticidad del suelo mediante los ensayos de límite líquido (LL) y límite plástico (LP), de los cuales se calculó el índice de plasticidad (IP).

Figura 7 Práctica Limite liquido.



Para la realización del ensayo de limite liquido se sacaron 3 muestras de las cuales fueron variando la cantidad de golpes. También se observa que el material era un poco difícil de manejar gracias a su poca cohesión. Obtuvimos como resultado 20%, siendo el promedio de las 3 muestras.

Tabla 2 Limite liquido

Muestra	N. golpes	W (%)	Promedio
1	25	20.00%	20.00%
2	20	19.67%	
3	33	20.32%	

El ensayo de limite plástico tuvo la misma dinámica, sacamos 3 muestras y por ende el promedio fue el resultado dando un valor de 18.65%. También se tubo dificultad para realizar este ensayo, debido a que no se podía cumplir con las instrucciones de la norma, ya que realizar los rollitos de las medidas necesarias fue demorado.

Tabla 3 Limite plástico

Muestra	W (%)	Promedio
1	18.00%	18.65%
2	20.41%	
3	17.54%	

Los resultados indicaron valores bajos de LL y LP, dejando como valor 1.35% de IP, lo que clasifica al material como no plástico, este comportamiento es característico de suelos arenosos esto confirma que el ripio no posee una parte significativa de finos, lo cual afecta negativamente su cohesión y su capacidad de compactación. No obstante, esta condición lo convierte en un candidato adecuado para ser estabilizado con cemento, ya que su poco contenido de finos permite que el cemento se disperse bien y reaccione de forma más eficiente.

5.1.3 Clasificación SUCS y AASTHO

Habiendo obtenido ya la granulometría y los límites de Atterberg, se procede a clasificar el suelo mediante el sistema SUCS, esto dejando como resultado un suelo perteneciente al grupo SP y con nombre de grupo “Arenas mal gradadas”, por consiguiente, en el sistema American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) se dio una clasificación del suelo de A-2-4, ya que es el grupo que más representa el comportamiento del suelo

correspondiente a materiales granulares compuestos principalmente por arena con una poca cantidad de finos.

5.1.4 Ensayo de Proctor

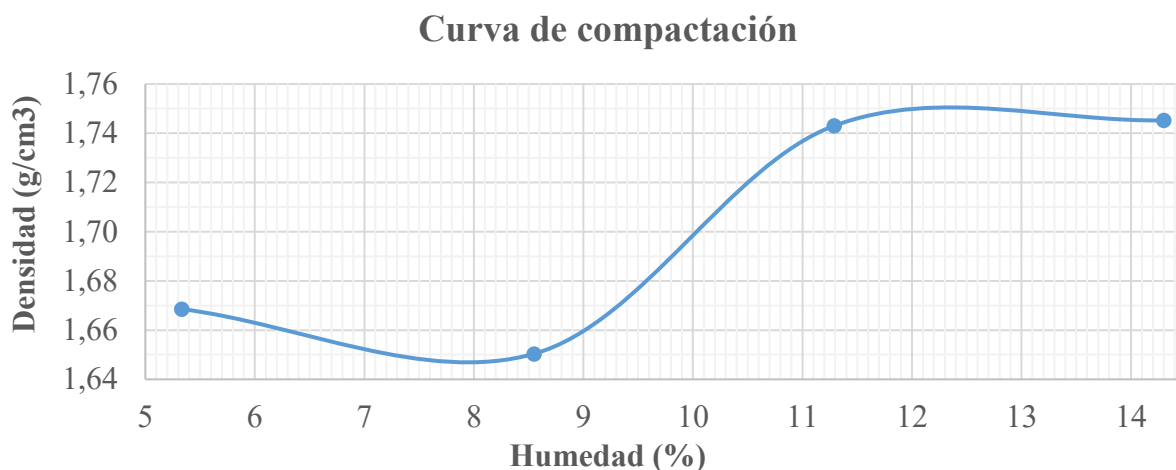
El ensayo de compactación Proctor normal mediante el método B de 3 capas, cada una de 25 golpes, se realiza con el propósito de determinar la relación entre el contenido de humedad del suelo y su densidad seca. Este ensayo permite establecer la humedad óptima a la cual el suelo alcanza su densidad seca máxima, parámetros fundamentales para definir las condiciones ideales de compactación.

Este ensayo fue planeado de manera de que se manejaran 4 porcentajes de cemento distintos, los cuales eran 0%, 5%, 10% y 15%. Se realiza primeramente con el material en estado natural es decir 0% de cemento, variando su porcentaje de humedad en 3%, 6%, 9% y 12%, donde a cada porcentaje de humedad se le realiza un ensayo y a cada ensayo se le toma dos muestras, luego se replica el mismo procedimiento con los siguientes porcentajes de cemento con la única diferencia de que se manejan porcentajes de humedad diferentes siendo estos de 5%, 10%, 15% y 20% de humedad.

Tabla 4 Proctor a 0% de cemento

0% Cemento				
Humedad	Promedio humedad		Promedio densidad seca	
3%	5.33	%	1.67	g/cm ³
6%	8.55	%	1.65	g/cm ³
9%	11.29	%	1.74	g/cm ³
12%	14.30	%	1.75	g/cm ³

Figura 8 Curva de compactación a 0% de cemento



Nota. A partir de (Fuente: Propia)

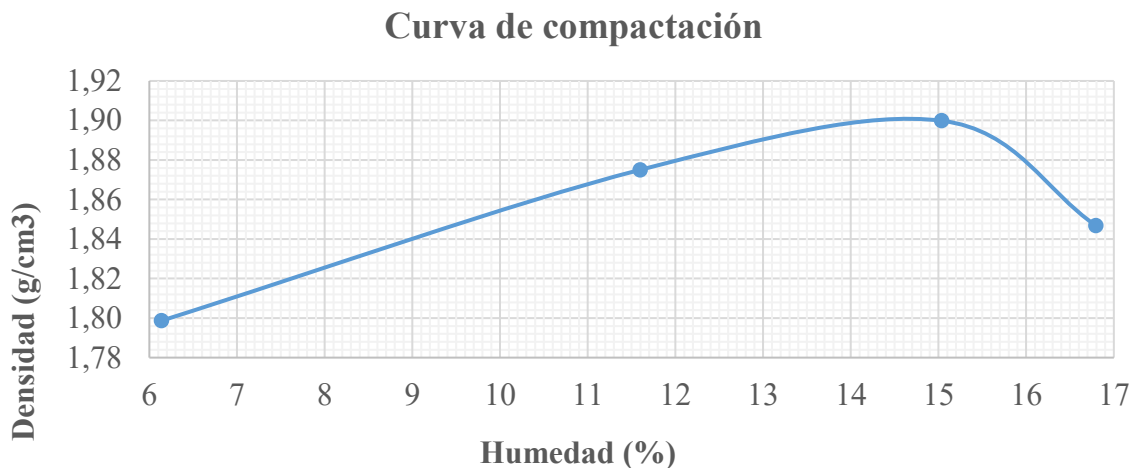
En la curva de compactación correspondiente al suelo sin estabilizar, se observa que la densidad seca máxima alcanzada es de aproximadamente 1.75 g/cm^3 , con una humedad óptima determinada de 12.4%. Este resultado indica que el suelo, en su estado natural, requiere una cantidad moderada de agua para alcanzar su máxima compactación, lo cual es característico de suelos con bajo contenido de finos y una plasticidad mínima.

El comportamiento observado en la curva es típico de suelos granulares, donde un incremento de humedad facilita la distribución de partículas, mejorando la compactación hasta cierto punto. Una vez sobrepasada la humedad óptima, la densidad comienza a disminuir, debido a que el exceso de agua ocupa los espacios que deberían ser aire en la mezcla compactada, reduciendo la eficiencia de la compactación.

Tabla 5 Proctor a 5% de cemento

5% Cemento				
Humedad	Promedio humedad		Promedio densidad seca	
5%	6.14	%	1.80	g/cm^3
10%	11.60	%	1.88	g/cm^3
15%	15.04	%	1.90	g/cm^3
20%	16.80	%	1.85	g/cm^3

Figura 9 Curva de compactación a 5% de cemento



Nota. A partir de (Fuente: Propia)

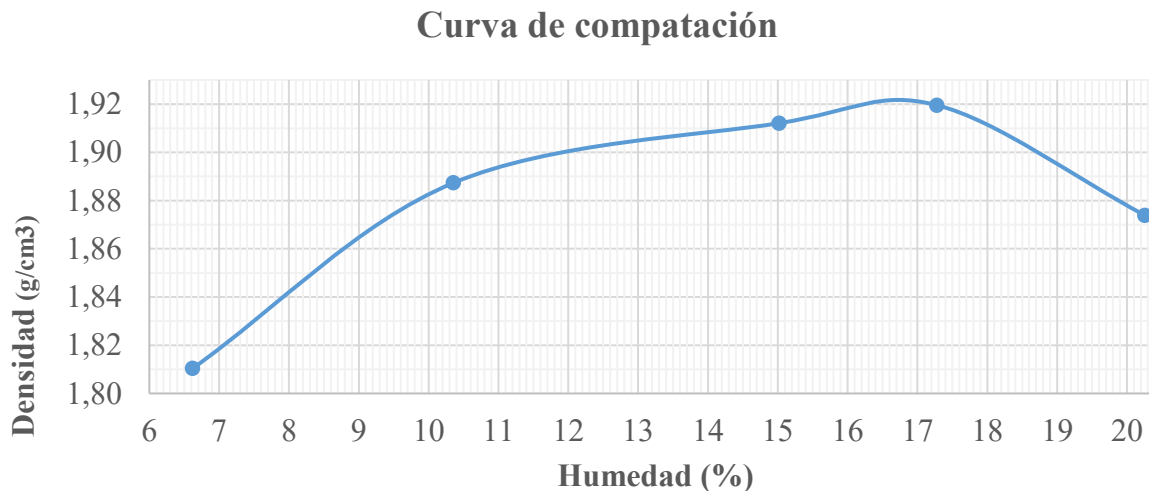
En la curva de compactación correspondiente al suelo con un 5% de cemento, se observa una densidad seca máxima de aproximadamente 1.90 g/cm³ alcanzada con una humedad óptima de 14.7%. Este aumento en la densidad respecto al material natural evidencia una mejora en el grado de compactación, lo cual es predecible ya que el cemento actúa como un aglomerante que mejora la cohesión entre las partículas del suelo.

La curva muestra una tendencia clara y bien definida, en la que el incremento de humedad mejora la compactación hasta un punto máximo. A partir de esa humedad, la densidad comienza a disminuir, comportamiento normal al sobrepasar la humedad óptima. Este resultado indica que con solo un 5% de cemento, el material ya presenta una mejora considerable en su comportamiento mecánico.

Tabla 6 Proctor a 10% de cemento

10% Cemento				
Humedad	Promedio humedad		Promedio densidad seca	
5%	10.35	%	1.89	g/cm ³
10%	15.02	%	1.91	g/cm ³
15%	17.28	%	1.92	g/cm ³
20%	20.26	%	1.87	g/cm ³

Figura 10 Curva de compactación a 10% de cemento



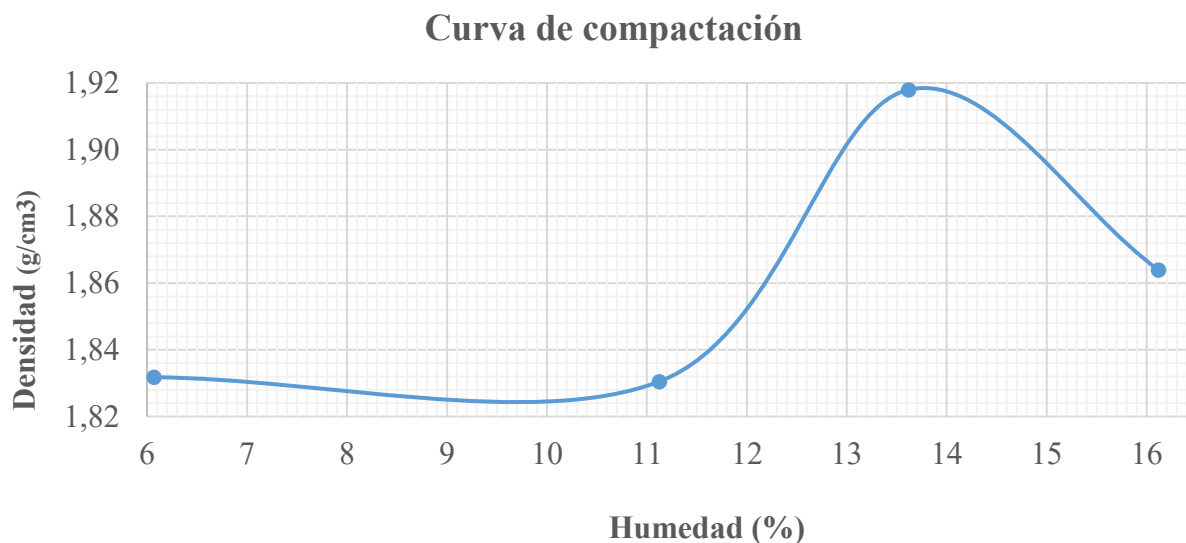
Nota. A partir de (Fuente: Propia)

En la curva de compactación para el suelo estabilizado con 10% de cemento, se observa una densidad seca máxima aproximadamente de 1.92 g/cm³ alcanzada con una humedad óptima de 16.8%. En comparación con el material natural y con el 5% de cemento, se nota un incremento tanto en la densidad máxima como en la humedad óptima, lo cual es coherente con la necesidad de mayor contenido de agua para mejorar la reacción de hidratación del cemento esto mejorando una mejor compactación.

La forma de la curva muestra una tendencia clara de aumento en la densidad con el incremento de la humedad hasta alcanzar un punto máximo, seguido de una disminución al sobrepasar la humedad optima.

Tabla 7 Proctor a 15% de cemento

15% Cemento				
Humedad	Promedio humedad		Promedio densidad seca	
5%	6.07	%	1.83	g/cm ³
10%	11.12	%	1.83	g/cm ³
15%	13.62	%	1.92	g/cm ³
20%	16.12	%	1.86	g/cm ³

Figura 11 Curva de compactación a 15% de cemento

Nota. A partir de (Fuente: Propia)

En la curva de compactación del suelo con 15% de cemento, se identifica una densidad seca máxima cercana a los 1.92 g/cm³, alcanzada con una humedad óptima de 13.7%, que es el valor seleccionado con base en el punto más alto de la curva.

En comparación con el 10%, esta curva presenta un pico más definido, lo que indica que la mezcla con mayor cantidad de cemento presenta una menor tolerancia a variaciones en el contenido de humedad. Es decir, valores por encima o por debajo del valor óptimo generan una caída más rápida de la densidad, lo que evidencia una mayor sensibilidad del material en esta condición. Esta tendencia sugiere que, a partir de ciertos porcentajes, el aumento de cemento no necesariamente incrementa la densidad, pero sí puede influir en otras propiedades como la resistencia mecánica.

También logramos observar que al adicionar más de 20% de agua en las mezclas estabilizadas, se generaba una mezcla inviable para realizar el ensayo, ya que esta adquiriría una textura demasiada aguada que impedía hacer el ensayo de la manera eficiente y correcta.

Figura 12 Ensayo de Proctor a más de 20% de agua.



En cambio, para las mezclas que no presentan adición de cemento este porcentaje máximo de agua disminuye, ya que al no tener cemento se debe tener mucho más cuidado con el contenido de agua debido a su bajo contenido de finos que lo hace susceptible a pérdida de su baja cohesión.

La estabilización del material se realizó con el propósito de mejorar las propiedades geotécnicas del suelo natural (ripio) proveniente del municipio de La Primavera, Vichada, con fin a su utilización en la mejora o rehabilitación de taludes y terraplenes. El objetivo principal fue aumentar su resistencia, permitiendo un mejor desempeño estructural en campo.

Para este fin, se utilizó cemento como agente estabilizante en proporciones del 5%, 10% y 15% en peso respecto al suelo seco. Estas proporciones fueron seleccionadas con base en criterios técnicos y estudios comparativos similares.

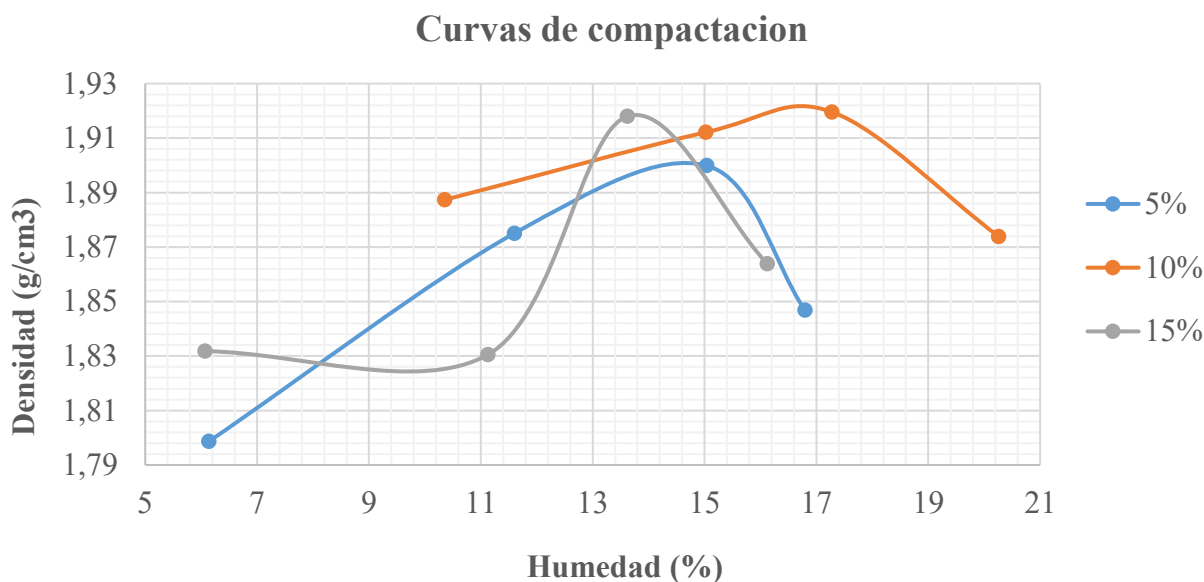
El procedimiento consistió en la mezcla en seco del suelo previamente secado al aire libre con el cemento, asegurando una distribución homogénea del estabilizante. Luego, se añadió agua hasta alcanzar el contenido de humedad óptimo determinado mediante el ensayo Proctor estándar.

Figura 13 Muestras para ensayo de compresión inconfiada



Estas muestras fueron embazadas en moldes cilíndricos de PVC con diámetro de 2 in y 4 in de largo, las cuales fueron sometidas a un período de curado de 7 días antes de ejecutar los ensayos de compresión inconfiada.

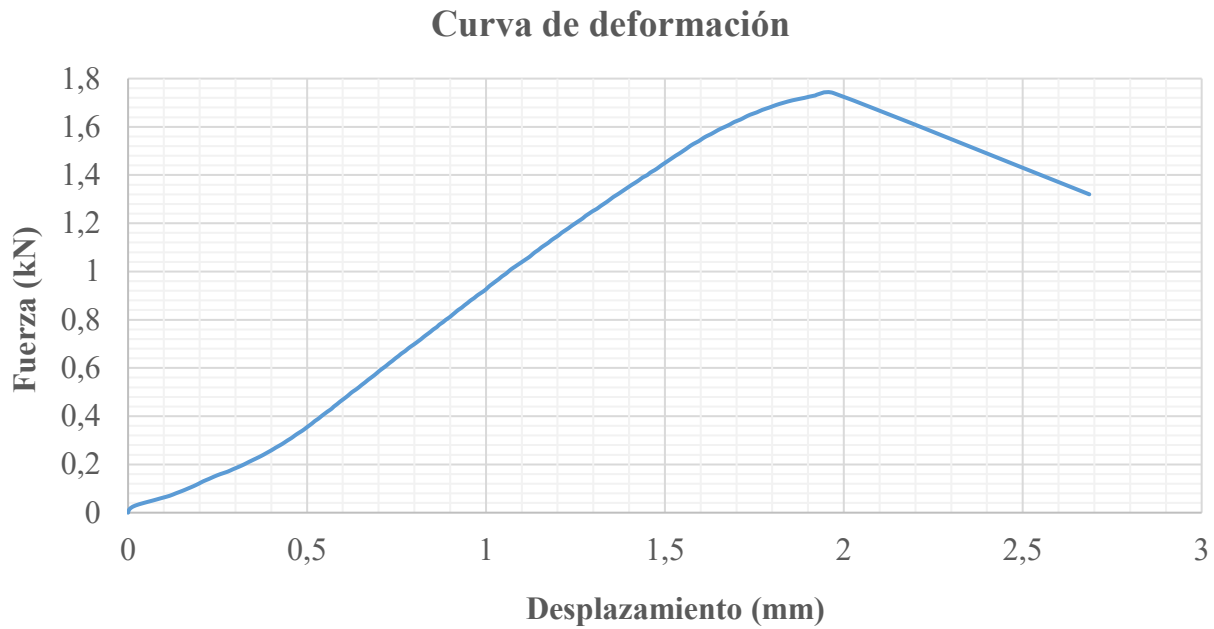
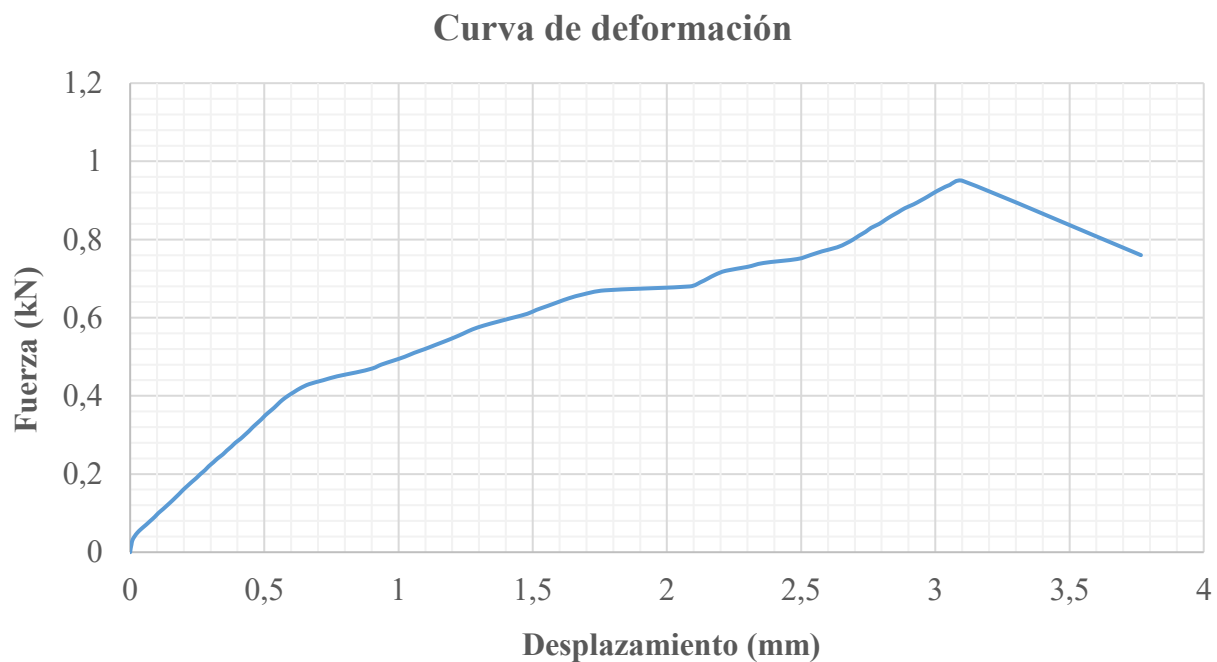
Los resultados obtenidos permitieron observar un aumento progresivo de la resistencia a medida que se incrementó el contenido de cemento, evidenciando la efectividad del proceso de estabilización en este tipo de suelo.

Figura 14 Curvas de compactación con cemento

5.1.5 Ensayo de compresión inconfiada (UCS)

Para evaluar la resistencia mecánica del suelo estabilizado, se llevó a cabo el ensayo de compresión inconfiada utilizando la máquina Masterload. Se ensayaron un total de ocho muestras, dos por cada porcentaje de cemento (0%, 5%, 10% y 15%), previamente compactadas con su respectiva humedad óptima determinada mediante el ensayo Proctor normal. Las muestras fueron curadas durante un periodo de 7 días antes de ser sometidas a la carga axial.

Los resultados del ensayo de compresión inconfiada evidenciaron un aumento progresivo en la resistencia del material conforme se incrementó el contenido de cemento, confirmando el efecto positivo de la estabilización. El suelo natural presentó una resistencia muy baja, como era de esperarse dada su baja cohesión. Sin embargo, al mezclar el cemento en proporciones del 5%, 10% y 15%, se observó un incremento significativo en la resistencia, siendo este efecto más evidente a partir del 10%.

Figura 15 Curva de deformación a 0% de cemento-1*Figura 16 Curva de deformación a 0% de cemento-2*

En las gráficas correspondientes al 0% de cemento se observa un comportamiento típico de un suelo natural sin estabilizante. Ambas muestras alcanzan un esfuerzo máximo cercano a los

0.96 kN y 1.75 kN, respectivamente con desplazamientos de aproximadamente 3.1 mm y 1.95 mm. Esto muestra una resistencia relativamente baja, lo cual es esperado en materiales no tratados. El incremento progresivo de la carga hasta el punto de falla es suave, con una reducción de la carga que indica pérdida de estructura.

Figura 17 Curva de deformación a 5% de cemento-1

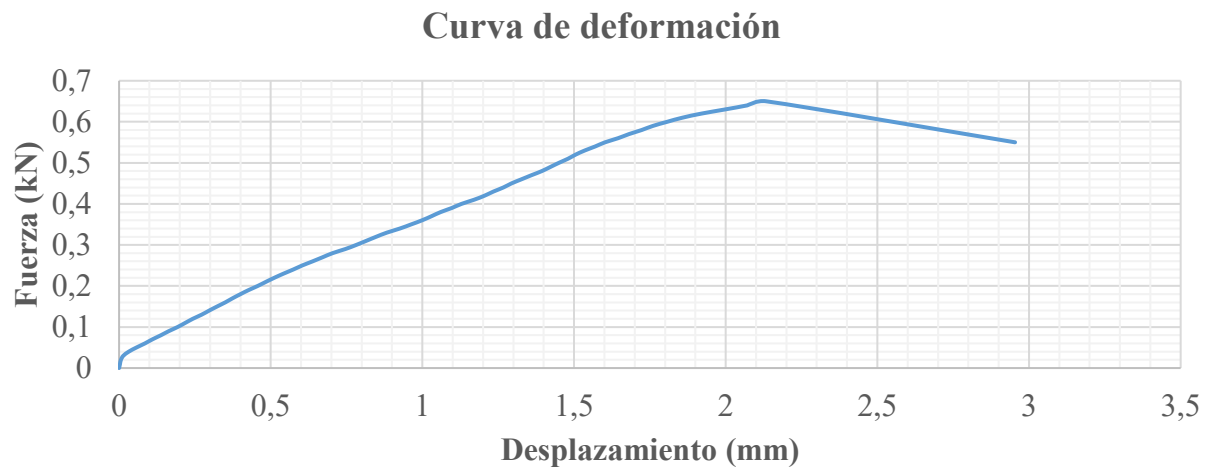
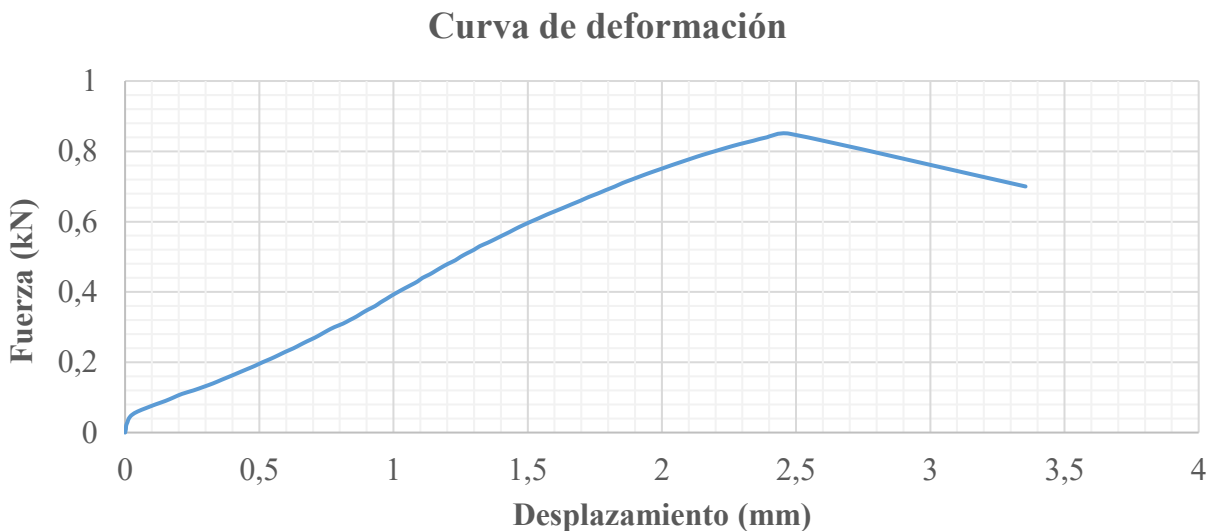


Figura 18 Curva de deformación a 5% de cemento-2



En estas graficas de 5% se evidencia una mejora en la capacidad respecto al 0%, aunque no tan marcada. Se alcanzan valores de fuerza máxima de 0.85 kN y 0.65 kN, en desplazamientos

cercanos a 2.4 mm y 2.15 mm. Aunque hay una ganancia su capacidad, el comportamiento refleja una transición dúctil. Esto indica que el nivel de estabilización comienza a ser efectivo, pero aún no genera un cambio significativo en la estructura del suelo.

Figura 19 Curva de deformación a 10% de cemento-1

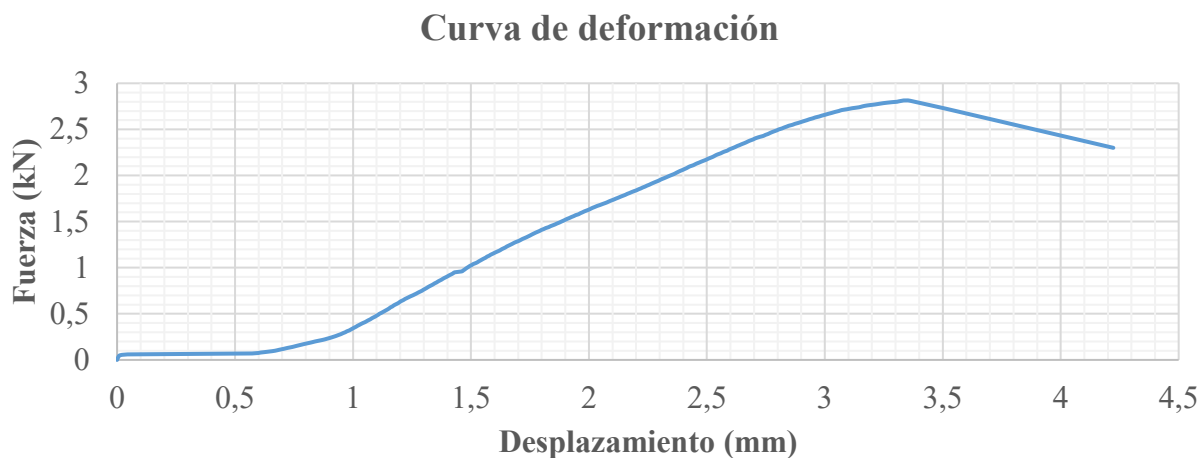
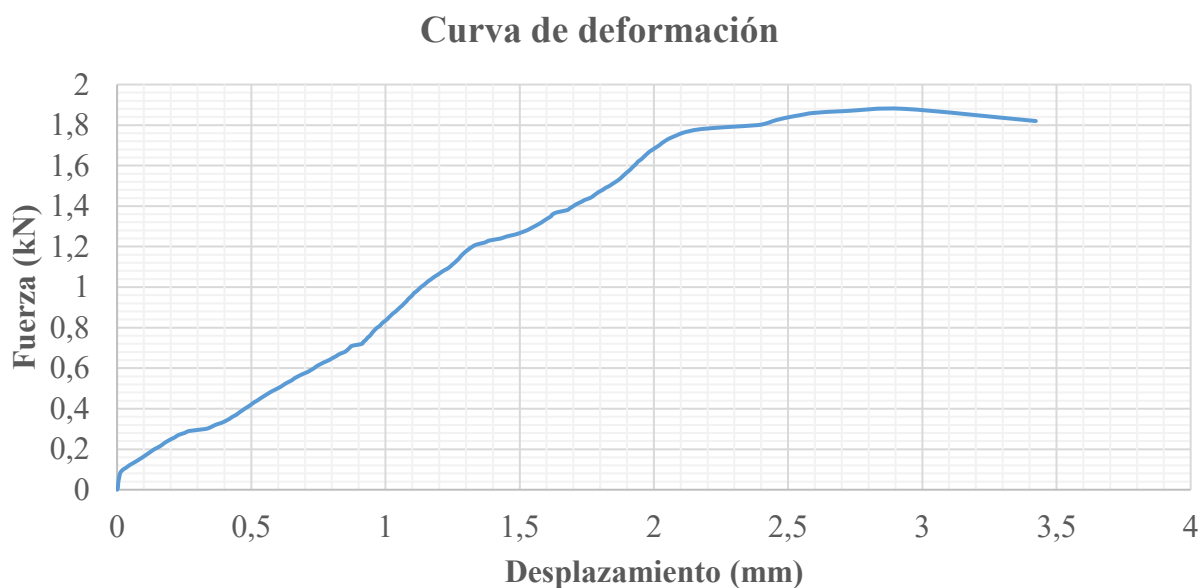


Figura 20 Curva de deformación a 10% de cemento-2



Al incorporar un 10% de cemento al suelo natural, se observa una mejora notable en la resistencia a la compresión simple. Las muestras evaluadas alcanzaron cargas máximas de 1.9 kN

y 2.8 kN, lo que representa un incremento significativo frente a los porcentajes menores de estabilización. Esta ganancia en resistencia se debe a la formación de enlaces del cemento que incrementan la cohesión interna del material y reducen la deformabilidad del suelo.

La grafica presenta un ascenso más pronunciado que en los porcentajes previos, lo que indica un aumento en la rigidez del material. El desplazamiento al momento de falla se registró en 2.9 mm y 3.35 mm, indicando una ligera pérdida de ductilidad. Esta reducción de deformabilidad se asocia al desarrollo de una estructura interna más rígida por efecto del cemento, que limita el comportamiento plástico del suelo estabilizado.

Este comportamiento revela que el suelo tratado con un 10% de cemento comienza a manifestar características de un material más frágil: sufre una menor deformación antes de alcanzar la falla. No obstante, esta fragilidad aún se mantiene dentro de niveles aceptables, haciendo de este porcentaje una alternativa técnica eficiente que proporciona una alta resistencia sin comprometer completamente la capacidad del material para absorber energía durante la carga.

Figura 21 Curva de deformación a 15% de cemento-1



Figura 22 Curva de deformación a 15% de cemento-2

Finalmente, con un 15% de cemento, el suelo alcanza su mayor resistencia, con cargas máximas entre 10.0 y 10.5 kN. Las curvas evidencian un ascenso muy pronunciado seguido de una caída brusca, comportamiento que corresponde a materiales con un carácter netamente frágil. El desplazamiento al momento de la falla se sitúa entre 3.4 y 4.0 mm, lo cual confirma que el suelo ha perdido gran parte de su capacidad de deformación plástica.

Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión inconfiada permiten evidenciar de forma clara la influencia del cemento sobre la resistencia mecánica del suelo laterítico estabilizado. El suelo sin estabilizar presentó un esfuerzo máximo de 0.67 MPa, valor común de un material natural con baja capacidad estructural. Al incorporar un 5% de cemento, se observó una disminución inesperada del esfuerzo máximo dando 0.37 MPa, lo cual sugiere posibles deficiencias en el proceso de compactación, curado o mala distribución del cemento. A partir del 10% de cemento, se evidencia una mejora significativa, alcanzando un esfuerzo máximo de 1.16 MPa, lo que demuestra el inicio de una reacción efectiva y la formación de una muestra que incrementa la resistencia del suelo. Finalmente, con el 15% de cemento, se logra un esfuerzo máximo de 5.03 MPa, indicando una estabilización altamente eficiente, con características de rigidez y comportamiento típicas de materiales estabilizados con cemento. Cabe resaltar que estos valores de esfuerzo máximo fueron calculados a partir de las fuerzas máximas registradas en cada muestra, dividiendo la fuerza entre el área de la sección transversal de los cilindros ensayados, de acuerdo con la fórmula clásica del esfuerzo axial.

Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo principal evaluar el comportamiento del suelo laterítico estabilizado con cemento mediante el ensayo de compresión inconfínada, con miras a su aplicación en el mejoramiento o rehabilitación de taludes y terraplenes en el municipio de La Primavera, Vichada. Para alcanzar este propósito, se definieron una serie de objetivos específicos que orientaron la ejecución metodológica y experimental, los cuales fueron abordados de manera progresiva y sistemática.

En primer lugar, se procedió a determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo laterítico, conocido localmente como ripio. Se realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg, y clasificación bajo los sistemas SUCS y AASHTO. Los resultados mostraron que el material presenta un bajo contenido de finos como se muestra en la tabla 1, así como un índice de plasticidad de apenas 1.35 %, lo que permite clasificarlo como un suelo tipo A-2-4 según la AASHTO y como SP (arena mal gradada) según SUCS. Estas características indican que el ripio es un material granular con baja cohesión natural, pero con un buen potencial para estabilización, dada su escasa interferencia con la reacción del cemento.

Seguidamente, se abordó la identificación de las cantidades adecuadas de cemento para estabilizar el suelo. Se eligieron cuatro porcentajes los cuales fueron 0 %, 5 %, 10 % y 15 %, para evaluar el comportamiento del material frente a la adición de cemento. Para cada mezcla se elaboraron muestras compactadas siguiendo el ensayo Proctor normal, determinando su humedad óptima y densidad seca máxima. Estos datos fueron fundamentales para preparar los especímenes de compresión inconfínada. Los resultados mostraron que la humedad óptima aumentó con la dosificación de cemento hasta el 10 %, pero decreció levemente al 15 %, reflejando posibles interacciones químicas entre el suelo y el cemento que modifican el comportamiento del agua en la mezcla.

En cuanto al tercer objetivo, se evaluó el comportamiento estático de los especímenes estabilizados mediante el ensayo de compresión inconfínada utilizando moldes de tubos de PVC de 2 pulgadas de diámetro por 4 de altura, y curadas por 7 días antes de ser ensayadas en una máquina Masterload. Se realizaron dos muestras por cada porcentaje de cemento, un total de ocho ensayos. Las curvas de fuerza vs desplazamiento obtenidas evidencian un cambio significativo en el comportamiento del suelo con el aumento del contenido de cemento. Las muestras naturales es

decir a 0 % de cemento, mostraron un comportamiento dúctil, con cargas máximas menores y desplazamientos amplios, mientras que a partir del 10 % se observó un comportamiento más frágil, con incrementos en la fuerza máxima, pero con menor deformación antes de la falla. El comportamiento más frágil y resistente se alcanzó con el 15 % de cemento, donde las curvas presentan picos pronunciados y caídas más contundentes.

Finalmente, se procedió a comparar la respuesta del suelo frente a los diferentes porcentajes de cemento, utilizando como criterio el esfuerzo máximo alcanzado por cada mezcla. Para ello, las cargas máximas obtenidas en el ensayo fueron transformadas en esfuerzos (MPa) mediante la fórmula de esfuerzo axial, considerando el área transversal de los moldes de PVC. Se obtuvo un esfuerzo de 0.67 MPa para el suelo natural, mientras que con 5 % de cemento se observó un descenso a 0.37 MPa, lo cual podría estar relacionado con una mala compactación o una distribución no homogénea del cemento. A partir del 10 % se evidenció una mejora significativa de 1.16 MPa, y con el 15 % se alcanzó el valor más alto llegando a 5.03 MPa, indicando que la estabilización fue altamente efectiva y que el suelo adquirió características mecánicas superiores.

En general, los resultados permitieron dar cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados, demostrando que la adición progresiva de cemento mejora las propiedades mecánicas del ripio, haciéndolo viable para su uso en obras de infraestructura como taludes y terraplenes. Específicamente, esta investigación concluye que el suelo puede ser utilizado de manera efectiva gracias a su comportamiento frente a un criterio reconocido en la ingeniería como “la resistencia a la compresión” de 2.5 MPa. Dicho valor, si bien es propio de especificaciones más exigentes como la del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) para bases de pavimento, se toma como un indicador de alta calidad para asegurar que el material adquiriera una buena estructura y durabilidad superior. Se demostró experimentalmente que, al ser estabilizado con un 15% de cemento, el material no solo alcanza, sino que supera este valor, obteniendo una resistencia de 5.03 MPa, lo que confirma su viabilidad técnica y proporciona un parámetro de diseño para su implementación.

Como recomendación para futuros proyectos de investigación con los mismos fines, se aconseja trabajar el material con porcentajes de humedad que no superen el 15% en estado natural y 20% en la estabilización con cemento, ya que esto facilitara el manejo del material para la determinación de las humedades óptimas. Se recomienda de igual manera usar porcentajes no mínimos a 10% cemento ya que a partir de este porcentaje la investigación del proyecto determinó que comienza a ser viable la estabilización del suelo laterítico.

6. Referencias

- Benjamin, P. (1970). *Laterite Genesis, Location, Use*. Springer.
- Caro, S., & Caicedo, B. (2017). Tecnologías para vías terciarias: perspectivas y experiencias desde la academia. *Revistas Uniandes* 1(45), 12-21. Obtenido de <https://doi.org/10.16924/revinge.45.3>
- Cementos Argos S.A. (s.f.). *Cartilla suelo-cemento: soluciones viales*. Obtenido de https://colombia.argos.co/fichas_tecnicas/Cartilla-Suelo-cemento-soluciones-viales.pdf
- El-Metwally, A., & Mohamed, A. E.-S. (1987). *Characterization of Sodium Chloride Stabilized Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Low-Volume Roads in Egypt*. Universidad de Leeds.
- Finesoftware. (s.f.). Obtenido de <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/es/compaction-test-proctor-01/>
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *Información general*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co>
- Jaime, S. (2009). Suelos residuales. En S. Jaime, *Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico* (págs. 1-50). Bucaramanga: Ediciones UIS.
- Jonatan, G. (2019). *Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de Caolín*. [Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia] Repositorio Institucional. Bogotá. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10983/23731>
- Mary, Y. (2021). *Efectos del uso de cemento en la estabilización de suelos dispersivos de la carretera Desvío Desaguadero - Kelluyo, Puno 2021*. [Trabajo de grado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12901>
- Narváez, L. (2017). Vías terciarias: motor del desarrollo económico rural. *Revista de Ingeniería*, 1(45), 80-87. Obtenido de <https://doi.org/10.16924/revinge.45.11>
- Paul, G. A., Alfonso, P. S., José, A. G., & Edda, Y. O. (2002). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. Sanfandila: Secretaría de comunicaciones y transportes; Instituto mexicano del transporte. Obtenido de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt201.pdf>
- Rodrigue, C. K., Abdolhossein, N., Leonel, T., Adeyemi, A., Jean, N. Y., Juvenal, G. D., . . . Bassam, T. (2022). *Lateritic soils based geopolymer materials: A review*. Construction and

Building Materials Volume 344(128157):1-21. Obtenido de
[Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2022.128157](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128157)

Soltec, F. E. (2023). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*.

Tavares, Weiss, Souza, & Costa, M. d. (2015). *Permeabilidad de suelos lateríticos por diferentes métodos*. Seminario: Ciencias Exactas de la Tecnología.