

**Lineamientos para la Estabilización Química de Suelos Aplicado a Suelos Procedentes
de Ceniza Volcánica Estabilizada con Cal.**



Universidad
del Cauca

Michell Tatiana Peña Jiménez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Civil

Director: PhD: Lucio Gerardo Cruz Velasco

Codirector: MSc: Andrea Carolina Paredes Cerón

Popayán

2025

**Lineamientos para la Estabilización Química de Suelos Aplicado a Suelos Procedentes
de Ceniza Volcánica Estabilizada con Cal.**

Michell Tatiana Peña Jiménez

Director: PhD: Lucio Gerardo Cruz Velasco

Codirector: MSc: Andrea Carolina Paredes Cerón

Trabajo de investigación para optar el título de Ingeniería civil

Universidad del Cauca

Popayán, 2025

CONTENIDO

1Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1Resumen.....	3
1.2Planteamiento del Problema.....	4
1.2.1Descripción de la Situación Problemática.....	4
1.3Objetivos de la Investigación.....	6
1.3.1Objetivo General.....	6
1.3.2Objetivos Específicos.....	6
1.4Justificación de la Investigación.....	6
1.5Resultados esperados e impacto del proyecto.....	13
1.6Plan de Laboratorio.....	14
2.Capítulo 2: Marco Teórico.....	17
2.1Estabilización de Suelos.....	19
2.2Métodos De Mejoramiento De Suelos.....	20
a) Excavación y Sustitución:.....	22
b) Compactación.....	23
c) Geo sintéticos.....	25
d) Columnas de Grava.....	26
e) Jet-Grouting.....	27
f) Compactación Dinámica.....	28
g) Precarga.....	28

h) Vibro flotación	29
i) Vibro sustitución	30
j) Estabilización química	32
k) Mechas Drenantes	35
i) Estabilización biológica	36
2.3 Suelos Derivados de Cenizas volcánicas (SDCV)	38
2.4 Estabilización Química de Suelos con Cal.....	43
2.5 Estabilización de Suelos Derivados de Ceniza Volcánica con Cal.....	48
2.6 Ettringita.....	51
2.7 Marco normativo	52
3 Capítulo 3: Toma de muestras y plan experimental suelo natural	54
3.1 Observaciones previas de los suelos en su estado natural.....	55
3.1.1 Ensayos de identificación de suelos:	55
3.1.2 Ensayos de comportamiento:.....	55
3.2 Muestreo de Suelos	56
3.3 Descripción de los suelos explorados	56
3.4 Ensayo del análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E – 213 – 13)	58
3.5 Ensayo sobre el análisis granulométrico por medio del hidrómetro (INV E – 124 – 07)	62
3.6 Consistencia de los Suelos (INV E – 125 – 13, INV E – 126 – 13 e INV E – 181 – 13).....	64
3.7 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).....	69

3.8PH de los Suelos (INV E – 131 – 13).....	71
3.9Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación) (INV E – 141 – 13)	73
3.10Compresión inconfínada en muestras de suelos (INV E – 152 – 13).....	76
3.11Ensayo de estabilidad al agua.....	81
3.12Resumen de los resultados obtenidos	89
4Capítulo 4: Plan experimental de los suelos estabilizados	90
4.1Determinación de % óptimo de cal teórico	90
4.1.1Método gráfico para estimar la proporción de cal requerida.....	91
4.1.2Método usando la medición de pH para estimar el porcentaje de cal requerida.	93
4.1.3Ecuación propuesta por Hill y Davidson.....	95
4.2Resultados de los ensayos realizados al suelo estabilizado.....	98
4.2.1Límites de consistencia en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado .	98
4.2.2Compresión inconfínada en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado	99
4.2.3Compresión inconfínada en estado saturado por capilaridad en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado	100
4.2.4Compresión inconfínada en estado saturado por inmersión en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado	101
5Capítulo 5: Análisis de datos obtenidos del suelo estabilizado	102
5.1Análisis de resultados de los límites de consistencia en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado	102

5.2	Análisis de resultados de la compresión inconfínada en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado	107
5.3	Análisis de resultados de la compresión inconfínada en estado saturado por capilaridad en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado	111
5.4	Análisis de resultados de la compresión inconfínada en estado saturado por inmersión en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado	115
6	Capítulo 6: Análisis estadístico.....	119
7	Capítulo 7: Conclusiones, Discusión y Lineamientos de estabilización con Cal	129
7.1	Conclusiones y Discusión	129
7.2	Lineamientos para la Estabilización Química de Suelos Derivados de Ceniza Volcánica en el Cauca con Cal	131
7.2.1	Evaluar las propiedades del suelo a estabilizar:	131
7.2.1.1	Propiedades físicas del suelo:.....	132
7.2.1.2	Propiedades mecánicas del suelo:	132
7.2.1.3	Resistencia inicial del suelo:	132
7.2.1.4	Propiedades químicas:	133
7.3	Selección del estabilizante:	133
7.3.1	Compatibilidad química:	133
7.3.2	Identificación de la necesidad de estabilización:.....	133
7.3.3	Recomendaciones basadas en la investigación y otros estudios realizados	134
7.3.4	Diseño de mezcla de cal y plan de laboratorio	135
7.3.4.1	Determinación del contenido óptimo del agente estabilizador “cal”:	135

7.3.4.2Plan de laboratorio:	135
7.3.4.3Evaluación de los tiempos de curado:	136
7.3.4.4Ensayos químicos:	136
7.3.4.5Estabilidad volumétrica:	136
7.3.5Criterios de evaluación para la ejecución en campo:	137
8 Capítulo 8: Bibliografía	138

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Administración de la red nacional vial.	5
Ilustración 2. Disponibilidad de documentos en Scopus.	8
Ilustración 3. Publicaciones en Colombia.....	8
Ilustración 4. Este mapa clasifica los suelos del territorio colombiano con base en criterios como textura, fertilidad, uso potencial, limitaciones y capacidad de uso, entre otros.....	10
Ilustración 5. Esquema economía circular.....	12
Ilustración 6. Etapas del plan de laboratorio.....	15
Ilustración 7. Técnicas de mejoramiento de suelos.....	21
Ilustración 8. Estabilización de suelos.....	22
Ilustración 9. Esquema del proceso de compactación.....	23
Ilustración 10. Distribución de los suelos derivados de ceniza volcánica en Colombia.....	39
Ilustración 11. Propiedades índices de suelos derivados de ceniza volcánicas.....	40
Ilustración 12. Propiedades índices de suelos derivados de ceniza volcánicas.....	41
Ilustración 13. Extracción de la muestra y conservación del material.....	56
Ilustración 14. Lugar de extracción del suelo – Vía Coconuco, Cauca.....	57
Ilustración 15. Lugar de toma del suelo – Facultad de Ingeniería Civil.....	57
Ilustración 16. Lugar de toma del suelo – Vía Timbío, Cauca.....	57
Ilustración 17. Tamizado para el análisis granulométrico.....	58
Ilustración 18. Tamices utilizados en el ensayo.....	59
Ilustración 19. Fases de la granulometría obtenida del hidrómetro.....	63

Ilustración 20. Ensayo de límite líquido.	65
Ilustración 21. Ensayo de límite plástico	66
Ilustración 22. Ensayo de gravedad específica (Gs)	70
Ilustración 23. pH de los 3 suelos en estudio (INV E – 131 - 13)	72
Ilustración 24. Ensayo de compactación Proctor Estándar con Molde Japonés.	74
Ilustración 25. Ensayo de compresión simple.....	77
Ilustración 26. Ensayo de estabilidad al agua realizado por inmersión.	81
Ilustración 27. Ensayo de estabilidad al agua realizado por capilaridad.....	82
Ilustración 28. Ficha Técnica Argos – Cal hidratada de uso general	91
Ilustración 29. Método gráfico para la estabilización con Cal.....	92

Índice de tablas

Tabla 1. Convención Mapa de suelos de Colombia.....	11
Tabla 2. Ensayos a realizar al suelo.	16
Tabla 3. Estabilizantes Tradicionales.....	34
Tabla 4. Estabilizantes No Tradicionales.....	34
Tabla 5. Clase de bacterias y su función correspondiente	37
Tabla 6. Recomendación del método de estabilización según el tipo de suelo.....	37
Tabla 7. Lista de ensayos que se practicarán al suelo natural.....	54
Tabla 8. Coordenadas de los lugares de toma de muestras.	58
Tabla 9. Datos del ensayo de granulometría – Suelo a, b y c.....	60
Tabla 10. Resultados finales del ensayo de granulometría – Suelo a, b y c.....	60
Tabla 11. Datos del ensayo del hidrómetro – Suelo a, b y c	64
Tabla 12. Datos obtenidos del ensayo (INV E – 125 – 13).....	67
Tabla 13. Límites de consistencia y clasificación del suelo.....	68
Tabla 14. Resultados del ensayo de gravedad específica – Suelo a, b y c	71
Tabla 15. Datos obtenidos del ensayo de pH	73
Tabla 16. Peso unitario seco máximo y humedad óptima.....	74
Tabla 17. Datos del ensayo de compresión inconfina da	79
Tabla 18. Estabilidad al agua por inmersión en el Suelo de Coconuco	83
Tabla 19. Estabilidad al agua por capilaridad en el Suelo de Coconuco	83
Tabla 20. Estabilidad al agua por inmersión en el Suelo Fic	84

Tabla 21. Estabilidad al agua por capilaridad en el Suelo Fic	84
Tabla 22. Estabilidad al agua por inmersión en el Suelo de Timbío.....	85
Tabla 23. Estabilidad al agua por capilaridad en el Suelo de Timbío	86
Tabla 24. Datos del ensayo de compresión simple de las probetas saturadas por capilaridad	88
Tabla 25. Resultados obtenidos de los tres suelos en estado natural en estudio	89
Tabla 26. Lista de ensayos que se practicarán al suelo con el estabilizante (Cal)	90
Tabla 27. Datos obtenidos del método gráfico.....	93
Tabla 28. Datos obtenidos del método normalizado (INV E – 601-13).....	95
Tabla 29. Datos obtenidos del método empírico.....	98
Tabla 30. Datos obtenidos de los diferentes métodos utilizados.....	98
Tabla 31.Límites de consistencia para los tres suelos estudiados	98
Tabla 32.Resistencia promedio de la compresión inconfínada del Suelo Coconuco, F.I.C y Timbío, con adición de cal en estado seco posterior a la etapa de curado	99
Tabla 33.Resistencia promedio de la compresión inconfínada saturados por capilaridad de los 3 suelos estabilizados.....	100
Tabla 34.Resistencia promedio de la compresión inconfínada saturados por inmersión de los 3 suelos estabilizados.....	101
Tabla 35.Interpretación del Coeficiente de variación	120
Tabla 36. Coeficiente de Variación	120
Tabla 37. estadístico de la resistencia en estado seco y húmedo del suelo Coconuco.....	121
Tabla 38.Análisis de la resistencia en estado seco y húmedo obtenido del análisis estadístico del suelo Coconuco	122

Tabla 39. Análisis de la resistencia en estado seco y húmedo obtenido del análisis estadístico del suelo F.I.C 124

Tabla 40. Análisis 9 de la resistencia en estado seco y húmedo obtenido del análisis estadístico del suelo Timbío..... 125

Índice de gráficas

Gráfica 1. Curva granulométrica – Suelo a	60
Gráfica 2. Curva granulométrica – Suelo b	61
Gráfica 3. Curva granulométrica – Suelo c	61
Gráfica 4. Límite líquido de los suelos Coconuco, F.I.C y Timbío	67
Gráfica 5. Carta de plasticidad de Casa Grande	69
Gráfica 6. Resultados obtenidos del ensayo de compactación para el suelo Coconuco	75
Gráfica 7. Resultados obtenidos del ensayo de compactación para el suelo FIC	75
Gráfica 8. Resultados obtenidos del ensayo de compactación para el suelo Timbío	76
Gráfica 9. Compresión inconfínada para el suelo de Coconuco (Probetas 1,2 y 3).....	79
Gráfica 10. Compresión inconfínada para el suelo Fic (Probetas 1,2 y 3)	80
Gráfica 11. Compresión inconfínada para el suelo Timbío (Probetas 1,2 y 3).....	80
Gráfica 12. Compresión inconfínada en estado húmedo por capilaridad para el suelo Coconuco (Probetas 1 y 2).	83
Gráfica 13. Compresión inconfínada en estado húmedo por capilaridad para el suelo F.I.C (Probetas 1 y 2). ...	85
Gráfica 14. Compresión inconfínada en estado húmedo por capilaridad para el suelo Timbío (Probetas 1,2 y 3).	86
Gráfica 15. pH obtenido del Suelo FIC, Coconuco y Timbío (en agua).....	94
Gráfica 16. Resultado obtenido del hidrómetro para el Suelo de F.I.C	96
Gráfica 17. Resultado obtenido del hidrómetro para el Suelo de Coconuco.	97
Gráfica 18. Resultado obtenido del hidrómetro para el Suelo de Timbío.....	97
Gráfica 19. Límite Líquido y Límite Plástico de los Suelos Coconuco, F.I.C y Timbío posterior a la etapa de curado, respectivamente.	102
Gráfica 20. Resistencia a la compresión inconfínada del Suelo Coconuco, F.I.C y Timbío, en estado seco posterior a la etapa de curado, respectivamente.	107
Gráfica 21. Resistencia a la compresión inconfínada del Suelo Coconuco, F.I.C y Timbío, en estado saturado por capilaridad durante 24 horas posterior a la etapa de curado, respectivamente.	111
Gráfica 22. Resistencia a la compresión inconfínada del Suelo Coconuco, F.I.C y Timbío, en estado saturado por inmersión durante 24 horas posterior a la etapa de curado, respectivamente.	115

Aclaración de la autoría y de confidencialidad

Este anteproyecto de trabajo de grado y el trabajo de grado mismo es en desarrollo de una idea de investigación de los Profesores Andrea Carolina Paredes y Lucio Cruz y su dirección, la autoría pertenece tanto a los profesores Andrea Carolina Paredes y Lucio Cruz, como al estudiante del trabajo de grado que firma a continuación.

También me comprometo a manejar la información de manera confidencial y responsable.

Michell Tatiana Peña Jimenez
cc: 1002971503

ESTUDIANTE: Michell Tatiana Peña Jiménez

1 Capítulo 1: Introducción

La generación de resultados en las diferentes investigaciones surgidas en el ámbito académico ha llevado a la sociedad a la búsqueda de un mejoramiento en las condiciones de vida, siendo fundamental en la misión de las instituciones educativas la indagación de nuevos conocimientos que fomenten mejores condiciones para la comunidad. (INVIAS et al., 2022)

En el desarrollo de esta investigación se explicarán algunos de los mecanismos que existen para el mejoramiento de suelos, enfocando la atención especialmente en la estabilización química aplicado a suelos derivados de ceniza volcánica (SDCV) del Cauca, dado que la finalidad del proyecto es estabilizarlos con cal, en búsqueda del mejoramiento del sistema vial terciario.

De acuerdo con (Constitución Política de Colombia, 1991a) las vías de comunicación terrestre cumplen dos funciones esenciales, la primera permitir la libre circulación por el territorio nacional y la segunda contribuir al desarrollo económico; con este precedente los ingenieros de vías actualmente se enfrentan a las siguientes situaciones:

Primera, según el informe Nacional de Competitividad 2021-2022 realizado por el Consejo Privado de Competitividad, (2022) se encontró que “las vías terciarias representan más del 70 % de la red vial departamental. No obstante, un 75 % se encuentra en mal estado” este informe considera a las instituciones e infraestructura como determinantes básicos de la competitividad y afirma que “el desarrollo de estos dos pilares es una condición necesaria para materializar los beneficios de los avances en capital humano, eficiencia, innovación y sofisticación”

Segunda, los suelos colombianos están constituidos aproximadamente en un 24% de su territorio por suelos con CBR entre 2% y 25%, teniendo en cuenta que la normativa vigente (INVIAS et al., 2022) considera inaceptable para subrasante todo suelo con $CBR < 3\%$ se infiere que se necesita considerar alternativas de mejoramiento de suelos para garantizar un suelo de fundación adecuado para la comunicación vial.

Por otra parte, durante la recolección de datos referentes a métodos de estabilización para el mejoramiento de los suelos derivados de cenizas volcánicas, los cuales constituyen gran parte de los encontrados en las vías terciarias en la región del Cauca, se encontró que a través de una adecuada caracterización estos pueden ser estabilizados químicamente a través de diferentes aditivos tradicionales tales como cal, cemento portland, cenizas volantes, entre otras. (Montejo Fonseca et al., 2018)

Dichos datos encontrados en investigaciones consultadas previamente constatan grandes ventajas técnicas y económicas al momento de estabilizar estos suelos usando como agente estabilizador la cal (J. Rivera et al., 2022). Algunas de estas ventajas serán mencionadas a continuación y se buscará comprobar su eficiencia para la estabilización de los suelos presentes en la zona del Cauca.

Versatilidad en la granulometría del suelo: El método de estabilización con cal es efectivo en suelos de granulometría media, moderadamente fina y fina. (Asociación Nacional de la Cal, 2004) Esto indica que la cal puede aplicarse en una amplia gama de tipos de suelos.

Reducción de plasticidad, reducción expansión, aumento de trabajabilidad y resistencia: Estas características pueden prevenir problemas en la infraestructura vial construidas sobre estos suelos debido al hinchamiento/expansión y contracción excesiva en los mismo, además de que facilita las labores de construcción y manipulación lo que, sumado a la resistencia ganada, aumenta significativamente la durabilidad y la integridad de las estructuras construidas sobre estos suelos. (J. Rivera et al., 2022)

Eficiencia demostrada en diversas investigaciones: Las investigaciones demuestran que la cal puede ser un estabilizador eficaz incluso en suelos con contenidos de arcilla tan bajos como el 7 por ciento y en suelos con índices de plasticidad por debajo de 10. (Asociación Nacional de la Cal, 2004)

Recomendaciones de organizaciones reconocidas: Tanto la Asociación Nacional de Cal, como el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos respaldan la efectividad de la

estabilización con cal, aunque con diferentes recomendaciones proporcionan una base sólida para confiar en la aplicación de la cal como estabilizador, esto refuerza su credibilidad y utilidad.

Compatibilidad con varios tipos de suelo: La clasificación de AASHTO establece que varios tipos de suelo, como A-4, A-5, A-6, A-7, A-2-6 y A-2-7, son adecuados para la estabilización con cal. Esto amplía el espectro de suelos en los que se puede aplicar este enfoque. (INVIAS et al., 2022)

Control de contenido de cal: Se puede lograr una estabilización de calidad con un contenido de cal del 2-8%. Esto sugiere que la cantidad de cal necesaria para lograr los resultados deseados es relativamente baja, lo que puede entenderse como un ahorro significativo frente a otros estabilizadores como el cemento portland.

Por lo anterior y tomando como base los efectos de la aplicación de cal, tales como la reducción de la humedad natural del suelo, modificación de la granulometría, aumento de la permeabilidad, mayor trabajabilidad, reducción del índice de plasticidad, reducción del potencial de cambios volumétricos, modificación de las características de compactación, aumento inmediato de la consistencia, mayor resistencia a largo plazo, la presente investigación trata de enfocar estas características de la estabilización por medio de la cal, hacia las vías terciarias del departamento del Cauca en búsqueda de generar oportunidades dentro del marco de la investigación para la excelencia.

1.1 Resumen

El estudio de los suelos es sumamente extenso y complejo, dado que los datos que se pueden obtener de manera detallada se encuentran limitados a una serie de muestras aleatorias que solo representan un punto en el espacio; de forma que, el suelo es un universo complejo que requiere de un análisis adecuado de datos para la correcta toma de decisiones con fines de ingeniería civil, ahora bien, cada obra civil necesita de unas condiciones determinadas en el suelo para su óptimo desempeño.

Con fines sociales, las vías cumplen dos funciones esenciales; la primera, es permitir la libre circulación por el territorio nacional y la segunda, contribuir al desarrollo económico, de acuerdo con Constitución Política de Colombia, (1991b).

Así pues, para el cumplimiento de estos objetivos se deben considerar alternativas que permitan que las estructuras viales perduren en el tiempo, siendo así de vital importancia el terreno en donde se apoya la estructura que se desee construir. Para ello, se debe contar con el adecuado manejo de métodos para la estabilización de suelos que garanticen un sedimento de fundación adecuado para el tránsito vehicular, dado el caso que éste no cuente con la capacidad de soporte y demás propiedades idóneas para su función.

En el desarrollo de esta investigación, se busca orientar y evaluar la estabilización química de suelos procedentes de ceniza volcánica utilizando la cal como agente estabilizante.

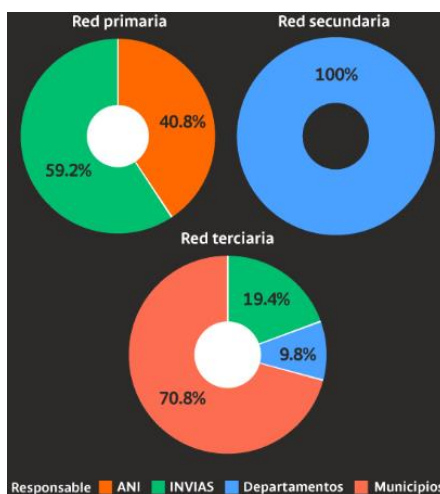
1.2 Planteamiento del Problema

1.2.1 Descripción de la Situación Problemática

Partiendo desde la siguiente tesis se dará desarrollo al siguiente planteamiento de investigación: ¿cuáles son los lineamientos óptimos para la estabilización con cal de suelos con baja capacidad de soporte?, ahora bien dicha necesidad resulta ser demasiado extensa para la presente investigación y por consiguiente se plantea abordar la aplicación de la estabilización química de suelos aplicado a suelos procedentes de ceniza volcánica del Cauca estabilizada con cal, dado que la cal resulta ser un recurso de fácil acceso para las poblaciones; los suelos procedente de ceniza volcánica del Cauca representan un gran porcentaje de los suelos a los que se enfrentan las obras de ingeniería en el territorio Caucano (INVIAS et al., 2018) es importante resaltar que si bien es cierto que la cal pertenece al grupo de estabilizantes tradicionales el objetivo principal de la presente investigación radica en la definición de lineamientos claros para la adecuada estabilización de suelos procedentes de ceniza volcánica utilizando diferentes porcentajes de cal.

Según (Juanita Agudelo Arbeláez, 2022), la red vial en Colombia está compuesta por las vías primarias, secundarias y terciarias, las cuales se integran en alrededor de 205.745 km de vía. Las vías primarias tienen una longitud aproximada de 18.323 km de las que especialmente están a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS); del mismo modo, se estima que las secundarias corresponden a una longitud de 45.137 km de malla vial. Finalmente, se tiene conocimiento de que las vías terciarias son las más extensivas en el país y tiene aproximadamente 143.000 km de red.

Ilustración 1. Administración de la red nacional vial.



Fuente: Mintransporte, ANI, Inviás. 2022

Basado en lo anterior, es posible plantear esta investigación que pretende estudiar el comportamiento de la cal como agente estabilizador en suelos derivados de ceniza volcánica, los cuales no se han estudiado lo suficiente como para conocer las mejores opciones de estabilización cuando no posee las cualidades para ser usado como subrasante, a esto se le debe agregar que el 68% de la red vial nacional requiere mejoramiento (solo considerando vías terciarias). Este Proyecto busca dar una solución ofreciendo una guía de uso simple y funcional con recomendaciones y observaciones hacia los lineamientos para la estabilización química de suelos aplicado a suelos procedentes de ceniza volcánica del Cauca estabilizada con cal, divulgando la misma por medio de publicaciones o

conferencias para que logre emplearse en el mejoramiento de la red vial nacional, cuando realmente la metodología aplique.

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Proporcionar los lineamientos para la estabilización química de suelos aplicado a suelos procedentes de ceniza volcánica del Cauca estabilizada con cal para mejoramiento de la red vial terciaria.

1.3.2 Objetivos Específicos

Revisar bibliográficamente y concluir sobre las características físicas del suelo que resultan favorables para la estabilización química de suelos aplicado a suelos procedentes de ceniza volcánica del Cauca estabilizada con cal.

Proponer lineamientos que permitan establecer la estabilización química de suelos procedentes de ceniza volcánica del Cauca utilizando cal.

Aplicar los lineamientos propuestos a datos de una prueba de experimentación de estabilización de suelos ejecutados en el laboratorio de suelos de la Universidad del Cauca.

1.4 Justificación de la Investigación

Según se evidencia en el planteamiento del problema, el estudio la estabilización química de suelos aplicado a suelos procedentes de ceniza volcánica del Cauca estabilizada con cal, es un tema de relevancia a nivel regional toda vez que ofrece soluciones prácticas y accesibles para el mejoramiento de suelos en la región.

Como solución al problema de baja capacidad portante de los suelos, surge esta investigación, para ser usada en la fase del estudio geotécnico definitivo en la debida selección de la alternativa de tratamiento en el caso de haber identificado subrasantes con suelos débiles o problemáticos procedentes

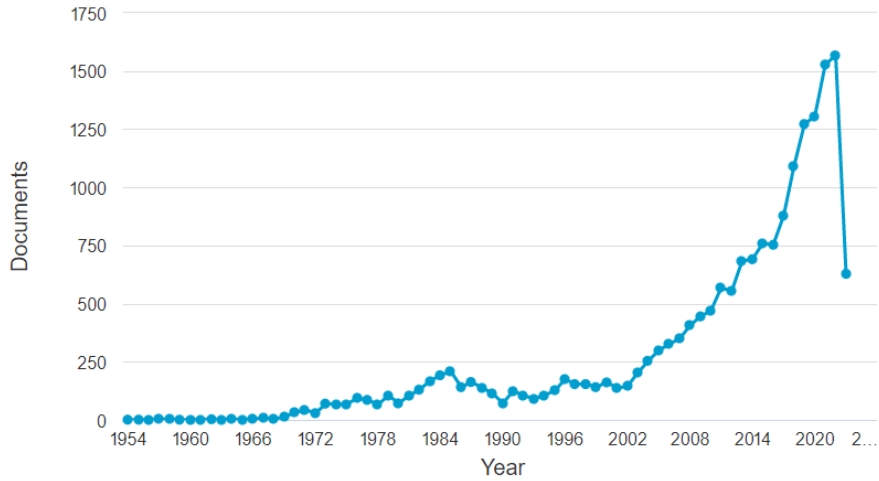
de ceniza volcánica del cauca, teniendo en cuenta si para el suelo obtenido es aplicable la estabilización con cal y de llegar así, en qué forma se debe aplicar para obtener los mejores resultados, considerando los factores que implican cada opción (afinidad, economía, disponibilidad y tiempo). (INVIAS et al., 2018)

El principal objetivo es orientar al ingeniero en la debida aplicación de la estabilización química de suelos aplicado a suelos procedentes de ceniza volcánica del cauca estabilizada con cal, tomando en cuenta que según el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito (INVIAS et al., 2018), cuando el espesor del suelo natural inadecuado es importante y no se puede colocar cargas directamente sobre él se realizan mejoramientos más complejos que la compactación, el resultado esperado es que la selección de mecanismos de mejoramiento permitan superar esta dificultad y que los suelos estabilizados sean idóneos para construir vías seguras, que cumplan con el objetivo de comunicar y que sean durables.

Por otra parte, las vías de comunicación tienen una función social dentro del crecimiento económico y por consiguiente es preciso invertir esfuerzos en su optimización como apoyo al desarrollo (Constitución Política de Colombia, 1991b). Asimismo, esta investigación pretende favorecer el establecimiento de una enseñanza generalizada de esta disciplina por lo que se dirige a un público muy amplio: Los estudiantes y docentes de ingeniería civil, quienes se encuentren realizando estudios geotécnicos y para quienes elaboren las especificaciones sobre mejoramientos de suelos.

En el mundo se han realizado 18,872 investigaciones relacionadas con estabilización de suelos desde 1954 hasta 2022, se presenta un comportamiento creciente sobre el tópico desde 2002, presentando un pico de 1567 publicaciones en 2022. Analizando la base de datos disponible en scopus.

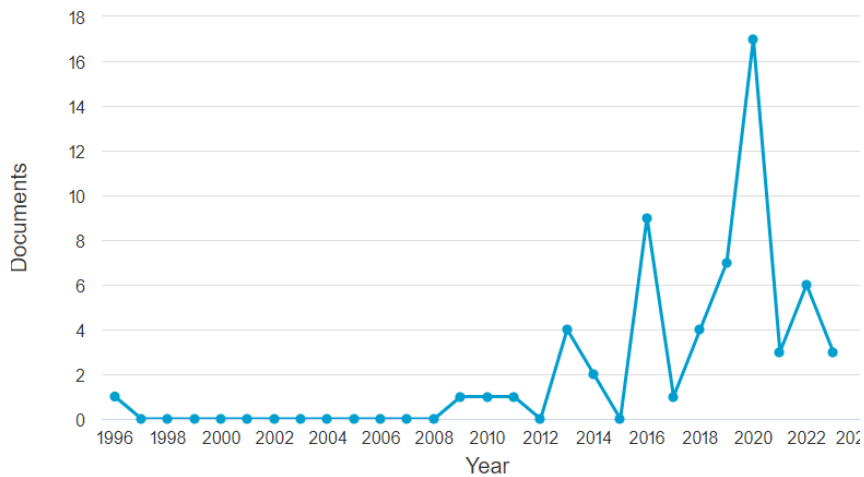
Ilustración 2. Disponibilidad de documentos en Scopus.



Fuente: Base de datos disponible en scopus. Scopus en mayo de 2022

Solo en Colombia se han realizado 60 publicaciones al respecto, de las cuales 44 documentos en scopus son artículos.

Ilustración 3. Publicaciones en Colombia



Fuente: Base de datos disponible en scopus. Scopus en mayo de 2022

En el caso de la Universidad del Cauca, en su repositorio se pueden encontrar 4 investigaciones hasta el momento (2023), las más antiguas realizadas por Orobio Quiñones & Valenzuela Ramírez, (2004) que trataron el tema de la “estabilización con productos no convencionales en la estabilización de suelos finos con cementantes hidráulicos” y la de Sandoval Vallejo, (2004) que trató la “Estabilización de arenas mediante polímeros acrílicos para su utilización en capas de pavimentos”,

también se encuentra la investigación realizada por Torres Valencia, (2007) “Estabilización de arcillas mediante polímeros acrílicos” y la más reciente por Cruz Henao, (2022), sobre “Estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica mediante activación alcalina de residuos de quema de bagazo de caña” Adicionalmente, se están realizando investigaciones sobre el uso de ceniza de café para estabilización de suelos.

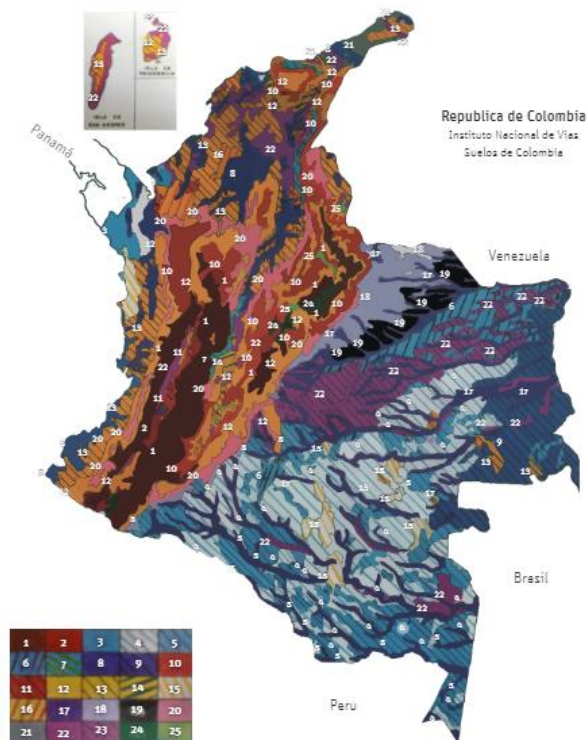
Se puede resumir globalmente las conclusiones derivadas de estos estudios afirmando que dada la diferencia química y mineralógica de cada suelo estudiado, los comportamientos con los estabilizantes varían significativamente, es decir, ningún estabilizante mostró un comportamiento igual para las diferentes muestra de suelo por lo que se hace obligatorio continuar con el estudio del impacto de los estabilizantes en los suelo locales de Colombia y particularmente en este caso del suroccidente de Colombia, con el fin de conocer estos suelos y poder de esta manera someterlos a procesos de mejoramiento que permitan la adaptabilidad de los mismos a las obras que se pretendan adelantar.

Por otra parte, el estudio de los suelos colombianos es un tema extenso y complejo, debido a su variabilidad geológica y climática, esto es consecuencia de que Colombia posee todos los pisos térmicos y pertenece a la zona tropical del globo, contiene una parte de la Cordillera de los Andes y 19 volcanes activos e inactivos, como resultado presenta fuertes cambios en sus condiciones climáticas, regímenes de lluvia, evaporación, radiación solar y de relieve, entre otros. (Noriega Armas et al., 2022)

También cabe señalar que los suelos en Colombia y en especial el suroccidente tienen bajos CBR, en general los suelos del país están constituidos aproximadamente en un 24% de sus territorios por suelos con CBR entre 2% y 25% según el mapa de suelos de Colombia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (1995) que se muestra en la Ilustración 4 y la Tabla 1; teniendo en cuenta que los suelos tolerables para subrasante son aquellos que tienen índice CBR, correspondiente a las condiciones de compactación de puesta en obra igual o superior a tres ($CBR \geq 3\%$) (INVIAS et al., 2022), se concluye la existencia de una necesidad, la de formular una guía para la estabilización de estos suelos con baja capacidad de soporte, ahora bien dicha necesidad resulta ser demasiado extensa para la

presente investigación y por consiguiente se plantea abordar la aplicación de estabilización química de suelos aplicado a suelos procedentes de ceniza volcánica del cauca estabilizada con cal, dado que la cal resulta ser un recurso de fácil acceso para las poblaciones y los suelos procedente de ceniza volcánica del cauca representan un gran porcentaje de los suelos a los que se enfrentan las obras de ingeniería en el territorio caucano, es importante resaltar que si bien es cierto la cal pertenece al grupo de estabilizantes tradicionales el objetivo principal de la presente investigación radica en la definición de lineamientos claros para la adecuada estabilización de suelos procedentes de ceniza volcánica con cal.

Ilustración 4. Este mapa clasifica los suelos del territorio colombiano con base en criterios como textura, fertilidad, uso potencial, limitaciones y capacidad de uso, entre otros.



Fuente: Mapa de suelos de Colombia. Bogotá, Colombia (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1995)).

Tabla 1. Convención Mapa de suelos de Colombia

Convención	Descripción	Rango de CBR estimado	Región predominante	Porcentaje
(4) Rayado azul claro	Suelos sedimentarios ubicados en relieve ondulado a quebrado (lomeríos)	3-10	Amazonia	14.00
(10) Naranja	Cenizas volcánicas, limo arenosas, ubicadas en montañas	3-25	Andina	5.68
(11) Naranja rayas negras	Cenizas volcánicas con altos contenidos de arcillas, ubicadas en pie de montañas.	2-10	Andina	0.60
(20) Rosado	Suelos arcillo arenosos, ubicados en montaña	3-15	Andina	3.86
(24) Verde oscuro	Suelos arcillo arenosos, ubicados en planicies	3-10	Andina	0.38
Total				24.51

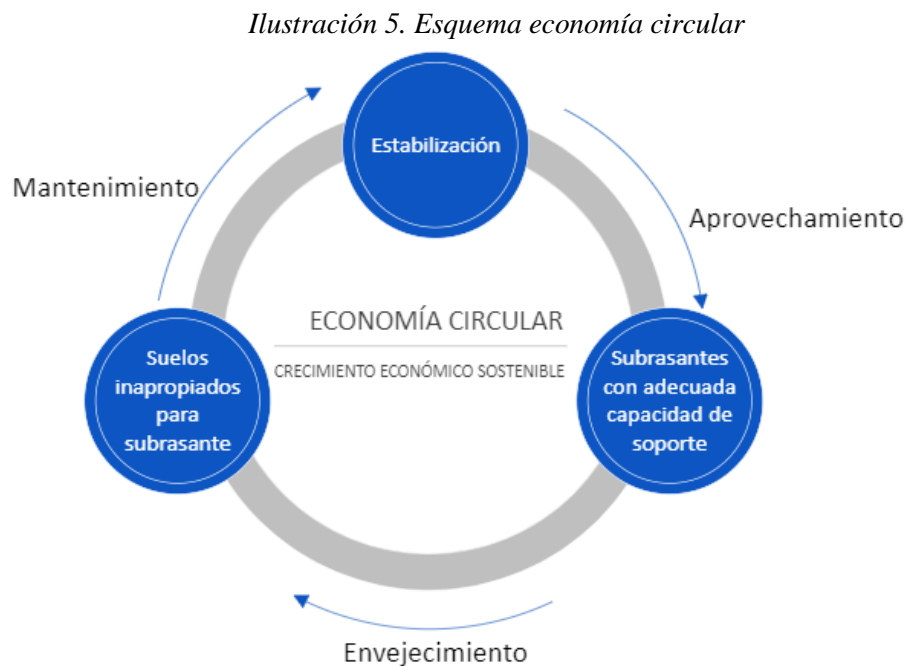
Fuente: Adaptado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1995)

Basado en lo anterior se puede deducir que Colombia representa un reto considerablemente grande al ofrecer suelos particulares que no se han estudiado lo suficiente como para conocer las mejores opciones de estabilización cuando no posee las cualidades para ser usado como subrasante, a esto se le debe agregar que el 52% de la red vial nacional requiere mejoramiento (solo considerando vías terciarias), y que para tener la red vial nacional a nivel de pavimento se haría necesaria una

inversión de más de 300 billones de pesos y según el actual director de INVIAS esto es “totalmente imposible”. (López Agudelo, 2023)

En consecuencia, la estabilización de suelos desarrolla una oportunidad de economía circular en la construcción de vías; debido a que se aprovechan los suelos naturales optimizando la gestión de materias primas y evitando el transporte de estos hacia sitios de depósito (reducción de la emisión de CO2) a la par de que el mejoramiento en muchas ocasiones induce a la reducción de espesores de capas estructurales de pavimento, esto significa que es una opción más económica tanto para pavimentos multicapa como para adecuación de pavimentos unicapa.

En la Ilustración 5, se observa un esquema de la economía circular donde los suelos de subrasantes mejorados con estabilización son diseñados para recuperarse al final de su vida útil y por ende no se convierten en ningún momento en desperdicios.



Fuente. Guía empresarial: Economía circular (Colombia productiva & Centro nacional de producción más limpia, 2023)

El cumplimiento de los ODS son el nuevo reto al que los ingenieros y profesionales se deben enfrentar en la actualidad para proteger el planeta y garantizar que las personas gocen de paz y

prosperidad. La situación actual, es que no se dispone de lineamientos enfocados al contexto colombiano para la selección de alternativas de mejoramiento, entonces para un ingeniero proyectista que realiza un análisis de estabilización se vuelve una tarea demorada buscar las alternativas que se tienen para estabilizar los suelos y es común que se recurra por disponibilidad de tiempo a soluciones tradicionales como la estabilización suelo cemento, desconociendo que quizá existe una mejor solución, más económica y sostenible para resolver su caso, es así como las investigaciones realizadas en el tema pierden alcance y se quedan solo en la teoría.

Basados en lo anterior expuesto se busca dar una solución ofreciendo una guía de uso simple y funcional con recomendaciones y observaciones hacia los lineamientos para la estabilización química de suelos aplicado a suelos procedentes de ceniza volcánica del Cauca estabilizada con cal, por otra parte, divulgando la misma por medio de conferencias para que logre emplearse en el mejoramiento de la red vial nacional.

Es por esto, que esta investigación permite mejorar la eficiencia de los estudios geotécnicos definitivos y de futuras investigaciones en el campo de la estabilización de suelos. De esta manera queda aclarada la conveniencia académica, social y económica de la investigación.

1.5 Resultados esperados e impacto del proyecto

Criterios de selección de tratamiento: Se espera que la investigación proporcione criterios claros y fundamentados para la selección de alternativas de tratamiento en casos donde se identifiquen suelos débiles o problemáticos procedentes de ceniza volcánica en el territorio Caucano.

Suelos estabilizados idóneos: Los resultados deberían indicar cómo aplicar la estabilización con cal de manera que los suelos procedentes de ceniza volcánica se vuelvan idóneos para la construcción de vías seguras y duraderas, lo que implica proporcionar pautas para la aplicación y evaluación de la efectividad de la estabilización.

Contribución al desarrollo regional: Los resultados esperados incluyen la contribución al desarrollo regional al mejorar la infraestructura de carreteras y, por lo tanto, apoyar el crecimiento económico. Esto podría medirse en términos de un mayor acceso a áreas previamente mal comunicadas y a una reducción de los costos de mantenimiento de carreteras debido a suelos más estables.

Apoyo a la enseñanza: La investigación debería favorecer el establecimiento de una enseñanza generalizada en el campo de la estabilización de suelos. Los resultados esperados podrían incluir material educativo o recomendaciones para incluir este conocimiento en programas de estudio en ingeniería civil y geotecnia.

1.6 Plan de Laboratorio

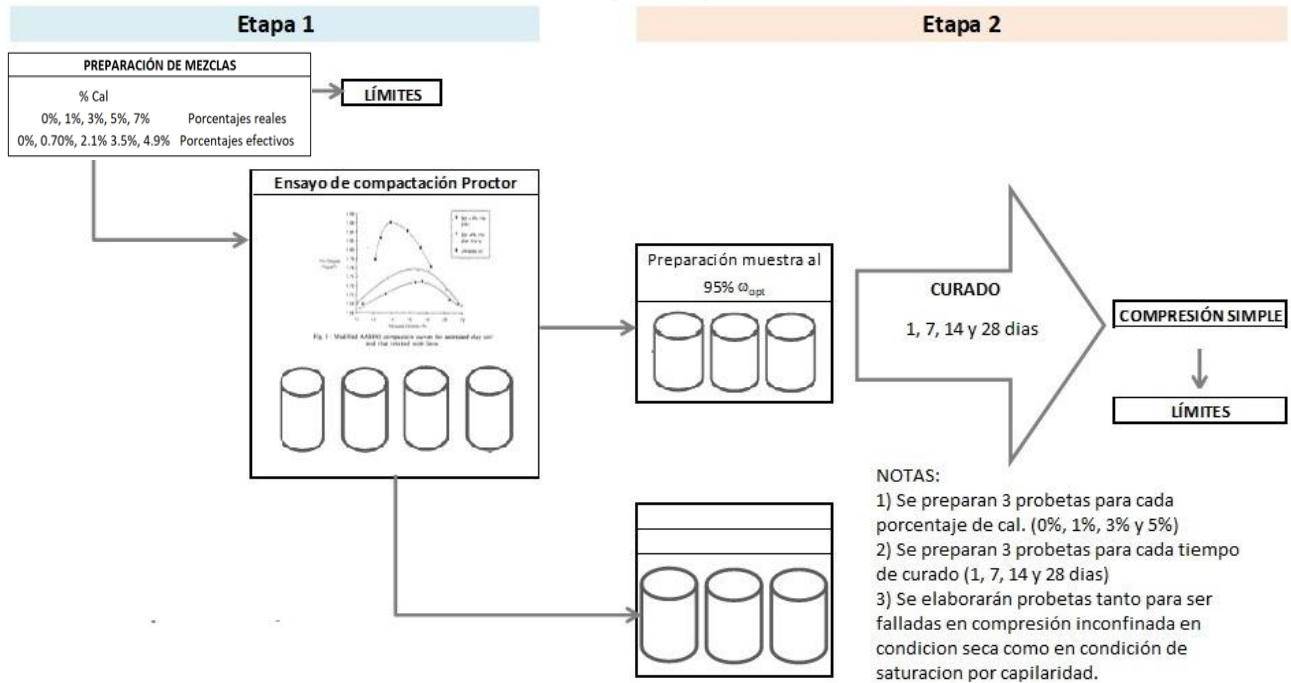
El plan de ensayos a realizar en la presente investigación se realiza bajo una etapa inicial (Etapa 0), que consiste en la toma de muestras, en donde se tendrán 3 tipos de suelos considerados como derivados de ceniza volcánica. Terminando la fase de campo, se inicia el trabajo de laboratorio denominada como la etapa 1, correspondiente a la caracterización de los 3 suelos, determinando así las propiedades físicas del mismo. Seguido, se tiene la etapa 2 en donde la caracterización de la subrasante es una parte esencial en el proceso, por tanto, tener la densidad y la humedad óptima del suelo a estudiar es esencial, finalmente se tiene la etapa 3 del plan de laboratorio, en donde se evaluará el comportamiento del suelo por medio de la resistencia inconfiada en estado seco y húmedo (por capilaridad e inmersión), teniendo en cuenta tiempos de curado y repetibilidad en el proceso.

Es importante tener en cuenta, que al poner a prueba un estabilizante es importante ampliar las posibilidades de ensayo, de allí que se plantea diferentes porcentajes de estabilizante siendo estos al 1%, 3%, 5% y 7% de cal (0.7%, 2.1%, 3.5% y 4.9% de cal efectiva), por otro lado, se estudiarán diferentes edades de curado con el estabilizante para evaluar su comportamiento siendo estos a 1-7-14-28 días.

Este proceso de laboratorio se realizará en instalaciones de la Universidad del Cauca, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos en el proceso formativo, de allí que se vincula en el proceso de investigación un estudiante del programa de Geo tecnología.

Para puntualizar el proceso se presenta en la Ilustración 6 el esquema de plan de laboratorio y ensayos a realizar (Ver Tabla 2).

Ilustración 6. Etapas del plan de laboratorio



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Ensayos a realizar al suelo.

ETAPAS	
ENSAYOS	NORMA
Etapa 1	
Propiedades físicas del suelo natural	
Límite Líquido (%)	INV E-125-13
Límite plástico e Índice de plasticidad (%)	INV E-126-13
Granulometría por tamizado	INV E-213-13
Granulometría por hidrómetro	INV E-124-07
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
Contenido de materia orgánica	INV E-121-13
Contenido de sulfatos	NLT-120/72
pH	INV E-131-13
Etapa 2	
Ensayo de compactación Proctor Estándar	
3 probetas suelo sin estabilizante	INV E- 142-13
3 probetas suelo con estabilizante (diferentes proporciones de cal)	
Etapa 3	
Compactación de muestras al 95% Proctor Estándar	
Después de tiempo de curado:	
Resistencia a la compresión confinada (sin y con estabilizante)	INV E-614-13*
Ensayo de estabilidad al agua (sin y con estabilizante)	NA
Propiedades físicas una vez terminados los ensayos de resistencia:	
Límite Líquido (%)	INV E-125-13
Límite plástico e Índice de plasticidad (%)	INV E-126-13

Fuente: Elaboración propia.

2. Capítulo 2: Marco Teórico

Se realizó una revisión de investigaciones sobre la estabilización de suelos enfocándose en los procedentes de ceniza volcánica, el objetivo de esta búsqueda es retroalimentar los métodos de la estabilización con cal que han sido utilizados en diferentes países para respaldar su uso en el campo ingenieril en Colombia específicamente en el Cauca.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos: Academia, Dialnet, Elsevier, Scopus, Scielo, SpringerEnlace, Mendeley, Refseek, Researchgate, Scholarpedia, Worldwidescience entre otras. Las palabras clave incluidas como motor de búsqueda fueron: Estabilización, Subrasante, Suelos, Suelos Volcánicos, Cal. No se tomó como criterio de exclusión el año de publicación, ya que, se presentó una falta de información reciente.

El marco teórico de esta investigación se fundamenta en el estudio de la estabilización química de suelos, particularmente aquellos derivados de cenizas volcánicas, empleando cal como agente estabilizador. Este proceso, ampliamente documentado, mejora las propiedades mecánicas y físicas del suelo al inducir reacciones químicas como la formación de compuestos cementantes (pozzolanas) que incrementan su resistencia y durabilidad (Bell, 1996; P.T. Sherwood, 1993). Para caracterizar los suelos de la región del Cauca, se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión confinada (UCS), límites de consistencia y determinación de materia orgánica y contenido de sulfatos, siguiendo estándares internacionales. Estas pruebas permiten evaluar las propiedades geotécnicas iniciales y los efectos de la estabilización, considerando que los suelos volcánicos presentan desafíos como alta plasticidad, baja densidad y reactividad variable debido a su composición mineralógica (P. Oliveira & E. Parreira, 2020). El marco teórico integra conceptos clave sobre los mecanismos de estabilización y los factores que influyen en el desempeño del suelo tratado con cal, como el contenido de sulfatos, que puede dar lugar a reacciones expansivas si no se controla adecuadamente. (David N. Little, 1995)

Nortcliff et al. en el 2006, considera que el suelo es tierra fina que cubre la superficie terrestre por el resultado de la erosión in situ del manto rocosos o por la acumulación de materia mineral

transportada por el agua, viento o hielo, que además puede contener material orgánico. El suelo se considera como el material de construcción más antiguo, complejo y más utilizado por los ingenieros, teniendo gran importancia las propiedades fisicoquímicas y mecánicas, tales como la resistencia, permeabilidad, compresibilidad, durabilidad y estabilidad volumétrica, ya que en su mayoría todas las estructuras civiles están cimentadas sobre la superficie de la tierra.

“Cuando los suelos tienen pobres características mecánicas, (suelos de baja capacidad portante, susceptibles de asentamientos excesivos) o pueden presentar problemas como expansión, licuación, (grandes deformaciones) no son recomendables para ser empleados en la construcción de carreteras ya sea como subrasantes o como materiales de préstamo para conformar terraplenes, capas de sub-base o bases, se tiene la alternativa de reemplazarlos o tratarlos (mejorarlos) utilizando diferentes procedimientos, algunos con una mayor implicación que otros en el campo de las vías terrestres desde el punto de vista de su eficacia y economía. Las propiedades de los suelos pueden mejorarse reduciendo su relación de vacíos o mezclándolo con otras sustancias.”

La capacidad portante del suelo interviene en un papel determinante en las cimentaciones; ya que, de sus propiedades depende en gran medida la estabilidad de las estructuras a soportarse sobre él. Las estructuras transmiten sus cargas a las cimentaciones y éstas pasan a los diferentes estratos de suelo provocando que se generen deformaciones y tensiones, las cuales dependerán de la magnitud de la carga aplicada y de las propiedades del suelo de soporte afectado principalmente por la acción no anticipada del agua y por asentamientos excesivos no previstos. (J. F. Rivera et al., 2020a)

Según los estudios realizados, se percibió que en Estados Unidos los costos de los daños a estructuras producidos por suelos expansivos alcanzan la cifra de 1 billón de dólares al año (Firoozi et al., 2017), así como en Reino Unido se obtuvo una cifra de 150 millones de libras esterlinas al año (Zhao et al., 2014); en general, se tiene una referencia del deterioro de miles de millones alrededor del mundo por el mismo percance.

Cabe resaltar que el suelo, también llamado como suelo de cimentación, en su mayoría no corresponde con los requisitos de diseño o no son los ideales; por ende, surge la necesidad de ejecutar procesos de modificación o alteración del estrato, estabilización o sustitución para así suministrar a la obra un material de construcción competente.

2.1 Estabilización de Suelos

Resulta necesario decir que, es sustancial tener en cuenta los efectos ambientales que se pueden presentar, ya que, dentro de las alternativas de estabilización se encuentra la utilización de suelos granulares de préstamo y la explotación de canteras, alterando negativamente los ecosistemas locales y la biodiversidad; generando cambios en la topografía del terreno, aportando a la degradación de los recursos naturales locales y causando la posible pérdida del recurso vital como lo es el agua debido a la remoción de los acuíferos. (Fierro Julio & Rayo Lorena, 2009)

En la construcción de una obra civil es común que se opte por la utilización de materiales de excelente calidad, pero en muchos casos prácticos como sucede con la ejecución de pavimentos para carreteras, no es posible lograr este ideal debido a la dificultad de conseguir los recursos en la zona del proyecto, el costo de la extracción y el transporte de los materiales lo que conlleva a que resulte muy onerosa la ejecución de dicho propósito. Con respecto a lo anterior, se espera encontrar materiales de características menores a los ideales, pero que al ser optimizados mediante determinados procesos den como resultado un material adecuado para los fines que se apremian, a un costo relativamente bajo. De estas circunspecciones, emergió la necesidad de estabilizar o mejorar los suelos para la construcción de pavimentos y otras obras de ingeniería, tales como terraplenes, protección de las caras de las presas, revestimientos de canales, de taludes, entre otras cosas. (Montejo Fonseca et al., 2018)

De lo anterior, se comprende por estabilización de suelos como el proceso por el cual se someten ciertos suelos que no son aptos o no cumplen con ciertas características necesarias para la durabilidad y conservación de una estructura de pavimento o de cimentación, con el fin de mejorar sus condiciones naturales. Existen diversas técnicas que mejoran las propiedades del suelo, entre las cuales

se destacan: la excavación y recolocación, compactación, la implementación de columnas de grava, reforzamiento con geo sintéticos, jet grouting, compactación dinámica, mejoramiento con precarga, construcción de pilotes, pre-consolidación, la fracturación controlada, la estabilización con cemento o cal, la aplicación de microorganismos, el uso de enzimas, mezcla de suelo, la remediación electrocinética, entre muchas otras. Cada una de estas técnicas ofrece soluciones específicas como mejorar la capacidad portante, la resistencia, el drenaje y otros aspectos del suelo, permitiendo un mejor desempeño de las estructuras construidas sobre él.

Por último es conveniente acotar, que el criterio más importante en la investigación, es su composición, ya que según (Santosh K.G., 1987) en su libro titulado “Soil Mechanics” explica el comportamiento de las arenas y las arcillas puras, indicando que las partículas granulares arenosas de tamaño superior a setenta y cinco micras ($75 \mu\text{m}$) son garantes de proporcionar dureza y resistencia a un suelo, pero carecen de cohesión, lo que conlleva a que se disminuya o se pierda la unión entre sus fragmentos causando mayor efecto en pendientes parcialmente inestables; mientras que los suelos arcillosos con partículas inferiores a ($75 \mu\text{m}$) conservan suficiente fuerza de unión entre sus partículas, pero no aportan a la resistencia al corte mayormente con arcillas saturadas. En relación con el tema, la presencia de agua es problemática en suelos arcillosos, pero proporciona una aparente cohesión en suelos arenosos. (Santosh K.G., 1987)

2.2 Métodos De Mejoramiento De Suelos

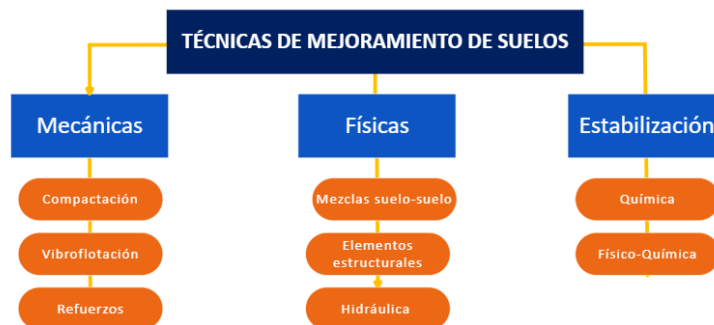
En la etapa del estudio geotécnico de un proyecto se debe investigar la naturaleza y propiedades de los suelos. El mejoramiento del terreno puede lograrse por medio de varios procedimientos anteriormente mencionados, los cuales serán descritos según el método al que pertenecen, ya sea método físico, químico, biológico o combinado.

Las técnicas de mejoramiento de suelos han evolucionado significativamente, integrando enfoques innovadores para optimizar las propiedades mecánicas y físicas del terreno, especialmente en condiciones geotécnicas desfavorables. Entre las estrategias más utilizadas se encuentran los métodos

químicos, como la estabilización con cal, cemento o aditivos químicos, que alteran la estructura del suelo mediante reacciones químicas que mejoran su resistencia y capacidad portante (Bell, 1996). Por otro lado, las técnicas físicas incluyen compactación, precarga y drenaje, que modifican la densidad y reducen la compresibilidad del suelo (James K. Mitchell & Kenichi Soga, 2005). En los últimos años, han surgido métodos biológicos, como la biocementación mediante precipitación de carbonato de calcio inducido por microorganismos (MICP), que refuerzan la matriz del suelo utilizando procesos biológicos sostenibles (DeJong et al., 2010). Además, se han desarrollado enfoques combinados que integran técnicas como el uso simultáneo de agentes estabilizadores químicos con refuerzo físico mediante geo sintéticos, logrando sinergias en el mejoramiento del terreno (Sanjay Kumar Shukla, 2002). Estos avances permiten abordar desafíos como la presencia de suelos expansivos, arcillas blandas o depósitos sueltos, ofreciendo soluciones adaptadas a las exigencias de cada proyecto. La elección del método depende de factores como la composición del suelo, las condiciones ambientales, los costos y los objetivos del diseño geotécnico. (Karl Terzaghi et al., 1996)

Las técnicas para mejoramientos de suelos se pueden agrupar en las siguientes categorías:

Ilustración 7. Técnicas de mejoramiento de suelos



Fuente: Adaptado de (Holtz & Kovacs, 1981)

Ilustración 8. Estabilización de suelos



Fuente: Adaptado de Nicholson, (2015).

a) Excavación y Sustitución:

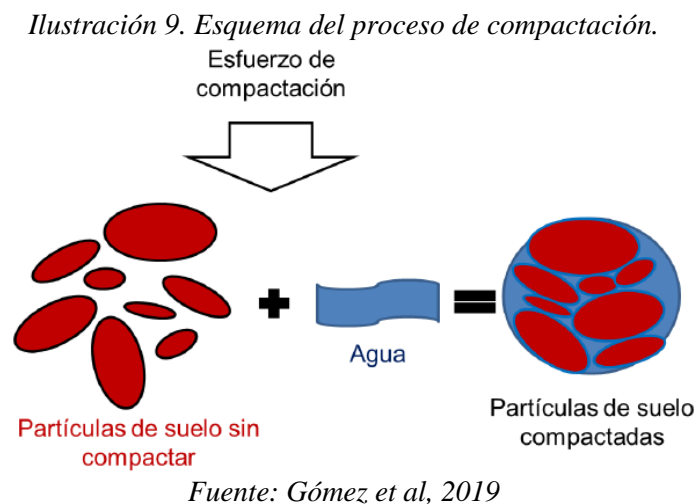
En este método se realiza el respectivo retiro de los suelos que no son competentes y se sustituyen por otros con mejores características y de mayor resistencia, ya sea con piedra rajón, recebo o utilizando geo bloques. Consultando diferentes bases de información se recomienda que el espesor a mejorar y a excavar no sea mayor a 1,0 m para que la técnica no resulte ni costosa ni dispendiosa teniendo en cuenta que la cantera del agregado no esté muy lejos del sitio a intervenir; se requiere sustituir o rellenar con material limoso o arcillo limoso y que éste no sea de tipo erodable, expansivo ni tampoco colapsable. (Doroteo, 2014)

De acuerdo con el “Manual de Carreteras” de Perú existen dos escenarios para el mejoramiento del suelo por este método, el primer caso consiste en la construcción de la capa sobre el suelo natural existente y lo que se procede a realizar es escarificar la zona, conformar y compactar a la densidad especificada por normativa, para lo cual una vez considerado que el suelo de soporte esté listo, se debe autorizar la distribución de los materiales previamente humedecidos o aireados por capas hasta obtener el nivel de la sub rasante y densidad exigida, disponiendo de equipos de compactación; En el segundo caso se excava previamente el área a mejorar, de acuerdo al espesor de reemplazo, se realiza la

colocación de material y posteriormente se compacta hasta alcanzar la cota requerida. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014)

b) Compactación

El proceso de compactación es fundamental en la construcción de caminos, autopistas y aeródromos, en donde el suelo compactado es utilizado como relleno o suelo de reemplazo debajo de otras estructuras, considerándolo como una “base especial” (Das, 2011). Su finalidad es proporcionar las propiedades mecánicas apropiadas para su uso y se define como el proceso de aplicación de energía mecánica al suelo (esfuerzo de compactación) para disminuir su volumen a través de la expulsión de aire existente en sus poros. (ver Ilustración 9) (Gómez et al., 2019)



▪ **Métodos de Compactación:**

Compactación por amasado: A través de una acción de amasado se realiza una reorientación de las partículas causando una disminución de los vacíos. El efecto del equipo en forma de pata de cabra al penetrar un material, ejerce grandes presiones concentradas hacia todos los lados produciendo un bulbo de presiones muy intenso, ocasionando que el agua y el aire salgan a la superficie, su forma de compactación es de abajo hacia arriba; y es muy adecuado para suelos finos plásticos utilizando el Rodillo “Pata de Cabra”. (Arenas, 1999)

Compactación por presión estática: Este principio se basa en la aplicación de pesos más o menos grandes sobre la superficie del suelo. La acción o su forma de compactación es de arriba hacia abajo, es decir, la parte superior de la capa alcanza primero mayores densidades que la inferior provocando que se consuma mayor energía de compactación.

Se requiere utilizar equipos como “Rodillo Metálico” o “Rodillo Neumático” para dicho proceso, cuando éstos se lastran en exceso, pueden romper las partículas del material de la capa, por la sobrepresión, ocasionando una variación en la granulometría del material, por lo que no es conveniente realizar el proceso a materiales granulares (gravas y arenas). La presión es capaz de vencer la resistencia que presentan tanto la cohesión como la fricción, por lo que los equipos que producen esta energía son capaces de compactar toda clase de suelos. (Alcaraz, 2006a)

Compactación por impacto: Consiste en la aplicación repetida de fuerzas de gran amplitud y baja frecuencia. Como las fuerzas son grandes, este tipo de energía es capaz de vencer tanto la cohesión como la fricción, y es capaz de compactar toda clase de suelos, pero como el acabado de la capa es demasiado irregular su uso se limita al cuerpo del terraplén, que generalmente está formado con materiales cohesivos, y por lo tanto se ha calificado como útil sólo para estos materiales (Alcaraz, 2006a). Para compactar se utilizan pisones, ya sea de caída libre y accionados a mano (fragmentos de roca), o de compresión neumática (suelos cohesivos) o de combustión interna.

Compactación por vibración: Consiste en la aplicación de fuerzas de corta duración de baja amplitud y alta frecuencia (Arenas, 1999). Este tipo de compactación facilita la obtención de los últimos porcentajes del grado de compactación, los cuales se dificultan al realizarlo con compactadores estáticos. Cabe resaltar que esta técnica es utilizada en suelos gruesos con poco o nada de contenido de finos, además se permite el uso de compactadores pequeños. (Alcaraz, 2006b)

Factores que Influyen en la Compactación de los Suelos: Como se ha expresado anteriormente, la compactación depende de una serie de características propias de cada método puntualizado y de las condiciones que presente el suelo antes de ser compactado. Uno claro ejemplo es

la naturaleza del suelo, la cual es altamente influyente en el proceso, debido a que prevalece la primordial diferencia entre los suelos de estructura simple y forma equidimensional, denominados en la literatura como gravas, arenas y limos no plásticos; y están los suelos de forma generalmente laminares y cuya estructuración obedece a efectos electroquímicos, llamados usualmente limos plásticos o arcillas (Rico & Del Castillo, 1992).

Según Barrera & Martínez en el año 2004, plantearon que el parámetro fundamental a tener en cuenta cuando se compacta el suelo es el contenido de agua de compactación (w). Los autores definen que “Un contenido de agua alto, denota que los poros almacenan bastante agua como para que la deformabilidad no drenada del suelo sea baja, puesto que en este caso las presiones aplicadas son soportadas principalmente por la mezcla aire-agua”. Además, hacen resaltar que, al tener con una humedad baja, los poros tienen poca agua y la succión que se desarrolla hace que el suelo sea poco deformable, debido a que rigidiza el esqueleto sólido el cual, soporta las acciones externas. Por último, se considera que el grado de saturación del suelo compactado está en función del contenido de humedad, ya que, es la relación entre el volumen del agua y el volumen de vacíos contenidos en la masa del suelo.

c) Geo sintéticos

Un geotextil es una lámina o membrana textil (de fibras o filamentos, estructuras de hilos, tejidos o no, telas no tejidas, o texturas mixtas), dentro de componentes se encuentran fibras de poliamidas, poliésteres y poliolefinas, los cuales constituyen casi la totalidad de los geotextiles. Se sitúa entre dos capas de material, manteniendo la separación entre ellas y evitando la contaminación de un material al otro. Por otra parte, se percibe que no es absolutamente nueva la implementación o uso de los geotextiles, sino que debido a los problemas que han surgido con respecto a su utilización se han ido creando nuevas tecnologías en cuanto a sus características, parámetros, su fabricación y en cuanto a su empleo más adecuado. (López, 1986)

Según Meyer et al, en el año 1998 realizaron una patente titulada “Geo textiles and Geogrd in Subgrade Stabilization and Base Course Reinforcement Applications” en la cual, indican que las condiciones de tensión que experimenta un geotextil en la capa base bajo carga son semejantes a las de una viga cargada. Considerando que, por flexión, la base experimenta compresión en la parte superior y tensión en la base bajo la carga de la rueda. Las subrasantes débiles proveen muy poca restricción lateral; por lo que, el agregado en la parte inferior de la capa base tiende a separarse, condescendiendo la intrusión de la subrasante blanda; no obstante, un geo sintético colocado en la parte inferior de la capa base restringe el movimiento del agregado proporcionando resistencia a la tracción. Por lo que se concluye que, el refuerzo a través del soporte de membrana tensada se proporciona a través de las características de carga-deformación del geo sintético y de la interacción friccional suelo-geo sintético.

d) Columnas de Grava

Las columnas de grava pertenecen a métodos relativamente nuevos para mejorar las características del suelo; cabe destacar que se espera acelerar la consolidación del subsuelo, así como también aumentar la capacidad portante y disminuir el asentamiento de los suelos. Dado que no se han realizado suficientes investigaciones del tema se puede señalar que, el diseño de columnas de grava se ha basado durante mucho tiempo en experiencias empíricas. (Sulovska & Turček, 2018)

Las columnas de grava realizadas con equipos de vibración profunda se han empleado con éxito en múltiples obras desde los años 60s, para reforzar suelos blandos o sueltos de elevada compresibilidad. El procedimiento de ejecución se realiza por vía seca (método Bottom-Feed) en la cual, se introduce todo el sistema en el suelo, junto al vibrador, con ayuda del empuje vertical y el aire comprimido. Una vez alcanzada la profundidad deseada; el sistema de tubos estabiliza la cavidad elaborada, facilitando la inyección o acoplamiento de grava y permitiendo su descarga por la parte inferior del vibrador que la compacta en movimientos verticales y horizontales. Debido a la naturaleza del procedimiento de ejecución a este tipo de tratamiento habitualmente se le denomina vibro sustitución. Sin embargo, durante los años 1990 surgió la metodología de ejecución de columnas de

agregado apisonado. En donde se efectúan las perforaciones con extracción de material y se rellenan de grava desde la plataforma de trabajo y hasta el fondo de la perforación. En particular, la compactación se realiza únicamente en sentido vertical, por medio de impactos producidos por una placa en contacto con la grava, por lo que en este método es importante garantizar la estabilidad de las perforaciones ante la presencia de agua freática y/o suelos muy blandos. (Carvajal & Ruiz, 2015)

e) Jet-Grouting

Es una de las técnicas de mejoramiento de suelo más populares debido a su aplicabilidad en casi todos los tipos de suelo; especialmente en la estabilización de terrenos blandos mezclando lechada de cemento con suelo in situ. La inyección de lechada se ha utilizado considerablemente para la modificación de terrenos en proyectos subterráneos con el fin de formar sellos de base y puntales de lechada enterrados para excavaciones profundas, además promueve un soporte estructural alrededor del túnel en los sitios de entrada y salida de tuneladoras. El procedimiento a seguir, consiste en la inyección de un fluido de alta velocidad (ya sea, chorro de agua o de lechada) a través de embocaduras de pequeño diámetro en el subsuelo para erosionar el suelo circundante, mientras las boquillas giran y se elevan hacia la superficie a una velocidad constante, induciendo a que el suelo erosionado se mezcle paralelamente con la lechada inyectada para formar la mezcla, y que posteriormente se solidifique formando una columna de suelo-cemento. (Wang et al., 2013)

Existen diversas técnicas de Jet-grouting, en primer lugar, se tiene el denominado simple o mono Jet, en donde la inyección de lechada de cemento produce la disgregación o desplazamiento del suelo y la mezcla suelo-lechada de cemento. En segundo lugar, se incluye la técnica del Jet doble fluido, la cual, induce a la disgregación del terreno con ayuda de agua a alta presión (por la fila superior del conducto) y la inyección de la lechada de cemento se hace a menor presión por los conductos inferiores). Por último, se describe el Jet-grouting de triple fluido o trijet, que consiste en envolver con aire comprimido el chorro de agua a alta presión del método descrito anterior. (Alonso, 2014)

f) Compactación Dinámica

La compactación dinámica se usa para incrementar la densidad relativa del suelo, cuando ciertas restricciones subsuperficiales hacen que otros métodos resulten inapropiados; lo que se busca con ese método es incrementar la capacidad portante de los suelos con compacidad suelta y reducir asentamientos verticales diferenciales, así mismo se puede usar para atenuar el hundimiento por licuefacción e inducir asentamientos en suelos colapsables. (Zhang et al., 2019)

Tomando como referencia un reporte de la Administración Federal de Carreteras denominado “Geotechnical Engineering Circular 1: Dynamic Compaction”, redactado por Robert Lukas en el año 1995, en el que se definen tres tipos de suelos potenciales para usar el proceso de compactación dinámica; comenzando por los suelos granulares permeables, en donde, se logran los mejores resultados, seguido de los suelos semipermeables de limos con índice de plasticidad menor a ocho ($IP < 8$) y finalmente con una zona más desfavorable de depósitos semipermeables de arcillas con índice de plasticidad mayor a ocho ($IP > 8$).

g) Precarga

En el mejoramiento por precarga se espera acelerar el asentamiento y aumentar la capacidad de carga del suelo, suministrándole una carga adicional sobre el mismo. Esta será eficiente si la carga total [dado como la suma de todos los esfuerzos implicados] excede la presión máxima que el estrato o terreno ha experimentado (pre- presión de consolidación). En su implementación, método precarga, se requiere bastante tiempo para liberar el agua de los poros en el proceso de mejora del suelo. (Muis & Wulan, 2019)

La técnica de precarga es un método ampliamente utilizado en la mejora de suelos blandos o altamente compresibles. Este procedimiento consiste en aplicar una carga temporal, generalmente en forma de materiales de relleno o estructuras provisionales, para inducir deformaciones controladas en el suelo antes de la construcción final. A través de este método, se logra consolidar el suelo al reducir el volumen de vacíos y expulsar el agua intersticial, lo que lleva a una densificación del material

subyacente y una disminución de la compresibilidad futura (Karl Terzaghi et al., 1996). La precarga puede ser aplicada en combinación con sistemas de drenaje vertical, como drenes prefabricados de mecha o columnas de grava, para facilitar el proceso de consolidación al reducir las distancias de drenaje y facilitar la disipación de la presión del agua de poros. (Robert D. Holtz et al., 2011)

Una de las ventajas clave de este método es su capacidad para mitigar asentamientos diferenciales en estructuras construidas sobre suelos blandos, mejorando la uniformidad del terreno y reduciendo el riesgo de fallas estructurales. Además, la precarga es particularmente eficaz en proyectos de gran escala, como carreteras, diques y plataformas industriales, donde el tiempo para el tratamiento del suelo puede ser planeado con antelación (B.B. Broms & P. Boman, 1979). Sin embargo, su éxito depende de una cuidadosa planificación, considerando factores como el espesor del estrato compresible, la permeabilidad del suelo y la magnitud de la carga aplicada. También es fundamental realizar un monitoreo continuo mediante instrumentación geotécnica, como piezómetros y extensómetros, para evaluar la disipación de presiones de poro y los asentamientos durante la implementación. (Buddhima Indraratna et al., 2005)

h) Vibro flotación

La vibroflotación es una técnica de mejoramiento de suelos que se utiliza principalmente para densificar depósitos de suelos granulares, como arenas sueltas y gravas, aumentando su resistencia y reduciendo su susceptibilidad a la licuación. Este método emplea un equipo especializado conocido como vibroflotador, que genera vibraciones de alta intensidad capaces de reorganizar los granos del suelo, logrando una mayor densidad relativa (James K. Mitchell & Kenichi Soga, 2005). A diferencia de otras técnicas de compactación, la vibroflotación trabaja en profundidad, siendo especialmente eficaz en suelos donde la densificación superficial no sería suficiente para garantizar la estabilidad de la estructura.

Durante su aplicación, el vibroflotador suele ir acompañado de un sistema de suministro de agua o aire comprimido que ayuda a crear una cavidad temporal en el suelo y facilita el desplazamiento

lateral de los granos. Este proceso no solo compacta el terreno circundante, sino que también permite añadir material granular desde la superficie para rellenar los vacíos creados y mejorar aún más las propiedades del terreno (G. Bauer & B. Lutz, 1988). La técnica es utilizada en proyectos de gran escala, como cimentaciones para edificios altos, tanques de almacenamiento, muelles y plataformas offshore, donde se requiere un suelo firme y uniforme para soportar cargas significativas. (K. Rainer Massarsch & Bengt H. Fellenius, 2005)

El diseño y la disposición de los puntos de tratamiento en el terreno se planifican en función de las características del suelo y los requisitos del proyecto, generalmente en un patrón de malla. Esta metodología asegura que las vibraciones alcancen de manera uniforme todas las áreas críticas, logrando una mejora integral del terreno (Construction Industry Research and Information Association, 1983). Además, la vibroflotación ofrece ventajas como su capacidad para tratar grandes volúmenes de suelo en tiempos relativamente cortos y su adaptabilidad a diferentes tipos de suelos granulares, aunque su efectividad es limitada en materiales con alto contenido de finos o cohesivos.

Es el procedimiento mediante el cual se introduce en el suelo un dispositivo que vibra e inyecta agua produciendo la licuación de la arena, logrando su compactación (Montejo Fonseca et al., 2018). La vibro flotación implica el uso de una sonda vibratoria que puede penetrar el suelo granular a profundidades de más de 30m. Las vibraciones de la sonda provocan el colapso de la estructura del grano, lo que densifica el suelo que rodea la sonda. Para tratar un área de suelo potencialmente licuable, el vibro flotador se eleva y baja en un patrón de cuadrícula.

i) Vibro sustitución

La técnica de vibro sustitución es un método especializado de mejora de suelos que consiste en reemplazar parcial o totalmente materiales de baja capacidad portante, como limos, arcillas o arenas con alto contenido de finos, por columnas de material granular grueso, generalmente piedra o grava. Este proceso mejora las propiedades mecánicas del terreno al aumentar su resistencia al corte, reducir

su compresibilidad y facilitar la disipación de presiones de poro. (James K. Mitchell & Kenichi Soga, 2005)

El procedimiento comienza con la introducción de un vibro flotador que penetra el suelo mediante vibraciones de alta energía. A diferencia de la vibro flotación tradicional, en la vibro sustitución, el objetivo no es densificar el suelo existente, sino crear cavidades controladas que luego son rellenadas con el material granular. Este material se introduce en capas y se compacta mediante el mismo vibro flotador, formando columnas verticales de alta densidad que refuerzan el terreno circundante. Estas columnas actúan no solo como elementos de soporte directo para estructuras, sino también como disipadores de presiones hidráulicas, mejorando la estabilidad global del suelo tratado. (K. Rainer Massarsch & Bengt B. Broms, 1991)

La vibro sustitución es particularmente eficaz en suelos cohesivos con baja capacidad portante, donde métodos como la vibro flotación serán menos efectivos debido a la cohesión de las partículas. Se utiliza en proyectos de infraestructura como puertos, tanques de almacenamiento, cimentaciones industriales y plataformas, donde es necesario garantizar una base firme y estable (Russ, 2012). Además, esta técnica tiene la ventaja de ser adaptable a diversas profundidades y condiciones del suelo, aunque su aplicación requiere un diseño cuidadoso que considere factores como la distribución del peso de la estructura y las características específicas del terreno.

Según Quijada, en su tesis escrita en el año 2008, investigó que esta técnica surgió en Alemania en 1957, a causa de mejorar cierto tipo de estratos, especialmente suelos limosos o limo-arcillosos, mezclas de gravas, arenas y arcillas con contenidos pasantes del tamiz 200 del 20%. Por sus características cohesivas, cuando las partículas están sometidas a vibraciones, se deslizan entre sí y pueden ser desplazadas o sustituidas; luego de penetrar y alcanzar la profundidad requerida, se retira el “vibro flotador” y se rellena el pozo con material granular grueso, compactando capa por capa hasta formar una columna de piedra, que a su vez se empuja lateralmente dentro del suelo fronterizo. De esta relación, suelo-columna, se forma un sistema integrado de baja compresibilidad y de alta resistencia al

corte. Algo semejante ocurre con el exceso de presión de poros, los cuales se disipan fácilmente por las columnas que actúan al mismo tiempo como drenes verticales.

j) Estabilización química

La estabilización química es un proceso que implica la adición de sustancias químicas a un material para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Esta técnica se utiliza ampliamente en diversas industrias, como la construcción, la minería y la agricultura, para mejorar la estabilidad y la resistencia de los materiales (Bell, 1996). La estabilización química puede ser utilizada para mejorar la resistencia a la compresión, la tensión y la corrosión de los materiales, lo que los hace más adecuados para su uso en diversas aplicaciones. Además, la estabilización química puede ser utilizada para mejorar la trabajabilidad y la plasticidad de los materiales, lo que facilita su manipulación y procesamiento. La selección del tipo y la cantidad de sustancia química a agregar depende del tipo de material y de las propiedades que se desean mejorar (Manfred R. Hausmann, 1990). En general, la estabilización química es una técnica efectiva y eficiente para mejorar las propiedades de los materiales y hacerlos más adecuados para su uso en diversas aplicaciones. La estabilización química también puede ser utilizada para reducir la permeabilidad y la porosidad de los materiales, lo que los hace más resistentes a la corrosión y a la degradación (Joseph E. Bowles, 1992). Además, la estabilización química puede ser utilizada para mejorar la resistencia al fuego y a la temperatura de los materiales, lo que los hace más seguros para su uso en diversas aplicaciones. En esencia, la estabilización química es una técnica versátil y efectiva para mejorar las propiedades de los materiales y hacerlos más adecuados para su uso en diversas aplicaciones.

La estabilización química es la técnica comúnmente utilizada para el tratamiento de los suelos especiales. Su propósito es mejorar la estabilidad, aumentando el tamaño de los granos del material del suelo, disminuyendo el índice de plasticidad, reduciendo el potencial de hinchazón-contracción e incrementando la cementación. (Fondjo et al., 2021)

Este tipo de mejoramiento engloba una extensa gama de materiales, entre los cuales cabe destacar la implementación del cemento y la cal, conocidos por pertenecer al grupo de estabilizantes convencionales; sin embargo, existen otros productos como sales (cloruro de sodio, cloruro de calcio) y residuos o subproductos industriales (escoria de alto horno, cenizas volantes) considerados en la estabilización para construcción de carreteras. Adicionalmente, la combinación de varias materias primas adecuadamente seleccionadas puede permitir la sinergia de sus propiedades brindando un mejor comportamiento frente a la estabilización de un suelo. (Syed-Zuber et al., 2013)

Cabe aclarar, que la selección del tipo y porcentaje de estabilizante está en función de la tipología o clasificación del suelo y por supuesto, de la expectativa de mejoramiento requerida para cada caso en particular; otros factores importantes e influyentes son el costo y las condiciones medioambientales. Así, cuando simplemente se pretende alterar algunas de sus propiedades, tales como la trabajabilidad, plasticidad o la distribución de partículas, es posible que se requieran proporciones bajas del aditivo; sin embargo, cuando se desea interactuar con propiedades tales como la resistencia y la durabilidad, para incrementar la vida útil en servicio, la cantidad del aditivo puede ser superior. (J. F. Rivera et al., 2020b)

Para Das, (2011) la estabilización química de suelos implica la aplicación de aditivos químicos in situ, para mejorar el comportamiento de los suelos. Se utiliza para mejorar la manejabilidad del suelo, haciendo el material más fácil de usar como material de construcción. También se usa para reducir la plasticidad y el potencial de expansión-contracción. Si las arcillas son dispersivas, se utiliza para flocular las partículas. Cuando las arcillas son difíciles de compactar, se pueden añadir productos químicos para dispersar ligeramente sus partículas y ayudar en el proceso, a su vez. En general, estos mecanismos se pueden agrupar en: tradicionales, no tradicionales y por subproductos. Tingle et al., (2007) los ha agrupado a su vez, en siete clases, los cuales se enlistan a continuación:

Tabla 3. Estabilizantes Tradicionales

Estabilizador Químico	Funcionalidad (Estabilizantes Tradicionales)
<i>Cal</i>	La mezcla del suelo con cal, produce una reacción química llamada floculación, en donde las partículas de cal se desplazan sobre la superficie del suelo arcilloso y causan un intercambio iónico, haciendo que el estrato aumente su resistencia a la penetración y mitigue la expansión ante la presencia de agua. Asimismo, una de las características más importantes de la cal en el suelo, es el cambio en la plasticidad, aumentando o disminuyendo su límite líquido y límite plástico; al igual que produce un aumento en la humedad óptima de compactación.
<i>Cemento</i>	Este aditivo se emplea para suelos sueltos granulares de tipo A-1, A-2 y A3. El contenido óptimo de agua a utilizar se determina mediante el ensayo Proctor. También, la compactación requerida es de 95% de la Máxima Densidad Seca según AASHTO T-180 en el nivel de la subrasante y se recomienda realizar un proceso adecuado de curado para evitar el fisuramiento de las estabilizaciones o las bases tratadas.
<i>Ceniza Volante</i>	Son residuos producto de la combustión del carbón bituminoso que, al ser tan finos, son lo suficientemente livianos para ser transportados por el gas saliente de un horno; conocidas por ser una puzolana artificial, es decir un material silíceo o silico-aluminoso que puede ser cementante, contiene partículas finas y con la aplicación de humedad reaccionan con hidróxido de calcio presente para formar propiedades cementantes.

Fuente: (Moale Q. & Rivera J., 2019) (Thomas, 2007).

Tabla 4. Estabilizantes No Tradicionales

Estabilizador Químico	Funcionalidad (Estabilizantes No Tradicionales)
<i>Cloruro de Calcio</i>	El cloruro de calcio previene el desmoronamiento del terreno, aumenta la resistencia del suelo y mantiene la humedad en la superficie de la carretera. La dosificación que se recomienda está entre 1% y 2% respecto al peso de suelo suelto.
<i>Cloruro de Magnesio</i>	Este compuesto es más efectivo en la incrementación de la tensión superficial a comparación del cloruro de calcio. Debido a que es un material higroscópico, cohesionaste, de baja temperatura de congelamiento, resistente a la evaporación y altamente soluble en agua.
<i>Cloruro de Sodio</i>	Esta técnica debe emplearse para suelos que tengan menos de 3% en su composición de materia orgánica, índice de plasticidad mayor a 8%; para suelos pasantes de la malla N°200 se emplea un 12%. La sal es un estabilizante natural e higroscópico compuesta en un 98% de cloruro de sodio y en un 2% de limos y arcillas, sus propiedades le permiten absorber la humedad del aire y del material que lo rodea, y mediante la coagulación se genera una densificación del suelo de manera más rápida y con mayor cohesión. Esto debido al intercambio iónico del Sodio y los minerales del suelo, haciendo el papel de un cementante. La cantidad de sal a emplear es entre 50 y 80 kg por metro cúbico de suelo a estabilizar.
<i>Escoria</i>	Es uno de los métodos más amigables con la naturaleza, ya que no requiere de la exploración de nuevas canteras, por lo que no genera daño al paisaje, y no es necesario procesarla. Si en el material seleccionado hubiera escasez de finos, se puede agregar cal (excepto cal viva) y arena fina.

Estabilizador Químico	Funcionalidad (Estabilizantes No Tradicionales)
<i>Resina de árbol</i>	Las resinas de los árboles son principalmente agentes cementantes que unen físicamente las partículas del suelo, son adecuadas para materiales granulares, pero son menos efectivas en suelos de grano fino debido a la menor eficiencia de mezcla.
<i>Lignosulfonato</i>	Los lignosulfonatos, incluidos los lignosulfonatos de sodio, calcio y amonio, se derivan de la lignina que une las fibras de celulosa. Estos pueden recubrir las partículas individuales del suelo con una fina película similar a un adhesivo que une las partículas. Los lignosulfonatos son principalmente agentes cementantes con efectos químicos menores según su composición. El efecto cementante estabiliza el suelo uniéndolo físicamente a las partículas del suelo. Sin embargo, como estos productos también son iónicos, tienen capacidad de intercambio iónico y de reacciones con algunos suelos.
<i>Enzimas</i>	Las enzimas son moléculas orgánicas que catalizan reacciones químicas muy específicas si las condiciones son propicias para la reacción. Por lo general, se usan en concentraciones bajas ya que no son consumidos por las reacciones que facilitan. En teoría, una enzima permanecería activa en el suelo hasta que no hubiera más reacciones que catalizar, de ahí la necesidad de pequeñas dosis. Se esperaría que las enzimas fueran muy específicas del suelo. Materiales como limos y suelos granulares no poseerían una afinidad significativa por el agua y no serían adecuados para la estabilización con productos enzimáticos.

Fuente:(Tingle et al., 2007).

k) Mechas Drenantes

Las mechas drenantes son drenes prefabricados que se hincan en el terreno y permiten recoger el agua y conducirla, sin pérdida de carga, hacia el exterior. Normalmente el agua se recoge en una capa o lecho libremente drenante colocada en la superficie del terreno (base de la precarga en su caso). En ciertas circunstancias, la presencia de costras desecadas superficiales, o de algún horizonte o estrato duro intercalado, pueden hacer necesario realizar perforaciones auxiliares para facilitar el hincamiento de las mechas. Éstas suelen atravesar completamente el terreno blando a consolidar, y quedan dispuestas en filas “tresbolillo”, es decir, vértices de triángulos equiláteros, con separaciones entre ellas. Los suelos blandos saturados, al estar sometidos a cargas o precargas, han de expulsar agua para ganar la consistencia suficiente con el fin de construir la obra. Ésta circularía consecuentemente hacia los extremos permeables, lo que conlleva a que se formen caminos o recorridos de agua demasiado largos, que podrían requerir tiempos superiores a los compatibles con la realización de las obras en cuestión. (Dirección General de Carreteras. & Laboratorio de Geotecnia del CE- DEX, 2009)

i) Estabilización biológica

Para tener un enfoque ecológico en el mejoramiento de un terreno, los ingenieros geotécnicos han estado en constante trabajo con el medio ambiente para descubrir un método adecuado y económico para la estabilización utilizando microbios o bacterias. Es una alternativa poco común, sin embargo, el proceso microbiológico es más amigable con el medio ambiente que otros métodos de tratamiento convencionales (Achal et al., 2011). El proceso involucrado en el efecto microbiano da como resultado que, en los poros de la matriz de suelo, se forme un precipitado mineral, el cual altera las propiedades del mismo mediante una cementación llamada biocementación. Ésta tiene como función, mejorar las propiedades de resistencia y rigidez del suelo; y en las rocas mediante la introducción de bacterias y reactivos de cementación en el suelo. La biocementación incluye la unión de las partículas del suelo con sulfuros de metales producidos por bacterias reductoras de sulfato, al mismo tiempo con carbonatos de metales producidos debido a la hidrólisis de la urea y por último, terminando con la unión con sales e hidróxidos ferrosos y férricos producidos por la actividad de las bacterias reductoras de hierro; incluso existe otra forma, que consiste en el llenado de los orificios con un producto resultante de una transformación bioquímica inducido por microbios llamado bioobstrucción (Mitchell & Santamarina, 2005). La cual, incluye la formación de una capa impermeable de biomasa de algas y cianobacterias. La producción de sulfuros de metales no disueltos por bacterias reductoras de sulfato y carbonatos de metales no disueltos se forman por bacterias amonificantes. La solución ferrosa y la precipitación de hidróxidos y sales ferrosas y férricas no disueltas en el suelo son formadas por bacterias reductoras de hierro. Finalmente, cabe destacar que los factores como temperatura y humedad afectan altamente las reacciones metabólicas dentro de las células y algunas propiedades físicas como la viscosidad y la difusión. (DeJong et al., 2010)

Tabla 5. Clase de bacterias y su función correspondiente

SUELO	BACTERIAS	PROCESO MICROBIANO	MEJORA	DESVENTAJAS	REFERENCIA
Ottawa (50-70) arena	Bacilo pasteurii	Proceso de cementación	Aumento de la capacidad axial, mayor capacidad elástica	La degradación de la cementación fue detectable	(Dejong et al., 2006)
Arena de Itterbeck	Sporosarcina pasteurii	Actividad de ureasa	La porosidad se redujo al 90%, un aumento significativo de la resistencia	CaCO ₃ (por debajo de 60 kg/m ³ o 3.5% p/p) no tuvo efecto significativo	(Whiffin et al., 2007)
Arena	Mineralización impulsada por enzima ureasa	Enzima para hidrolizar la urea	La resistencia a la compresión libre aumenta y la permeabilidad se reduce	No definido (N.D.)	(Yasuhara et al., 2012)
Arena	Bacilo pasteurii		El tamaño efectivo de la arena incluye en el rendimiento	N.D.	(Pusadkar & Chavan, 2014)
Arena	Sporosarcina pasteurii	Precipitación de calcita	Mejoras significativas en los valores de UCS y rigidez, valores de coeficiente de permeabilidad de las arenas tratadas	N.D.	(Shahrokhi et al., 2014)
Suelo de algodón negro	Se utilizó caldo de soja tréptico para el cultivo de microorganismo	Uso de caldo de soja tréptico	El índice de plasticidad disminuye, el límite de contracción aumenta, la presión de hinchazón disminuye	N.D.	(Pusadkar, 2014)
Arena	Bacilo, sporosarcina, sporolactobacillus, clostridium y desulfotomaculum	Hidrólisis de urea	Aumento en la resistencia al corte, resistencia a la compresión confinada, rigidez y resistencia a la licuefacción	N.D.	(Ukken & Krishnan, 2015)

Fuente: (Di Prisco et al., 2016). Traducido.

Tabla 6. Recomendación del método de estabilización según el tipo de suelo.

Tipo de Suelo	Métodos de Estabilización más eficaces
Suelos granulares gruesos	Mezcla mecánica, Suelos asfálticos -Suelos cal - cenizas volantes.
Suelos granulares finos	Mezcla mecánica estabilización con cemento portland, Cal-cenizas volantes, Suelo asfálticos-cloruros.
Arcillas de baja plasticidad	Compactación, estabilización con cemento portland, impermeabilizantes químicos, modificación con cal
Arcillas de alta plasticidad	Estabilización con cal.

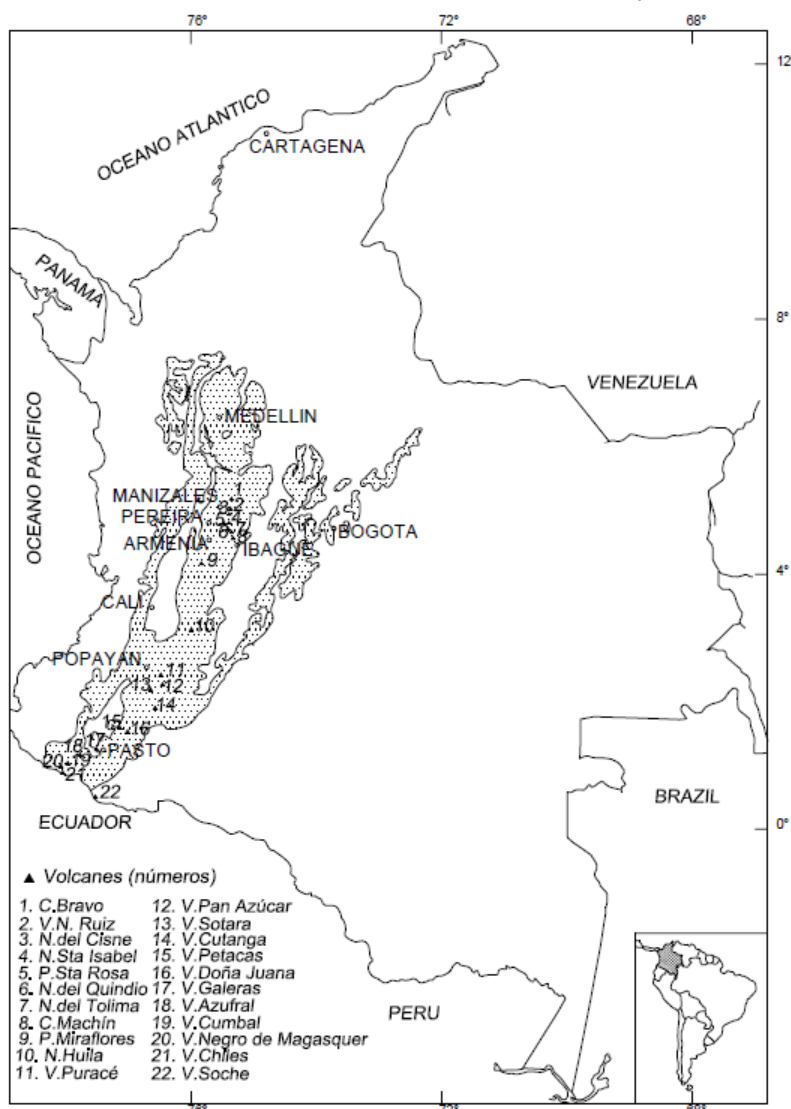
Fuente:(Solminihac Hernán et al., 1989) .Traducido.

2.3 Suelos Derivados de Cenizas volcánicas (SDCV)

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (SDCV) (Andisoles) cubren a gran parte del área de América Central y América del Sur. La fracción arcilla de estos suelos está dominada por alófana, imogolita y haloisita (minerales amorfos de rango corto) que provienen de la meteorización de los materiales piroclásticos producto de recientes deposiciones volcánicas. (Espinosa, 2004)

Estos suelos ocupan cerca del 12% del territorio colombiano y se localizan de manera preponderante en la cordillera Central, desde el Eje Cafetero (departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío) en el centro del país, hasta los departamentos de Tolima, Cauca y Nariño hacia el suroeste, casi siempre en zonas lluviosas con alturas sobre el nivel del mar mayores de 1000 metros. En la sabana de Bogotá y otras zonas aledañas a la cordillera Oriental se presentan algunos depósitos con patrones dispersos y discontinuos.

Ilustración 10. Distribución de los suelos derivados de ceniza volcánica en Colombia



Fuente: Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: estudio fundamental e implicaciones en ingeniería (Herrera A., 2006)

La mineralogía de estos suelos tiene gran influencia sobre sus características y su comportamiento mecánico. Los minerales presentes en la fracción arcillosa, principalmente alófana (aunque también se pueden presentar imogolita y haloisita), derivados de la meteorización de las cenizas volcánicas, contribuyen al desarrollo de las propiedades químicas y físicas únicas que exhiben estos suelos. Entre ellas, las más reconocidas son baja densidad (inferior incluso a la del agua), plasticidad media, elevada relación de vacíos, alta capacidad de retención de agua, alta humedad natural (generalmente superior al límite líquido) y friabilidad y tendencia a agregarse, clasificando

generalmente como limos o arenas limosas. Valores típicos de las propiedades índices de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas en el país se muestran en la Ilustración 11 y la Ilustración 12

Ilustración 11. Propiedades índices de suelos derivados de ceniza volcánicas.

Propiedades	Colombia		Otros países	
pH	4.5 – 6.2	[2]	6	India [21]
	6.1 – 6.3	[3]	4.6 – 5.2	USA [6]
	5.1 – 5.8	[4]	3.6 – 8	Japón [20]
			4.8 – 7.2	Nueva Zelanda [16]
			5.7 – 6.2	Java [25]
G _s	2.47 – 2.65	[4]	5.8 – 6.7	Hawai [26]
	1.92 – 2.67	[1]	2.58 – 2.59	Ecuador [15]
	2.50 – 2.67	[31]	2.67 – 2.74	Japón [13]
S _a [m ² g ⁻¹]	170 – 340	[31]	2.28 – 2.65	Fiji [8]
			50 – 250	Japón [20]
e	2.0 – 7.0	[3]	581 Alofana (adsorción de N ₂)	– [19]
	1.1 – 1.9	[24]	2.4 – 5.3	Indonesia [28]
	2.0 – 2.7	[4]	1.5 – 8	Indonesia [30]
	0.88 – 3.62	[1]	1.9 – 4.1 predomina alofana	India [22]
	1.3 – 3.8	[31]	3.0 – 5.7	Japón [7]
w _o	80 – 200%	[3]	1.0 – 6.1	Japón [11]
	16 – 90%	[1]	1.8 – 6.6	Java [25]
	29 – 119%	[31]	50 – 300%	Indonesia [30]
			50 – 100%	India [21]
w _L	52 – 64%	[4]	102 – 205%	Japón [7]
	60 – 70%	[14]	40 – 50%	Japón [13]
	120 – 250 %	[17]	27 – 184%	Japón [11]
	37 – 117%	[31]	70 – 110% predomina haloisita	Indonesia [28]
			85 – 190% predomina alofana	Indonesia [28]
			95 – 107% predomina haloisita	New Guinea [12]
			156 – 165% predomina alofana	New Guinea [12]
			179 – 187%	Indonesia [29]
w _p	27 – 33%	[4]	80 – 213%	India [21]
	45 – 50%	[14]	72 – 159%	Japón [20]
	70 – 150%	[17]	105 – 107%	Ecuador [10]
	25 – 90%	[31]	31 – 40%	Japón [13]
			55 – 75% predomina haloisita	Indonesia [28]
w _p			65 – 150% predomina alofana	Indonesia [28]
			65 – 73% predomina haloisita	New Guinea [12]
			119 – 129% predomina alofana	New Guinea [12]
			139 – 149%	Indonesia [29]
			40 – 100%	Japón [20]
			17 – 20%	Japón [13]

Fuente: Fuente: Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: estudio fundamental e implicaciones en ingeniería (Herrera A., 2006) (Cristina & Ardila, 2006)

Ilustración 12. Propiedades índices de suelos derivados de ceniza volcánicas.

Propiedades	Colombia	Otros países
		~ 60% Ecuador [10]
S_r	65 – 88% [31]	50 – 80% India [18] > 95% Japón [7]
γ_d [kN/m ³]	8.70 (limo arenoso) [24] 10.7 (arena limosa) [24] 7.0 – 8.4 [4] 4.5 – 13.8 [1] 5.7 – 13.8 [31]	4.0 – 7.2 Japón [7] 3.8 – 12.7 Japón [11] 7.9 – 9.8 Fiji [8] 4.3 – 7.6 Java [25]
γ_{sat} [kN/m ³]	15.1 (limo arenoso) [24] 16.1 (arena limosa) [24] 12.8 – 13.1 [31]	13.3 – 14.9 India [21] 11 – 14 Ecuador [15] 21.8 – 25.7 Japón [11]
k [m/s]	$8.1 \times 10^{-7} - 16 \times 10^{-5}$ [5] 8.1×10^{-7} (limo arenoso) [24] 4.4×10^{-6} (arena limosa) [24] 7.0×10^{-8} [14]	2.0×10^{-5} Ecuador [9] 3.0×10^{-5} Costa Rica [9] $1.0 \times 10^{-9} - 1.3 \times 10^{-8}$ predomina haloisita Indonesia [28] $0.8 \times 10^{-9} - 2.7 \times 10^{-8}$ predomina alofana Indonesia [28] $1.4 \times 10^{-6} - 5.6 \times 10^{-6}$ Dominica [22]
φ [°]	26 – 43 [3] 29 – 39 (arena limosa) [24] 22 – 29 (limo arenoso) [24] 30 – 38 [14]	30 – 40 Indonesia [30] 38 – 40 India [21]
S_u [Kpa]	26 – 309 [1] 25 – 135 [14]	65 – 200 Indonesia y New Zealand [30] 100 – 230 Japón [9] 20 – 160 Japón [13]

Fuente: Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: estudio fundamental e implicaciones en ingeniería (Herrera A., 2006) (Cristina & Ardila, 2006)

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (SDCV), comúnmente clasificados como Andisoles en términos taxonómicos, representan una de las unidades edafológicas más singulares debido a su origen volcánico, propiedades distintivas y distribución geográfica. Estos suelos se forman a partir de la alteración de depósitos piroclásticos (cenizas, lapilli y otros fragmentos volcánicos) bajo condiciones climáticas y ambientales particulares, como altas precipitaciones y temperaturas moderadas, que favorecen su desarrollo en zonas tropicales y subtropicales de alta montaña (IUSS Working Group WRB, 2015). Una característica central de los SDCV es su mineralogía única, dominada por minerales amorfos o de ordenamiento cristalino de corto rango, como la alófana, la imogolita y la haloisita. Estos minerales se originan por la meteorización química de las cenizas volcánicas y son responsables de

muchas de las propiedades físicas y químicas que distinguen a estos suelos de otros tipos edáficos. Por ejemplo, la alófana y la imogolita tienen una alta superficie específica y un comportamiento coloidal, lo que les otorga capacidades excepcionales de retención de agua y alta fertilidad natural, aunque con limitaciones en ciertos casos debido a la fijación de fósforo.

En Colombia, los SDCV cubren aproximadamente el 12% del territorio y son prominentes en áreas montañosas de la cordillera Central, extendiéndose desde el Eje Cafetero hasta el sur del país en departamentos como Tolima, Cauca y Nariño, y en patrones dispersos en la cordillera Oriental, como en la sabana de Bogotá. Estas zonas suelen estar por encima de los 1000 metros sobre el nivel del mar y presentan un régimen de lluvias elevado que contribuye a la rápida alteración de los materiales volcánicos. Las propiedades físicas de estos suelos también son notables, destacándose por su baja densidad aparente (inferior a 1 g/cm^3), alta friabilidad, alta porosidad, y una capacidad de retención de agua que puede exceder su límite líquido, lo cual tiene implicaciones para su comportamiento mecánico y uso en ingeniería geotécnica. Estas características, aunque beneficiosas para la agricultura, presentan retos significativos para la estabilización y construcción, debido a su baja resistencia al corte, alta compresibilidad y cambios volumétricos frente a variaciones de humedad. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR), 2007)

En el contexto de su estabilización química, como se aborda en este trabajo, los SDCV han demostrado responder favorablemente a tratamientos con agentes estabilizantes como la cal, dado que esta puede inducir reacciones puzolánicas al interactuar con los minerales amorfos presentes en la fracción arcillosa. Estas reacciones promueven la formación de compuestos cementantes, como los silicatos y aluminatos de calcio, que mejoran las propiedades mecánicas y reducen la plasticidad y la susceptibilidad a la humedad. Por lo tanto, el análisis detallado de la composición y propiedades de estos suelos es crucial para desarrollar lineamientos específicos que optimicen su estabilización y permitan su uso eficiente en proyectos de infraestructura. (Folberth et al., 2012)

2.4 Estabilización Química de Suelos con Cal

Las investigaciones han demostrado que la cal puede ser un estabilizador eficaz en suelos con un contenido de arcilla tan bajo como el 7 por ciento y en suelos con índices de plasticidad por debajo de 10. La Asociación Nacional de Cal recomienda un índice de plasticidad de 10 o superior para que la cal sea considerada como un estabilizador potencial, mientras que el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos recomienda un índice de plasticidad de 12 o superior para una estabilización exitosa con cal. Según la clasificación de AASHTO, los tipos de suelo A-4, A-5, A-6, A-7 y algunos de A-2-6 y A-2-7 son adecuados para la estabilización con cal. Nicholson, en el año 2015 agrega que se puede lograr una estabilización de calidad con un contenido de cal del 2-8%. Si se necesita más cal para lograr los resultados deseados o requeridos, entonces puede ser más económico utilizar otro tipo de aditivo, como el cemento.

La estabilización de suelos con cal es una técnica ampliamente utilizada en ingeniería geotécnica para mejorar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de suelos problemáticos. Este proceso consiste en incorporar cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)_2) al suelo, generando reacciones químicas que modifican su estructura interna y su comportamiento mecánico (P.T. Sherwood, 1993). Es particularmente efectiva en suelos arcillosos y suelos volcánicos debido a la alta reactividad química de sus minerales amorfos como la alófana y la haloisita. (Bell, 1996)

Modificación inmediata del suelo: El contacto inicial entre la cal y el agua presente en el suelo provoca una reacción exotérmica y un aumento significativo del pH. Esto mejora la trabajabilidad del suelo al reducir su plasticidad y aumentar su friabilidad (P.T. Sherwood, 1993). La floculación y aglomeración de partículas de arcilla son efectos dominantes en esta etapa inicial, gracias a la liberación de iones calcio (Ca^{2+}), que reorganizan la estructura del suelo. (Dallas N. Little, 1995)

Reacciones a largo plazo (puzolánicas): A largo plazo, la cal reacciona con los óxidos de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) del suelo, generando compuestos cementantes como silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH). Estas reacciones mejoran

significativamente la resistencia y la durabilidad del suelo (Jagannath Mallela et al., 2004). En suelos derivados de cenizas volcánicas, la alta disponibilidad de sílice amorfa favorece estas reacciones, produciendo suelos con mejores propiedades mecánicas. (J. C. Herrera, 2006)

Mejoramiento mecánico: Incremento de la resistencia al corte: Los productos cementantes aumentan la cohesión y la resistencia a la compresión del suelo. (Dallas N. Little, 1995)

Reducción de la expansividad y de la permeabilidad: En suelos arcillosos o volcánicos altamente plásticos, la cal neutraliza el hinchamiento y contracción frente a variaciones de humedad (Bell, 1996). La formación de una matriz más compacta disminuye la porosidad efectiva, limitando el flujo de agua y mejorando su comportamiento hidráulico (P.T. Sherwood, 1993).

Durabilidad frente a condiciones climáticas adversas: Los suelos estabilizados con cal resisten mejor a ciclos de humedad-sequía, heladas y ataques químicos, lo que los hace adecuados para aplicaciones en pavimentos y terraplenes (Jagannath Mallela et al., 2004).

Antes de la estabilización, se realizan ensayos geotécnicos para evaluar la plasticidad, granulometría, contenido de humedad y capacidad de reacción con la cal. Estos parámetros determinan la cantidad óptima de cal requerida (P.T. Sherwood, 1993).

Dosificación, mezclado, compactación y curado del método de la cal: La cantidad de cal varía entre el 2% y el 10% en peso del suelo seco. La dosificación ideal se determina mediante pruebas como el ensayo de pH de equilibrio o la prueba (Eades & Grim, 1960) (Dallas N. Little, 1995). La cal se mezcla uniformemente con el suelo y se compacta para promover un contacto íntimo entre partículas. Esto se realiza cerca de la humedad óptima para maximizar la densidad seca y facilitar las reacciones químicas (Bell, 1996). Por último, el curado del suelo estabilizado se mantiene húmedo durante un período de curado (7-28 días) para permitir el desarrollo completo de las reacciones puzolánicas (Jagannath Mallela et al., 2004).

Limitaciones de la Estabilización con Cal

- Suelos no reactivos: En suelos con bajo contenido de arcilla o minerales no reactivos, la cal puede no ser efectiva.
- Condiciones climáticas: En ambientes muy húmedos, la cal puede reaccionar prematuramente con la humedad del aire, reduciendo su eficiencia.
- Impacto ambiental: La producción de cal es una fuente importante de emisiones de CO₂, lo que plantea desafíos de sostenibilidad ambiental (J. C. Herrera, 2006).

Aplicaciones Principales

- Carreteras y pavimentos: Mejoramiento de suelos subrasantes para incrementar la capacidad de soporte (P.T. Sherwood, 1993).
- Terraplenes y plataformas: Uso de suelos locales estabilizados para reducir costos y mejorar la resistencia estructural (Dallas N. Little, 1995).
- Control de expansión de arcillas: Mitigación de problemas en cimentaciones y pavimentos.

Polvo de Horno de Cal

La Asociación Nacional de la Cal, (2004) Se refiere a la ceniza o polvo de horno de cal (LKD por sus siglas en inglés) definiéndola como el residuo fino que resulta de la combustión de carbón y el tratamiento de caliza en un horno, para procesar la piedra en cal y que es removido de los gases de escape del horno. El LKD por lo general contiene una cantidad significativa de cal, aluminio y silicio es en esencia una premezcla de puzolana y cal. La cantidad de cal, silicio y aluminio en el LKD varía, principalmente dependiendo de la caliza, el combustible y el tipo de operaciones del horno usadas durante el proceso de fabricación de cal.

Cuando se añade en la cantidad adecuada, la cal sola estabilizará con eficacia la mayor parte de suelos arcilloso. Sin embargo, cuando el suelo no es suficientemente reactivo, se puede necesitar

sílice y alúmina para la estabilización. El uso de polvo de horno de cal (LKD por sus siglas en inglés) o la cal-ceniza volante son dos alternativas. La alúmina, la sílice y la cal son tres de los principales componentes del polvo de horno de cal. Con el diseño apropiado, este material puede ser usado para la modificación del suelo, incluyendo la modificación de los suelos con bajas concentraciones de arcilla inferior. Si la cantidad adecuada de cal (y sílice y alúmina) está presente, el polvo de horno de cal también puede ser utilizado para la estabilización de suelos. Los procedimientos de construcción son esencialmente los mismos como aquellos usados para la cal viva seca.

Mecanismo de reacción de la Cal con el Suelo

Los suelos se pueden estabilizar añadiendo cemento o cal. Dichos procesos de estabilización mejoran las diversas propiedades técnicas del suelo estabilizado y generan un material de construcción mejorado. El aumento de la resistencia del suelo, la rigidez de la durabilidad y la reducción de la plasticidad del suelo y del potencial de hinchazón/contracción son los beneficios de la estabilización del suelo [1–5]. El concepto de estabilización tiene 5000 años. McDowell indicó que en el antiguo Egipto y Mesopotamia se utilizaban caminos de tierra estabilizada y que los griegos y romanos utilizaban la cal como estabilizador. Sin embargo, los recientes levantamientos y fallas prematuras del pavimento en subrasantes tratadas con cal y cemento que contienen sulfatos llevaron a cuestionar la validez de la estabilización a base de calcio.

(Asociación Nacional de la Cal, 2004). Efectuaron un compendio titulado “Manual de Estabilización de Suelo Tratado con Cal” en el que indican el componente de la cal, la cual está constituida por óxido de calcio (CaO), ésta se produce de la transformación química con el carbonato de calcio (Piedra caliza - CaCO_3). Por otra parte, expone que los suelos arcillosos de grano fino (con un mínimo del 25% que pasa el tamiz 200 y con un índice de plasticidad mayor que 10) se consideraban buenos demandantes para la estabilización con cal.

(Rodríguez Moreno et al., 2005), realizaron un estudio que tenía como objetivo obtener la estabilización de un suelo residual de diorita con cal, realizando el balance con el mismo suelo sin

tratamiento; analizando el efecto del contenido de finos y el tiempo de curado sobre la resistencia a la compresión simple, tracción indirecta y a la penetración (CBR) de especímenes cilíndricos compactados con 4 porcentajes diferentes de dosificación de cal. Se encontró que la resistencia con cualquier dosificación de cal, es marcadamente mayor con respecto al material sin cal. Para los suelos con altos contenidos de finos se requirieron al menos 60 días para alcanzar las resistencias máximas, mientras que en el suelo sin finos la resistencia máxima se alcanzó al poco tiempo de curado, pasando de una resistencia sin cal del orden de 3 kg/cm² a una resistencia de 9 o 10 kg/cm² a los 7 días para todos los contenidos de cal.

(Arrieta Fabián Elizondo et al., 2010), evaluaron el efecto de dos tipos de cal en las propiedades de un suelo de alta plasticidad, estabilizado con cal, además valoraron el cumplimiento de especificaciones de acuerdo con la normativa existente de Costa Rica. Se seleccionaron los aditivos aptos y sus respectivas restricciones para cada tipo de suelo clasificado según (S.U.C.S), basados en el tamaño de la partícula o con condiciones de plasticidad (IP,LL), que posteriormente fueron comparados con metodologías de diseño propuestas por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada norteamericana y por la National Lime Association, (2004) con el fin de valorar las ventajas y desventajas de cada una de ellas, se obtuvo que el método de la NLA se propone como el más factible debido a la reducción en el tiempo requerido para el diseño y su correspondencia con los resultados del método del CI.

Salomão y otros autores en el año 2019, en su proyecto titulado “Estabilización Química de Suelos de Textura Blanda” su objetivo fue estudiar la estabilidad química del suelo añadiendo cemento y cal, en un suelo de textura media con 25% de arcilla, realizando pruebas cilíndricas variando el porcentaje de cemento y cal en cantidades del 0 al 13% en relación con la masa del suelo, mediante ensayos físico-químicos, modelados y ruptura de los cuerpos de prueba. Se obtuvo que de las pruebas mecánicas los lotes con 3% de cal al 7% y 9% cemento, fueron los únicos que presentaron mayor resistencia mecánica promedio que el mínimo establecido por la NBR 8491 en Brasil.

2.5 Estabilización de Suelos Derivados de Ceniza Volcánica con Cal

Las cenizas volcánicas son materiales que conforman sedimentos susceptibles a tener alteración con el tiempo, debido a procesos naturales tales como la meteorización, debido a su susceptibilidad a los cambios medioambientales, Siendo así desde el punto de vista mineralógico, las cenizas volcánicas llevan a la formación de minerales de arcilla tales como la haloisita, alófana e imogolita; cuya presencia es casi exclusiva en estos suelos, siendo estos minerales que generar problemas de inestabilidad en el suelo por su estructura mineralógica y morfológicas.

La estabilización con cal es una técnica utilizada para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de suelos finos, como arcillas y limos. Este proceso implica la adición de cal al suelo, lo que provoca una reacción química que aumenta su cohesión y resistencia. La cal reacciona con el agua y los minerales del suelo, formando compuestos estables que refuerzan la estructura del terreno. Esta técnica es especialmente útil en la construcción de caminos y bases de pavimento, donde se requiere una mayor estabilidad. Además, la estabilización con cal ayuda a reducir la plasticidad y la expansión del suelo. Es una solución económica y eficaz para mejorar la calidad del suelo en diversas aplicaciones de ingeniería civil.

La cal es el estabilizante tradicional más antiguo utilizado para la estabilización de suelos, mediante su incorporación se logra mejorar la calidad del suelo e incrementar su idoneidad para el uso en la construcción. La estabilización mediante la adición de cal es un método que ha sido ampliamente utilizado en todo el mundo y por esta razón, es importante verificar su uso, la metodología desarrollada para su aplicación, así como la obtención de resultados favorables en el incremento de la resistencia del suelo.

Bhardwaj & Sharma, 2021, en su investigación “Influencia de los desechos industriales y la cal en las características de resistencia de un suelo arcilloso”, realizaron un análisis de la incidencia de la cal como aditivo en un suelo arcilloso blando, clasificado como (CH), en donde se observó una disminución del índice de plasticidad (IP) desde 35% a 9% con la adición de porcentajes de

estabilizante que iban desde 3 a 12%, siendo 9% el porcentaje que mayor disminución del IP generó en el suelo en comparación con las otras concentraciones de cal. Además, al evaluar el comportamiento del suelo combinado con cal, se evidenció un incremento en el ángulo de fricción del suelo en un 50.6% y una disminución en el valor de cohesión de 19.06%, así mismo, la combinación de otros estabilizantes producto de desechos industriales más la adición de cal generaron efectos positivos en el mejoramiento de las características del suelo. Con base en los resultados obtenidos, es evidente la mejora que se genera al suelo con la presencia de la cal como estabilizante, adicionándose incluso en cantidades más pequeñas que originan costos de construcción mucho menores.

De la misma forma, (Kakrasul et al., 2022), en su artículo “Uso del polvo de horno de cal para mejorar las propiedades de subrasantes para pavimentos”, realizaron ensayos de campo y de laboratorio para evaluar los beneficios de este aditivo en la estabilización de suelos de subrasante; se realizaron una serie de ensayos de penetración dinámica de cono (DCP) y deflectómetro liviano (LWD) en tres sitios diferentes de construcción con el fin de evaluar la resistencia y rigidez in situ de los suelos de subrasante tratados con el polvo de horno de cal, en donde los resultados mostraron una mejora sustancial en el suelo que incrementó con el tiempo. Así mismo, se evaluaron también las propiedades del suelo en laboratorio después de la compactación y varios días de curado. Los ensayos mostraron una mejora de más del 100% en la resistencia del suelo tratado con polvo de horno de cal, desarrollándose la mayor parte de la resistencia en los primeros tres días después de la compactación. Los resultados de laboratorio evidenciaron que un 5% de polvo de horno de cal fue suficiente para reducir efectivamente la plasticidad de los suelos, así como la expansión de estos, logrando una efectiva estabilización de la subrasante.

Así mismo, en el documento “Estabilización de un suelo de subrasante usando cal viva: Un estudio de caso de la carretera Modjo-Hawassa, Etiopía central” (Regasa et al., 2023) se examinaron las propiedades índices de resistencia del suelo mezclando cal con cinco muestras de suelo tomadas de la carretera Modjo-Hawassa clasificadas como suelos MH y CH, con CBR menores a 5% y porcentajes

de expansión mayores a 2%. El objetivo principal de este estudio fue proporcionar más información sobre los efectos de la estabilización con cal en los límites de Atterberg (LL, LP, IP), humedad óptima, densidad seca máxima, CBR y porcentaje de expansión del suelo de subrasante a lo largo de la ruta seleccionada. Para esto, se utilizaron porcentajes de cal de 4, 6 y 8%, observándose una mejora considerable de las características de resistencia y compactación de los suelos, reduciendo el índice de plasticidad (IP) así como el porcentaje de expansión del suelo e incrementando los valores de CBR.

Ghanizadeh et al., (2023), en su artículo “Investigación del efecto de la estabilización con cal de la subrasante sobre la fatiga y vida útil de los pavimentos flexibles mediante el análisis empírico mecanicista no lineal” determinaron el efecto de la estabilización con cal en la vida útil del pavimento desde la perspectiva del diseño de este, para esto, consideraron un suelo arcilloso débil de alta plasticidad, clasificado como CH, al cual se le proporcionaron tres dosificaciones diferentes de cal (3,6 y 9%), a profundidades de estabilización de 15, 30 y 45 cm. El análisis se realizó asumiendo el comportamiento lineal de la capa de asfalto y comportamiento no lineal de la subrasante natural, la base granular y la subrasante estabilizada según el modelo no lineal Universal utilizando el software de análisis de pavimentos NonPAS. Los resultados mostraron que un aumento en el porcentaje de cal del 3 al 6% incrementa la vida útil del pavimento contra el ahuellamiento y la fatiga, mientras que el 9% no supone una diferencia notable, por ende, se consideró que el porcentaje óptimo de cal para el suelo arcilloso es del 6%.

Dentro de las investigaciones y estudios realizados de la estabilización con cal, se han evidenciado mejoras en el comportamiento del suelo a medida que incrementa el tiempo de curado. En el artículo “Uso del polvo de horno de cal para mejorar las propiedades de subrasantes para pavimentos” se observó una disminución en el cambio volumétrico del suelo al ser mezclado con cal a partir de los 7 días aproximadamente y siendo casi nulo después de los 28 días de curado (Kakrasul et al., 2022). De la misma manera, en el estudio “Estabilización de un suelo de subrasante usando cal viva: Un estudio de caso de la carretera Modjo-Hawassa, Etiopía central”, se evaluó el comportamiento

del suelo al ser mezclado con cal a los 7, 14 y 28 días, mostrando una reducción del límite líquido y el índice de plasticidad del suelo en estos tiempos de acuerdo con los porcentajes de cal utilizados, además se logró evidenciar un incremento en el CBR al extender los tiempos de curado a 14 y 28 días. De esta manera, se concluye que el periodo de curado afecta directamente el cambio de las características geotécnicas del suelo, presentando un mejor comportamiento a medida que este se extiende (Regasa et al., 2023).

Es así como el uso de la cal en diferentes porcentajes y tiempos de curado además de presentar mejoras en el suelo e incrementar su resistencia, genera beneficios en la prolongación de la vida útil del pavimento, convirtiéndose en un aditivo de gran potencial para la estabilización de los suelos de subrasante.

2.6 Ettringita

La ettringita es un mineral raro que se encuentra en algunos suelos, especialmente en aquellos con alto contenido de yeso o sulfato de calcio (Taylor W, 1990). Su presencia puede afectar la fertilidad y la estructura del suelo, por lo que es importante comprender sus propiedades y comportamiento.

La ettringita tiene una fórmula química de $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ (Taylor W, 1990) y se compone de sulfato de calcio y aluminio hidratado (Hansen, 1963). Se caracteriza por la presencia de cristales aciculares o prismáticos, a menudo en forma de agujas o estrellas (Deer et al., 1992). Debido a esto, este mineral puede reducir la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Lindsay, 1979) y aumentar la erosión del suelo (Kirkland, 1990). También puede causar problemas de drenaje y estructura del suelo (Doner, 1970); sin embargo, también puede ayudar a retener agua en el suelo y proporcionar sulfato de calcio, un nutriente esencial para las plantas (Lindsay, 1979).

Dentro de los métodos de análisis y detección para la ettringita se puede detectar mediante difracción de rayos X (DRX)(Taylor W, 1990), espectroscopía de infrarrojo (IR) (Hansen, 1963) y también se puede analizar mediante análisis químico de suelos (Lide, s. f.).

Efectos en los suelos por la presencia de ettringita:

- Puede reducir la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Lindsay, 1979).
- Aumentar la erosión del suelo.
- Causar problemas de drenaje y estructura del suelo (Doner, 1970).
- Ayudar a retener agua en el suelo (Hansen, 1963).
- Proporcionar sulfato de calcio, un nutriente esencial para las plantas.

2.7 Marco normativo

Esta investigación toma como referencia a las normas elaboradas por el Instituto Nacional de Vías, (2013), vigentes en Colombia, las cuales estandarizan los requerimientos y especificaciones de los ensayos necesarios para diseño y construcción de carreteras, cabe notar que para realizar de forma precisa la caracterización del suelo, se apoyó de la una norma española como lo fue la determinación del contenido de sulfatos solubles en los suelos (1972)

- Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E - 213 - 2013)
- Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (INV E - 124 - 2007)
- Determinación del límite líquido de los suelos (INV E - 125 - 2013)
- Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2013h)
- Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua (INV E - 128 - 2013)
- Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición (INV E - 121 - 2013)
- Contenido de sulfatos solubles en los suelos (NLT-120/1972)
- PH de los Suelos (INV E - 131 - 2013)

- Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación) (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2013)
- Compresión inconfiada en muestras de suelos (INV E - 152 - 2013)
- Ensayo de estabilidad al agua (N.A)

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta aspectos de la normativa obtenida como proyecto entre el INVIAS y la Universidad del Cauca (Sección 600), la cual reglamenta los procesos a seguir relacionados con la estabilización de suelos con productos químicos no tradicionales:

- Estimación de la proporción de cal necesaria para estabilizar un suelo a partir de la medida del pH (INV E - 601 - 2013)
- Adición de cal para reducir el índice de plasticidad de un suelo (INV E - 604 - 2013)
- Resistencia a la compresión y confinada de mezclas compactadas de suelo-cal (INV E - 605 - 2013)

3 Capítulo 3: Toma de muestras y plan experimental suelo natural

La toma de muestras y el desarrollo del plan experimental son etapas fundamentales para garantizar la representatividad y confiabilidad de los ensayos que permitirán caracterizar las propiedades del suelo natural. Este proceso incluye la selección cuidadosa de los puntos de muestreo, asegurando que las muestras recolectadas sean representativas de las condiciones del terreno. Posteriormente, se planifican los ensayos necesarios para evaluar las características físicas y mecánicas del suelo, siguiendo técnicas normativas específicas. En este capítulo, se describen los ensayos (ver Tabla 7) que se realizarán al suelo natural, las normas aplicables y la cantidad de repeticiones requeridas, con el objetivo de obtener datos precisos y reproducibles para el análisis del comportamiento del suelo y su interacción con agentes estabilizantes como la cal.

Tabla 7. Lista de ensayos que se practicarán al suelo natural

NÚMERO DE ENSAYO	TITULO	NORMA	Cant. por suelo y por repetibilidad
1	Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino	INV E – 213 – 13	9
2	Determinación del límite líquido de los suelos	INV E – 125 – 13	9
3	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	INV E – 126 – 13	9
4	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	9
5	Análisis granulométrico por medio del hidrómetro	INV E – 124 – 07	9
6	Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición	INV E – 121 – 13	9
7	Contenido de sulfatos solubles en los suelos	NLT-120/72	9
8	PH de los Suelos	INV E – 131 – 13	9
9	Caracterización Química (DRX)		6
10	Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)	INV E – 141 – 13	9
11	Compresión inconfiada en muestras de suelos	INV E – 152 – 13	9
12	Ensayo de estabilidad al agua	N. A	9

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Observaciones previas de los suelos en su estado natural.

El primer paso será identificar completamente las características de los suelos a emplear para decidir si su estabilización con cal es la solución más recomendable. En este acápite, se ejecutaron diferentes ensayos de laboratorio normalizados para tres muestras de suelo explorados de tres lugares distintos ubicados en la ciudad de Popayán que, clasifican como Suelos Derivados de Ceniza Volcánica y de los cuales cabe destacar que son muy típicos en algunas de las regiones Colombia y en el Departamento del Cauca, debido a la actividad volcánica histórica y actual en la Cordillera de los Andes y en otras áreas montañosas del país (ver Ilustración 10). Considerando las especificaciones de esta investigación, el objetivo es estabilizar los suelos ya mencionados; para lo cual se llevó a cabo una revisión bibliográfica que proporcionó ubicaciones estratégicas para la extracción de las muestras, contando con el material necesario y así tener seguridad de que no se presentara dispersión de las propiedades por efectos de la meteorización.

3.1.1 Ensayos de identificación de suelos:

Límites de Atterberg, granulometría por lavado, granulometría por el método del hidrómetro, humedad natural, gravedad específica, pH, materia orgánica, contenido de sulfatos y estabilidad al agua.

3.1.2 Ensayos de comportamiento:

Los dos ensayos esenciales para identificar la resistencia de los suelos en estudio, es el ensayo de Proctor Estándar, debido a que es aplicado a suelos finos cohesivos, y la capacidad portante por medio de la resistencia a la compresión inconfínada.

En función de los resultados de estas pruebas mencionadas y de los objetivos a alcanzar, se valora la idoneidad del suelo para el tratamiento. En este sentido, es importante recordar a Cristina & Ardila en el año 2006) donde confirman que el método de mejoramiento es más beneficioso para un suelo con un contenido de partículas finas considerable y tenga una plasticidad alta. En general,

aquellos suelos con un índice de plasticidad de 10 o superior, son susceptibles de mejorar sus propiedades bajo la influencia de la cal.

3.2 Muestreo de Suelos

Las muestras de suelo usadas para la elaboración de las probetas fueron extraídas por medio de exploración geotécnica (ver Ilustración 13) que posteriormente se guardaron en lonas o costales para ser finalmente colocarlas en bolsas plásticas con el fin de preservar su humedad.

Ilustración 13. Extracción de la muestra y conservación del material.



Fuente: Elaboración propia.

Los costales se llevaron al laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad del Cauca, donde se secaron las muestras en el horno para la realización de los ensayos de caracterización.

3.3 Descripciones de los suelos explorados

a) Suelo 1 - Clasificado como suelo fino derivado de ceniza volcánica color rojizo

La Ilustración 14 muestra el lugar exacto (K0+500 Vía Popayán - Coconuco) del sitio de muestreo donde fueron extraídas las muestras del suelo. Las muestras fueron almacenadas en bultos y llevadas al laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

Ilustración 14. Lugar de extracción del suelo – Vía Coconuco, Cauca



Fuente: Google maps – Fuente propia.

b) Suelo 2 – Clasificado como suelo fino derivado de ceniza volcánica color café claro

El primer suelo proviene de la Facultad de Ingeniería Civil, obtenido de un talud expuesto; la Ilustración 15 muestra el lugar exacto.

Ilustración 15. Lugar de toma del suelo – Facultad de Ingeniería Civil



Fuente: Google maps – Fuente propia.

c) Suelo 3 – Clasificado como suelo fino derivado de ceniza volcánica color café claro

La localización específica de la extracción de muestras para el tercer tipo de suelo se muestra en la Ilustración 16 (K2+000 Vía Timbío – Popayán). Estas muestras se tomaron de un talud expuesto.

Ilustración 16. Lugar de toma del suelo – Vía Timbío, Cauca



Fuente: Google maps – Fuente propia.

A continuación, se adjunta la Tabla 8 donde se encuentran registradas las coordenadas georreferenciadas de los lugares de extracción de los suelos.

Tabla 8. Coordenadas de los lugares de toma de muestras.

DEPOSITO DE MATERIAL	COORDENADAS	
	LATITUD	LONGITUD
Muestra 1. K0+500 vía Coconuco	2°26'45"N	76°35'15"W
Muestra 2. Facultad de Ingeniería civil	2°26'48" N	76°35'49" W
Muestra 3. K2+000 Vía Timbío	2°22'14"N	76°40'44"W

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Ensayo del análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INVE – 213 – 13)

Este ensayo se ejecutó con una muestra secada en el horno a una temperatura de 110°C para así obtener una masa constante, que posteriormente fue lavada a través del tamiz N°200 (0.075 mm) con el fin de separar los finos. Ahora bien, se introdujo al horno nuevamente a 110°C hasta masa constante y se determinó el peso final de finos. Nuevamente, la muestra se tamizó por las siguientes mallas: tamiz N°4 (4,75 mm), N°8 (2,36 mm), N°16 (1,18 mm), N°30 (0,600 mm), N°50 (0,300 mm), N°100 (0,150 mm) y N°200 (0,075 mm), ver Ilustración 18. Por último, se determinó el porcentaje de gravas, arenas y finos.

Ilustración 17. Tamizado para el análisis granulométrico



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 18. Tamices utilizados en el ensayo



Fuente: Elaboración propia.

Resultados obtenidos del ensayo (INVE – 213 – 13)

Los resultados obtenidos del ensayo para los tres suelos analizados se presentan por medio de la Tabla 9 y la Tabla 10, así como en la Gráfica 1, Gráfica 2 y Gráfica 3.

De acuerdo a estos resultados el Suelo (b) – Municipio de Coconuco se obtuvo que también, pertenece a un suelo fino dado a que el 85.7% fue pasante del tamiz # 200 (ver Tabla 9) y un 14.3% de contenido de arenas.

Para el Suelo (a) – Facultad de Ingeniería Civil es un suelo fino debido a que el 86.9% fue pasante del tamiz # 200 (ver Tabla 9) y un 13.1% perteneciente al contenido de arenas.

Finalmente, los resultados del Suelo (c) – Municipio de Timbío, se considera como un suelo fino, ya que el 66.1% fue pasante del tamiz # 200 (ver Tabla 9) y un 33.9% perteneciente al contenido de arenas.

Tabla 9. Datos del ensayo de granulometría – Suelo a, b y c

	(a) COCONUCO	(b) FIC	(c) TIMBIO
Tamiz	%pasa	%pasa	%pasa
N°4	100.0	100.0	100.0
N°8	99.8	100.0	99.8
N°16	98.2	99.8	97.3
N°30	95.8	98.8	91.0
N°50	94.6	94.8	82.5
N°100	90.7	90.6	73.7
N°200	85.7	86.9	66.1
FONDO	0.0	0.0	0.0

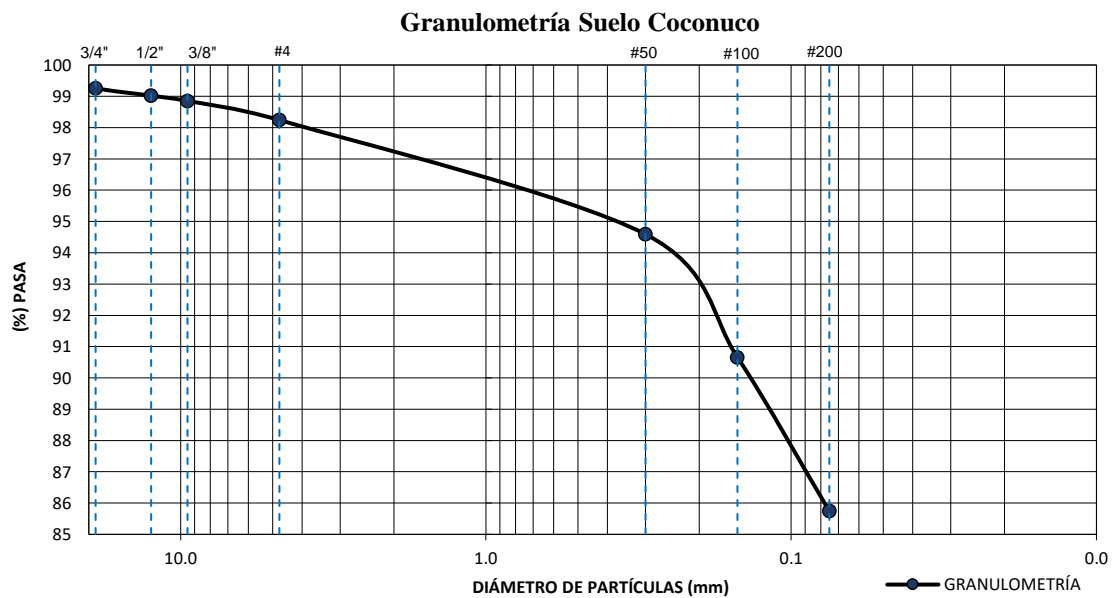
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Resultados finales del ensayo de granulometría – Suelo a, b y c

	COCONUCO	FIC	TIMBIO
Arena (%)	14.3	13.1	33.9
Finos (%)	85.7	86.9	66.1
Total (%)	100.0	100.0	100.0

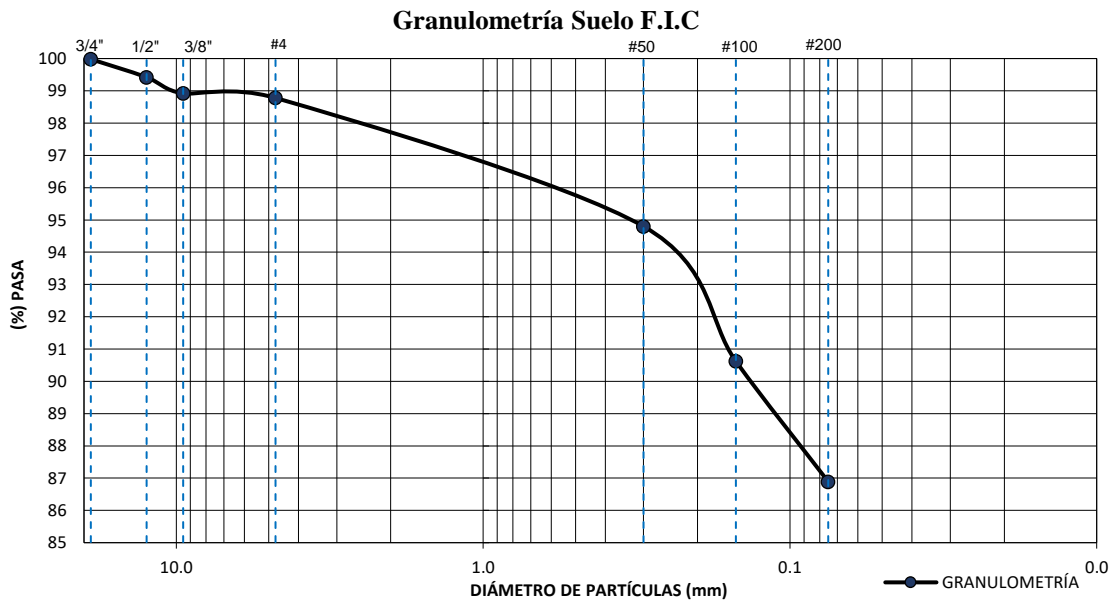
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 1. Curva granulométrica – Suelo a



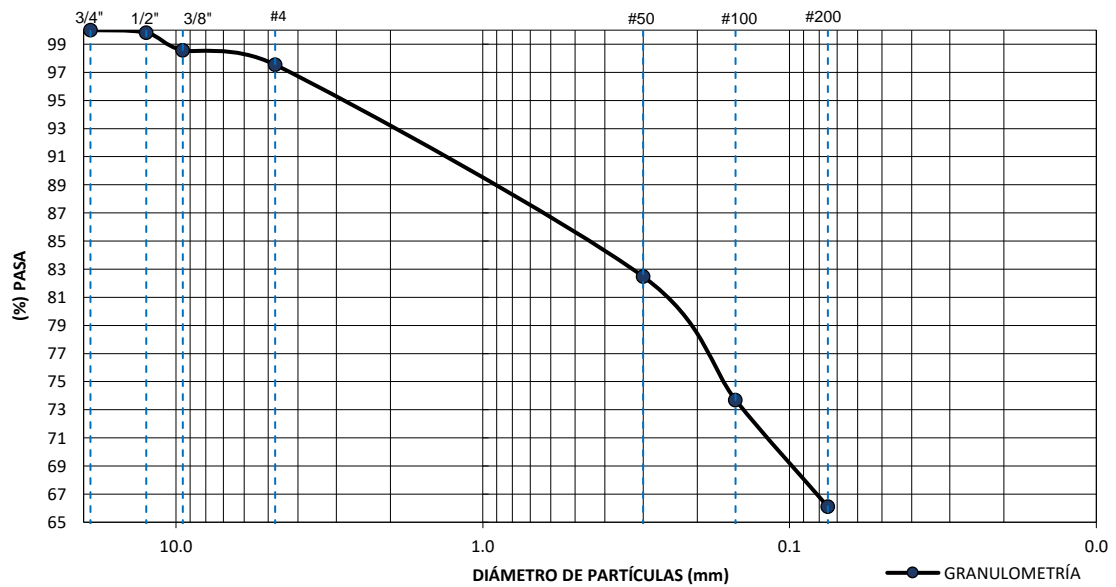
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2. Curva granulométrica – Suelo b



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3. Curva granulométrica – Suelo c

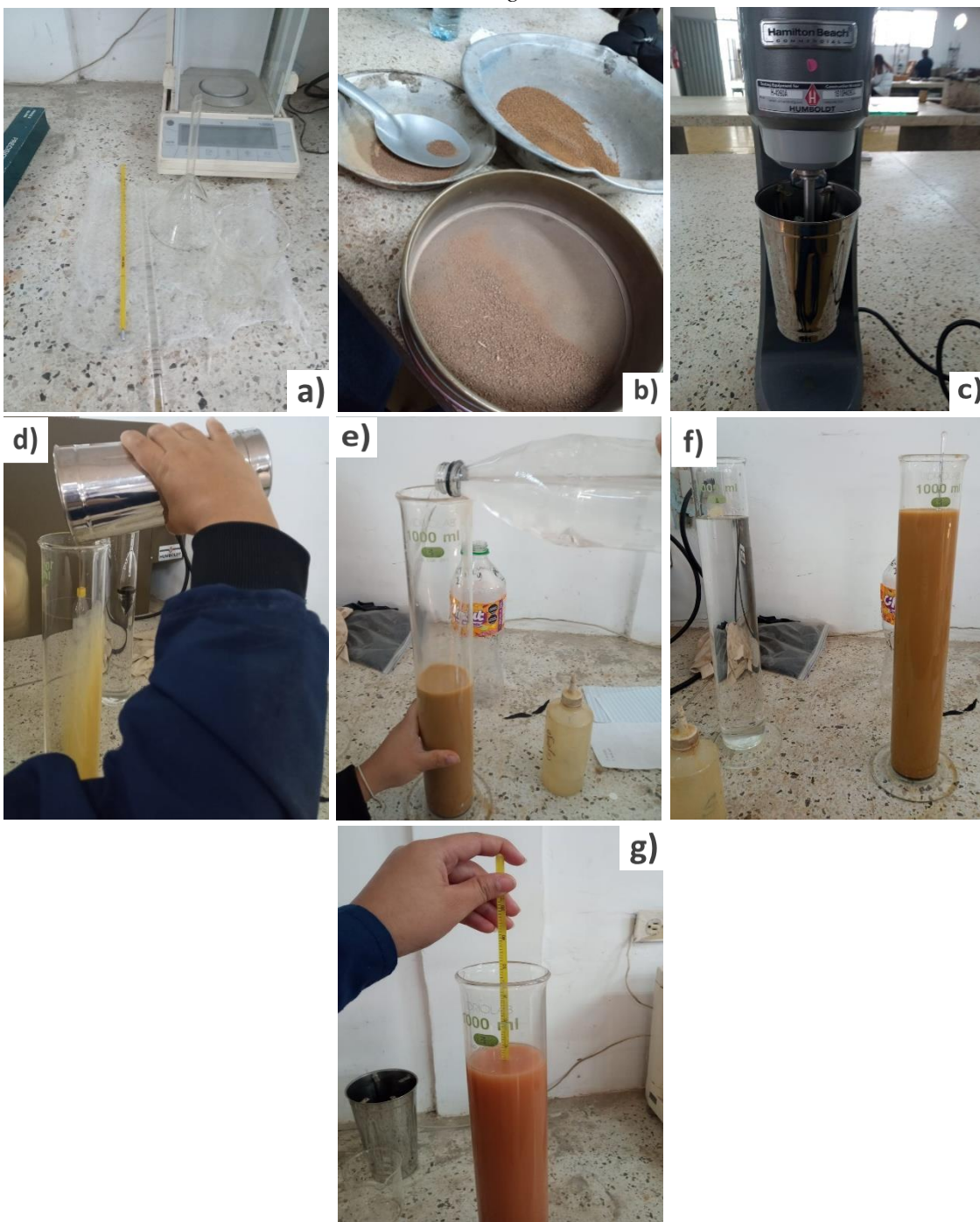


Fuente: Elaboración propia.

3.5 Ensayo sobre el análisis granulométrico por medio del hidrómetro (INV E – 124 – 07)

De los resultados adquiridos por el ensayo anterior, se dispuso realizar el análisis granulométrico por medio del hidrómetro con el fin de obtener el porcentaje de arcilla existente en los suelos con un tamaño de partícula menores a $2\ \mu\text{m}$ (0,002 mm). Este ensayo se realizó con una muestra de 50 gramos de masa seca del material pasante del tamiz #200 (0,075 mm) puesto que no se tratan de materiales arenosos. Se utilizó como agente dispersante una solución de hexametáfosfato de sodio ($\text{Na}_6[(\text{PO}_3)_6]$) en agua destilada con una proporción de 40 gramos por litro de solución. Posteriormente se mezcló la muestra con esta solución dispersante para luego dejarla saturar por 16 horas en la solución de trabajo. Después del periodo de saturación de la muestra; se procedió a mezclar por medio del agitador mecánico, se introdujo en una probeta de 1000 ml, se aforó con agua destilada y se agitó girando a 180° durante un minuto para luego proceder a tomar lecturas. Posteriormente se realizaron lecturas de densidad y temperatura, con un hidrómetro 152-H y un termómetro, al minuto (1), 2, 5, 15, 60, 120, 250 y 1440 minutos. (ver Ilustración 19)

Ilustración 19. Fases de la granulometría obtenida del hidrómetro



Fuente: Elaboración propia.

Resultados obtenidos del ensayo (INVE – 124 – 07)

Para este ensayo se realizó una interpolación para el suelo de Coconuco, debido a que el tamaño de grano de interés es de $2\ \mu\text{m}$ ($0,002\ \text{mm}$); por lo que, según los datos obtenidos del ensayo por

hidrometría se indica que, para el Suelo de Coconuco, el 17.8% corresponde a la fracción de arcillas y el 67.9% pertenecen al porcentaje de limos presentes en este suelo, para el Suelo de la Facultad de Ingeniería Civil, el 52.9% corresponde a la fracción arcillosa y el 34% pertenece a la fracción limosa. Finalmente, para el Suelo de Timbío se obtuvo un 41.7% de fracción arcillosa y un 24.4% de limo.

Tabla 11. Datos del ensayo del hidrómetro – Suelo a, b y c

TIEMPO (min) [t]	LECTURA DEL HIDROMETRO g/l [Rt]	Suelo Coconuco		Suelo Fic		Suelo Timbío	
		TAMAÑO DE GRANO [D]	% PASA [P]	TAMAÑO DE GRANO [D]	% PASA [P]	TAMAÑO DE GRANO [D]	% PASA [P]
1	43	0.0257	59.86	0.0232	74.88	0.028	48.17
2	41	0.0196	52.33	0.0174	71.03	0.020	46.29
5	40	0.0132	44.80	0.0113	69.10	0.013	44.40
15	36	0.0081	37.26	0.0071	61.39	0.008	42.52
60	33	0.0042	31.61	0.0038	55.61	0.004	41.81
120	29	0.0033	17.79	0.0029	50.77	0.003	43.82
250	29	0.0023	19.10	0.0020	52.89	0.002	41.47
1440	29	0.0009	12.35	0.0008	48.82	0.001	34.99

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Consistencia de los Suelos (INVE – 125 – 13, INVE – 126 – 13 e INVE – 181 – 13)

Determinación del límite líquido de los suelos (INVE – 125 – 13)

La determinación del límite líquido (LL o W_L) se presenta como un componente esencial en numerosos sistemas de clasificación de suelos, ya que desempeña un papel crucial en la caracterización de la fracción fina de dichos suelos. Este parámetro, obtenido a través de datos experimentales, se convierte en un recurso fundamental para la investigación, alimentando la determinación de varios índices importantes.

En particular, los resultados de esta determinación se utilizarán en el cálculo del índice de plasticidad, que proporciona información sobre la variabilidad de la plasticidad del suelo, permitiendo evaluar su comportamiento ante las fuerzas de deformación. Además, la consistencia relativa, derivada de los datos del límite líquido, ofrece perspectivas sobre la cohesión del suelo y su resistencia a la deformación.

Para este ensayo se usó el Método A (por vía húmeda) o también conocido como límite líquido multipunto, ya que, este método da con mayor exactitud los resultados. Se requiere de tres (3) o más tanteos sobre un rango de contenidos de agua donde se obtenga una consistencia que requiera de 15 a 35 golpes de la cazuela de Casa de Grande para cerrar la ranura que se forma en el suelo, estos resultados se dibujaron para establecer una relación a partir de la cual se determinó el límite líquido.

Se procesó la muestra de suelo para remover cualquier porción retenida en el tamiz No. 40 (0.425 mm). El límite líquido se determinó mediante tanteos, en los cuales una porción de la muestra se esparció sobre una cazuela de bronce y se dividió en dos partes con ayuda del ranurador plano, permitiendo que esas dos partes fluyeran como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada.

Ilustración 20. Ensayo de límite líquido.



Fuente: Elaboración propia.

Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (INV E – 126 – 13) y Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (INV E – 181 – 13)

En conjunto, estos parámetros derivados de la determinación del límite líquido contribuirán de manera significativa a una caracterización más completa y detallada de los suelos en estudio, enriqueciendo así el análisis geotécnico del proyecto de investigación.

El límite plástico (LP o W_p) se define como el contenido de agua del suelo, cuando éste se encuentra en el límite entre los estados plástico y semisólido, dicho de otra manera, se encuentra la

humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de 3,2 mm o 1/8" de diámetro, sin que estos se agrieten o desmoronen. Este ensayo se realizó presionando pequeñas porciones de muestra de los diferentes suelos de estudio, con el fin de moldear rollitos, hasta que el contenido de agua se redujera al punto de generarse agrietamiento y/o desmoronamiento de los mismos. Por último, todas estas fracciones de muestras se llevaron al horno a 110°C, para poder determinar su humedad.

El Índice de Plasticidad (IP) se conoce como el rango de contenido de agua, dentro del cual un suelo se comporta plásticamente. En otras palabras, se refiere numéricamente a la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). (Ver Ecuación 1)

Ecuación 1. Determinación del Índice de Plasticidad

$$IP = LL - LP$$

Fuente: Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (INVE – 126 – 13).

Por otra parte, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, categoriza los suelos en función de sus características como el tamaño de partícula, la plasticidad y la composición; estas clasificaciones se utilizan para describir y comprender el comportamiento de la estructura del suelo.

Ilustración 21. Ensayo de límite plástico



Fuente: Elaboración propia.

Resultados obtenidos de los ensayos (INVE – 125 – 13, INVE – 126 – 13 e INVE – 181 – 13)

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 12, se determinó que para el Suelo a (Coconuco), se obtuvo un 58% de límite líquido (LL). Continuando con el Suelo b (Fic), este posee un contenido de humedad del 70% en su estado natural, dado a que éste se encuentra en el límite entre los estados líquido y plástico; y finalmente un 64% (LL) para el Suelo c (Timbío).

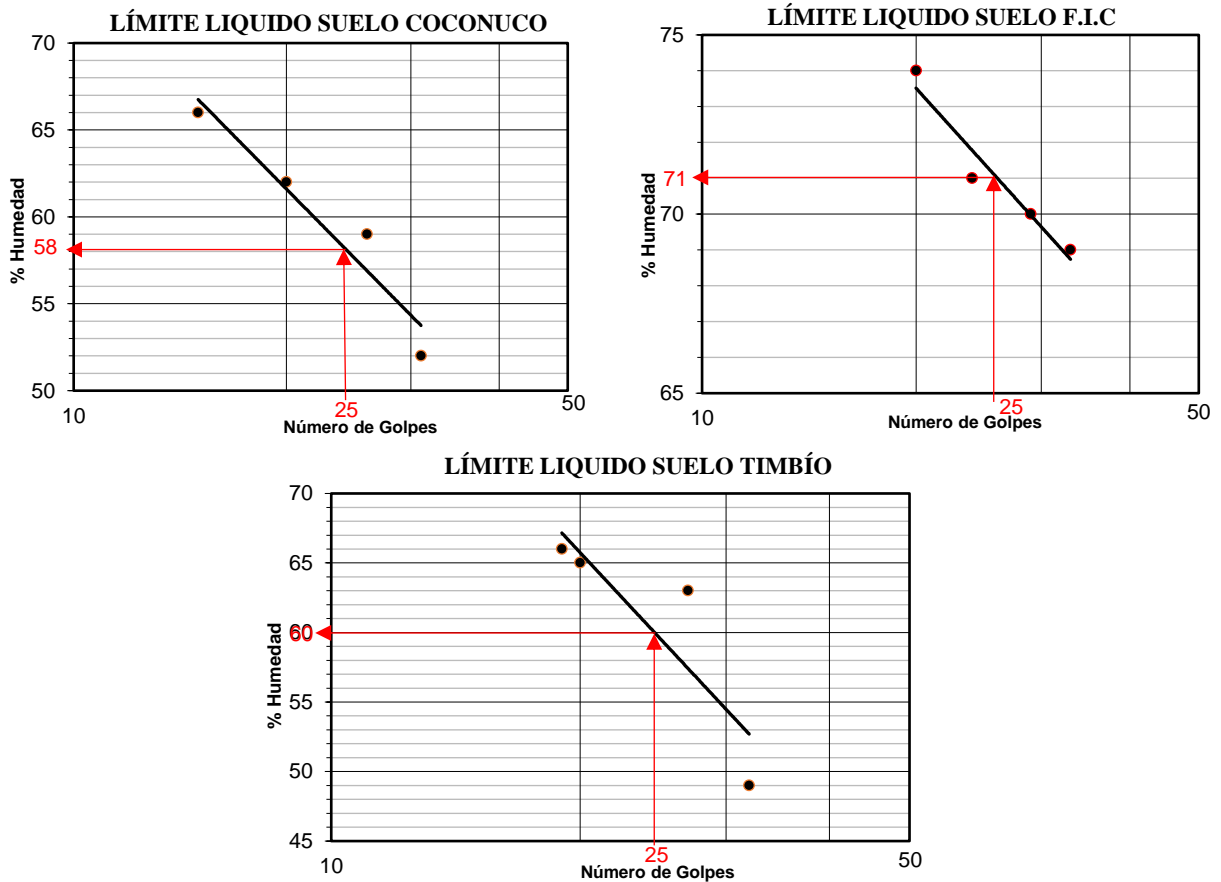
En definitiva, se afirma que los suelos explorados en esta investigación hacen parte de los Suelos Derivados de Ceniza Volcánica, ya que según la Ilustración 11, los datos obtenidos del ensayo se encuentran dentro de los límites o rangos de referencia.

Tabla 12. Datos obtenidos del ensayo (INVE – 125 – 13)

Suelo	Límite Líquido
Coconuco	58
F.I.C	70
Timbío	64

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4. Límite líquido de los suelos Coconuco, F.I.C y Timbío



Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los datos presentados en la Tabla 13, se determinó que el Suelo Coconuco se obtuvo un límite plástico de 44.1% y un índice de plasticidad de 15.6%, lo que permite clasificarlo como un limo de alta plasticidad (MH) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El Suelo Fic tiene un límite plástico de 45% y un 25% con respecto al índice de plasticidad, al mismo tiempo, se clasificó el suelo por el sistema S.U.C.S, a partir de la Carta de Plasticidad de Casa Grande (ver Gráfica 5) por lo que se obtuvo una simbología y nomenclatura de MH lo que significa que es un limo de alta plasticidad.

Se obtuvo resultado de un límite plástico de 49% y un índice de plasticidad del 15% (ver Tabla 13) para el Suelo Timbío. En el sistema de clasificación SUCS se determinó que corresponde a un suelo limoso inorgánico de alta plasticidad (MH).

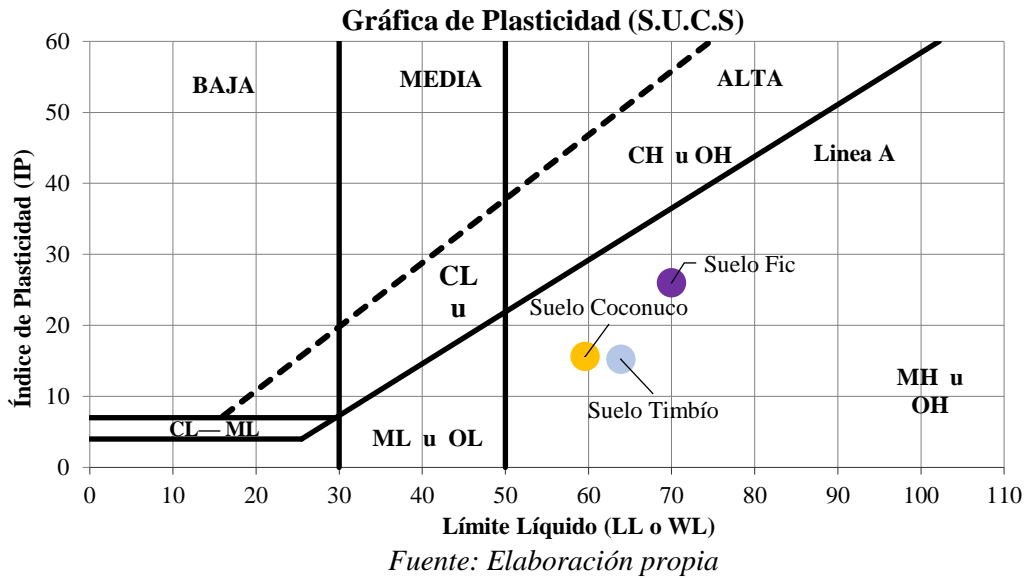
De las generalizaciones anteriores, se infiere que los datos del límite plástico (W_p) para los diferentes suelos concuerdan con los parámetros expuestos en la Ilustración 11, ya que, se localizan dentro de los rangos establecidos para ser clasificado como Suelo Derivado de Ceniza Volcánica.

Tabla 13. Límites de consistencia y clasificación del suelo

	COCONUCO	F.I.C	TIMBÍO
Límite Plástico [LP o W_p] (%)	43	45	49
Índice de Plasticidad [IP] (%)	15	26	11
S.U.C.S	(MH) - Limo de alta plasticidad	(MH) - Limo de alta plasticidad	(MH) - Limo de alta plasticidad

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5. Carta de plasticidad de Casa Grande



3.7 Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua (INVE – 128 – 13)

La gravedad específica (G_s), es un aporte para determinar la relación que existe entre las partículas minerales que aparecen naturalmente y que prácticamente no son solubles en agua; la norma invias 128 del año 2013 la define como la relación entre la masa de un determinado volumen de sólidos a una temperatura específica y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas o aire, también con la misma temperatura.

Con los datos experimentales obtenidos se genera una identificación y aporte en la clasificación del tipo de suelo en estudio, información importante para determinar la naturaleza y propiedades del suelo, objeto de estudio principal del proyecto de investigación.

El ensayo se llevó a cabo bajo los parámetros establecidos en la Norma mencionada, por lo que se basó principalmente en tomar 3 muestras de suelo, que posteriormente se disgregaron los grumos existentes con ayuda de agua destilada, para posteriormente ser llevado al mezclador mecánico. Es importante agregar que se vertió cada mezcla en su respectivo matraz, cuyo peso es conocido, llenando $\frac{3}{4}$ partes del matraz; luego se sacó el aire con ayuda de una bomba de vacío, ver Ilustración 22 .

Ilustración 22. Ensayo de gravedad específica (G_s)



Fuente: Elaboración propia

Se aforó por completo el matraz hasta la línea de enrase y se pesó para después tomar la temperatura de ensayo, se tomaron los respectivos pesos encontrados. Últimamente se vertió la lechada en un recipiente de masa conocida sin desperdiciar material, con la finalidad de llevarse al horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para evaporar el agua y así determinar la masa seca del material, obteniendo así los datos necesarios para el cálculo de la misma, teniendo un rango de tolerancia de 0.003 entre cada dato.

Resultados del ensayo (INVE – 128 – 13)

Como resultado del ensayo (G_s) se expresa que para el Suelo a (Coconuco), fue de 2.773 (ver Tabla 14) de acuerdo con la Ilustración 11, este resultado se sitúa por encima de los límites establecidos para los SDCV para Colombia, sin embargo, el valor de la gravedad se encuentra muy cercano del rango de investigaciones realizadas para el país de Japón, cuyo rango está entre 2.67 y 2.74.

El resultado de gravedad específica para el Suelo b – (Fic) obtuvo un valor de gravedad específica promedio de 2.481 como se muestra en la Tabla 14, lo que indica una alta densidad relativa en comparación con el agua. Esto induce que el suelo experimenta una baja porosidad y una capacidad potencialmente baja para retener agua. Por último, este suelo se encuentra dentro del rango de G_s de la Ilustración 11, y hace parte de un SDCV.

Como resultado obtenido del ensayo, se expresa que para el Suelo c – (Timbío) se obtuvo un valor de gravedad específica promedio de 2.816, por lo que es importante manifestar que este suelo no se encuentra dentro del rango establecido para Colombia con respecto a la G_s.

Tabla 14. Resultados del ensayo de gravedad específica – Suelo a, b y c

Suelo	Gravedad Especifica (G _s)
Coconuco	2.773
F.I.C	2.481
Timbío	2.816

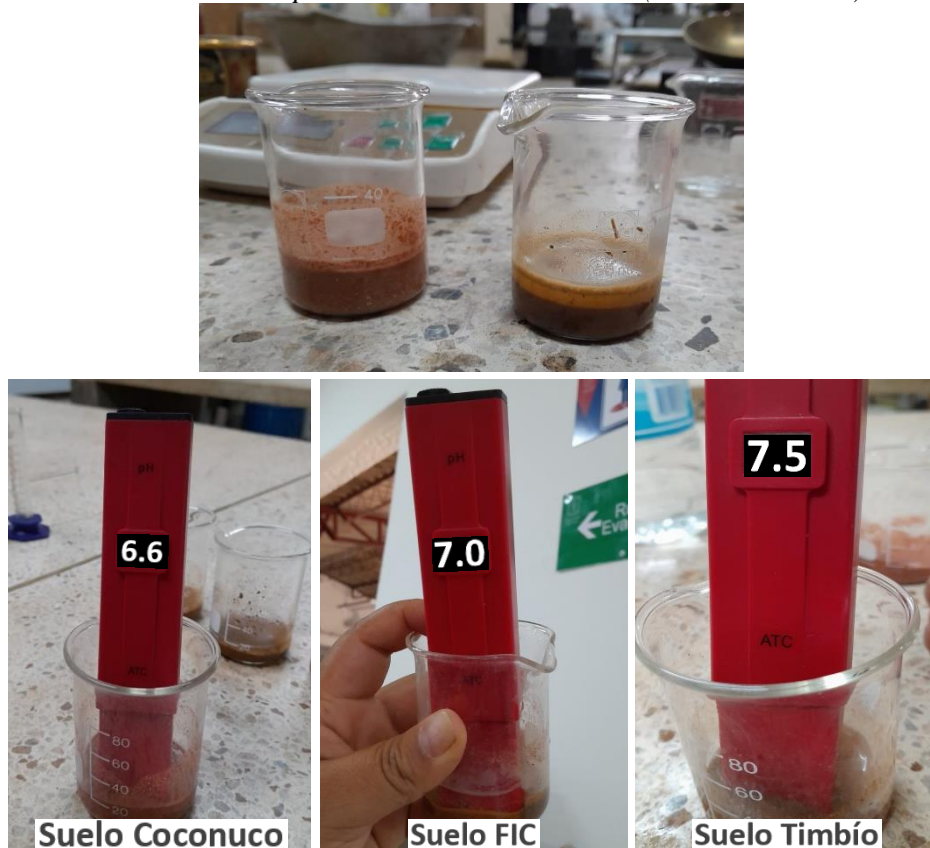
Fuente: Elaboración propia

3.8 PH de los Suelos (INVE – 131 – 13)

La medición del pH representa la concentración de iones de hidrógeno (H⁺), el valor a obtener indica la acidez o alcalinidad que tiene un suelo, por lo que es muy importante conocerlo, ya que, de ello dependerá la eficacia del tratamiento. Incluso, se conoce que los suelos con un pH considerablemente ácido pueden requerir tratamiento específico antes de aplicar las técnicas de estabilización.

El método de ensayo consiste en realizar medidas de pH en dos suspensiones por separado (en agua y en una solución de cloruro de calcio), con ayuda de un potenciómetro previamente calibrado con una solución Buffer (solución amortiguadora) de pH conocido. Un estrato con un pH bajo (por debajo de 7) se cataloga como ácido, mientras que con un pH alto (por encima de 7) se considera alcalino o básico y, por último, un suelo con un pH de 7 se contempla como neutro.

Ilustración 23. pH de los 3 suelos en estudio (INV E – 131 - 13)



Fuente: Elaboración propia

Resultados obtenidos del ensayo (INV E – 131 – 13)

De la Tabla 15, se puede indicar que para el Suelo extraído en Coconuco, al tener un pH de 6.5 se clasifica como ácido ligeramente neutro; por lo que se considera receptivo a la estabilización con cal. De acuerdo con la Ilustración 11, se puede afirmar que la composición mineralógica de este suelo es similar a los SDCV presentes en Japón, Nueva Zelanda y Hawái, debido a que el valor obtenido se encuentra dentro de los rangos estudiados en los países anteriormente mencionados.

Para el Suelo de la Facultad de Ingeniería Civil el valor obtenido de pH fue de 7.0, es decir que es un suelo neutro, por esta razón tiende a ser más estable en términos de su composición química y tiende a ser menos corrosivo al estar en contacto con materiales de construcción. Además, se puede afirmar que este resultado se encuentra dentro del rango investigado para Japón (pH entre 3.6 y 8), Nueva Zelanda (pH entre 4.8 y 7.2) (ver tabla Ilustración 11).

Por último, para el Suelo Timbío se obtuvo un pH igual a 7.5 (Ver Ilustración 23), en consecuencia, se afirma que es un suelo ligeramente alcalino y tiene una composición química muy similar con los SDCV explorados en Japón (pH entre 3.6 y 8) y Nueva Zelanda (pH entre 4.8 y 7.2).

Tabla 15. Datos obtenidos del ensayo de pH

Suelo	pH en agua	pH en cloruro de calcio
Coconuco	6.6	6.4
F.I.C	7	7.1
Timbío	7.5	7.4

Fuente: Elaboración propia

3.9 Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)

(INVE – 141 – 13)

Con el siguiente ensayo, se busca determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos, generando una curva de compactación, la cual brinda los valores extremos a los que se puede llevar el suelo, este ensayo parte de los valores aportados por el límite plástico.

Para realizar el ensayo se optó por utilizar el método A, descrito en la norma (INVE – 141 – 13), por lo que, primeramente, se preparó una muestra representativa de los diferentes suelos, previamente secados al aire con el fin de reducir el contenido de humedad. Posteriormente, se procedió a compactar las muestras con diferentes contenidos de humedad por debajo y por encima de la óptima del suelo. Cada una de las muestras fueron compactadas en tres capas dentro de un molde conocido como molde Japonés de 4 pulgadas (101.6 mm) de diámetro y altura de 4.6 pulgadas (116.4 mm), aplicando una serie de golpes controladas (9 golpes) con un martillo de 24.5 N (5.5 lbf), el cual cae desde una altura de 12 pulgadas (304.8 mm), produciendo una energía de compactación aproximada de 600 kN/m³. Consecutivamente se retiraron cuidadosamente las probetas y se les determinó su peso en estado seco después de un proceso de secado en un horno a temperatura controlada. Finalmente, con los datos obtenidos de peso húmedo y peso seco se calculan los valores de contenido de humedad y peso unitario seco para cada muestra; por último, se grafican estos valores para así obtener la curva de compactación.

Ilustración 24. Ensayo de compactación Proctor Estándar con Molde Japonés.



Fuente: Elaboración propia

Resultados obtenidos del ensayo (INVE – 141 – 13)

Al observar la Gráfica 6, se puede evidenciar que se obtuvo una humedad óptima del 46% para así lograr alcanzar una densidad máxima seca de 1001 Kg/m³; lo que indica que el suelo estudiado tiene una buena capacidad de compactación, sin embargo, se espera que, al ser aplicado el estabilizante, el suelo mejore aún más su compactación y su resistencia, lo que resultaría en una base más sólida para el tránsito de vehículos.

El Suelo F.I.C obtuvo una densidad seca máxima de 1180 Kg/m³ con una humedad óptima de 41%, lo cual indica que el suelo se compactó de manera eficiente y alcanzó una densidad satisfactoria bajo la humedad óptima encontrada.

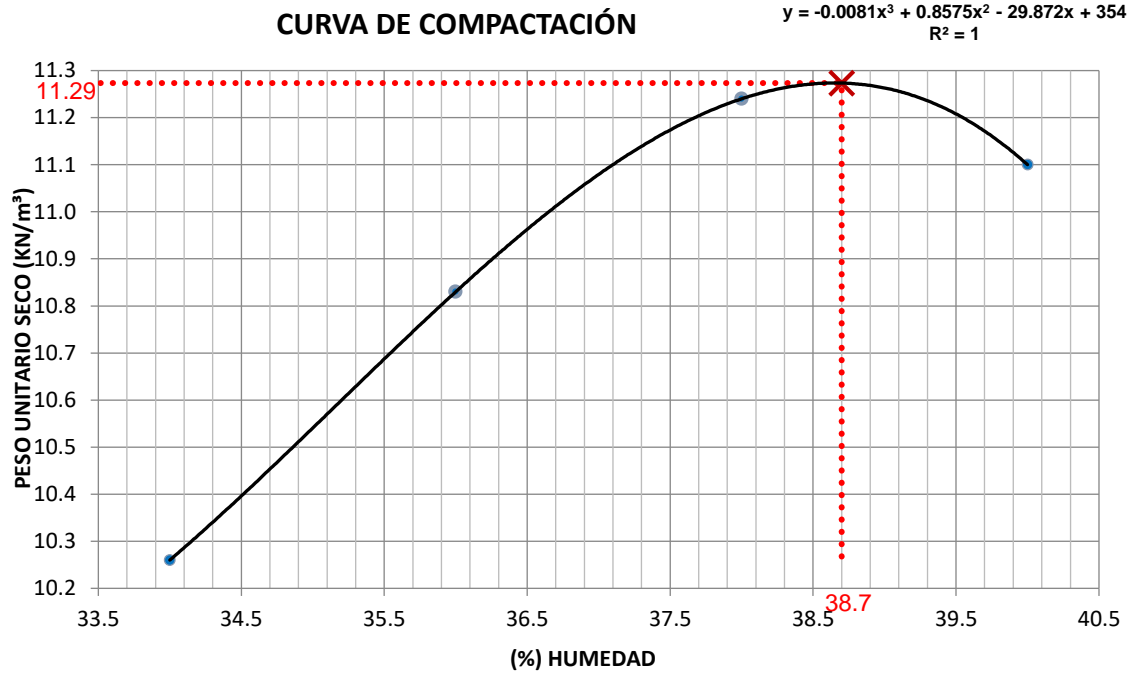
Finalmente, el Suelo Timbío alcanzó una densidad máxima seca de 1120 Kg/m³ para una humedad óptima de 38.5 %, siendo así un suelo con una capacidad de compactación aceptable. Sin embargo, tiene el potencial beneficiarse de la estabilización con cal.

Tabla 16. Peso unitario seco máximo y humedad óptima

Suelo	Peso unitario seco máximo (Kg/m³)	Humedad óptima (%)
Coconuco	1001	46
F.I.C	1180	41
Timbío	1120	38,5

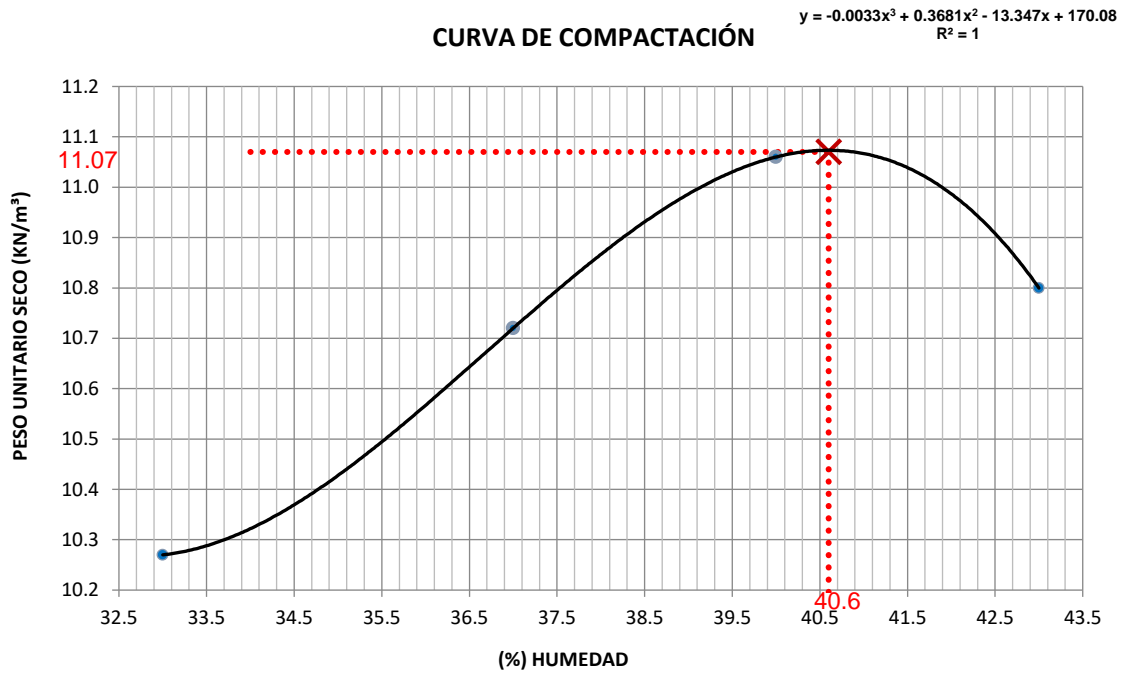
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6. Resultados obtenidos del ensayo de compactación para el suelo Coconuco



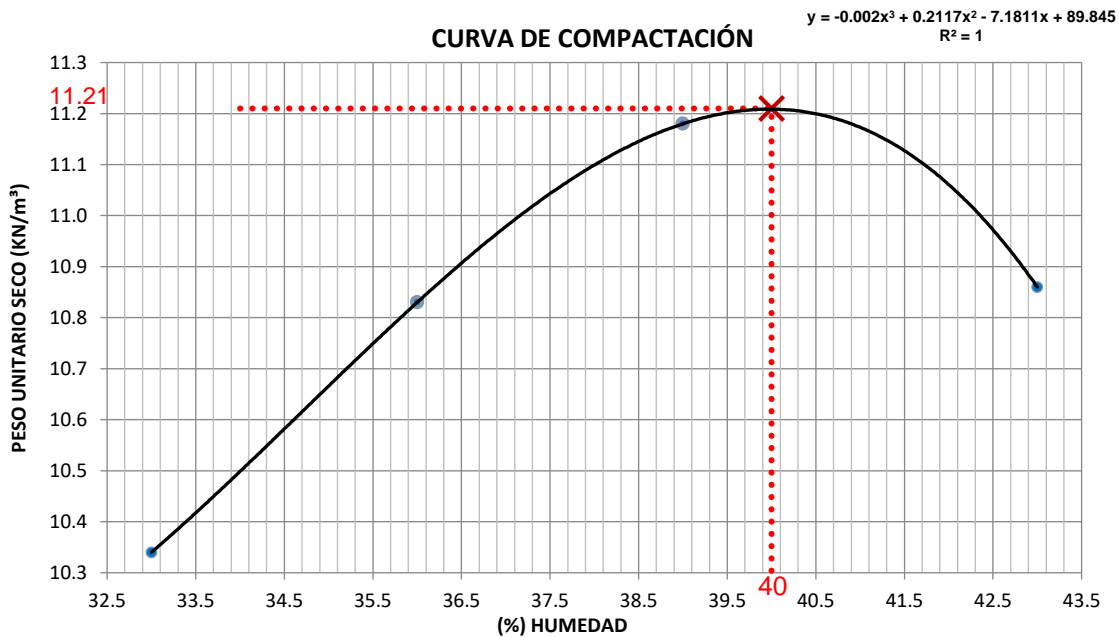
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7. Resultados obtenidos del ensayo de compactación para el suelo F.I.C



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8. Resultados obtenidos del ensayo de compactación para el suelo Timbío



Fuente: Elaboración propia

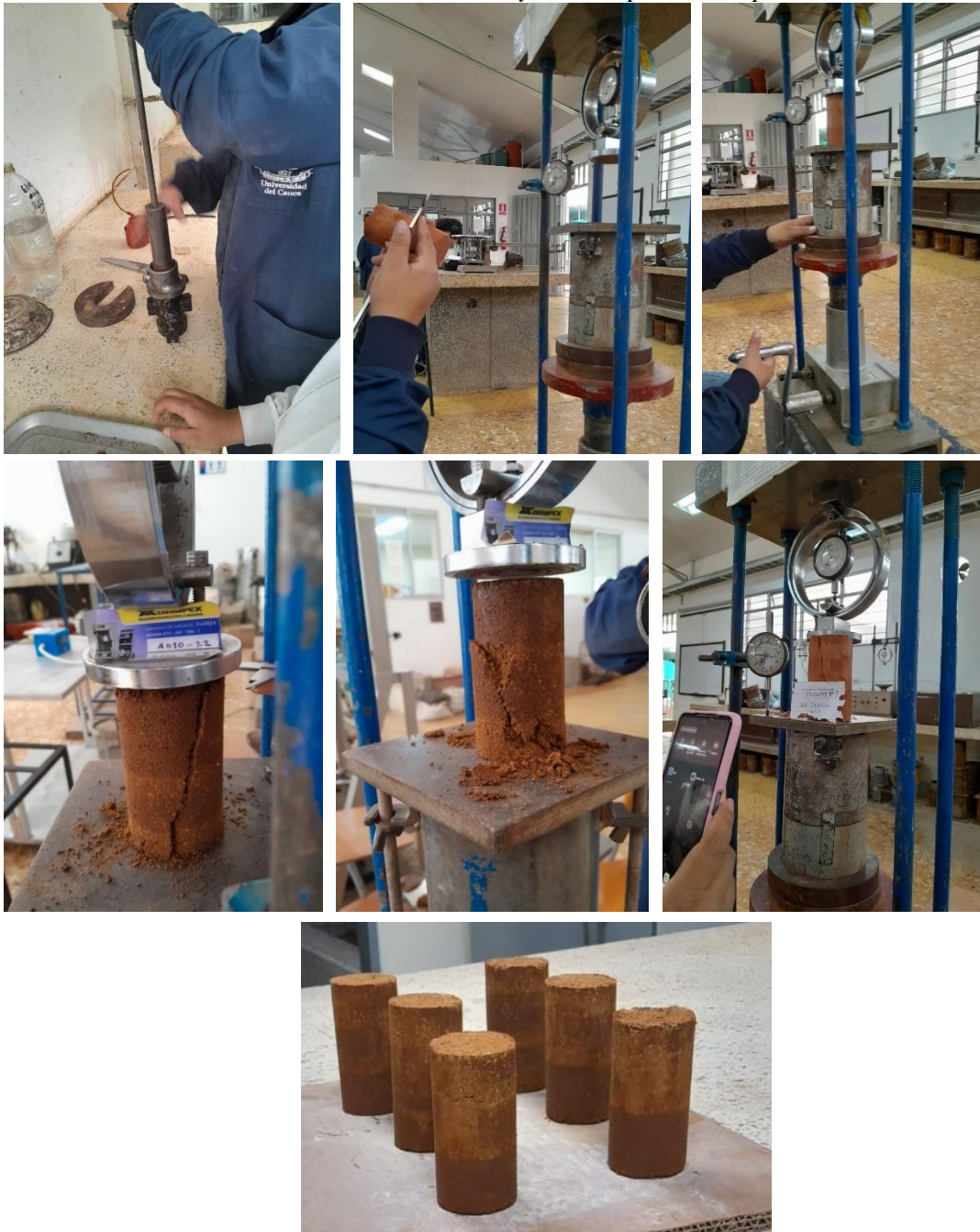
3.10 Compresión inconfiada en muestras de suelos (INVE – 152 – 13)

Dado que no se tenían muestras inalteradas de las canteras, debido a que fueron tomadas de un talud expuesto; este ensayo, fue realizado por remoldeo utilizando el molde japonés, por lo que estas probetas fueron sometidas a un curado de 24 horas, para posteriormente ser falladas. Estos datos obtenidos fueron fundamentales para determinar la resistencia a la compresión de los suelos en su estado natural con el fin de comprender su comportamiento bajo cargas uniaxiales.

Se prepara la muestra en el molde japonés, posteriormente, se extrae la probeta del molde y se coloca en el equipo de ensayo (uniaxial), procurando que la probeta conserve su forma cilíndrica y caras planas y paralelas para así evitar posibles irregularidades que puedan afectar los resultados entregados, subsiguientemente se le aplica una carga axial gradualmente, al mismo tiempo se registra la deformación con su respectiva carga, permitiendo así la obtención de la curva esfuerzo-deformación. Cabe resaltar que, para este ensayo se usó la humedad óptima y energía del Proctor Estándar para compactar briquetas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, donde se almacenaron en cámaras de

humedad, una vez cumplido el tiempo de curado se procedieron a fallar las probetas aplicando la carga requerida para producir una deformación axial a una velocidad de 2.5% por minuto, hasta que la carga disminuyera al aumentar la deformación

Ilustración 25. Ensayo de compresión simple



Fuente: Elaboración propia

Resultados obtenidos del ensayo (INVE – 152 – 13)

Al observar la Tabla 17, se puede deducir que existe una variación entre las 3 probetas ensayadas para cada uno de los suelos; como es el caso del esfuerzo máximo a compresión obtenido, la deformación unitaria y la resistencia al esfuerzo cortante, por lo que, los resultados se pudieron haber afectado por la variabilidad natural del suelo, su heterogeneidad en cuanto su composición o a factores relacionados con la preparación y el manejo de las muestras en el laboratorio.

Se obtuvo un esfuerzo a compresión (q_u) promedio de 115.8 KPa para el suelo Coconuco, una deformación unitaria promedio de 8.46%, su resistencia al esfuerzo cortante (S_u) promedio fue de 57.9 KPa y una masa unitaria seca promedio de 0.63 g/cm³. Por lo que es conveniente recalcar que, este suelo tiene una capacidad moderada para soportar cargas verticales, por otra parte, la deformación obtenida indica la cantidad de cambio en la forma o dimensiones del suelo bajo cargas aplicadas permitiendo así una respuesta razonable ante las cargas (ver Gráfica 9).

Para el Suelo Fic se obtuvo un esfuerzo a compresión (q_u) promedio de 233.46 KPa, una deformación unitaria promedio de 39.83%, su resistencia al esfuerzo cortante (S_u) promedio fue de 116.76 KPa y una masa unitaria seca promedio de 1.3 g/cm³. De estos resultados se desprende que, el suelo posee una alta resistencia para soportar cargas de compresión sin confinamiento lateral; ahora bien, cabe resaltar que el suelo tiene una capacidad moderada para resistir esfuerzos tangenciales. Una deformación promedio de 39.83% demuestra que el estrato puede experimentar altas deformaciones bajo la aplicación de cargas (ver Gráfica 10).

Por último, el Suelo Timbío obtuvo un esfuerzo a compresión (q_u) promedio de 232.23 KPa, una deformación unitaria promedio de 9.3%, su resistencia al esfuerzo cortante (S_u) promedio fue de 116.1 KPa y una masa unitaria seca promedio de 1.1 g/cm³. Cabe resaltar que, el suelo posee una capacidad para soportar cargas verticales semejante al suelo explorado en la Facultad de Ingeniería Civil, sin embargo, su deformación promedio es moderada y sugiere una respuesta adecuada ante la

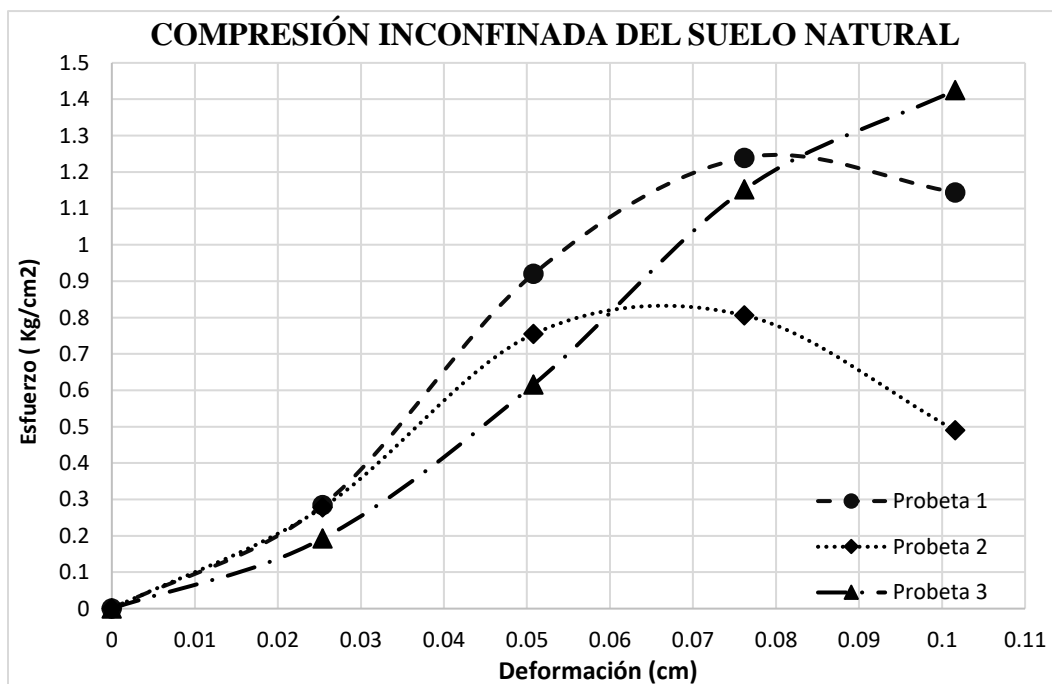
aplicación de cargas; por otra parte, el valor obtenido en cuanto al esfuerzo cortante muestra que tiene una capacidad moderada sin presentar deformaciones excesivas (ver Gráfica 11).

Tabla 17. Datos del ensayo de compresión inconfiada

	Suelo Coconuco			Suelo Fic			Suelo Timbío		
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Esfuerzo máximo a compresión (qu máx.) [KPa]	123.9	80.8	142.7	209.3	213.0	278.1	208.7	257.0	231.0
Deformación unitaria [%]	7.6	7.6	10.2	35.6	35.6	48.3	7.6	10.2	10.2
Resistencia al esfuerzo cortante (Su) [Kpa]	62	40.4	71.4	104.7	106.5	139.1	104.3	128.5	115.5
Humedad [%]	43.3	44.7	44.6	43.9	43.0	44.2	39.4	39.5	40
Masa unitaria húmeda [g/cm³]	1.02	0.97	0.97	1.69	2.11	2.10	1.98	1.54	1.58
Masa unitaria seca [g/cm³]	0.65	0.62	0.62	1.09	1.35	1.35	1.27	0.98	1.02

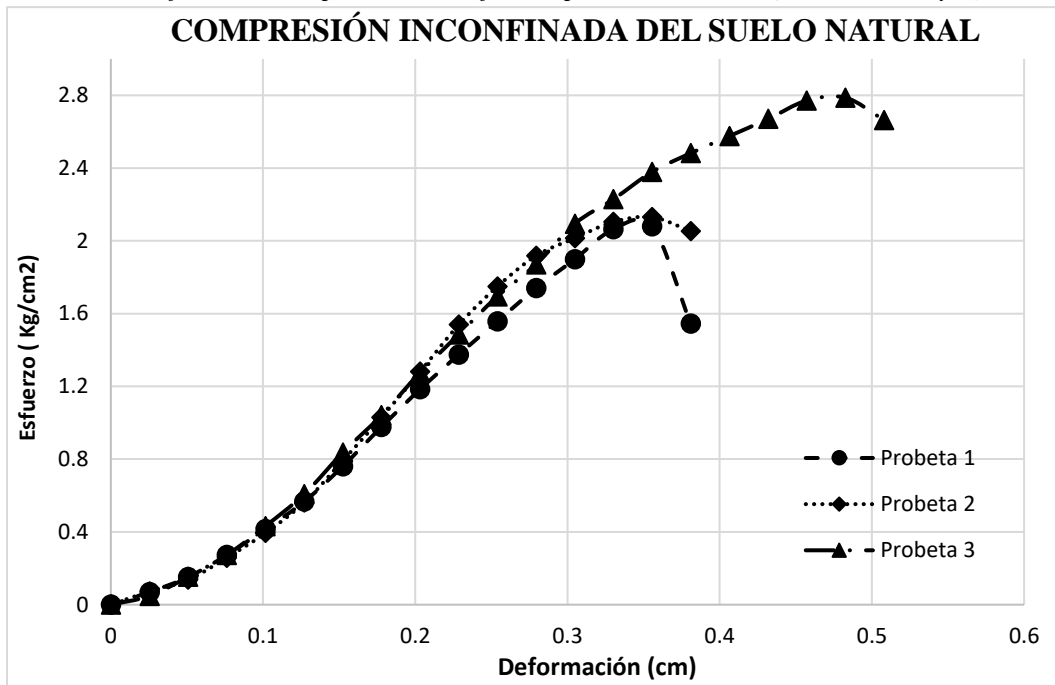
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9. Compresión inconfiada para el suelo de Coconuco (Probetas 1,2 y 3)

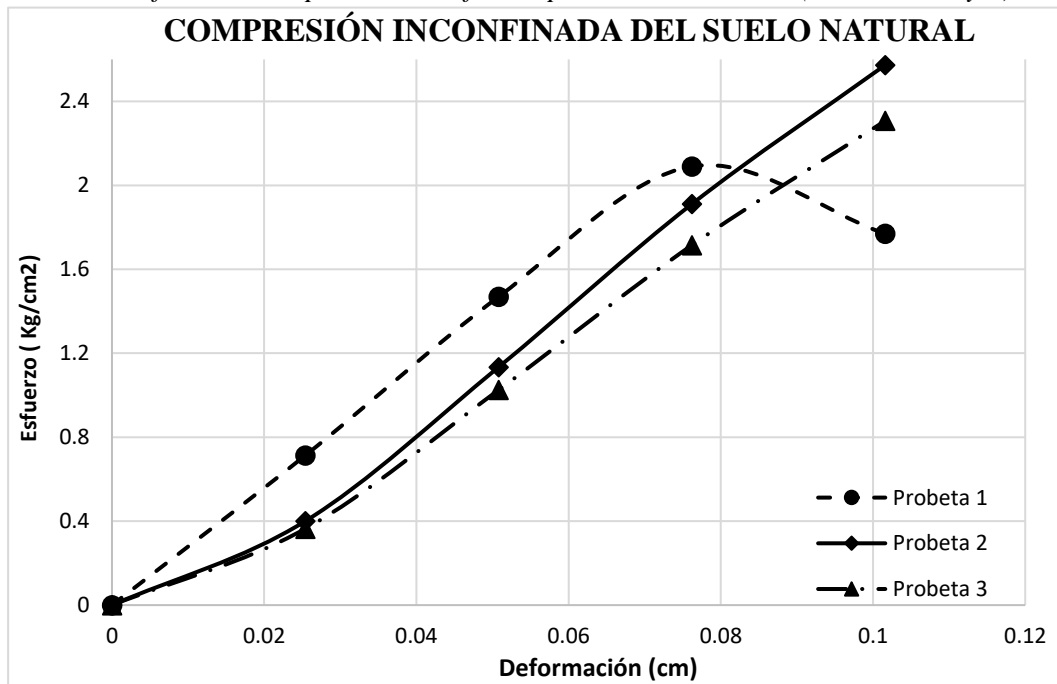


Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10. Compresión inconfínada para el suelo Fic (Probetas 1,2 y 3)



Gráfica 11. Compresión inconfínada para el suelo Timbío (Probetas 1,2 y 3)



3.11 *Ensayo de estabilidad al agua*

El ensayo permite evaluar la estabilidad natural del suelo frente a la acción del agua, tanto por inmersión total como por capilaridad. Esto proporciona información crucial sobre la susceptibilidad del suelo a la erosión y la pérdida de cohesión bajo condiciones de humedad, lo cual es especialmente relevante para su uso como subrasante en vías terciarias donde puede estar expuesto a agua superficial y condiciones de saturación. Los resultados del ensayo proporcionan información útil para determinar la necesidad y el tipo de medidas de estabilización requeridas para mejorar la calidad del suelo. En este caso, la estabilización con cal puede ser una opción viable para mejorar la resistencia del suelo al agua y reducir su susceptibilidad a la erosión y la deformación bajo condiciones de humedad.

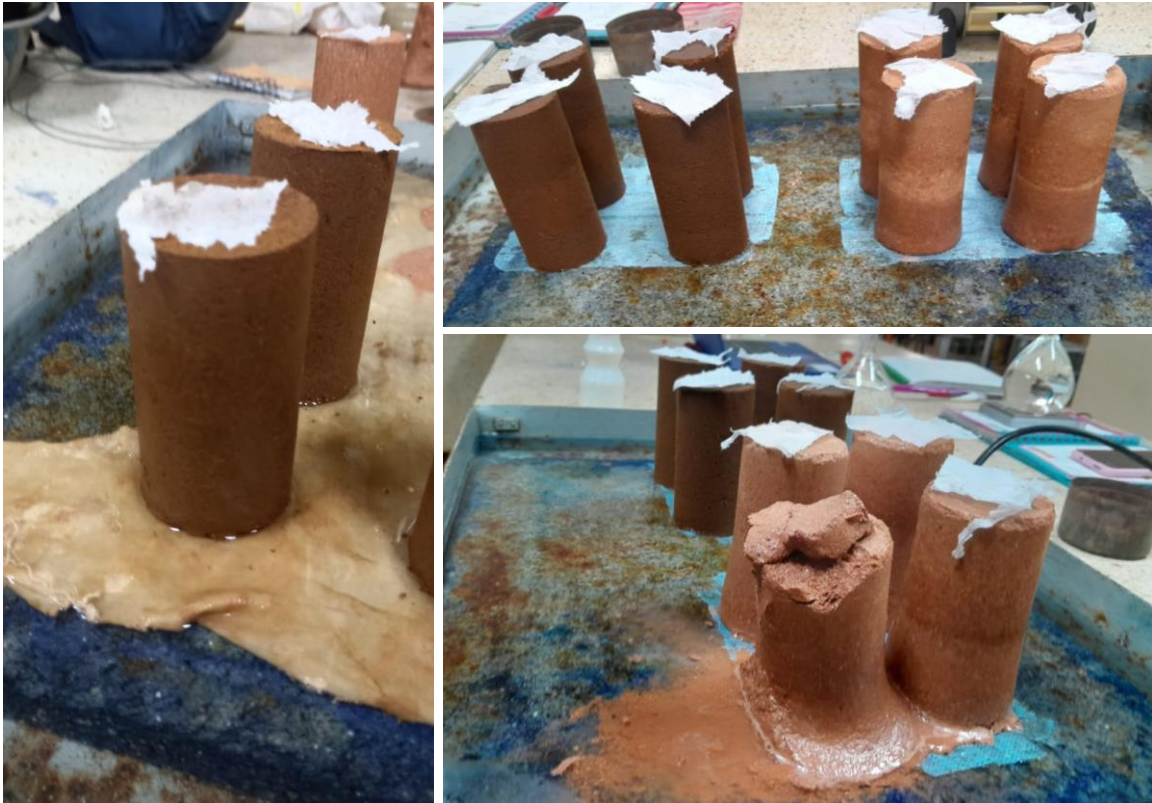
El procedimiento aplicado en este ensayo, fue haber realizado la compactación de las muestras de los diferentes suelos contemplando la humedad óptima y la densidad de compactación obtenido en el ensayo de Proctor Estándar compactadas en el molde japonés (ver Ilustración 24). Posteriormente las probetas fueron llevadas a una bandeja con agua y con una piedra porosa para simular la condición de capilaridad, para lo cual se colocaron papeles sobre las mismas para identificar y poder registrar el tiempo que se demoró en absorber el agua. Al mismo tiempo, se alista un biker con agua para simular las condiciones de inmersión registrando el tiempo en que se destruyeron las probetas (ver Ilustración 26). Como observación adicional, se elaboraron 4 probetas para capilaridad y 2 para simular la inmersión.

Ilustración 26. Ensayo de estabilidad al agua realizado por inmersión.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 27. Ensayo de estabilidad al agua realizado por capilaridad.



Fuente: Elaboración propia

Resultados obtenidos del ensayo

De la Tabla 18, cabe resaltar que el suelo de Coconuco al ser sometidas las probetas a inmersión, éste experimenta una extrema susceptibilidad a la erosión, por lo que se puede afirmar que el suelo tiene una muy baja estabilidad al agua. Una explicación de la rapidez de destrucción de las probetas, conlleva a decir que, este suelo carece de la cohesión necesaria para resistir la acción del agua debido a posibles contenidos de materia orgánica, su composición mineralógica o su textura.

En la Tabla 19 se encuentran registrados los tiempos en que sucedió completamente la absorción de agua por medio de la capilaridad, por lo que cabe resaltar que el tiempo de absorción se da en un rango de 20 a 40 minutos, indicando que existe una heterogeneidad en la estructura del suelo o en la preparación de las probetas ya sea por la distribución de partículas dentro del suelo. Por otra parte, se observa que los porcentajes de humedad son elevados lo que refleja que el suelo de Coconuco

tiene alta capacidad de retener agua, por lo que suelo ser muy susceptible a la desintegración y a la pérdida de estabilidad.

Tabla 18. Estabilidad al agua por inmersión en el Suelo de Coconuco

PROBETAS SOMETIDAS A INMERSION TOTAL	
TIEMPO PROBETA 1	3 min 33s
TIEMPO PROBETA 2	3 min 52s
NOTA: Las probetas se destruyen por completo en un lapso mínimo de tiempo al ser sometidas a la inmersión total	

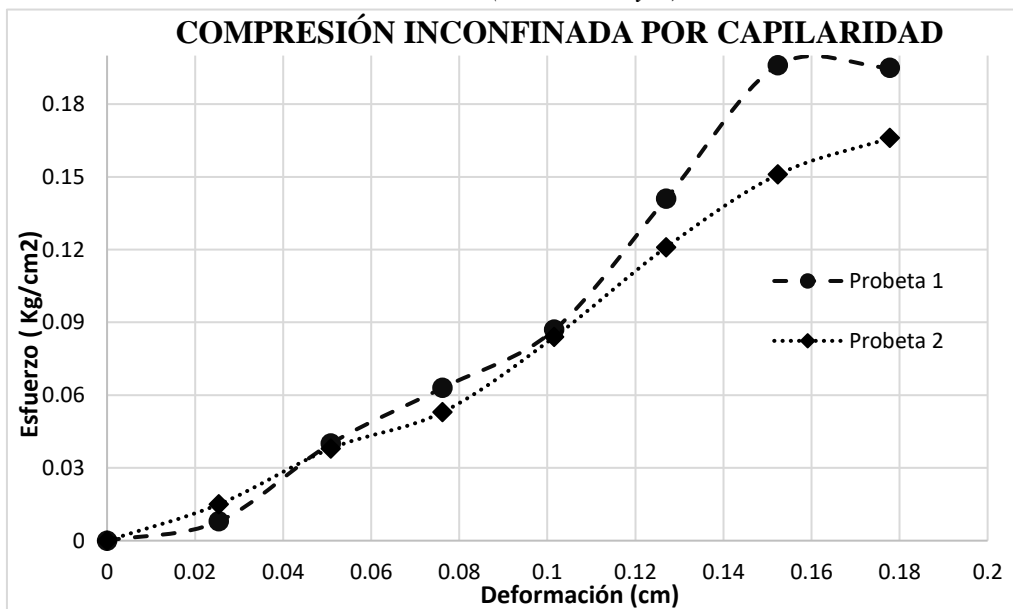
Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Estabilidad al agua por capilaridad en el Suelo de Coconuco

PROBETAS EN SATURACION POR CAPILARIDAD	%W
PROBETA 1	20 min 27 s
PROBETA 2	21 min 36s
PROBETA 3	27 min 41s
PROBETA 4	39 min 24s
Nota: Las probetas al llegar al estado de saturación sufren daños y algunas se desintegran	

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 12. Compresión inconfínada en estado húmedo por capilaridad para el suelo Coconuco (Probetas 1 y 2).



Fuente: Elaboración propia

Al revisar los datos obtenidos para el suelo Fic, se puede afirmar que tiene una alta susceptibilidad a la erosión cuando fue sometido a inmersión total debido a que las probetas de ensayo

se destruyeron en un lapso de tiempo muy corto (ver Tabla 20), haciéndolo inadecuado para aplicaciones sin tratamiento en entornos de alta humedad o propensos a experimentar inundaciones.

Contemplando lo que sucedió con la simulación de absorción de agua por capilaridad (Tabla 21), y sabiendo de antemano, que, teniendo un suelo de alta plasticidad, las probetas mostraron un comportamiento más estable, lo que permite hablar de que el suelo retiene cierta cohesión. Por otra parte, se observó que los contenidos de humedad fueron relativamente altos, contribuyendo al comportamiento altamente cohesivo y a la susceptibilidad frente a la erosión. Al tener una alta capacidad de retención de agua, el suelo puede experimentar una posible pérdida de capacidad portante en condiciones de saturación prolongada.

Tabla 20. Estabilidad al agua por inmersión en el Suelo Fic

PROBETAS SOMETIDAS A INMERSION TOTAL	
TIEMPO PROBETA 1	7 min 28s
TIEMPO PROBETA 2	11 min 23s
NOTA: Las probetas se destruyen por completo en un lapso mínimo de tiempo al ser sometidas a la inmersión total	

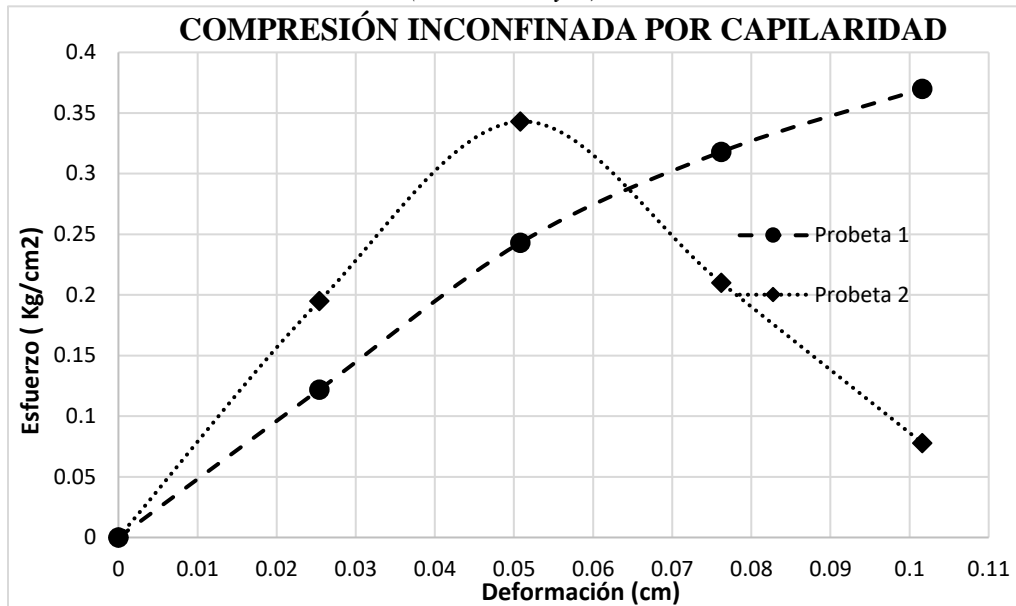
Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Estabilidad al agua por capilaridad en el Suelo Fic

PROBETAS EN SATURACION POR CAPILARIDAD	%W	
PROBETA 1	30 min 34s	47
PROBETA 2	38 min 23s	46
PROBETA 3	53 min 31s	46
PROBETA 4	55 min 06s	45
NOTA: las probetas están en un estado aceptable para realizar ensayo de compresión inconfiada.		

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 13. Compresión inconfínada en estado húmedo por capilaridad para el suelo F.I.C (Probetas 1 y 2).



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 22, evidencia el tiempo en que las probetas llegan a la desintegración total, lo que indica que sufren una susceptibilidad considerable a la erosión y pérdida de cohesión cuando están completamente sumergidas en agua.

Los tiempos de saturación por capilaridad variaron entre 30 minutos y 49 minutos, indicando que el suelo tarda poco tiempo en alcanzar la saturación, lo que es típico en los suelos limosos de alta plasticidad. Los valores obtenidos de humedad oscilan entre 37% y 41% mostrando una alta capacidad de retención de agua, lo que puede llevar a un aumento de volumen y a una reducción en la capacidad portante del suelo estando en saturación.

Esto indica una cierta variabilidad en la capacidad del suelo para retener agua, lo que puede reflejar diferencias en la textura, composición y estructura del suelo en las áreas de muestreo.

Tabla 22. Estabilidad al agua por inmersión en el Suelo de Timbío

PROBETAS SOMETIDAS A INMERSION TOTAL	
TIEMPO PROBETA 1	3 min 10s
TIEMPO PROBETA 2	5 min 09s
NOTA: Las probetas se destruyen por completo en un lapso mínimo de tiempo al ser sometidas a la inmersión total	

Fuente: Elaboración propia

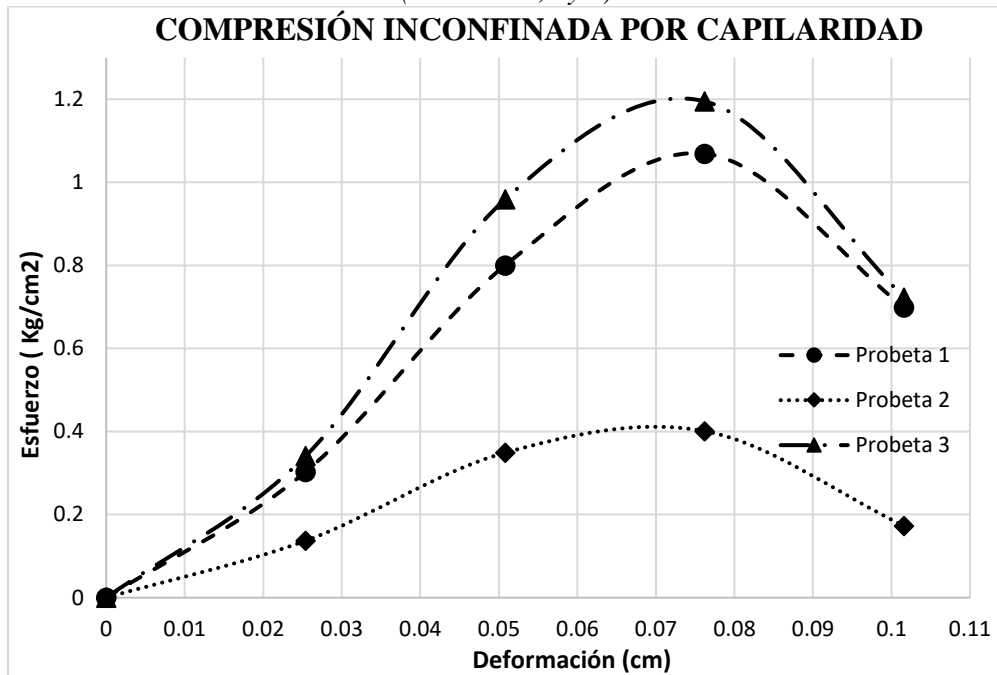
Tabla 23. Estabilidad al agua por capilaridad en el Suelo de Timbío

PROBETAS EN SATURACION POR CAPILARIDAD		%W
PROBETA 1	30 min 57s	38
PROBETA 2	33 min 23s	41
PROBETA 3	37 min 19s	37
PROBETA 4	49 min 34s	39

NOTA: las probetas están en un estado aceptable para realizar ensayo de compresión inconfiada.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 14. Compresión inconfiada en estado húmedo por capilaridad para el suelo Timbío (Probetas 1,2 y 3).



Fuente: Elaboración propia.

Resultados obtenidos del ensayo de compresión simple en las probetas saturadas por capilaridad

De la Tabla 24, se afirma que la probeta 1 del Suelo Coconuco sufrió daños severos durante el ensayo de estabilidad lo que impidió obtener resultados cuantitativos, ya sea porque la estructura del suelo es muy frágil o por las condiciones en que se transportó la probeta hacia el equipo de compresión. La probeta 2 presentó un esfuerzo máximo de compresión relativamente bajo, mostrando una baja capacidad de carga, con respecto a la deformación que sufrió se afirma que, indicó una considerable deformación por lo cual se le atribuye que tuvo un comportamiento dúctil; por otra parte, la resistencia al esfuerzo cortante obtenida, reflejó una moderada capacidad de resistencia interna a fuerzas cortante,

además, experimentó una humedad bastante alta, por lo que se considera que pudo afectar negativamente en su resistencia. Por último, la probeta 3 presentó un esfuerzo a compresión mucho más bajo que la probeta anterior, confirmando que se trata de un suelo con una capacidad portante muy baja, también presentó la misma humedad afectando el desempeño mecánico del suelo; a diferencia de los valores de las masas unitarias de la probeta anterior, la número 3 experimentó un incremento leve, contribuyendo a una mejora en cuanto a su resistencia, aunque no significativa en este caso.

Ahora bien, los resultados obtenidos para el Suelo Fic fueron eficientes, ya que se pudo obtener la mayor información posible de las probetas. La primera, experimentó un esfuerzo a compresión moderado, implicando una capacidad de carga razonable y una moderada deformación antes de alcanzar el fallo, su esfuerzo cortante se considera adecuado y su humedad es baja a comparación del suelo ya analizado, sin embargo, puede llegar a ser un limitante. La segunda probeta mostró un mejor comportamiento en cuanto a la resistencia a compresión, siendo la más alta de las 3 probetas ensayadas para este suelo; así mismo con su resistencia al esfuerzo cortante, lo que indica que posee una mayor capacidad de resistencia interna; la humedad experimentada es ligeramente menor lo que podría mejorar un poco la estabilidad del suelo. La probeta 3 experimentó comportamientos muy similares a las 2 probetas anteriores, sin embargo, es la única de las tres la que presentó la menor deformación unitaria mostrando una mayor rigidez. En general, este suelo presentó un rendimiento consistente y razonable, aunque se observó una humedad alta lo que podría influir en la estabilidad del mismo a largo plazo.

Por último, se obtuvieron los diferentes resultados para el Suelo de Timbío, de los cuales se deduce que, la probeta 1 alcanzó una capacidad de carga relativamente alta, su deformación indica que es rígido, la resistencia al esfuerzo cortante es alta por lo que el suelo puede soportar cargas laterales significativas, sin embargo, la humedad es alta afectando la estabilidad en condiciones de carga sostenida. La probeta 2 indicó una capacidad de carga bastante limitada, la deformación unitaria fue igual que la probeta mencionada indicando que existe una mayor tendencia a fallar sin aviso previo, su capacidad de soportar cargas laterales y vibraciones es muy reducida, la humedad obtenida fue la más

alta afectando significativamente su capacidad de carga y resistencia reflejando esto en el resultado obtenido de las masas unitarias. La probeta 3 obtuvo el mayor esfuerzo máximo a compresión, la deformación fue igual a las probetas restantes indicando un suelo más rígido y menos dúctil, el esfuerzo cortante indicó una excelente capacidad de resistencia interna y estabilidad bajo cargas laterales, su humedad indicó ser la más baja de las probetas ensayadas reduciendo el riesgo de saturación y colapso.

Tabla 24. Datos del ensayo de compresión simple de las probetas saturadas por capilaridad

	Suelo Coconuco			Suelo Fic			Suelo Timbío		
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Esfuerzo máximo a compresión (qu máx.) [KPa]		19.6	16.6	32.3	37.0	34.3	106.9	40.1	119.5
Deformación unitaria [%]		15.2	17.8	10.2	10.2	5.1	7.6	7.6	7.6
Resistencia al esfuerzo cortante (Su) [Kpa]	La probeta sufrió daños severos	9.8	8.3	16.2	18.5	17.2	53.5	20.0	59.8
Humedad [%]		63.2	63.2	49.2	45.9	46.0	38.1	40.9	37.3
Masa unitaria húmeda [g/cm³]		1.75	1.88	1.75	1.71	1.75	1.90	1.88	1.97
Masa unitaria seca [g/cm³]		1.12	1.21	1.12	1.10	1.12	1.22	1.21	1.26

Fuente: Elaboración propia

3.12 Resumen de los resultados obtenidos

Tabla 25. Resultados obtenidos de los tres suelos en estado natural en estudio

Propiedad o Ensayo	Valor			Unidades	Norma de ensayo
	Coconuco	Fic	Timbío		
Granulometría por tamizado (%Pasa Tamiz #4)	100	100	100	%	INV E-213
Granulometría por tamizado (%Pasa Tamiz #200)	85.74	86,89	66.1	%	INV E-213
Limite Plástico	44.1	44,5	48.7		INV E-126-13
Índice de Plasticidad	16	26	15		INV E-126-13
Limite Liquido	60	70	64		INV E-125-13
Clasificación S.U.C.S	MH	MH	MH		INV E-181-13
Gravedad específica	2.77	2.48	2.816		INV E-128-13
Ph (Cloruro de Calcio)	6.2	6.33	6.43	%	INV E-131-13
Proctor Estándar - Densidad Seca	1.001	1.18	1.085	(g/cm3)	INV E-141-13
Proctor Estándar - % Humedad	46	41	37	%	INV E-141-13
Proctor Modificado - Densidad Seca	1.2	1.28	1.23	(g/cm3)	INV E-142-13
Proctor Modificado - % Humedad	29	39	32	%	INV E-142-13
Compresión Inconfinada - Resistencia a la compresión inconfinada, [qu]	1.158	2.33	2.32	Kg/cm2	INV E-152-13
Compresión Inconfinada - Resistencia al esfuerzo cortante, [Su]	0.58	1.17	1.16	Kg/cm2	INV E-152-13
Compresión Inconfinada - Resistencia a la compresión inconfinada, [qu] de las probetas saturadas	0.18	0.35	0.88	Kg/cm2	
Compresión Inconfinada - Resistencia al esfuerzo cortante, [Su] de las probetas saturadas	0.091	0.17	0.44	Kg/cm2	
Hidrómetro	17.8	52.9	41.7	%	
Estabilidad al agua (inmersión total) Probeta 1	3 min 33s	7 min 28s	3 min 10s	min - s	N. A
Estabilidad al agua (inmersión total) Probeta 2	3 min 52s	11 min 23s	5 min 09s	min - s	N. A
Estabilidad al agua (Saturación por capilaridad) Probeta 1	20 min 27s	30 min 34s	30 min 57s	min - s	N. A
Estabilidad al agua (Saturación por capilaridad) Probeta 1 - [%W]	67	47	38	%	N. A
Estabilidad al agua (Saturación por capilaridad) Probeta 2	21 min 36s	38 min 23s	33 min 23s	min - s	N. A
Estabilidad al agua (Saturación por capilaridad) Probeta 2 - [%W]	62	46	41	%	N. A
Estabilidad al agua (Saturación por capilaridad) Probeta 3	27 min 41s	53 min 31s	37 min 19s	min - s	N. A
Estabilidad al agua (Saturación por capilaridad) Probeta 3 - [%W]	63	46	37	%	N. A
Estabilidad al agua (Saturación por capilaridad) Probeta 4	39 min 24s	55 min 06s	49 min 34s	min - s	N. A
Estabilidad al agua (Saturación por capilaridad) Probeta 4 - [%W]	60	45	39	%	N. A

Fuente: Elaboración propia.

4 Capítulo 4: Plan experimental de los suelos estabilizados

Tabla 26. Lista de ensayos que se practicarán al suelo con el estabilizante (Cal)

ENSAYOS	NORMA	CURADO (CON ESTABILIZANTE)				TOTAL ENSAYOS CON ESTABILIZANTE POR TIPO DE SUELO (1) Y POR PORCENTAJE DE ESTABILIZANTE (4)	TOTAL	REPETIBILIDAD	CANTIDAD DEFINITIVA POR TIPO DE SUELO (1) Y POR PORCENTAJE DE ESTABILIZANTE (3)
		24 H	7 DIAS	15 DIAS	28 DIAS				
		CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	TOTAL * REPETIBILIDAD
Límite Líquido (%)	INV E-125-13	1	1	1	1	12	12	3	36
Límite plástico e Índice de plasticidad (%)	INV E-126-13	1	1	1	1	12	12	3	36
pH	INV E-131-13	1	1	1	1	12	12	3	36
Determinación del límite líquido de los suelos		1	1	1	1	1	1	3	3
Resistencia a la compresión inconfiada	INV E-614-13	1	1	1	1	12	12	3	36
Ensayo de estabilidad al agua	NA	1	1	1	1	12	12	3	36

*Nota: Los ensayos de estabilidad al agua con estabilizante se realizarán siempre y cuando el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada sea exitoso.

Fuente: Elaboración propia

4.1 Determinación de % óptimo de cal teórico

Luego de la obtención de cada una de las características de los 3 estratos analizados: se dosificaron mezclas de suelo con cal hidratada al 72% de contenido de hidróxido de calcio (Ver Ilustración 28); las propiedades en las cuales se enfocó la estabilización fueron: límites de Atterberg (LL, LP e IP), densidad de compactación y humedad, resistencia a la compresión inconfiada. Se trató de reducir el límite líquido y aumentar el límite plástico, para así obtener una reducción en el índice de plasticidad; de igual manera aumentar las densidades de compactación junto con la humedad óptima, obtener un aumento en la capacidad de soporte del suelo; todo esto de forma que al aumentar el porcentaje de cal se obtuvieran mejoras en las propiedades que se mencionaron anteriormente.

Ilustración 28. Ficha Técnica Argos – Cal hidratada de uso general

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:		
CARACTERÍSTICA QUÍMICAS (ASTM C25/NTC 5059)		
Hidróxido de Calcio	Ca(OH) ₂	72,0% mín.
Óxido de Magnesio	MgO	1,5% máx.
Silice	SiO ₂	1,5% máx.
Óxido de Hierro + Aluminio	Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	0,5% máx.
Insolubles	HCl	2,0% máx.
CARACTERÍSTICA FÍSICAS (ASTM C-25/NTC 5059)		
Humedad	H ₂ O	1,0% máx.
CARACTERÍSTICA FÍSICAS (ASTM C-110/NTC 5233)		
Granulometría	%P200	85,0% mín.
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS		
- Color Blanco o ligeramente amarillento - Sin Olor - Densidad: 1,117 g/ml - pH: 11,0 - 12,5 a 25°C (Solución acuosa)		
- Punto Fusión: 2570°C - punto de ebullición: 2850°C		

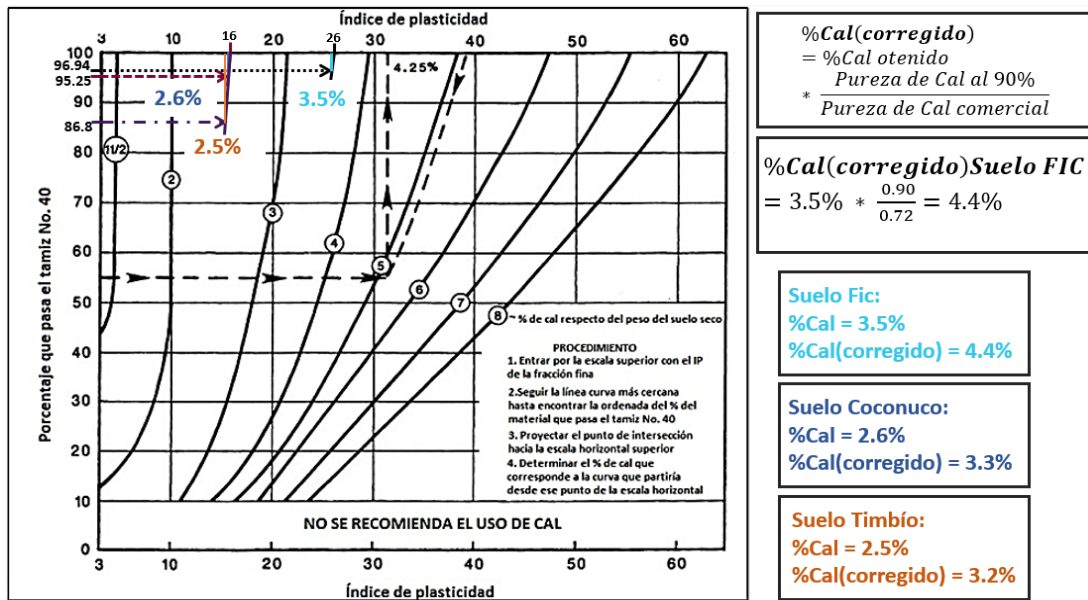
Fuente: Cal hidratada de uso general. Argos, (2021).

Con base en los estándares y requisitos de los ensayos ya mencionados, a continuación, se muestra el análisis paso a paso de los materiales que componen la mezcla suelo-cal y el método encaminado a encontrar la cantidad de cal necesaria para lograr la estabilidad del suelo que se está estudiando.

4.1.1 Método gráfico para estimar la proporción de cal requerida.

Este método consta del uso de un Abaco propuesto por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), con el cual, se debe contar con la granulometría del suelo a estudiar, en especial, tener el porcentaje del pasante por el tamiz #40 (0.420 mm), además se necesita haber realizado los Límites de Atterberg para extraer el Índice de Plasticidad.

Ilustración 29. Método gráfico para la estabilización con Cal



Fuente: Adaptado de (AASHTO T 220-66, 2013)

Según los datos adquiridos; entrando con un valor de índice de plasticidad de 26 y un 96.94 de porcentaje pasa por el tamiz # 40, se sigue con la curva más cercana, que para este caso se tomó la curva del 4%, en la intersección entre el %pasa y la curva de referencia, se sube hasta llegar al eje horizontal donde, posteriormente se obtiene un 3.5% de cal. Cabe resaltar que, para hacer uso de este método gráfico se realizó una corrección del porcentaje, debido a que está hecho para purezas del 90% o más de hidróxido de calcio, por lo que finalmente se obtuvo un 4.4% de cal para el Suelo de la Facultad de Ingeniería Civil.

Para el suelo del municipio de Coconuco, entrando con un valor de índice de plasticidad de 16 y un 95.25 de porcentaje pasa por el tamiz # 40; tomando la curva más cercana siendo así la del 3%, se realiza el proceso descrito anteriormente, obteniendo así un 2.6% de cal, y un 3.3% de cal corregido.

Finalmente, para el suelo del municipio de Timbío, entrando con un valor de índice de plasticidad de 16 y un 86.8 de porcentaje pasa por el tamiz # 40, tomando la curva más cercana siendo así la del 3%, se realiza el proceso descrito anteriormente, obteniendo así un 2.5% de cal, y un 3.2% de cal corregido.

Tabla 27. Datos obtenidos del método gráfico

Suelo o muestra	% Cal Obtenido	% Cal Corregido
F.I.C	3.5	4.4
Coconuco	2.6	3.3
Timbío	2.5	3.2

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Método usando la medición de pH para estimar el porcentaje de cal requerida.

Hay muchas formas de encontrar el mejor u optimo porcentaje de cal; lo que conlleva a que la eficacia de cada método depende de la experiencia de la persona con que lo utiliza. La mayoría de los ensayos aún no han sido estandarizados; sin embargo, para ese caso se utilizó el método descrito en INV E – 131-13 y de INV E – 601-13 (ver normas para mayor información).

La norma técnica colombiana INV E-601-13 aborda el procedimiento para estimar la proporción de cal aplicado a suelos que pasan por el tamiz de 425 μm (No. 40). No obstante, la norma recomienda que para determinar el contenido óptimo se debe practicar ensayos de caracterización del suelo estabilizado, tales como la resistencia a la compresión o el índice de plasticidad.

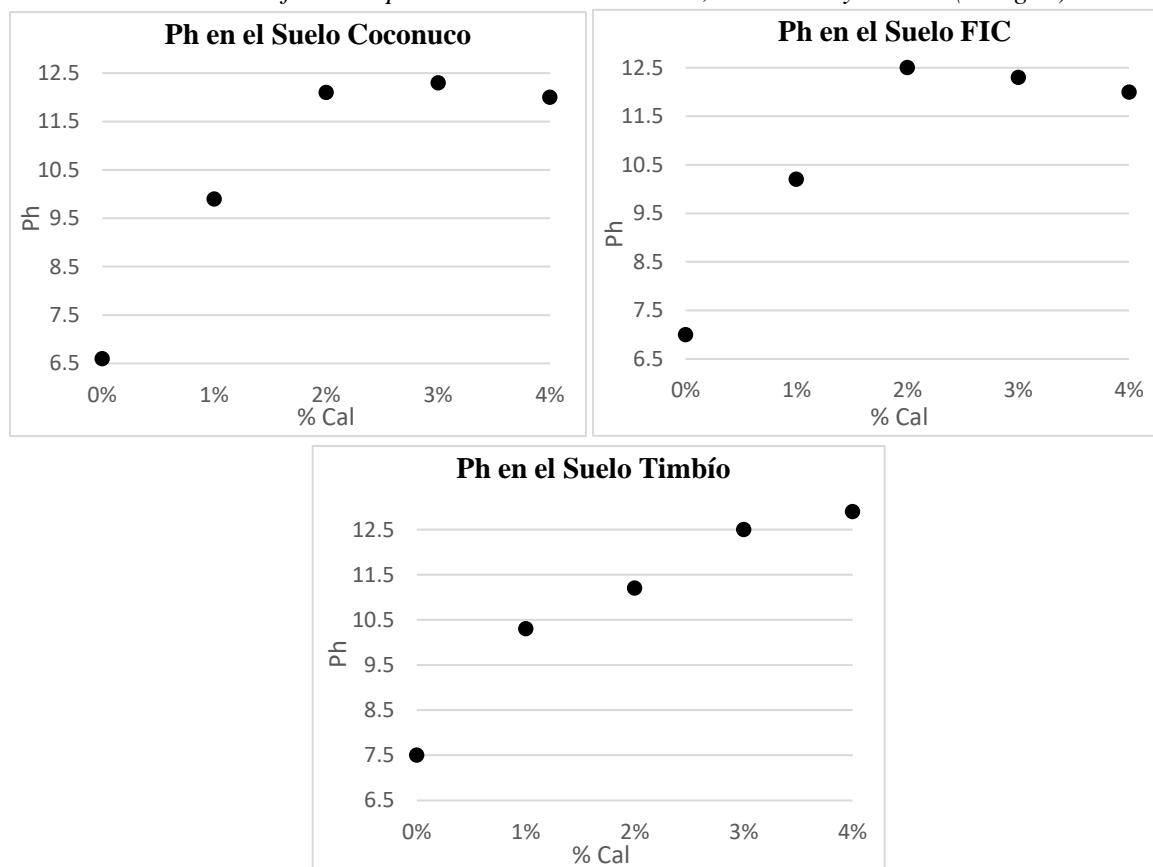
Para llevar a cabo este procedimiento, se preparan una serie de especímenes que contienen diferentes porcentajes de cal en una muestra de suelo; se realizan mediciones de pH en las mezclas de estos especímenes en suspensión para determinar el contenido mínimo de cal necesario para lograr un pH de 12.4 en el suelo estabilizado para activar la reacción puzolánica entre el agente estabilizador y el suelo.

Siendo más preciso, el procedimiento de aplicación seguido en este método, fue usar una solución de trabajo conocida como cloruro de sodio, la cual debe tener un pH entre 5 y 7, posteriormente se almacenó en diferentes vasos de precipitado para luego agregar el suelo con su porcentaje de cal correspondiente; la mezcla reaccionó durante una hora y finalmente se tomaron las lecturas con un

potenciómetro que tiene un sistema de electrodos sensitivos al pH (PH metro). Este mismo procedimiento se realizó, pero ahora haciendo uso de agua destilada.

Por lo que se expresa por medio de la Tabla 28 y la Gráfica 15 **Error! Reference source not found.** los valores obtenidos para los 3 suelos propuestos.

Gráfica 15. pH obtenido del Suelo FIC, Coconuco y Timbío (en agua).



Fuente: Elaboración propia.

De los datos obtenidos se evidencian que, para el suelo extraído de Coconuco, este suelo es ácido debido al pH natural que se obtuvo del ensayo (INV E – 131 – 13) agregando 3.0% de cal se precisa como el porcentaje óptimo para estabilizar ese estrato en específico, debido a que cumple con la especificación a pesar de que tenga un comportamiento asintótico.

Siguiendo con el suelo tomado de la Facultad de Ingeniería Civil, agregando 1.9% de cal cataloga como el porcentaje óptimo para estabilizar ese estrato en específico, debido a que cumple con la especificación INV E-601-13.

Finalmente, de los datos obtenidos para el suelo tomado del municipio de Timbío, agregando 2.9% de cal se cataloga como el porcentaje óptimo para estabilizar ese estrato en específico.

Tabla 28. Datos obtenidos del método normalizado (INV E – 601-13)

Suelo o muestra	% Cal Obtenido
F.I.C	1.9
Coconuco	3.0
Timbío	2.9

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Ecuación propuesta por Hill y Davidson.

La siguiente ecuación fue propuesta por Hill y Davidson en el año 1960 y fue adoptada por el Department of Civil and Environmental Engineering (John Daniels et al., 2010), la cual se conoce como el mínimo porcentaje de cal o método del “punto de fijación de la cal”.

Ecuación 2. Porcentaje mínimo de Cal

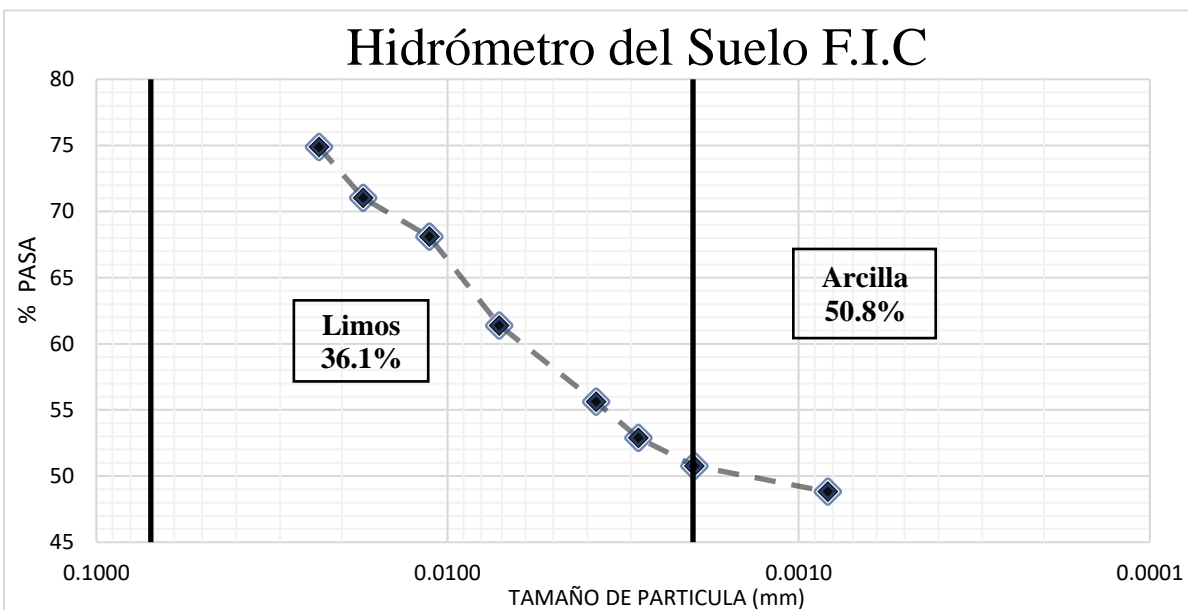
$$Lm = \frac{[Contenido de arcillas (< 2\mu m)]}{35} + 1.25$$

Fuente: (John Daniels et al., 2010)

Para colocar en práctica este método, se hizo uso del ensayo del Análisis Granulométrico Vía Hidrómetro, ya que es ampliamente utilizado para obtener valores estimados de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran desde el tamiz #200 (0.075 mm) hasta alrededor de 0.001 mm. Concretamente en el análisis del hidrómetro se utiliza la relación de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera, su peso específico y la del fluido, y la viscosidad del fluido, estos datos se reemplazaron en la ecuación más conocida como la Ley de Stokes, establecida

por el físico Inglés G.G. Stokes, la cual dice que la velocidad de sedimentación de partículas en un líquido es función de su tamaño. (ver norma INV E-124 – 07 para mayor información). Por último, cabe destacar, que para hacer uso de la Ecuación 2, se usó el porcentaje de arcilla de tamaño 2 μm. Los datos obtenidos del ensayo fueron representados a través de un gráfico en escala semilogarítmica.

Gráfica 16. Resultado obtenido del hidrómetro para el Suelo de F.I.C



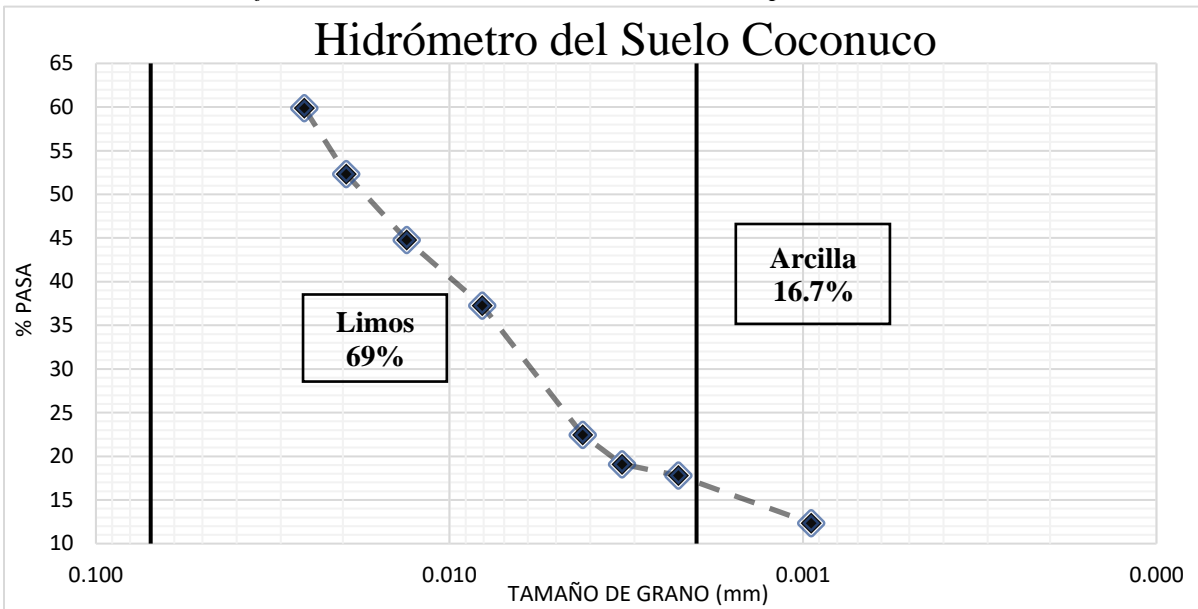
Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 3. Calculo tipo del contenido mínimo de cal para el suelo Fic.

$$Lm = \frac{50.8}{35} + 1.25 = 2.7\%$$

De la Gráfica 16 se obtuvo 50.8% de contenido de arcilla, la cual se reemplazó en la Ecuación 3, obteniendo un porcentaje mínimo de cal de 2.7%.

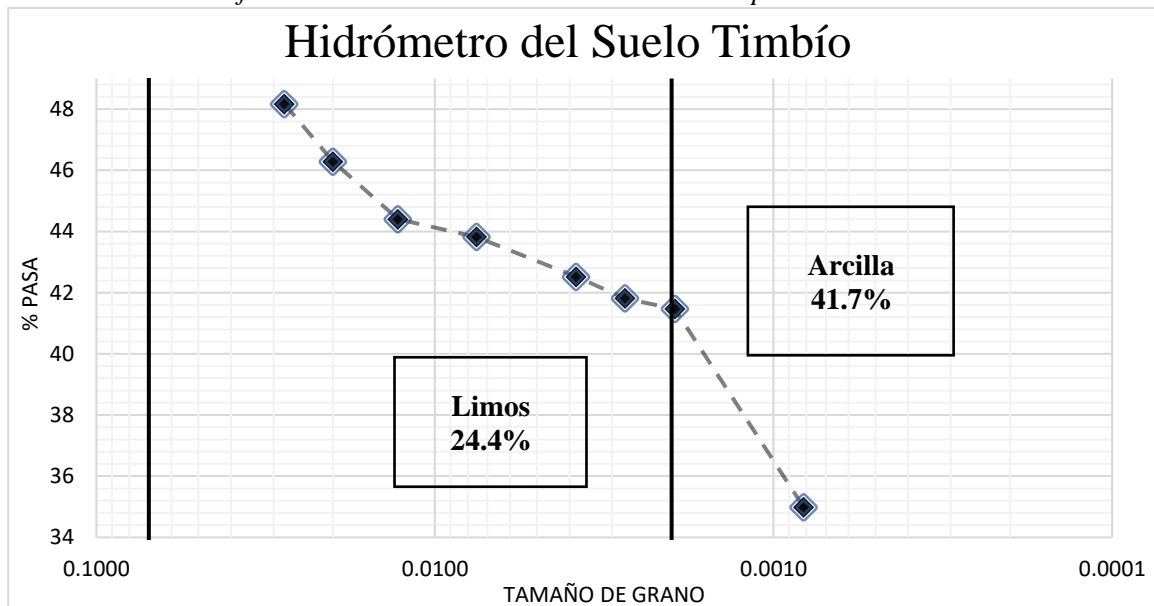
Gráfica 17. Resultado obtenido del hidrómetro para el Suelo de Coconuco



Fuente: Elaboración propia.

De la Gráfica 17 se obtuvo 16.7% de contenido de arcilla para el suelo de Coconuco, la cual se reemplazó en la Ecuación 2, obteniendo un porcentaje mínimo de cal de 1.7%.

Gráfica 18. Resultado obtenido del hidrómetro para el Suelo de Timbío



Fuente: Elaboración propia.

De la Gráfica 18 se obtuvo 41.7% de contenido de arcilla para el suelo de Coconuco, la cual se reemplazó en la Ecuación 2, obteniendo un porcentaje mínimo de cal de 2.4%.

Tabla 29. Datos obtenidos del método empírico

Suelo o muestra	% mínimo de Cal
F.I.C	2.7
Coconuco	1.7
Timbío	2.4

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, de los tres métodos aplicados para obtener el porcentaje de cal optimo se optó por definir que 3.5% de cal efectivo para estabilizar suelos derivados de ceniza, ya que, garantiza un equilibrio entre los requerimientos de cal y la mejora de propiedades mecánicas y químicas del suelo.

Tabla 30. Datos obtenidos de los diferentes métodos utilizados

Suelo o muestra	Método Aashto		Método pH	Método empírico
	% Cal obtenido	% Corregido	% Cal	% mínimo de Cal
F.I.C	3.5	4.4	1.9	2.7
Coconuco	2.6	3.3	3.0	1.7
Timbío	2.5	3.2	2.9	2.4

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Resultados de los ensayos realizados al suelo estabilizado

4.2.1 Límites de consistencia en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado

Tabla 31. Límites de consistencia para los tres suelos estudiados

		COCONUCO					FIC					TIMBIO				
		0 %	1 %	3 %	5 %	7 %	0 %	1 %	3 %	5 %	7 %	0 %	1 %	3 %	5 %	7 %
		Limite Líquido	24 h	58	51	57	56	72	70	75	73	80	82	60	65	62
7 días	58		54	54	63	71	70	72	68	67	73	60	64	51	50	64
14 días	58		54	57	65	68	70	71	70	66	72	60	61	71	65	62
28 días	58		56	61	62	57	70	70	64	66	70	60	67	61	62	59

		COCONUCO					FIC					TIMBIO				
		0 %	1 %	3 %	5 %	7 %	0 %	1 %	3 %	5 %	7 %	0 %	1 %	3 %	5 %	7 %
Límite Plástico [LP o W_P]	24 h	43	32	48	36	56	45	42	43	41	48	49	39	41	41	55
	7 días	43	38	30	41	56	45	43	41	43	45	49	41	30	33	46
	14 días	43	48	45	51	50	45	43	43	39	45	49	41	43	42	47
	28 días	43	45	51	51	51	45	42	42	41	47	49	46	40	43	46
Índice de Plasticidad [IP]	24 h	15	19	9	20	16	25	33	30	39	35	11	26	21	29	11
	7 días	15	16	24	22	15	25	29	27	25	29	11	23	21	17	18
	14 días	15	6	12	14	17	25	29	27	27	28	11	20	28	23	15
	28 días	15	10	10	11	6	25	27	23	25	24	11	21	21	19	13
S.U.C.S	24 h	MH					MH					MH				
	7 días															
	14 días															
	28 días															

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Compresión inconfínada en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado

Tabla 32. Resistencia promedio de la compresión inconfínada del Suelo Coconuco, F.I.C y Timbío, con adición de cal en estado seco posterior a la etapa de curado

COMPRESIÓN INCONFINADA											
SUELO COCONUCO											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1			42.8	21.4	24.6	12.3	34.5	17.2	299.0	149.5	kPa
7	113.4	56.7	84.6	42.3	65.7	32.9	80.9	40.4	389.3	194.6	kPa
14			97.4	48.7	53.6	26.8	73.7	36.8	614.3	307.2	kPa
28			98.3	49.2	112.1	56.1	118.4	59.2	695.3	347.6	kPa
SUELO F. I. C.											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1			442.0	221.0	332.8	166.4	402.1	201.0	451.8	225.9	kPa
7	228.8	114.4	681.9	340.9	383.4	191.7	601.8	300.9	729.5	364.7	kPa
14			414.2	207.1	333.8	166.9	515.8	257.9	498.2	249.1	kPa
28			580.2	290.1	436.7	218.4	730.3	365.1	446.8	223.4	kPa

COMPRESIÓN INCONFINADA											
SUELO TIMBÍO											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1			84.8	42.4	112.0	56.0	115.6	57.8	532.2	266.1	kPa
7	227.8	113.8	466.7	233.3	110.4	55.2	123.4	61.7	889.1	444.6	kPa
14			931.3	465.7	113.3	56.7	210.4	105.2	164.4	82.2	kPa
28			408.8	204.4	112.7	56.4	239.0	119.5	651.6	325.8	kPa

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Compresión inconfínada en estado saturado por capilaridad en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado

Tabla 33. Resistencia promedio de la compresión inconfínada saturados por capilaridad de los 3 suelos estabilizados

COMPRESIÓN INCONFINADA SATURADAS POR CAPILARIDAD											
SUELO COCONUCO											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1			16.2	8.1	87.9	43.9	254.8	127.4	349.2	174.6	kPa
7	17.7	8.9	16.6	8.3	39.9	20.0	74.4	37.2	481.4	240.7	kPa
14			12.5	6.3	66.9	33.5	49.5	24.8	501.1	250.5	kPa
28			3.6	1.8	30.4	15.2	71.1	35.6	624.3	312.2	kPa
SUELO F. I. C.											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1	36.0	18.0	57.1	28.6	69.6	34.8	248.1	124.1	234.9	117.4	kPa
7			85.3	42.7	159.6	79.8	300.1	150.0	318.7	159.4	kPa
14			84.6	42.3	77.5	38.7	343.2	171.6	476.4	238.2	kPa
28			106.4	53.2	103.0	51.5	185.3	92.7	442.5	221.3	kPa
SUELO TIMBÍO											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1			4.3	2.1	62.1	31.1	73.6	36.8	1094.6	547.3	kPa
7	87.1	43.6	491.3	245.6	61.0	30.5	144.1	72.0	651.7	325.9	kPa
14			313.1	156.6	52.1	26.1	192.6	96.3	575.4	287.7	kPa
28			533.8	266.9	92.2	46.1	220.8	110.4	386.6	193.3	kPa

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Compresión inconfínada en estado saturado por inmersión en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado

Tabla 34. Resistencia promedio de la compresión inconfínada saturados por inmersión de los 3 suelos estabilizados

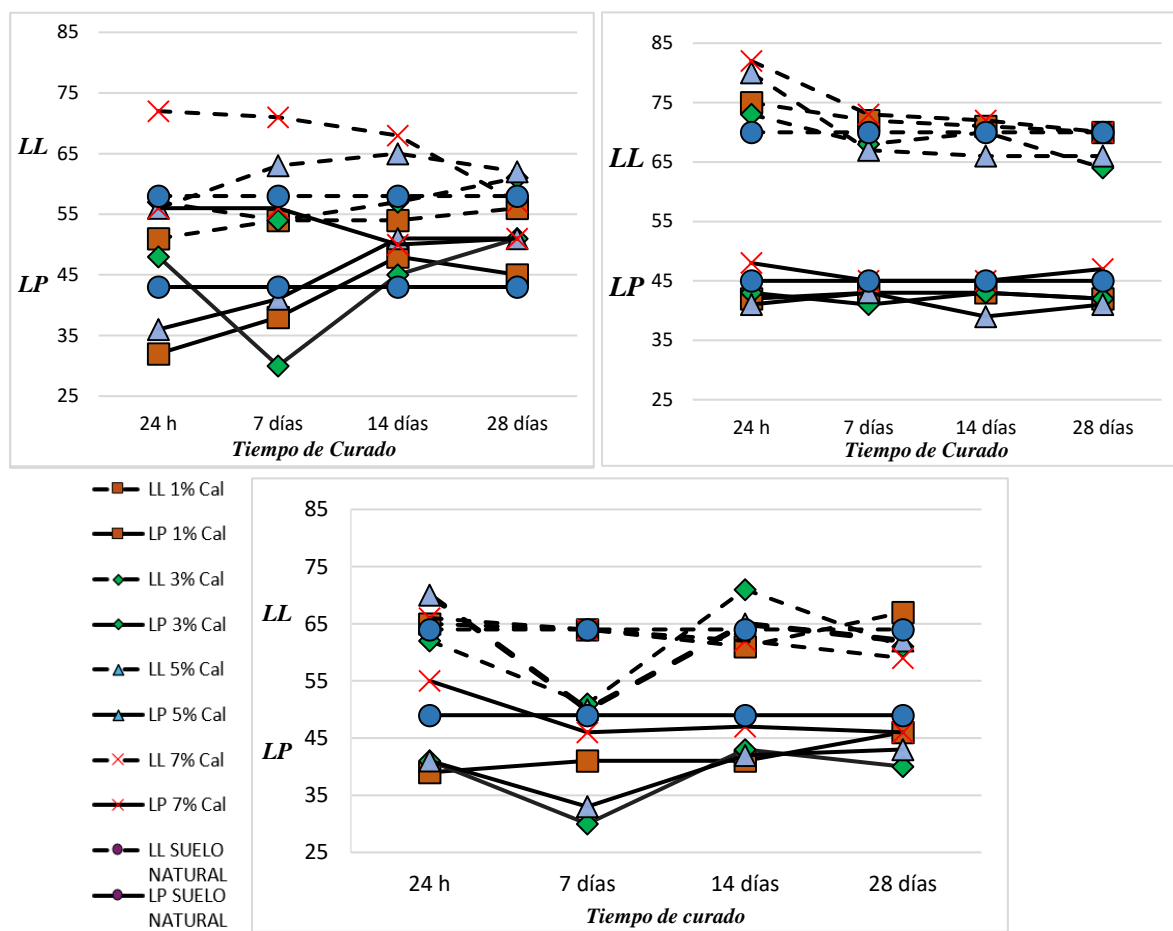
COMPRESIÓN		INCONFINADA				SATURADAS				POR	
		INMERSIÓN									
SUELO COCONUCO											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1			0.0	0.0	0.0	0.0	226.6	113.3	502.7	251.3	kPa
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	524.2	262.1	kPa
14			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	564.2	282.1	kPa
28			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	588.4	294.2	kPa
SUELO F. I. C.											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1			0.0	0.0	51.5	25.7	256.4	128.2	170.6	85.3	kPa
7	0.0	0.0	50.5	25.3	117.2	58.6	221.6	110.8	333.4	166.7	kPa
14			75.0	37.5	70.6	35.3	317.2	158.6	396.7	198.3	kPa
28			53.9	27.0	78.9	39.5	100.5	50.3	415.3	207.7	kPa
SUELO TIMBÍO											
DIA	0%		1%		3%		5%		7%		Unidad
	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	
1			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	292.2	146.1	kPa
7	0.0	0.0	170.3	85.2	80.1	40.1	0.0	0.0	170.4	85.2	kPa
14			117.8	58.9	55.0	27.5	139.9	69.9	322.3	161.1	kPa
28			0.0	0.0	52.1	26.1	184.8	92.4	261.2	130.6	kPa

Fuente: Elaboración propia.

5 Capítulo 5: Análisis de datos obtenidos del suelo estabilizado

5.1 Análisis de resultados de los límites de consistencia en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado

Gráfica 19. Límite Líquido y Límite Plástico de los Suelos Coconuco, F.I.C y Timbío posterior a la etapa de curado, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis del Límite Líquido (LL) con respecto al suelo natural:

SUELO COCONUCO

Al agregar 1% de cal, se observa que el LL disminuye un 12% a las 24 horas de curado. Esto se debe seguramente a una rápida reacción inicial entre la cal y los minerales presentes en el suelo, reduciendo su sensibilidad al agua.

El Límite Líquido aumenta progresivamente hasta en un 8% con porcentajes entre el 3% y 5% de cal, alcanzando un pico en el 5% tras 14 días. Esto puede deberse a la formación de compuestos intermedios de reacción que retienen más agua.

Curiosamente al agregar 7% de cal, el LL sube drásticamente en un 24% en las primeras 24 horas, lo que indica que este exceso de cal podría no estar completamente integrado químicamente, lo que genera un aumento temporal en el contenido de agua necesario para el estado líquido.

SUELO F.I.C

El Límite Líquido con 1% de cal aumenta 7% a las 24 horas, lo que indica una reacción química inicial que puede estar incrementando la capacidad del suelo para retener agua.

Al añadir entre 3% y 5% de cal al suelo, se observa una disminución del 8.6% en el LL con el tiempo, es decir, a los 28 días de curado, reflejando un efecto estabilizador de la cal al reducir la sensibilidad al agua.

El Límite Líquido con 7% de cal sube considerablemente en un 17% a las 24 horas de curado y se mantiene alto hasta llegar al mismo LL del suelo sin estabilizador a los 28 días de curado. Esto podría deberse a un exceso de cal no completamente reaccionada con el suelo, lo que aumenta temporalmente la capacidad de absorción de agua.

SUELO TIMBÍO

El Límite Líquido añadiendo 1% de cal, se mantiene estable a lo largo del tiempo, mostrando una ligera variación, lo que indica una reacción inicial de la cal sin una reducción significativa de la plasticidad.

Con el 3% de cal, el LL disminuye significativamente en un 20% dentro de los primeros 7 días, lo que sugiere una reacción química más efectiva a este porcentaje y en este tiempo de curado, pero aumenta ligeramente en un 11% tras los 28 días.

Agregando 5% de cal, el suelo presenta un aumento del 9% del LL en las 24 horas de curado, no obstante, disminuye significativamente en un 28.5% tras 7 días, y se aumenta en un 30% con respecto al curado anterior sin superar el IP natural; este comportamiento se puede atribuir a la reacción química entre la cal y el suelo, que produce compuestos que retienen más agua inicialmente, pero que se estabilizan y se vuelven menos higroscópicos con el tiempo.

Con 7% de cal, se observa un comportamiento variable, con un aumento inicial del 3% después de 24 horas y una reducción posterior del 7.8% a los 28 días. Esto podría deberse a un efecto estabilizador a largo plazo.

Análisis del Límite Plástico (LP) con respecto al suelo natural:

SUELO COCONUCO

El Límite Plástico al agregar 1% de cal, disminuye significativamente en un 25.5% a las 24 horas con respecto al LP del suelo sin estabilizar, lo que implica que el suelo se vuelve menos plástico y más trabajable.

Al adicionar 3% cal al suelo, es decir, 2.1% de cal efectiva, el límite plástico aumenta 11.6% a las 24 horas, demostrando que el suelo comienza a adquirir características más rígidas debido a la reacción química.

Al agregar 3.5% de cal efectiva (5% cal), el LP se estabiliza en torno a los 14 y 28 días de curado, mostrando un equilibrio entre la cantidad de cal y la reacción química del suelo, obteniendo un aumento del 18.6% con respecto al límite plástico del suelo en estado natural.

El Límite Plástico aumenta considerablemente en un 30% a las 24 horas y se mantiene constante a los 7 días de curado, sin embargo, se disminuye 8.9% a los 14 y 28 días, posiblemente debido a un exceso de cal.

SUELO F.I.C

Entre el 1%, 3% y 5% de cal agregado al suelo, el límite plástico disminuye alrededor del 6.6% dentro de las 24 horas y se mantiene constante hasta los 28 días de curado, indicando que el agente estabilizador (cal) no contribuye de manera eficiente a la mejora de las propiedades plásticas.

Contrariamente, al añadir un 7% de cal, el LP aumenta 5.5%, lo que puede interpretarse como un mejoramiento en la cohesión y plasticidad.

SUELO TIMBÍO

Al añadir 1%, 3% y 5% de cal al suelo respectivamente, el LP disminuye significativamente alrededor de un 18% tras 24 horas de curado y se mantiene en ese rango, por lo que no demostró mejoramiento alguno.

Contrariamente, al añadir 7% de cal el LP sube 12% al inicio y luego disminuye 6%, este comportamiento se puede atribuir a la sobresaturación del suelo con el estabilizador; la cantidad excesiva de cal puede producir una reacción química que aumenta la plasticidad del suelo inicialmente. Sin embargo, con el tiempo, la reacción química puede continuar y producir compuestos que reducen la plasticidad del suelo.

Análisis del Índice de Plasticidad (IP) con respecto al suelo natural:

SUELO COCONUCO

El Índice de Plasticidad al adicionar 1% de cal (0.7% efectivo) aumenta inicialmente un 26.6% a las 24 horas, pero disminuye a medida que avanza el tiempo de curado en un 33% tras 28 días. Esto refleja una mejora en las propiedades del suelo, haciéndolo menos plástico y más estable.

Al agregar 3% de cal al suelo (2.1% efectivo), el índice de plasticidad disminuye drásticamente en un 40% a las 24 horas, lo que representa una reducción significativa en la plasticidad; por lo que es un indicativo de una buena estabilización química.

El Índice de Plasticidad al adicionar 5% de cal (3.5% efectivo) tiende a estabilizarse a los 14 y 28 días de curado, lo que sugiere que el suelo alcanza un equilibrio favorable.

7% cal: El IP disminuye hasta 6% tras 28 días, lo que indica una plasticidad muy baja. Esto podría ser deseable en ciertos contextos, pero también indica que el exceso de cal podría no estar contribuyendo significativamente a la mejora química.

SUELO F.I.C

El Índice de Plasticidad agregando 1% y 3% aumentan alrededor del 26% dentro de las 24 horas de curado comparado con el LP que tiene el suelo sin el estabilizante, posteriormente, disminuyen en un 8% con respecto al obtenido del suelo natural tras 28 días, lo que puede indicar una mejora con el tiempo.

Añadiendo el 5% de cal, el índice de plasticidad aumenta 56% dentro de las 24 horas de curado; sin embargo, el IP permanece en el mismo estado tras 28 días respecto al suelo natural, mostrando un efecto estabilizador moderado, pero menos efectivo que el 3%.

Con 7% de cal en el suelo, el IP no muestra una mejora significativa, pero se reduce en un 4% tras 28 días de curado, indicando que el exceso de cal podría no ser necesario o eficiente.

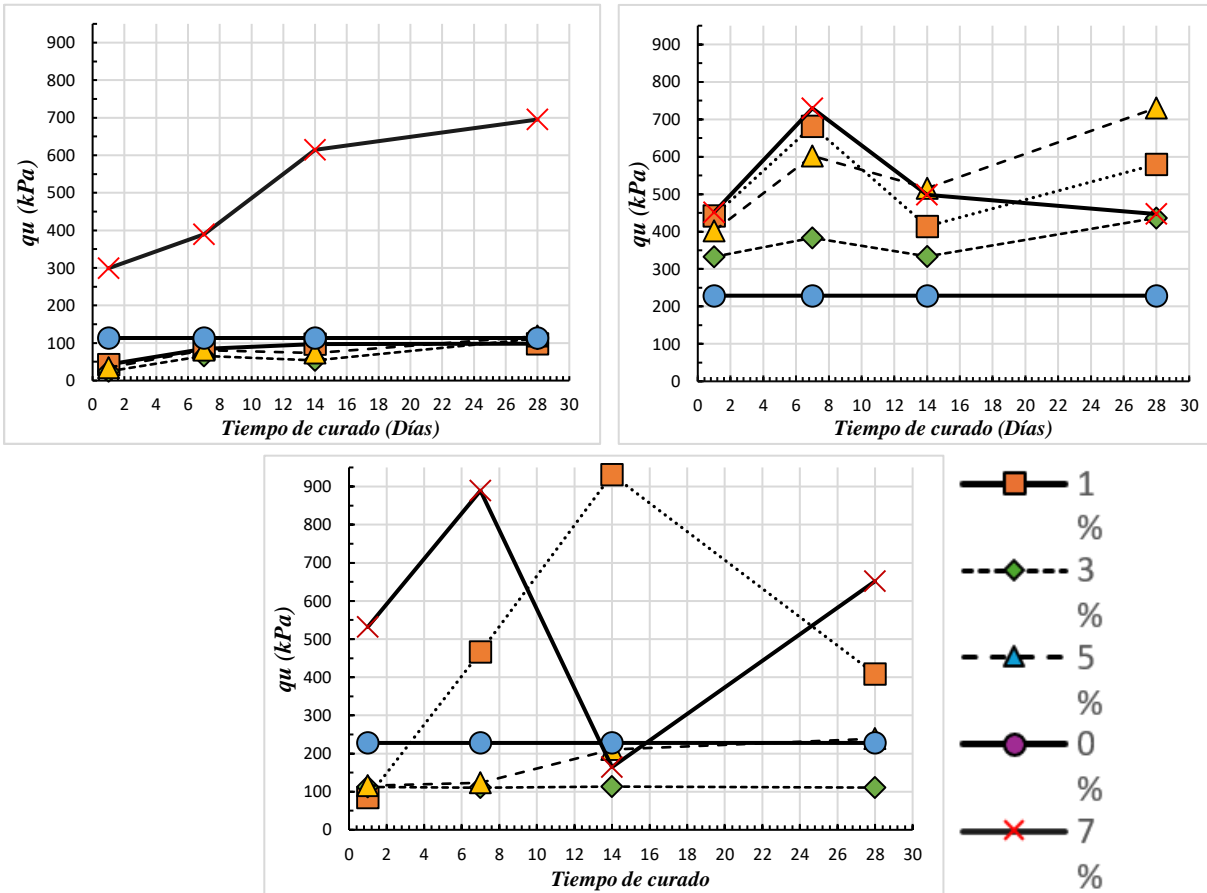
SUELO TIMBÍO

Agregando 1%, 3% y 5% de cal al suelo, respectivamente, el IP aumenta alrededor de 154.6% en los tres casos y posteriormente disminuye un 32% tras 28 días con respecto al curado inicial (24 h) de las mezclas suelo-cal, mostrando que la reacción química entre la cal y el suelo es compleja y puede producir compuestos que aumentan la plasticidad del suelo.

Con 7% de cal, el índice de plasticidad es igual después de 24 horas, varía en los tiempos de curado entre 7 y 14 días, sin embargo, aumenta 18% tras 28 días con respecto al IP natural; esto sugiere que la cantidad mayor de cal puede producir una reacción química más intensa que reduce la plasticidad del suelo de manera más efectiva.

5.2 Análisis de resultados de la compresión inconfiada en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado

Gráfica 20. Resistencia a la compresión inconfiada, q_u [kPa] del Suelo Coconuco, F.I.C y Timbío, en estado seco posterior a la etapa de curado, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

SUELO COCONUCO

La resistencia a la compresión inconfiada (q_u) del suelo natural es de 113.4 kPa, indicando que el suelo presenta características mecánicas relativamente bajas, típico de suelos limosos de alta plasticidad (clasificación MH).

Con 1% de cal, la resistencia a la compresión aumenta 130% pasando de 42.8 kPa a las 24 horas a 98.3 kPa tras 28 días, pero sigue siendo menor que el suelo natural. Este porcentaje de cal no estabiliza significativamente el suelo, lo que sugiere que no es suficiente para provocar una reacción química completa entre la cal y los componentes del suelo.

Añadiendo 3% de cal, (qu) aumenta a medida que transcurre el tiempo, de 24.6 kPa a las 24 horas a 112.1 kPa tras 28 días, por lo que se obtuvo un aumento del 356%. Este comportamiento apunta que el porcentaje de cal comienza a tener un efecto estabilizador evidente, mejorando la resistencia gradualmente.

La hidratación y formación de hidróxido de calcio provoca una leve mejora en las propiedades mecánicas, en porcentajes bajos (1% y 3%), estas mejoras son limitadas debido a la falta de suficiente reactivo para interactuar con los minerales del suelo.

La resistencia a la compresión inconfiada pasa de 34.5 kPa a las 24 horas a 118.4 kPa tras 28 días, superándolo ligeramente en la resistencia al suelo natural con 4%. Con este porcentaje, se observa un balance óptimo entre la cantidad de cal y el desarrollo de las reacciones puzolánicas.

Agregando 7% de cal al suelo, la resistencia crece en un 513%, alcanzando 695.3 kPa tras 28 días, un incremento significativo respecto al suelo natural y a otros porcentajes de cal. Este comportamiento se atribuye a una mayor disponibilidad de cal, que incrementa la velocidad y magnitud de las reacciones químicas. Sin embargo, este valor puede ser excesivo dependiendo del costo-beneficio de usar una mayor cantidad de cal.

La cal reacciona con los minerales de sílice y alúmina presentes en las partículas de suelo, formando compuestos cementantes como silicatos y aluminatos de calcio hidratados (C-S-H y C-A-H) en porcentajes más altos (5% y 7%) por lo que provoca que estas reacciones sean eficientes, lo que se traduce en mayores resistencias. Aunque se alcanzan resistencias muy altas, un exceso de cal (al adicionar 7%) podría no ser económicamente viable y podría ocasionar una menor trabajabilidad del suelo.

SUELO F.I.C

La resistencia a la compresión inconfiada del suelo natural es de 228.8 kPa, demostrando que el suelo F.I.C. tiene una resistencia inicial baja, característico de suelos finos de alta plasticidad con baja capacidad portante.

La resistencia inicial al agregar 1% de cal, aumentó un 93% (442.0 kPa) a las 24 horas con respecto a la resistencia obtenida en el suelo natural y después de 28 días alcanza una resistencia de 580.2 kPa por lo que se obtuvo un aumento del 153.5% comparado con la resistencia en estado natural del suelo. Este comportamiento insinúa que la reacción química entre la cal y el suelo continúa después de las 24 horas, lo que produce un aumento adicional en la resistencia del suelo.

Con 3% de cal mejora desde 332.8 (subiendo un 45.5% comparado con el del suelo natural) kPa a las 24 horas hasta 436.7 kPa en 28 días (aumentando 91% la resistencia natural del suelo). Este porcentaje produce una estabilización más consistente, pero los valores de resistencia no alcanzan niveles óptimos.

La cal produce un efecto de floculación y aglomeración, lo que mejora las propiedades mecánicas en el corto plazo, especialmente a bajos porcentajes (1 y 3) % de cal.

Al añadir 5% de cal en el suelo, éste presenta un incremento significativo (75.7%) de 402.1 kPa a las 24 horas a 730.3 kPa tras 28 días, por lo que aumento la resistencia del suelo natural a un porcentaje de 219%. Considerando que este porcentaje de adición de cal es el más eficiente en términos de costo-beneficio, ya que promueve un desarrollo significativo de las reacciones químicas y reacciones puzolánicas para garantizar una estabilización sostenida.

Se observa un comportamiento atípico agregando 7% de cal, ya que, aumenta rápidamente en los primeros días (451.8 kPa a las 24 horas y 729.5 kPa a los 7 días), pero disminuye a 446.8 kPa tras 28 días; por lo que el exceso de cal podría haber generado micro fisuras o un estado sobre estabilizado, lo que reduce la resistencia con el tiempo.

SUELO TIMBÍO

La resistencia a la compresión inconfiada del suelo en estado natural es de 227.8 kPa. Estos valores reflejan un suelo natural con una resistencia moderada, característico de suelos con menor plasticidad comparado con el suelo Coconuco.

La resistencia a la compresión inconfiada con el 1% de cal, incrementa a 84.8 kPa tras 1 día y alcanza su valor máximo de 931.3 kPa a los 14 días. Sin embargo, disminuye considerablemente a 408.8 kPa tras 28 días, por lo que puede atribuirse a una estabilización química parcial donde las reacciones puzolánicas iniciales generan resistencia, pero no se sostienen a largo plazo.

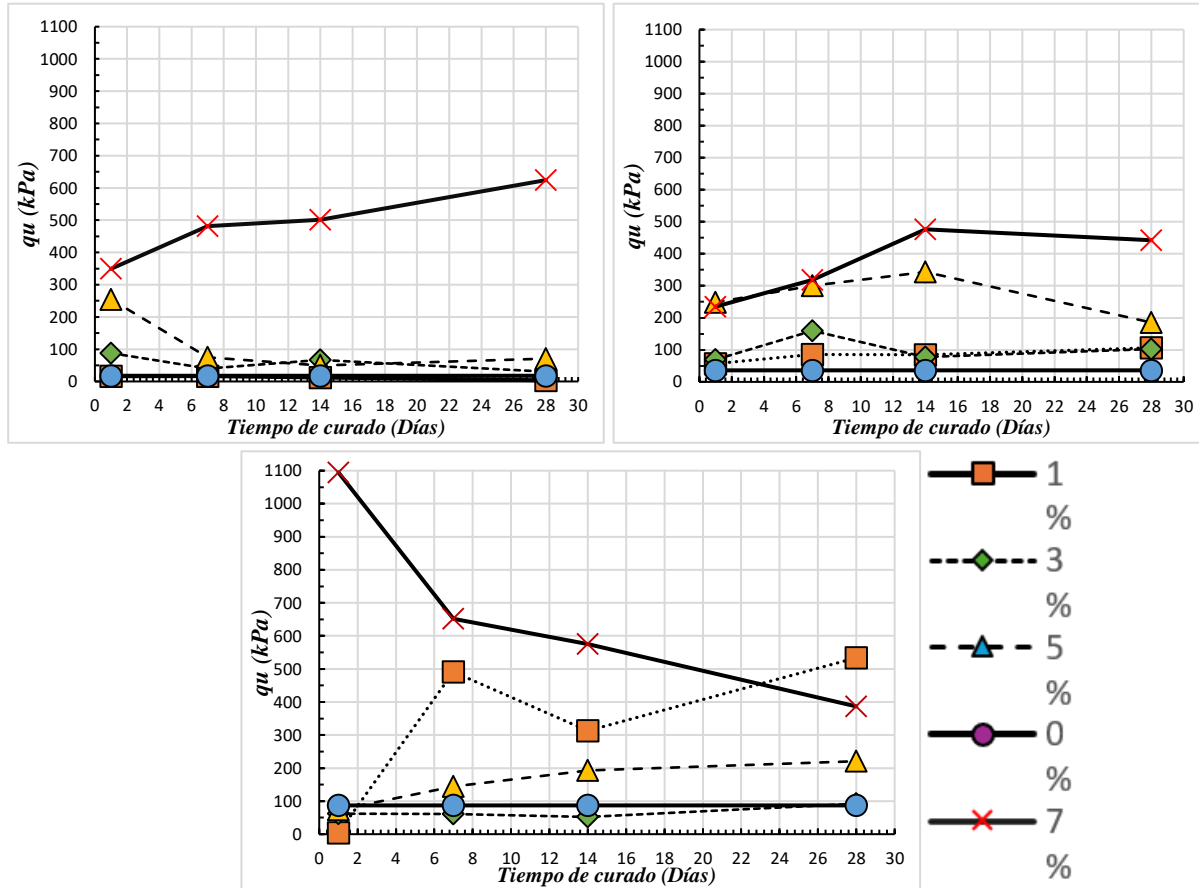
Con 3% de cal agregado al suelo, la resistencia inicial de 112.0 kPa tras 24 horas de curado muestra poca mejora de sus propiedades mecánica. A los 14 días alcanza su máximo de 113.3 kPa, sin incrementos significativos tras 28 días (112.7 kPa). Este porcentaje parece insuficiente para estabilizar adecuadamente el suelo Timbío.

La resistencia al adicionar 5% de cal, presentó incrementos graduales, desde 115.6 kPa después de 1 día de curado hasta alcanzar 239.0 kPa tras un curado de 28 días; para este caso aumento 5% la resistencia comparada con la obtenida del suelo natural. Esto se debe a una estabilización consistente, sin embargo, los incrementos en resistencia no son tan altos como en otros porcentajes.

La resistencia a la compresión inconfiada al adicionar 7% de cal en el suelo, muestra un comportamiento sobresaliente, incrementándose rápidamente a 532.2 kPa en 1 día, alcanzando un pico de 889.1 kPa a los 7 días. Posteriormente, desciende a 651.6 kPa tras 28 días. Este comportamiento indica una fuerte reacción puzolánica inicial, seguida de una posible micro fisuración o desintegración parcial de la matriz estabilizada a largo plazo.

5.3 Análisis de resultados de la compresión inconfiada en estado saturado por capilaridad en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado

Gráfica 21. Resistencia a la compresión inconfiada del Suelo Coconuco, F.I.C y Timbío, en estado saturado por capilaridad durante 24 horas posterior a la etapa de curado, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

SUELO COCONUCO

La resistencia a la compresión inconfiada inicial bajo condiciones de saturación por capilaridad mezclando 1% de cal, $q_u = 16,2$ kPa es similar a la del suelo natural, en una reducción del 8.5%; tras 28 días de curado, la resistencia disminuye el 80% ($q_u = 3.6$ kPa) comparada con q_u del suelo sin estabilizar, mostrando que este porcentaje de cal no es suficiente para crear una estructura resistente al agua en este suelo. Esto se debe a que, bajo condiciones de saturación, el suelo no

estabilizado pierde cohesión a causa del ingreso de agua, debilitando las interacciones entre las partículas. Este fenómeno es típico en suelos volcánicos de baja plasticidad y alta porosidad.

En este caso, al incorporar 3% de cal, la resistencia presenta un incremento de 397% de la resistencia inicial ($q_u = 87,9$ kPa) en comparación con el suelo natural. Sin embargo, esta resistencia disminuye notablemente un 65% con el tiempo ($q_u = 30,4$ kPa a los 28 días), superando aun la resistencia natural del suelo, lo que indica que, aunque las reacciones de la cal inicial mejoran la resistencia, éstas no logran estabilizar completamente el suelo en condiciones saturadas.

La resistencia inicial agregando 5% de cal, es alta ($q_u = 254,8$ kPa tras 24 horas) en 1340% y mantiene valores moderadamente estables con el tiempo ($q_u = 71,1$ kPa a los 28 días), disminuyendo 72% la resistencia obtenida a las 24 horas de curado. Lo que refleja una mejora significativa en las propiedades mecánicas del suelo gracias a la floculación inicial y las reacciones puzolánicas, que generan una matriz más estable.

Este porcentaje del 7% de cal, logra la mayor resistencia inicial ($q_u = 349,2$ kPa) creciendo 1873% en comparación de la resistencia obtenida con el suelo sin estabilizar y se mantiene una resistencia significativa con el tiempo ($q_u = 624,3$ kPa tras los 28 días de curado) incrementado por 79% la resistencia inicial de la mezcla. La alta resistencia indica que la cantidad de cal añadida es suficiente para estabilizar el suelo incluso en condiciones saturadas. Esto se atribuye a una mayor formación de compuestos cementantes derivados de las reacciones puzolánicas entre la cal y el suelo.

SUELO F.I.C

El valor de la resistencia a la compresión inconfiada del suelo natural en condiciones saturadas por capilaridad $q_u=36,0$ kPa se mantiene constante a lo largo del tiempo, lo cual indica que el suelo natural no presenta variaciones significativas en su resistencia bajo condiciones de saturación. De manera que el suelo carece de cohesión adicional o de mecanismos internos que puedan mejorar su resistencia, especialmente bajo el efecto del agua.

La resistencia a la compresión inconfiada inicial mezclando 1% de cal en el suelo fue de $q_u = 57,1$ kPa, de modo que muestra un nivel de mejoría respecto al suelo natural, creciendo en un porcentaje del 58.6%, no obstante, no se observa un aumento significativo con el tiempo, teniendo $q_u = 106,4$ kPa a los 28 días de curado, adicionalmente se obtuvo un aumento del 195.5% para ésta última resistencia comparada con la conseguida en el estado natural del suelo, lo que orienta a una mejora limitada, insuficiente para estabilizar efectivamente el suelo en condiciones saturadas.

Con 3% de cal en la mezcla del suelo, se observa una resistencia inicial moderada, la cual aumentó el 93% comprada con la resistencia obtenida para el suelo natural y fue de 69,6 kPa, con un incremento progresivo a los 28 días de curado y adquiriendo una resistencia de 103 kPa, la cual, comparada con la resistencia del suelo en estado natural creció un 186%. La estabilización comienza a ser práctica en este porcentaje, aunque la cal podría no ser suficiente para generar una reacción completa que estabilice el suelo de manera óptima.

Al añadir 5% de cal, el incremento en resistencia es evidente desde el día 1, siendo esta de 248.1 kPa y alcanzando un aumento del 586% con respecto a la resistencia de suelo en estado natural; los valores continúan mejorando hasta los 14 días de curado, sin embargo, cae un 46% la resistencia a los 28 días, pero sigue siendo mayor que la obtenida en el suelo natural. Esto sugiere que la estabilización con cal fue efectiva, pero la resistencia puede disminuir con el tiempo debido a que el estabilizante pudo haber reaccionado con otros componentes del suelo reduciendo su eficacia.

En este caso, se presenta la mayor resistencia inicial añadiendo 7% de cal, la cual fue de 234,9 kPa y se sigue incrementando hasta los 28 días con 442.5 kPa, con un incremento de 553% y 1129% respectivamente, comparados con la resistencia del suelo en estado natural. Siendo así, el porcentaje más efectivo para estabilizar este suelo en condiciones de saturación, ya que garantiza una resistencia óptima al agua y mejora significativamente las propiedades mecánicas.

SUELO TIMBÍO

Mezclando 1% de cal en el suelo, la resistencia a la compresión confinada por capilaridad fue de 491.3kPa al pasar 7 días de curado, incrementando 464% su valor en comparación con el suelo natural; incluso, la resistencia sigue aumentando hasta un 8.7% tras 28 días de curado ($q_u=533.8$ KPa), generando un progreso en la resistencia del suelo debido a reacciones puzolánicas que desarrollan la cohesión.

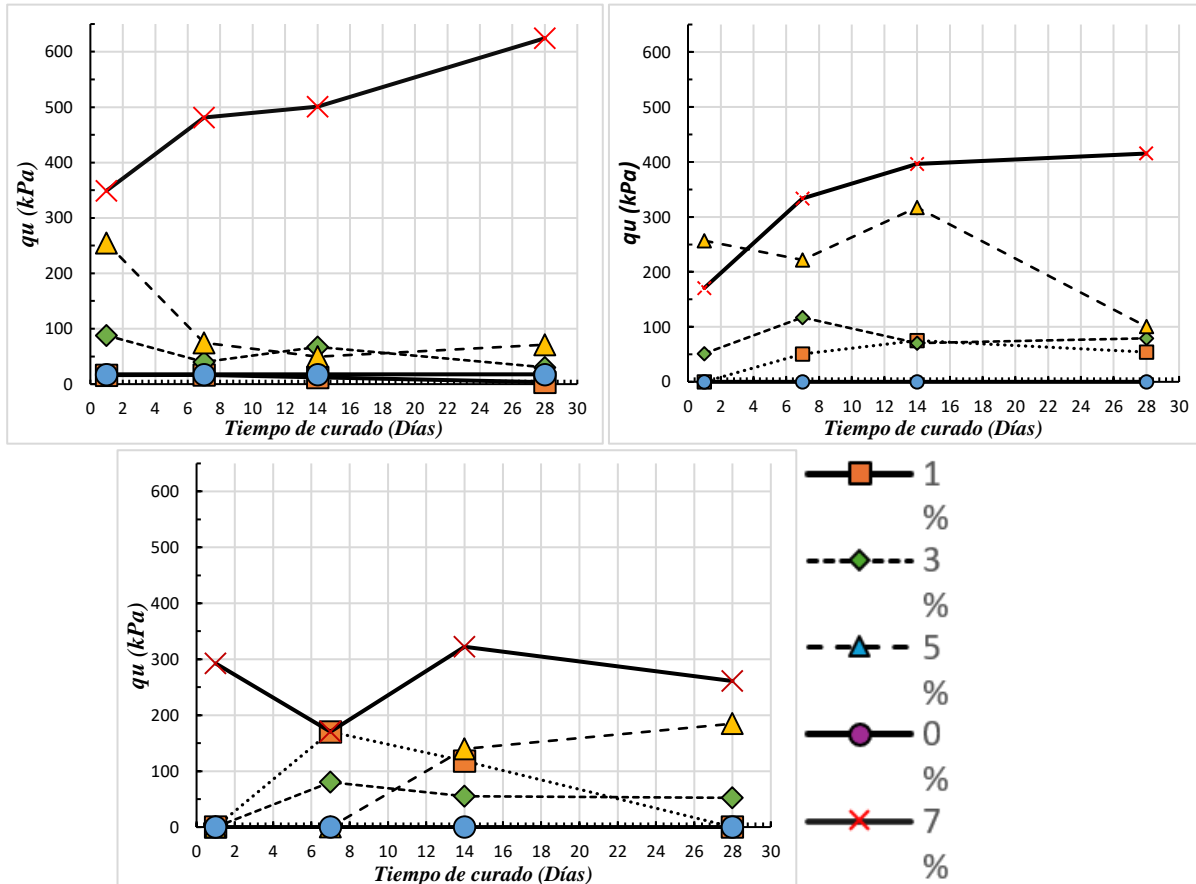
La resistencia a la compresión confinada añadiendo 3% de cal, la disminución fue de 28.7% ($q_u=62.1$) después de 24 horas de curado, la resistencia se incrementa 48.5% tras 28 días llegando a 92.2kPa. Señalando que hubo una mejora leve en comparación con el suelo natural a los 28 días, en cierto modo a no llegar a ser tan significativa como en el caso del 1% o el 5%, por lo que apunta a que el 3% de cal podría ser no suficiente para generar una reacción completa que estabilice el suelo de manera óptima.

Al adicionar 5% de cal, la resistencia a la compresión se incrementa progresivamente a medida que pasa el tiempo de curado; tras pasar 28 días se intensifica 154% a comparación de la resistencia obtenida en el suelo natural ($q_u=220.8$ kPa). Aquí se aprecia un incremento considerable en la resistencia con el tiempo, siendo mucho mayor que el suelo natural y que los porcentajes de 1% y 3%. Por lo que este porcentaje coincide con el óptimo teórico para estabilizar el suelo de FIC, logrando una buena combinación entre reacción química y cohesión.

La resistencia agregando 7% se amplifica 1157% en las primeras 24 horas de curado (1094.6 KPa) a comparación de lo obtenido en el suelo natural, aunque la resistencia a los 28 días es alta, ésta disminuye significativamente en un 65% comparado con el valor inicial ($q_u=386.6$ KPa). Este comportamiento podría deberse a una sobresaturación de cal, que inicialmente genera efectos de reacción rápidos, pero a largo plazo el exceso de cal sin reaccionar debilita la estructura cohesiva del suelo.

5.4 Análisis de resultados de la compresión inconfiada en estado saturado por inmersión en los diferentes días de curado y por cada porcentaje de cal analizado

Gráfica 22. Resistencia a la compresión inconfiada del Suelo Coconuco, F.I.C y Timbío, en estado saturado por inmersión durante 24 horas posterior a la etapa de curado, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

SUELO COCONUCO

Se observa que la resistencia a la compresión inconfiada del suelo natural es de 0.0 KPa, lo que indica, que éste no tiene capacidad portante bajo condiciones de inmersión; puesto que, al estar compuesto por material derivado de ceniza volcánica, su estructura es altamente inestable en presencia de agua y pierde toda su resistencia. De modo que, el suelo natura en estas condiciones sería inadecuado para su uso en proyectos de ingeniería sin estabilización.

La resistencia a la compresión inconfiada inicial bajo condiciones de saturación por inmersión adicionando 1% y 3% de cal, no tuvo ninguna mejora ($q_u = 0$ KPa), en razón de lo cual, estos porcentajes

de cal no fueron suficientes para generar reacciones químicas significativas (como floculación o cementación) que estabilicen el suelo y mejoren su resistencia. Seguramente, debido a que las cantidades de cal no alcanzan el límite mínimo de estabilización requerido para iniciar las reacciones puzolánicas.

A las 24 horas de curado, la resistencia al mezclar 5% de cal es de 226.6 kPa, sin embargo, después de 7 días, la resistencia disminuye a 0 kPa y se mantiene en este valor hasta los 24 días. Este comportamiento sugiere que la adición de este porcentaje de cal ha producido una reacción química inicial que ha aumentado la resistencia del suelo, pero que esta reacción no ha sido lo suficientemente estable como para mantener la resistencia en el tiempo debido a la saturación por inmersión y a la producción de compuestos que han debilitado la estructura del suelo.

Agregar 7% de cal al suelo muestra excelentes resultados, obteniendo así que la resistencia a las 24 horas fue de 502.7 KPa, con un aumento del 4% llegando a 524.2 KPa a los 7 días, 564.2 KPa tras 14 días logrando un aumento del 7.6% y finalmente se alcanza una resistencia de 588.4 KPa después de 28 días de curado (incremento del 4%). Por lo que, la resistencia no solo es alta desde el principio, sino que también mejora progresivamente con el tiempo debido a la reacción de los compuestos cementantes (silicatos y aluminatos de calcio hidratados). Por ende, el mejoramiento constante con el tiempo confirma que el 7% de cal proporciona suficiente material reactivo para generar una estabilización duradera del suelo.

SUELO F.I.C

La resistencia a compresión bajo saturación por capilaridad del suelo natural fue de 0.0 KPa, evidenciando que el suelo natural no tiene capacidad portante bajo condiciones de saturación por inmersión, demostrando una inestabilidad extrema, la razón es que, al tratarse de un suelo derivado de ceniza volcánica, su estructura colapsa completamente en presencia de agua debido a su alta plasticidad o bajo contenido de material cementante natural.

La resistencia a la compresión fue de 50.5 KPa tras 7 días y disminuye 6.7% llegando así a 53.9 KPa después de 28 días de curado, estos valores indican que el 1% de cal no es suficiente para estabilizar de manera efectiva el suelo en condiciones de inmersión. Aunque mejora ligeramente con respecto al suelo natural, la cantidad de cal no alcanza a generar una cantidad significativa de compuestos puzolánicos.

Los valores de la resistencia muestran un comportamiento más consistente, aumentando de 51.5 KPa tras 24 horas a 117.2 KPa después de 7 días (se incrementó un 128%), no obstante, la resistencia se disminuye un 33% llegando a 78.9 KPa a los 28 días. Esto indica que el 3% de cal tiene un efecto limitado en la estabilización del suelo. Aunque se observan reacciones iniciales (floculación y compactación), la resistencia a largo plazo no se sostiene adecuadamente.

Con 5% de cal en el suelo, la resistencia mejora de manera considerable, obteniendo así 256.4 KPa después de 1 día de curado, aumenta (24%) a 317.2 KPa a los 14 días y luego disminuye (68%) a 100.5 KPa tras 28 días de curado. Este comportamiento se puede atribuir a una mejora inicial debido a la floculación y la formación temprana de compuestos puzolánicos, pero la resistencia final podría estar limitada por una insuficiencia de cal para estabilizar todo el material.

Adicionando 7% de cal en el suelo genera óptimos resultados, con una resistencia alta y consistente, adquiriendo 170.6 KPa en el primer día, el cual, se incrementa (95%) a 333.4 KPa tras 7 días, luego la resistencia pasa a 396.7 KPa a los 14 días (obteniendo un aumento del 19%) y finalmente alcanza 415.3 KPa después de 28 días de curado (incrementó 5% más). Aquí se observa que la reacción química entre la cal y los compuestos del suelo se desarrollaron plenamente, lo que se refleja en un aumento progresivo de la resistencia a largo plazo.

SUELO TIMBÍO

Los resultados muestran que la resistencia a la compresión inconfiada bajo condición de saturación por inmersión son nulas lo que evidencia que el suelo natural es altamente inestable y colapsa completamente al estar en condiciones saturadas por inmersión, seguramente debido a, su alta

porosidad, baja cohesión intrínseca o sensibilidad extrema al agua, lo que ocasiona una rápida pérdida de integridad estructural.

La resistencia en el primer día de curado es nula, tras 7 días se observa un incremento de 170.3 KPa, posteriormente se reduce (31%) a 117.8 KPa y finalmente la resistencia cae a 0 KPa. La poca eficacia de esta proporción se debe a que 1% de cal no es suficiente para estabilizar completamente el suelo, y las reacciones químicas no generan una cantidad adecuada de compuestos cementantes para resistir las condiciones de inmersión.

En los primeros 7 días de curado, la resistencia agregando 3% de cal es de 80.1 kPa, sin embargo, en los 14 y 28 días de curado se reduce un 31% y 5%, respectivamente. Este comportamiento se atribuye a que, aunque se forman compuestos cementantes (como silicatos y aluminatos de calcio), la cantidad de cal sigue siendo insuficiente para estabilizar completamente el suelo bajo condiciones de inmersión.

La resistencia en las primeras horas y a los 7 días de curado son nulas, sin embargo, después de 14 días la resistencia llega a 139.9 kPa y finalmente se aumenta en 32% obteniendo así 184.8 KPa. El mejoramiento se interpreta a que adicionando un 5% de cal activa suficientemente las reacciones puzolánicas, lo que genera una matriz más rígida y resistente, estabilizando las partículas del suelo y reduciendo la sensibilidad al agua.

Con 7% de cal agregado al suelo, éste presenta un mejor desempeño, obteniendo 292.2 KPa tras pasar 24 horas, seguido por un comportamiento variable en los días 7 y 14 hasta llegar a 261.2 KPa después de 28 días de curado, por ende, la resistencia se redujo en un 11% comparada con la inicial. La resistencia inicial es alta debido a la rápida reacción inicial entre la cal y el agua, sin embargo, tras 7 días disminuye levemente porque las partículas requieren más tiempo de hidratación para continuar desarrollando compuestos cementantes. En general, adicionando 7% de cal se genera una estructura muy resistente y estable, incluso en condiciones de inmersión.

6 Capítulo 6: Análisis estadístico

El análisis estadístico se basó en el libro de Posada en el año 2016 y se realizó con el propósito de comparar los resultados obtenidos relacionados con las resistencias a la compresión inconfiada en estado seco y natural dentro del programa experimental relacionados a la resistencia a la compresión simple.

• **Media aritmética (\bar{x}):** La media aritmética es la medida de tendencia central más utilizada y la de mayor representatividad en los análisis estadísticos. Representa el promedio del conjunto de datos de la muestra. Su cálculo se realiza con la suma de todos los valores de los datos, dividida entre el número de datos que componen la muestra. Si la variable de estudio está representada por X, la media aritmética se representa por \bar{x} .

Cuando los datos son pocos y no se han agrupado en clases o intervalos, la media aritmética sería:

Ecuación 4. Media aritmética (\bar{x})

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Donde

\bar{x} : media aritmética de la muestra

n: total de datos de la muestra

x_i : dato de la variable

$\sum_{i=1}^n X_i$: suma de todos los valores de la muestra

• **Desviación estándar de la muestra (S):** La desviación estándar es considerada la medida de dispersión con mayor representatividad para un conjunto de datos. Indica la distribución de los datos alrededor de la media aritmética o promedio.

Ecuación 5. Desviación estándar de la muestra (S)

$$S = \sqrt{s^2}$$

• **Coefficiente de variación (CV):** El coeficiente de variación (CV) es una medida que relaciona la desviación estándar con la media aritmética para determinar qué tan homogénea o dispersa es la información. Expresa el porcentaje que representa la desviación con relación a la media aritmética y se calcula por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Coeficiente de variación (CV)

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100$$

Tabla 35. Interpretación del Coeficiente de variación

Coeficiente de Variación	Confiabilidad o representatividad
Menor a 10%	Mediciones consistentes
Entre 10% y 25%	Dispersión moderada, variabilidad aceptable
Mayor a 25%	Datos dispersos, error e inconsistencia en las mediciones

Fuente: Adaptación de ISO 5725, (1994)

Tabla 36. Coeficiente de Variación

Coeficiente de Variación	Confiabilidad de medición
Menor o igual al 7%	Las estimaciones se consideran precisas.
Entre el 8% y el 14%	Las estimaciones tienen precisión aceptable.
Entre el 15% y 20%	La precisión es regular.
Mayor del 20%	La estimación es poco precisa.

Fuente: Adaptación de Posada (2016)

El análisis estadístico de los datos se realizará utilizando la Tabla 35, ya que ofrece una interpretación adecuada para la variabilidad de los suelos. Por otro lado, la Tabla 36 no se empleará, ya que está diseñada para representaciones numéricas más amplias, lo que la hace menos adecuada para este contexto específico.

Tabla 37. estadístico de la resistencia en estado seco y húmedo del suelo Coconuco

SUELO COCONUCO									
COMPRESIÓN INCONFINADA									
DIA		1%		3%		5%		7%	
		qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu
1	PROM	0.44	0.22	0.25	0.10	0.35	0.29	3.05	1.52
	Desviación estándar	0.31		0.03		0.18		0.09	
	Límite superior	0.75		0.28		0.53		3.14	
	Límite inferior	0.13		0.22		0.17		2.96	
	Coefficiente de variac	70.7%		13.3%		51.7%		3.1%	
7	PROM	0.86	0.43	0.67	0.34	0.82	0.41	3.97	1.98
	Desviación estándar	0.05		0.24		0.07		1.38	
	Límite superior	0.91		0.91		0.89		5.35	
	Límite inferior	0.82		0.43		0.76		2.59	
	Coefficiente de variac	5.3%		36.0%		8.1%		34.7%	
14	PROM	0.99	0.50	0.55	0.27	0.75	0.38	6.26	3.13
	Desviación estándar	0.14		0.18		0.06		0.78	
	Límite superior	1.14		0.73		0.81		7.04	
	Límite inferior	0.85		0.37		0.69		5.49	
	Coefficiente de variac	14.4%		32.9%		8.3%		12.4%	
28	PROM	1.00	0.50	1.14	0.57	1.21	0.60	7.09	3.54
	Desviación estándar	0.20		0.19		0.22		0.76	
	Límite superior	1.20		1.33		1.42		7.85	
	Límite inferior	0.80		0.96		0.99		6.33	
	Coefficiente de variac	20.2%		16.2%		17.9%		10.7%	
COMPRESIÓN INCONFINADA SATURADAS POR CAPILARIDAD									
DIA		1%		3%		5%		7%	
		qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu
1	PROM	0.16	0.08	0.90	0.45	2.60	1.30	3.56	1.78
	Desviación estándar	0.03		0.13		0.09		0.24	
	Límite superior	0.20		1.02		2.69		3.80	
	Límite inferior	0.13		0.77		2.51		3.32	
	Coefficiente de variac	19.4%		14.4%		3.6%		6.7%	
7	PROM	0.17	0.08	0.41	0.20	0.76	0.38	4.91	2.71
	Desviación estándar	0.08		0.16		0.10		0.44	
	Límite superior	0.25		0.56		0.85		5.35	
	Límite inferior	0.09		0.25		0.66		4.47	
	Coefficiente de variac	45.6%		38.4%		12.6%		8.9%	
14	PROM	0.13	0.06	0.68	0.26	0.51	0.25	5.11	2.55
	Desviación estándar	0.02		0.15		0.19		1.05	
	Límite superior	0.15		0.84		0.70		6.16	
	Límite inferior	0.10		0.53		0.31		4.06	

	Coefficiente de variac	19.3%	22.5%	37.9%	20.6%				
28	PROM	0.04	0.02	0.31	0.15	0.73	0.36	6.37	3.18
	Desviación estándar	0.01		0.29		0.22		0.71	
	Límite superior	0.05		0.60		0.95		7.07	
	Límite inferior	0.03		0.02		0.50		5.66	
	Coefficiente de variac	29.1%		94.8%		30.9%		11.1%	

COMPRESIÓN INCONFINADA SATURADAS POR INMERSIÓN									
DIA		1%		3%		5%		7%	
		qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu	qu	Cu
1	PROM	0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	1.16	5.13	2.56
	Desviación estándar	0.00		0.00		0.36		1.32	
	Límite superior	0.00		0.00		2.67		6.45	
	Límite inferior	0.00		0.00		1.95		3.81	
	Coefficiente de variac					15.5%		25.7%	
7	PROM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.35	2.67
	Desviación estándar	0.00		0.00		0.00		0.31	
	Límite superior	0.00		0.00		0.00		5.65	
	Límite inferior	0.00		0.00		0.00		5.04	
	Coefficiente de variac							5.7%	
14	PROM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.75	2.88
	Desviación estándar	0.00		0.00		0.00		1.32	
	Límite superior	0.00		0.00		0.00		7.07	
	Límite inferior	0.00		0.00		0.00		4.44	
	Coefficiente de variac							22.9%	
28	PROM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00	3.00
	Desviación estándar	0.00		0.00		0.00		0.67	
	Límite superior	0.00		0.00		0.00		6.67	
	Límite inferior	0.00		0.00		0.00		5.33	
	Coefficiente de variac							11.2%	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Análisis de la resistencia en estado seco y húmedo obtenido del análisis estadístico del suelo Coconuco

Suelo	Porcentaje (%)	Estado	Curado (Días)	Representatividad
Coconuco	1%	Seco	1d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			14d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
			28d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable

Suelo	Porcentaje (%)	Estado	Curado (Días)	Representatividad	
		Capilaridad	1d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			14d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			28d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
		Inmersión	1d	-	
			7d	-	
			14d	-	
			28d	-	
	3%	Seco	1d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			7d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
			14d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
			28d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
		Capilaridad	1d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			7d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
			14d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			28d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
		Inmersión	1d	-	
			7d	-	
			14d	-	
			28d	-	
		5%	Seco	1d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones
				7d	CV < 10%. Mediciones consistentes
				14d	CV < 10%. Mediciones consistentes
				28d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
	Capilaridad		1d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			7d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			14d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
			28d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
Inmersión	1d		-		
	7d		-		
	14d		-		
	28d		-		

Suelo	Porcentaje (%)	Estado	Curado (Días)	Representatividad
	7%	Seco	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			7d	CV > 25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones
			14d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
			28d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
		Capilaridad	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			7d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
			14d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
			28d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
		Inmersión	1d	CV > 25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones
			7d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
			14d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
			28d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Análisis de la resistencia en estado seco y húmedo obtenido del análisis estadístico del suelo F.I.C

Suelo	Porcentaje (%)	Estado	Curado (Días)	Representatividad
FIC	1%	Seco	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes
		Capilaridad	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes
		Inmersión	1d	-
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes
	3%	Seco	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes
			14d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes

Suelo	Porcentaje (%)	Estado	Curado (Días)	Representatividad	
		Capilaridad	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			28d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
		Inmersión	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			28d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
	5%	Seco	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
		Capilaridad	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
		Inmersión	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
		7%	Seco	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes
				7d	CV < 10%. Mediciones consistentes
				14d	CV < 10%. Mediciones consistentes
				28d	CV < 10%. Mediciones consistentes
	Capilaridad		1d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
Inmersión	1d		CV < 10%. Mediciones consistentes		
	7d		CV < 10%. Mediciones consistentes		
	14d		CV < 10%. Mediciones consistentes		
	28d		CV < 10%. Mediciones consistentes		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Análisis 9 de la resistencia en estado seco y húmedo obtenido del análisis estadístico del suelo Timbío

Suelo	Porcentaje (%)	Estado	Curado (Días)	Representatividad
TIMBÍO	1%	Seco	1d	CV > 25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones
			7d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
			14d	10% < CV < 25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable

Suelo	Porcentaje (%)	Estado	Curado (Días)	Representatividad	
	3%	Capilaridad	28d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			1d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			7d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
			14d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
		Inmersión	1d	-	
			7d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			14d	-	
			28d	-	
		Seco	1d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			7d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
			14d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			28d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			Capilaridad	1d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones
				7d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones
				14d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
	28d			10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
	Inmersión	1d	-		
		7d	-		
		14d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones		
		28d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones		
	5%	Seco	1d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			7d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
			28d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
		Capilaridad	1d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			7d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			14d	CV < 10%. Mediciones consistentes	
28d			CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones		
Inmersión		1d	-		
		7d	-		

Suelo	Porcentaje (%)	Estado	Curado (Días)	Representatividad	
	7%		14d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			28d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			Seco	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes
				7d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable
		14d		CV < 10%. Mediciones consistentes	
		28d		CV < 10%. Mediciones consistentes	
		Capilaridad	1d	10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable	
			7d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones	
	14d		10%<CV<25%. Dispersión moderada, variabilidad aceptable		
	28d		CV < 10%. Mediciones consistentes		
	Inmersión	1d	CV < 10%. Mediciones consistentes		
		7d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones		
		14d	CV < 10%. Mediciones consistentes		
		28d	CV>25%. Datos dispersos, errores e inconsistencia en las mediciones		

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 38, la confiabilidad de las mediciones obtenidas para el suelo Coconuco fueron moderadas, ya que la mayoría de los datos se encuentran en rangos aceptables de variabilidad siendo en un porcentaje del 52.08%. Sin embargo, el porcentaje de datos dispersos o inconsistentes fue de 22.92% y finalmente, se obtuvo un 25% de datos que no fue posible su medición, lo que reduce su representatividad global.

La confiabilidad de las mediciones en el suelo extraído de la Facultad de ingeniería civil fue muy alta, con un 91.67% de mediciones consistentes y solo un pequeño porcentaje de datos con variabilidad aceptable siendo este del 6.3%, por lo que, la representatividad de este conjunto de datos fue excelente. (Ver Tabla 39)

Por último, de la Tabla 40 se logró una confiabilidad de las mediciones en el suelo de Timbío fue moderada, similar a Coconuco. Aunque el 37.5% de los datos tienen una variabilidad aceptable, el

25% de los datos fueron dispersos y el 14.58% de los datos no fue posible su medición, lo que afecta su representatividad.

7 Capítulo 7: Conclusiones, Discusión y Lineamientos de estabilización con Cal

7.1 Conclusiones y Discusión

En general, la adición de pequeñas cantidades de cal (1%-3%) genera una reacción química inicial que puede reducir la sensibilidad al agua, especialmente en los suelos Coconuco y Timbío, reflejando una disminución del LL en los primeros días de curado. Sin embargo, en porcentajes mayores de cal (5%-7%) tienden a incrementar el LL, probablemente debido a la formación de compuestos intermedios o a un exceso de cal no completamente reaccionada. Esto sugiere que porcentajes intermedios de cal (3%-5%) son más efectivos para estabilizar el LL.

En el suelo Coconuco, la reducción inicial del LP con pequeñas cantidades de cal indica una mejora en la trabajabilidad del suelo, pero porcentajes mayores tienden a estabilizar el LP o a generar aumentos iniciales por el exceso de cal. El suelo F.I.C muestra un comportamiento constante con reducciones moderadas del LP, mientras que en el suelo Timbío se observa una disminución significativa a porcentajes bajos y medios de cal, evidenciando su mayor susceptibilidad a la estabilización química.

En todos los suelos analizados, se observa que la cal contribuye a reducir el IP con el tiempo de curado, aunque en algunos casos (por ejemplo, con 7% de cal) se evidencian aumentos temporales debido a la sobresaturación del suelo con estabilizador. Los porcentajes de cal entre 3% y 5% resultaron los más efectivos para reducir significativamente la plasticidad del suelo de manera consistente en todos los suelos estudiados, indicando que esta proporción optimiza la estabilización química.

El suelo Coconuco muestra una respuesta más inmediata y uniforme a la estabilización con cal, alcanzando valores estables en los límites de consistencia tras 14-28 días. El suelo F.I.C presenta un efecto estabilizador más gradual, mientras que el suelo Timbío exhibe un comportamiento variable, con reacciones químicas complejas que producen fluctuaciones iniciales antes de estabilizarse.

El uso de cal como estabilizador químico mejora sustancialmente las propiedades mecánicas de los suelos procedentes de ceniza volcánica. Aunque porcentajes altos de cal generan incrementos iniciales significativos en la resistencia, los resultados indican que un porcentaje de cal del 5% es el más eficiente para estabilizar estos suelos, logrando un equilibrio entre el desarrollo de la resistencia a la compresión inconfiada, estabilidad a largo plazo y viabilidad económica. Este porcentaje debería considerarse como el lineamiento base para proyectos que involucren estabilización química de suelos con características similares.

El comportamiento de los suelos estabilizados con cal bajo saturación por capilaridad muestra que la cantidad de cal utilizada y el tiempo de curado son factores críticos para lograr una estabilización efectiva, por lo que en términos generales: El porcentaje óptimo de cal es 5%, ya que proporciona una mejora significativa en resistencia, garantizando una estabilidad a largo plazo y un equilibrio en la viabilidad económica.

Para el suelo de Coconuco, el grado de expansión según LL, es predominantemente alto en la mayoría de los casos. Sin embargo, al aumentar el porcentaje de estabilizante (7% de cal), se observa una tendencia hacia un grado de expansión muy alto (principalmente tras 24 horas y 7 días de curado). (Ver norma INV E – 132 – 13)

Para el suelo FIC, el grado de expansión según el límite líquido es predominantemente muy alto en la mayoría de los casos. Sin embargo, se observan mejoras notables en el grado de expansión para porcentajes de cal entre 3% y 5% después de 7 y 28 días, reduciendo el grado de expansión a alto (50–70). (Ver norma INV E – 132 – 13)

El grado de expansión del suelo Timbío se clasifica como muy alto en la mayoría de los casos. Sin embargo, tras 7 días de curado, el estabilizante al 3% y 5% reduce la expansión a un nivel alto. Además, después de 28 días, el estabilizante al 7% también presenta una mejora, clasificándose en grado de expansión alto teniendo en cuenta el límite líquido. (Ver norma INV E – 132 – 13)

El índice de plasticidad muestra que, para el suelo Coconuco, al aumentar el porcentaje de cal, el grado de expansión tiende a disminuir hacia niveles bajos (especialmente después de 28 días). Esto indica que el estabilizante tiene un impacto positivo en la reducción de la plasticidad del suelo, mejorando potencialmente su comportamiento expansivo. (Ver norma INV E – 132 – 13)

El suelo F.I.C presenta muy alta expansividad ($IP > 25$) en los primeros días al aumentar el contenido del estabilizante. A largo plazo (tras 28 días de curado), el IP se reduce de manera significativa, especialmente para contenidos de cal del 3% al 7%, alcanzando valores de expansión altos (IP 15–25) en varios casos. (Ver norma INV E – 132 – 13)

El índice de plasticidad del suelo Timbío, muestra una variación significativa. En general, los valores de IP tienden a reducirse a un nivel bajo para contenidos de 7% de cal a lo largo del tiempo. A medida que se estabiliza el suelo, los valores de IP indican que el comportamiento expansivo mejora hacia niveles bajos y medios. (Ver norma INV E – 132 – 13)

7.2 Lineamientos para la Estabilización Química de Suelos Derivados de Ceniza Volcánica en el Cauca con Cal

Estos lineamientos buscan orientar la estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica presentes en el departamento del Cauca, utilizando cal como estabilizante químico. La implementación de estas directrices tiene como objetivo mejorar las condiciones de la red vial terciaria, garantizando mayor estabilidad, durabilidad y capacidad de soporte en las vías rurales de la región, dentro de los cuales se incluyen:

7.2.1 Evaluar las propiedades del suelo a estabilizar:

La evaluación inicial del suelo es fundamental para diseñar una estrategia de estabilización efectiva. Este proceso debe incluir un análisis detallado de sus propiedades físicas, mecánicas y

químicas. Esto permitirá seleccionar los métodos y dosificaciones más apropiados para garantizar el desempeño esperado del suelo tratado.

7.2.1.1 Propiedades físicas del suelo:

Se recomienda realizar una caracterización integral a través de los siguientes ensayos:

- Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos: Norma de ensayo (**INV E 123-13**)
- Análisis granulométrico por medio del hidrómetro: Ensayo según norma **INV E 124-13**.
- Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral: Ensayo según norma **INV E 128-13**.
- Determinación del límite líquido de los suelos: Ensayo según norma **INV E 125-13**.
- Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos: Ensayo según norma **INV E 126-13**.
- Determinación del pH del suelo: Ensayo según norma **INV E 131-13**.
- Contenido de sulfatos solubles: Ensayo según norma **NLT -120/72**.
- Determinación del contenido orgánico de un suelo: Ensayo según norma **INV E 121-13**.
- Determinación del potencial de cambio volumétrico: Determinación según normas **INV E 120-13 – INV E 132-13**.

7.2.1.2 Propiedades mecánicas del suelo:

- Relaciones de humedad – peso unitario seco: Ensayo según norma **INV E 141-13**.

7.2.1.3 Resistencia inicial del suelo:

- Compresión inconfínada en muestras de suelos secas y saturadas por capilaridad e inmersión según norma **INV E 152-13**.

7.2.1.4 Propiedades químicas:

Aunque no se encuentran normadas bajo la normativa Invias, se recomienda complementar el análisis físico y mecánico la implementación de técnicas avanzadas como:

- Difracción de rayos X (DRX): Para identificar los minerales presentes en el suelo.
- Fluorescencia de rayos X (XRF): Para analizar la composición química elemental del suelo.

7.3 Selección del estabilizante:

Después de evaluar las propiedades del suelo, es fundamental seleccionar el estabilizante más adecuado, considerando factores químicos, mecánicos y ambientales para garantizar el éxito del proceso de estabilización. Los aspectos clave a tener en cuenta son los siguientes:

7.3.1 Compatibilidad química:

La compatibilidad química entre el suelo y el estabilizante es un criterio determinante en la selección. Es importante evitar el uso de estabilizantes a base de hidróxido de calcio en suelos con altos contenidos de sulfatos.

- **Precaución con suelos ricos en sulfatos:** En suelos con altos contenidos de sulfatos, el uso de estabilizantes a base de hidróxido de calcio (cal) puede inducir la formación de minerales expansivos como la ettringita y la taumasita. Estos compuestos tienen la capacidad de absorber agua y expandirse, lo que resulta en un aumento de volumen no controlado, fisuras y pérdida de capacidad portante del suelo.

7.3.2 Identificación de la necesidad de estabilización:

Es necesario definir el objetivo principal de la estabilización:

- Estabilidad volumétrica: Controlar problemas de hinchamiento o contracción.
- Incremento de resistencia: Mejorar la capacidad portante y el comportamiento mecánico del suelo.

7.3.3 *Recomendaciones basadas en la investigación y otros estudios realizados*

Uso de cal: La cal es un estabilizante convencional ampliamente utilizado debido a su capacidad para reaccionar con los minerales del suelo, generando productos cementantes que mejoran sus propiedades físicas y mecánicas. Sin embargo, su uso debe considerarse cuidadosamente, especialmente en suelos con características particulares como los derivados de ceniza volcánica.

Proporción recomendada: La cal debe adicionarse en porcentajes entre el 3.5% y el 5.0% efectivo, respecto al peso seco del suelo, del tipo de suelo tratado y dependiendo de su pureza, esta última recomendación es de suma importancia, ya que, así se obtendrán el porcentaje de cal a reaccionar (porcentaje efectivo)

Resultados observados:

- *Reducción de plasticidad:* La cal puede disminuir la plasticidad del suelo en rangos que oscilan entre el 5% y el 60%, mejorando su trabajabilidad y controlando su sensibilidad a cambios de humedad.
- *Incremento de resistencia:* La resistencia a la compresión del suelo tratado puede incrementarse entre 1.8 y 12.5 veces, tanto en condiciones secas como saturadas, dependiendo de la reactividad del suelo y la proporción de cal utilizada.

Limitaciones:

En suelos con altos contenidos de sulfatos, es crucial realizar una estabilización química, debido a que el uso de cal puede generar compuestos expansivos como la ettringita y la taumasita, que provocan un aumento volumétrico significativo, inestabilidad y fallas en la estructura de pavimento soportada sobre el suelo tratado. Para evitar estos problemas, se recomienda optar por estabilizantes alternativos o mezclar la cal con otros aditivos que mitiguen estas reacciones.

7.3.4 *Diseño de mezcla de cal y plan de laboratorio*

7.3.4.1 *Determinación del contenido óptimo del agente estabilizador “cal”:*

El contenido óptimo debe definirse con base en los porcentajes recomendados en investigaciones previas que han demostrado ser efectivos. Estas proporciones serán utilizadas en las mezclas y ensayos de laboratorio para garantizar un desempeño adecuado del suelo estabilizado.

Adicionalmente, se recomienda evaluar no solo el porcentaje seleccionado, sino también valores ligeramente superiores e inferiores ($\pm 2\%$) para analizar el comportamiento del suelo en distintas proporciones, por lo que se aconseja evaluar mínimo 4 porcentaje. Este enfoque permite identificar de manera precisa el rango óptimo de aplicación, mejorando el proceso de estabilización.

7.3.4.2 *Plan de laboratorio:*

En Colombia, los procesos de estabilización de suelos deben cumplir con las normativas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (Invías), entre la cuales se destaca: Artículo 236 – 22 Estabilización de suelos de subrasante y terraplén con cal (INVÍAS et al., 2022).

Aplicable a suelos de subrasante o materiales existentes en vías de bajo volumen de tránsito.

De acuerdo con estas disposiciones, el plan de laboratorio debe incluir, como mínimo, los siguientes ensayos:

Ensayos	Norma Invias
Especificaciones Generales De Construcción De Carreteras 2022	
Determinación del Límite Líquido de los suelos	INV E -125-13
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	INV E -126-13
Sistema Unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería	INV E 181-13
Estabilidad al agua (capilaridad e inmersión)	N. A
Determinación del potencial de cambio volumétrico	INV E 120-13 INV E 132-13.
Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo normal de compactación)	INV E 141-13

Relaciones de humedad – densidad mezclas de suelo cemento	INV E 611-13
Relaciones de humedad – peso unitario seco de mezclas de suelo con estabilizantes químicos no tradicionales	INV E – 631-22
Resistencia a la compresión inconfiada de mezclas de suelo compactadas de suelo - cal	INV E 605-13

7.3.4.3 Evaluación de los tiempos de curado:

Es necesario elaborar probetas de las mezclas de suelo-cal y someterlas a períodos de curado de 7, 14 y 28 días como mínimo, teniendo en cuenta periodos superiores, que alcancen incluso la evaluación en meses, se aconseja hasta 60 días de curado. Este análisis permite evaluar la estabilidad y eficacia del suelo estabilizado en diferentes etapas y a largo plazo.

7.3.4.4 Ensayos químicos:

Posterior al proceso de estabilización, los ensayos químicos permiten verificar la efectividad de las reacciones puzolánicas y los cambios en la composición del suelo.

- Difracción de rayos X (DRX): Identifica la formación de nuevos minerales, como silicatos y aluminatos de calcio hidratados, responsables de mejorar la resistencia y estabilidad del suelo.
- Fluorescencia de rayos X (XRF): Analiza los elementos químicos presentes en el suelo tratado, asegurando la integración efectiva del estabilizante.

7.3.4.5 Estabilidad volumétrica:

La evaluación de la expansión es esencial para determinar la efectividad del tratamiento químico aplicado. No obstante, como ya se ha mencionado, la cal puede generar reacciones químicas desfavorables que generan minerales expansivos, los cuales pueden contrarrestar los beneficios esperados.

Determinar el grado de expansión permite verificar si la mezcla estabilizada logra controlar o reducir los cambios volumétricos, asegurando la durabilidad y estabilidad de las estructuras soportadas sobre el suelo tratado. Por lo que se recomienda realizar el ensayo de Determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de Lambe, ensayo realizado conforme a la norma. **INV E 120-13.**

7.3.5 Criterios de evaluación para la ejecución en campo:

Para garantizar la calidad de los procesos en campo, se deben seguir las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (2022) del Instituto Nacional de Vías, que establecen el siguiente criterio: Artículo 236-22 Estabilización de suelos de subrasante y terraplén con cal.

8 Capítulo 8: Bibliografía

AASHTO T 220-66. (2013). *Determination of the Strength os Soil-Lime Mixtures*.

Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2011). Microbial Concrete: Way to Enhance the Durability of Building Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 730-734.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000159](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000159)

Alcaraz, F. (2006a). *Equipo de Compactación*. FUNDACIÓN PARA LA ENSEÑANZA DE LA CONSTRUCCIÓN, A.C.

Alcaraz, F. (2006b). *Equipo de Compactación*. FUNDACIÓN PARA LA ENSEÑANZA DE LA CONSTRUCCIÓN, A.C.

Alonso, J. (2014). *Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava*. Universidad Politécnica de Madrid.

Arenas, H. (1999). *Teoría de los Pavimentos* . Universidad del Cauca.

Arrieta Fabián Elizondo, Carro Alejandro Navas, & Obando Denia Sibaja. (2010). *EFECTO DE LA CAL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES*.

Asociación Nacional de la Cal. (2004). *Manual de estabilización de suelos con cal*.

Barrera, M., & Martinez, F. (2004). *Influencia de la Succión en los Cambios Volumétricos de un Suelo Compactado*.

B.B. Broms, & P. Boman. (1979). Preloading Techniques for Soil Improvement. *ASCE Journal*, 147-160.

- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223-237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bhardwaj, A., & Sharma, R. (2021). Stabilization of Clayey Soil Using Waste Foundry Sand and Molasses. En *Sustainable Development Through Engineering Innovations* (pp. 641-649). Springer, Singapore.
- Buddhima Indraratna, Jian Chu, & Cholachat Rujikiatkamjorn. (2005). *Ground Improvement: Case Histories*. Elsevier.
- Carvajal, E., & Ruiz, P. (2015). *Métodos de ejecución de columnas de grava y su influencia en el suelo mejorado*. Keller Cimentaciones, S.L.U.
- CIRIA (Construction Industry Research and Information Association). (1983). *Deep Compaction of Soils*. Construction Industry Research and Information Association.
- Consejo Privado de Competitividad. (2022). *Informe Nacional de competitividad 2021-2022*.
- Constitución Política de Colombia (1991).
- Constitución Política de Colombia (1991).
- Cristina, M., & Ardila, H. (2006). *SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS EN COLOMBIA: ESTUDIO FUNDAMENTAL E IMPLICACIONES EN INGENIERÍA*.
- Cruz Henao, J. F. (2022). *Estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica mediante activación alcalina de residuos de quema de bagazo de caña*. Universidad del Cauca.
- Dallas N. Little. (1995). *Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*. Kendall/Hunt Publishing Company.
- Das, B. M. (2011). *Geotechnical Engineering Handbook*. J. Ross Pub.
- David N. Little. (1995). *Handbook for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials*. Transportation Research Board.

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Longman.

DeJong, J. T., Fritzsche, M. B., & Nusslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1381-1392.

DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>

Determinación del Contenido de Sulfatos Solubles en los Suelos. (1972).

Di Prisco, M., Di Milano, P., Chen, S.-H., & Solari, G. (2016). *Ground improvement techniques and geosynthetics* (Vol. 2). <http://www.springer.com/series/15087>

Dirección General de Carreteras., & Laboratorio de Geotecnia del CE- DEX. (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones.

Doner, H. E. (1970). Effects of Ettringite on Soil Structure. *Soil Science Society of America Journal*, 5, 773-776.

Doroteo, C. (2014). *Mejoramiento de Suelo por Sustitución de Materiall*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla .

Eades, J. L. , & Grim, R. E. (1960). A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Board Bulletin*.

Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras (2013).

Espinosa, J. (2004). *DIAGNÓSTICO Y RECOMENDACIONES DE P EN SUELOS DERIVADOS DE CE*.

- Fierro Julio, & Rayo Lorena. (2009). *Evolución Minera PMI de Tunjuelo*.
- Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Folberth, C., Gaiser, T., Abbaspour, K. C., Schulin, R., & Yang, H. (2012). Regionalization of a large-scale crop growth model for sub-Saharan Africa: Model setup, evaluation, and estimation of maize yields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 151, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.026>
- Fondjo, A. A., Theron, E., & Ray, R. P. (2021). Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive Review. *Civil Engineering and Architecture*, 9(5), 1295-1308. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090503>
- G. Bauer, & B. Lutz. (1988). *Deep Vibratory Soil Improvement*. Springer.
- Gómez, C., Tsige, M., & Melentijevic, S. (2019). *Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados, respuesta a cargas estáticas y dinámicas*.
- Hansen, W. C. (1963). Ettringite in Soils. *Soil Science*, 4, 257-261.
- Herrera A., M. C. (2006). *SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS EN COLOMBIA: ESTUDIO FUNDAMENTAL E IMPLICACIONES EN INGENIERÍA* [Geotecnia]. Universidad de los Andes.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (1995). *Mapa de Suelos de Colombia*.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2007). *Análisis Granulométrico por Medio del Hidrómetro*.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013a). *Adición de Cal para Reducir el Índice de Plasticidad de un Suelo*.

- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013b). *Análisis Granulométrico de los Agregados Grueso y Fino.*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013c). *Determinación de la Gravedad Específica de las Partículas Sólidas de los Suelos y del Llenante Mineral, Empleando un Picnómetro con Agua.*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013d). *Determinación de la Resistencia a la Compresión Inconfinada de Mezclas Compactadas de Suelo-Cal .*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013e). *Determinación de la Resistencia a la Compresión No Confinada en Muestras de Suelos.*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013f). *Determinación del Contenido Orgánico de un Suelo mediante el Ensayo de Pérdida por Ignición.*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013g). *Determinación del Límite Líquido de los Suelos.*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013h). *Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos.*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013i). *Determinación del pH de los Suelos.*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013j). *Estimación de la Proporción de Cal Necesaria para Estabilizar un Suelo a partir de la Medida del pH.*
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013k). *Relaciones Humedad – Peso Unitario Seco en los Suelos (Ensayo Normal de Compactación).*
- INVIAS, MINTRANSPORTE, & Gobierno de Colombia. (2018). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito.*
- INVIAS, Universidad Nacional de Colombia, & Universidad del Quindío. (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022: Vol. INVIAS.* Ministerio de transporte.

- ISO 5725. (1994). *Exactitud (veracidad y precisión) de los métodos y resultados de medición — Parte 1: Principios generales y definiciones.*
- IUSS Working Group WRB. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.*
- J. C. Herrera. (2006). Evaluación del uso de cal en la estabilización de suelos volcánicos. *Revista de Ingeniería Civil*, 45-53.
- Jagannath Mallela, Harold Von Quintus, & Kelly L. Smith. (2004). *Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design.*
- James K. Mitchell, & Kenichi Soga. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (Tercera edición). John Wiley & Sons.
- John Daniels, B. L., Rajaram Janardhanam, P., Brian Anderson, J., Shaogang Lei, P., Kyle Baucom, I., Nicholas DeBlasis, E. J., & Benjamin Bowers, E. F. (2010). *Subgrade Stabilization Alternatives to Lime and Cement.*
- Joseph E. Bowles. (1992). *Engineering Properties of Soils and Their Measurement* (4.^a ed.). McGraw-Hill.
- Juanita Agudelo Arbeláez. (2022). *Vías terciarias en Colombia: Un reto para el desarrollo del país. Grupo Bancolombia.*
- K. Rainer Massarsch, & Bengt B. Broms. (1991). Deep Soil Compaction Using Vibratory Probes. *ASTM International*, 297-319.
- K. Rainer Massarsch, & Bengt H. Fellenius. (2005). Deep Vibratory Compaction of Granular Soils. *Elsevier*, 633-658.
- Kakrasul, J., Biswas, N., & Han, J. (2022). Field monitoring of wicking geotextile to reduce soil moisture under pavement. *Geotextiles and Geomembranes*, 50.

- Karl Terzaghi, Ralph B. Peck, & Gholamreza Mesri. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (Tercera edición). John Wiley & Sons.
- Kirkland, D. L. (1990). Ettringite in Soils: A Review. *Soil Science*, 4, 257-265.
- Lide, D. R. (s. f.). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (Vol. 2005). CRC Press.
- Lindsay, W. L. (1979). *Chemical Equilibria in Soils*. Wiley.
- López Agudelo, J. H. (2023). *Las vías terciarias en Colombia*. <https://sai.org.co/las-vias-terciarias-en-colombia-sai/>
- López, F. (1986). *Los Geotextiles*.
- Lukas, R. G. (1995). *Geotechnical Engineering Circular No.1:Dynamic Compaction*.
- Manfred R. Hausmann. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill.
- Meyer, B. R., Eden, P., & Mattel, W. (1998). *GEO TEXTILES AND GEOGRDS IN SUBGRADE STABILIZATION AND BASE COURSE RENFORCEMENT APPLICATIONS*.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR). (2007). *Estudio Nacional de Suelos de Colombia*.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras (MTC) - Peru - Suelos,geologia,geotecnia y pavimentos*.
- Mitchell, J. K., & Santamarina, J. C. (2005). Biological Considerations in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), 1222-1233. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222))
- Moale Q., A. B., & Rivera J., E. J. (2019). *Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica*. UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS.

- Montejo Fonseca, A., Montejo Piratova, A., & Montejo Piratova, A. (2018). *Estabilización de suelos*.
- Muis, A., & Wulan, A. (2019). *Mejoramiento del suelo con una combinación de métodos verticales prefabricados y prefabricados Drenaje en el área alrededor del puente Tabalong, Kalimantan del Sur*.
- Nicholson, P. G. (2015). *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02804-9>
- Noriega Armas, Y. V., Vive Arroyo, J. A., & Muñoz Pérez, S. P. (2022). Uso de estabilizadores de suelo: una revisión del impacto al corte y asentamiento. *Avances Investigación en Ingeniería*. <https://doi.org/https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6856>
- Nortcliff, S., Hulpke, H., Bannick, C. G., Terytze, K., Knoop, G., Bredemeier, M., Schulte-Bisping, H., Auerswald, K., Litz, N., Mayer, R., Stoy, A., Alef, K., Kerndorff, H., Crössmann, G., Eikmann, T., Franzius, V., Grimsky, D., Möhlenbruch, N., Storm, P.-C., & Dworshak, U. (2006). Soil. En *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.b07_613.pub2
- Orobio Quiñones, J. C., & Valenzuela Ramírez, T. S. (2004). *Análisis de la utilización de productos no convencionales en la estabilización de suelos finos con cementantes hidráulicos*. Universidad del Cauca.
- P. Oliveira, & E. Parreira. (2020). Caracterización geotécnica de suelos volcánicos. *Ingeniería Geológica*, 2, 123-145.
- Posada, G. J. (2016). *Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos*. Universidad Católica Luis Amigó.
- P.T. Sherwood. (1993). *Soil Stabilization with Cement and Lime*. HMSO (Her Majesty's Stationery Office).

- Pusadkar, S. S. (2014, octubre 11). Swelling and shrinkage characteristics of biologically treated black cotton soil. *In National Conference on 'Geo-Environmental Issues and Sustainable Urban Development*.
- Pusadkar, S. S., & Chavan, R. (2014, marzo). Effect of effective size of sand on behavior of microorganism reinforced sand. *In International Conference on Recent Trends in Engineering and Technology*.
- Quijada, C. (2008). *MEJORAMIENTO DE SUELOS EN BASE A LOS METODOS DE VIBROFLOTACION Y VIBROSUSTITUCION*. Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Construcción Civil.
- Regasa, H., Jothimani, M., & Oyda, Y. (2023). Estabilización de suelos de subrasante utilizando cal viva: un estudio de caso de la carretera Modjo-Hawassa, Etiopía central. *Revista Internacional de Geoingeniería, 14*.
- Rico, A., & Del Castillo. (1992). *CONSIDERACIONES SOBRE COMPACTACIÓN DE SUELOS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE*.
- Rivera, J., Aguirre Guerrero, A., Mejía de Gutierrez, R., & Oroborio, A. (2022). *Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)*. Informador Técnico. <https://doi.org/https://doi.org/10.23850/22565035.2530>
- Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020a). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente. *Informador Técnico, 84(2)*, 43-67. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>
- Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020b). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico, 84(2)*, 43-67. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>

- Robert D. Holtz, William D. Kovacs, & Thomas C. Sheahan. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering* (Segunda edición). Pearson.
- Rodríguez Moreno, Alberto Mario, Hidalgo Montoya, & Augusto Cesar. (2005). Comportamiento de suelos residuales de Diorita estabilizados con Cal y su evolucion en el tiempo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4, 111-122.
- Russ, J. C. (2012). *Ground Improvement* (K. Kirsch & A. Bell, Eds.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b13678>
- Salomão, P. E. A., Silva, B. A., & Barbosa, F. A. (2019). Estabilização química de solo de textura franco: adição de cal e cimento. *Research, Society and Development*, 8(5), e50851019.
<https://doi.org/10.33448/rsd-v8i5.1019>
- Sandoval Vallejo, E. A. (2004). *Estabilización de arenas mediante polímeros acrílicos para su utilización en capas de pavimento*. Universidad del Cauca.
- Sanjay Kumar Shukla. (2002). *Geosynthetics and Their Applications*. Thomas Telford Publishing.
- Santosh K.G. (1987). *Soil Mechanics*. Khanna.
- Shahrokhi, R., Zomorodian, S. M., Naizi, A., & O'Kelly, B. (2014). *Improving sand with microbial-induced carbonate precipitation*. (pp. 1-14).
- Solminihac Hernán, Echeverría Gerardo, & Thenoux Guillermo. (1989). *Estabilización Química de Suelos - Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*.
- Sulovska, M., & Turček, P. (2018). *MEJORAMIENTO DEL SUELO MEDIANTE COLUMNAS DE GRAVA*.
- Syed-Zuber, S. Z., Kamarudin, H., Mustafa, A., Bingussain, M., & Salwas, M. (2013). Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 258-265.
- Taylor W, H. F. (1990). *Cement chemistry* (2.^a ed.). Academic Press.

- Thomas, M. (2007). Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. *Portland Cement Association*.
- Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A., & Rushing, J. F. (2007). Stabilization mechanisms of nontraditional additives. *Transportation Research Record*, 2(1989), 59-67. <https://doi.org/10.3141/1989-49>
- Torres Valencia, D. F. (2007). *Estabilización de arcillas mediante polímeros acrílicos*.
- Ukken, E. T., & Krishnan, A. (2015). Microbial-induced calcite precipitation for soil improvement. *International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology*.
- Wang, Z. F., Shen, S. L., Ho, C. E., & Kim, Y. H. (2013). Jet Grouting Practice: an Overview. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 44(4).
- Whiffin, V. S., Passen, L. A., & Harkes, M. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, 417-423.
- Yasuhara, H., Neupane, D., & Hayashi, K. (2012). Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymically-induced carbonate precipitation. En *Soil and Foundation* (pp. 539-549).
- Zhang, L., Yang, G., Zhang, D., Wang, Z., & Jin, J. (2019). Field Test and Numerical Simulation of Dynamic Compaction of High Embankment Filled with Soil-Rock. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/6040793>
- Zhao, H., Ge, L., Petry, T. M., & Sun, Y.-Z. (2014). Effects of chemical stabilizers on an expansive clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), 1009-1017. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1014-5>