



ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ARCILLOSOS USANDO PUMITA: CASO DE  
ESTUDIO MUNICIPIO SAN JOSÉ DE CÚCUTA, COLOMBIA

HAMER CASTELLANOS FUENTES

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ARCILLOSOS USANDO PUMITA: CASO DE  
ESTUDIO MUNICIPIO SAN JOSÉ DE CÚCUTA, COLOMBIA

HAMER CASTELLANOS FUENTES

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de:

Ingeniero Civil

Director:

CARLOS HUMBERTO FLÓREZ GÓNGORA

Ingeniero Civil, Esp. Msc. Profesor Asociado

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

FECHA: 23 DE MAYO DE 2023

HORA: 10:00 a. m.

LUGAR: SALON SB - 302

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA CIVIL

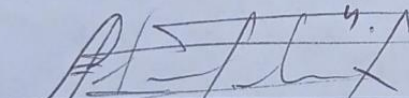
TÍTULO DE LA TESIS: "ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ARCILLOSOS USANDO PUMITA: CASO DE ESTUDIO MUNICIPIO SAN JOSÉ DE CÚCUTA"

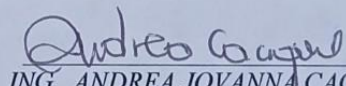
JURADOS: ING. ALVARO ORLANDO PEDROZA ROJAS  
ING. ANDREA JOVANNA CACIQUE ARIAS

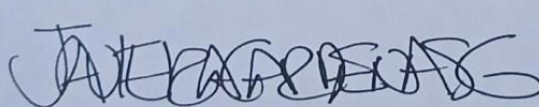
DIRECTOR: ING. CARLOS HUMBERTO FLÓREZ GÓNGORA

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTES:	CÓDIGO	CALIFICACIÓN	
		NÚMERO	LETRA
HAMER CASTELLANOS FUENTES	1113980	4,9	CUATRO, NUEVE

## MERITORIA

  
ING. ALVARO ORLANDO PEDROZA ROJAS

  
ING. ANDREA JOVANNA CACIQUE ARIAS

Vo. Bo.   
JAVIER ALFONSO CARDENAS GUTIERREZ  
Coordinador Comité Curricular

Betty M.

## Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a DIOS por haberme dado la vida, a JESUCRISTO por haberme dado salvación y al ESPIRITU SANTO por haberme dado el conocimiento para poder realizarlo.

A mi esposa Vivian Villarroel, a mi Hijo Elías Aarón, a mis padres Luis Darío & Rosa Helena, a todos mis seis (6) hermanos profesionales quienes siempre me han apoyado; por todo el amor que me han dado y sus palabras de aliento en cada momento; a mis suegros Nino & Virginia, y a todos mis amigos que siempre han estado para apoyarme.

## Agradecimientos

Agradezco a DIOS por darme la oportunidad de tener la libre elección de hacer su voluntad, al Ingeniero Carlos Humberto Flórez Góngora por su apoyo incondicional en el proceso de desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Leonardo Rangel, Ing. Leonardo Cely Illera, Química Karen Diez, Ing. Anderson Flórez, Química Eymi Ramírez, compañeros del Laboratorio de Análisis de Materiales para la construcción LABMAC SENA CIES Cúcuta.

A la Rectora Sandra Ortega Sierra por el apoyo en el financiamiento de los laboratorios de DRX y FRX, a la Vicerrectoría de investigación y extensión UFPS, al laboratorio de suelos civiles UFPS. A todos muchas gracias.

“Porque JEHOVÁ da la sabiduría y, de su boca viene el conocimiento y la inteligencia, te preservará la inteligencia” Proverbios 2: 6-11.

## Contenido

	<b>pág.</b>
Introducción	17
1. Problema	18
1.1 Título	18
1.2 Planteamiento del Problema	19
1.3 Formulación del Problema	20
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo general	20
1.4.2 Objetivos específicos	20
1.5 Justificación de la Investigación	21
1.6 Alcances y Limitaciones	22
1.6.1 Alcances	22
1.6.2 Limitaciones	22
1.7 Delimitaciones	22
1.7.1 Delimitación espacial	22
1.7.2 Delimitación temporal	23
1.7.3 Delimitación conceptual	24
2. Marco Referencial	25
2.1 Antecedentes	25
2.1.1 Antecedentes internacionales	25
2.1.2 Antecedentes nacionales	26
2.2 Marco Teórico	29

2.2.1 Ensayos de compresión	29
2.2.2 Ensayos de laboratorio de suelos	30
2.2.3 Clasificación de suelos	31
2.2.4 Diseño de mezclas	33
2.2.5 Fallas estructurales causadas por expansividad de suelos arcillosos	33
2.2.6 Ensayo de lambe	35
2.2.7 Expansión libre en probeta	36
2.2.8 Ensayo de gravedad específica de los suelos	38
2.2.9 Ensayo de Fluorescencia de rayos X (FRX)	39
2.2.10 Ensayo de difracción de rayos X (DRX)	40
2.2.11 Ensayo microscopía de barrido (SEM)	41
2.2.12 Estabilización química	42
2.2.13 Capacidad de intercambio catiónico	42
2.2.14 Buenas prácticas de laboratorio (BPL)	43
2.2.15 Aseguramiento de la validez de los resultados	45
2.3 Marco Conceptual	46
2.3.1 Arcilla	46
2.3.2 Pumita (Piedra Pómez, cenizas volcánicas)	46
2.3.3 Expansividad	47
2.3.4 Contracción lineal	47
2.3.5 Consistencia	47
2.3.6 Plasticidad	47
2.3.7 Microscopía	48
2.3.8 Mezcla	49

2.3.9 Agua destilada	50
2.4 Marco Contextual	50
2.5 Marco Legal	52
3. Diseño Metodológico	53
3.1 Tipo de Investigación	53
3.2 Población y Muestra	53
3.2.1 Población	53
3.2.2 Muestra	53
3.3 Fases de la Investigación	54
3.3.1 Fase 1: Revisión documental	54
3.3.2 Fase 2: Trabajo de campo	54
3.3.3 Fase 3: Ensayos de laboratorio	54
3.3.4 Fase 4: Trabajo de oficina	55
3.3.5 Fase 5: Participación en eventos de investigación formativa	55
3.4 Planificación de Actividades	56
3.5 Diseño de Experimentos	56
3.5.1 Hipótesis de trabajo en la investigación	56
3.5.1.1 Hipótesis nula	56
3.5.1.2 Hipótesis alternativa	57
3.5.2 Diseño de mezclas de suelo – pumita (cenizas volcánicas)	57
3.5.2.1 Condiciones para definir criterios de dosificación	57
3.5.2.2 Criterios de dosificación aceptados para el diseño de mezclas de suelo – pumita (cenizas volcánicas).	58
3.5.3 Diseño experimental aleatorizado	59



3.6 Fuentes de Consulta de Información	59
3.6.1 Fuentes primarias	59
3.6.2 Fuentes secundarias	59
3.7 Técnicas y análisis de Procesamiento de Datos	59
4. Desarrollo de la Investigación	61
4.1 Selección de la Fuente de Arcilla	61
4.2 Caracterización y Clasificación Geotécnica de las Arcillas en Estudio	61
4.2.1 Sondeos y toma de muestras	61
4.2.1.1 Fuente: Barrio Aguas Calientes	62
4.2.1.2 Fuente: Barrio la Ermita	63
4.2.2 Preparación de muestras y ejecución de ensayos para clasificación geotécnica	64
4.2.2.1 Contenido de humedad	65
4.2.2.2 Transporte de las muestras	67
4.2.2.3 Secado de las muestras	67
4.2.2.4 Tamizado de las muestras	68
4.2.2.5 Límite líquido	68
4.2.2.6 Límite plástico	69
4.2.2.7 Granulometría (lavado sobre el tamiz 200)	70
4.2.2.8 Índice de expansión libre (ELP)	71
4.2.2.9 Expansión en lambe	72
4.2.2.10 Gravedad específica	73
4.2.2.11 Ensayo modificado de compactación (Proctor modificado)	73
4.2.2.12 Compresión Inconfinada	74
4.2.3 Interpretación y análisis de resultados de laboratorio	75

4.3 Preparación del Material de Tratamiento de la Arcilla (Pumita)	77
4.3.1 Trituración del material	77
4.4 Tratamiento de Muestras con pumita Triturada y Evaluación del Comportamiento Geomecánico con Agua Destilada	78
4.4.1 Mezclas arcilla – pumita	78
4.4.2 Diseño de las mezclas suelo-pumita	78
4.4.3 Procesamiento de datos de laboratorio	78
4.4.3.1 Ensayos de límite líquido realizado a las mezclas arcilla – pumita	78
4.4.3.2 Ensayos de límite plástico	80
4.4.3.3 Índice de plasticidad	81
4.4.3.4 Índice de expansión libre en probeta	83
4.4.3.5 Expansión en lambe	83
4.4.3.6 Gravedad específica	84
4.4.3.7 Ensayo modificado de compactación (Proctor modificado)	85
4.4.3.8 Compresión Inconfinada	85
4.5 Caracterización Mineralógica	86
4.5.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	86
4.5.2 Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva	88
4.5.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	89
4.5.4 Análisis de la superficie específica mediante azul de metileno (Spot test)	90
5. Análisis de Datos de Campo y Laboratorio - Discusión de Resultados	91
5.1 Discusión de Datos de Laboratorio Geotécnicos	91
5.2 Discusión de Datos de Laboratorio Químicos	91
6. Conclusiones	93

6.1 Conclusiones Específicas Relacionadas con el Cumplimiento de los Objetivos	93
6.2 Aprendizajes en Investigación Formativa	98
6.3 Productos de la Investigación Adelantada	99
7. Recomendaciones	101
Referencias Bibliográficas	102
Anexos	111

## Lista de Figuras

	<b>pág.</b>
Figura 1. Ensayo de compresión Inconfinada	30
Figura 2. Relaciones volumétricas para masa original de suelo	31
Figura 3. Diagrama para diferenciar los grupos AASHTO	32
Figura 4. Carta de plasticidad de Casagrande, modificada por Mitchell con la intersección líneas A y U.	32
Figura 5. Falla estructural en muro	35
Figura 6. Equipo de lambe	36
Figura 7. Laboratorio FRX Instituto nacional de investigaciones nucleares	40
Figura 8. Ensayo DRX, Servicios analíticos Alpha 1	41
Figura 9. Microscopio de barrido UFPS Cúcuta	41
Figura 10. Comportamiento de la CIC en diferentes texturas del suelo	43
Figura 11. Buenas prácticas de laboratorio, Laboratorio de materiales SENA Cúcuta	45
Figura 12. Ubicación barrio Aguas Calientes, Cúcuta Norte de Santander, Zona de estudio	51
Figura 13. Ubicación espacial zona de trabajo del Barrio La Ermita, Cúcuta Norte de Santander	51
Figura 14. Localización del proyecto, sector Aguas Calientes A1, Cúcuta, Colombia	62
Figura 15. Localización del proyecto, sector Aguas Calientes A2, Cúcuta, Colombia	63
Figura 16. Localización del proyecto, sector La Ermita, Cúcuta, Colombia	64
Figura 17. Localización del proyecto, sector La Ermita, A3 zona afectada Cúcuta, Colombia	64
Figura 18. Contenido de humedad	66
Figura 19. Secado de muestras para ejecución de los ensayos	67

Figura 20. Tamizaje previo y disgregación de muestras	68
Figura 21. Ensayo de límite líquido	69
Figura 22. Ensayo de límite Plástico	70
Figura 23. Procedimiento de ensayo de lavado sobre tamiz 200	71
Figura 24. Secuencia ensayo modificado de compactación	74
Figura 25. Ensayo de compresión Inconfinada	75
Figura 26. Molino de bolas para trituración de pumita	77
Figura 27. Polvo de pumita triturada por molino de bolas	77
Figura 28. Agua destilada para ensayos	78
Figura 29. Eliminación de aire mediante secado Gs	85
Figura 30. Compresión Inconfinada mezcla arcilla + 25 % pumita	86
Figura 31. Imagen microscópica de arcilla natural La Ermita	87
Figura 32. Imagen EDS de arcilla natural Barrio la Ermita	89

## Lista de Tablas

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Predicción de la expansividad a partir del límite líquido	37
Tabla 2. Predicción de la expansividad a partir del índice de plasticidad	37
Tabla 3. Predicción de la expansividad a través de otras medidas	37
Tabla 4. Resumen de los resultados de ensayos individuales de Gs de cada laboratorio	39
Tabla 5. Recomendaciones sugeridas por investigadores para diseño de mezclas de suelo	58
Tabla 6. Dosificación de mezclas suelo-aditivo	58
Tabla 7. Descripción del trabajo de campo realizado	61
Tabla 8. Normas de procedimientos de pruebas de laboratorio de suelos	65
Tabla 9. Porcentajes de humedad	67
Tabla 10. Valores de límite líquido	69
Tabla 11. Valores de los límites plásticos	70
Tabla 12. Valores de granulometría (lavado tamiz #200)	71
Tabla 13. Porcentajes de ELP del sector Aguas Calientes A1	72
Tabla 14. Porcentajes de ELP del sector Aguas Calientes A2	72
Tabla 15. Porcentajes de ELP del sector La Ermita	72
Tabla 16. Porcentajes de Expansión LAMBE del sector Aguas Calientes A1	73
Tabla 17. Porcentajes de Expansión LAMBE del sector Aguas Calientes A2	73
Tabla 18. Porcentajes de Expansión LAMBE del sector La Ermita	73
Tabla 19. Información prueba Proctor modificado-arcillas	74
Tabla 20. Información prueba compresión Inconfinada-arcillas	74
Tabla 21. Descripción cualitativa de la plasticidad a partir del IP	76
Tabla 22. Valores del límite líquido en mezclas de arcilla con 15% pumita + agua destilada	79

Tabla 23. Valores del límite líquido en mezclas de arcilla con 25% pumita + agua destilada	79
Tabla 24. Valores del límite líquido en mezclas de arcilla con 35% pumita + agua destilada	79
Tabla 25. Valores del límite plástico en mezclas de arcilla con 15% pumita + agua destilada	80
Tabla 26. Valores del límite plástico en mezclas de arcilla con 25% pumita + agua destilada	81
Tabla 27. Valores del límite plástico en mezclas de arcilla con 35% pumita + agua destilada	81
Tabla 28. Valores del IP en mezclas de arcilla con 15% pumita + agua destilada	82
Tabla 29. Valores del IP en mezclas de arcilla con 25% pumita + agua destilada	82
Tabla 30. Valores del IP en mezclas de arcilla con 35% pumita + agua destilada	82
Tabla 31. Valores del ELP en mezclas de arcilla con 25% pumita + agua destilada	83
Tabla 32. Porcentajes de expansión Lambe del sector aguas calientes A1 + 25% pumita	84
Tabla 33. Porcentajes de expansión lambe del sector aguas calientes A2 + 25% pumita	84
Tabla 34. Porcentajes de expansión lambe del sector la ermita + 25% pumita	84
Tabla 35. Información prueba Proctor modificado-arcillas + 25% pumita	85
Tabla 36. Información prueba compresión Inconfinada-arcillas + 25% pumita	86

## **Resumen**

Este proyecto se basó en una estabilización química de suelos arcillosos usando pumita (roca ígnea extrusiva), llevando a cabo un caso de estudio en el municipio San José de Cúcuta, Colombia. Para ello, se implementó una investigación experimental, ya que se encargó de evaluar el comportamiento físico químico y mecánico de los suelos en estado natural y el de las mezclas de arcilla-sustancia adicionada en el laboratorio. La información se obtuvo durante el trabajo de campo, en el laboratorio y el trabajo de oficina con respecto al material natural, además de la mezcla de suelo-pumita. La población y muestra correspondió a dos muestras extraídas del Barrio Aguas Calientes y una muestra del Barrio La Ermita. Se lograron analizar las propiedades de clasificación geotécnica, el comportamiento fisicomecánico y químico de suelo y mezclas de suelo de arcillas con el uso de la pumita triturada. Seguidamente, se caracterizaron y clasificaron geotécnicamente las muestras de suelos de acuerdo con las metodologías especificadas, preparando las muestras que fueron utilizadas en el diseño de las mezclas de suelo-pumita. Posteriormente, se realizó la caracterización química del suelo natural, de las mezclas y se evaluó su comportamiento. Finalmente, se realizaron los ensayos de laboratorio geotécnicos de los suelos tratados con pumita triturada evaluando su comportamiento geomecánico.



## Introducción

Un suelo expansivo se caracteriza por su susceptibilidad al cambio volumétrico ante la presencia de agua o como consecuencia del aumento del tamaño de los cristales mineralógicos que contiene. Un suelo expansivo es de textura fina (tamaño menor a 0.002 mm), con límite de contracción menor a 8%, actividad mayor a 0,75, presión de expansión lambe de 5 a 9 CPV, índice de expansión libre  $> 100$ .

Los suelos expansivos hacen parte de la regolita (perfil de meteorización del suelo), están presentes en el horizonte B, sin embargo, si la roca es arcillolita meteorizada también puede haber expansividad en el horizonte C.

Pese a la hiperactividad de los materiales expansivos en los daños que experimentan las estructuras, solo hasta fines de 1930 se empezó a estudiar esta patología de los suelos (la expansividad) que se presentaban en las estructuras como rotura de pavimentos, fallas en muros columnas y pisos, desnivel de estructuras no solo se debían a los asentamientos, sino que podían haber sido causadas por la expansión de los suelos arcillosos.

Los suelos arcillosos suelen presentar problemas de inestabilidad volumétrica debido a cambios en su contenido de humedad, crecimiento de cristales mineralógicos, entre otras causas. En lo pertinente a la presente investigación se hace referencia a la hiperactividad de las arcillas asociada a modificaciones de humedad. Usualmente, la ganancia de esta condición de estado (humedad), por parte de los suelos finos cohesivos, está acompañada de expansiones (incremento del volumen) y, contrariamente, la pérdida de humedad conlleva contracciones (reducción volumétrica).

Distintos tipos de infraestructura construidas en ciertas zonas de la ciudad de Cúcuta presentan daños producidos por levantamientos o asentamientos diferenciales inducidos por la interacción suelo-estructura al cambiar las condiciones de humedad del suelo de apoyo. En tales condiciones se hace necesario desarrollar soluciones preventivas y/o correctivas del sistema suelo-cimentación; bien sea estabilizando el geomedio de apoyo o adoptando elementos estructurales de soporte (cimientos) para garantizar la estabilidad, buen funcionamiento y larga vida útil de las estructuras.

Este trabajo de investigación innova el uso de la pumita (ceniza volcánica extraída de los depósitos de rocas extrusivas del Ecuador) como aplicabilidad para la estabilización de suelos expansivos. De esta manera el proyecto contribuye a la utilización del material minero, y da solución de carácter geotécnico en los suelos que se ven afectados por la inestabilidad asociados al cambio volumétrico.

El presente documento presenta los resultados de la investigación sobre las características físicas, mecánicas y químicas de las arcillas expansivas de la zona de estudio, basadas en el análisis de muestras de los Barrios Aguas Calientes y La Ermita, de la ciudad de Cúcuta Norte de Santander, Colombia y, en el comportamiento geomecánico de las mezclas suelo natural-pumita (triturada) y, la efectividad de esta última sustancia sobre la disminución de la expansión.

## **1. Problema**

### **1.1 Título**

ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ARCILLOSOS USANDO PUMITA: CASO DE ESTUDIO MUNICIPIO SAN JOSÉ DE CÚCUTA, COLOMBIA.

## 1.2 Planteamiento del Problema

La historia de los suelos expansivos comenzó hace millones de años. Durante procesos de vulcanismo, la ceniza fue depositada en aguas poco profundas y formó una solidificación de arcilla rica en montmorillonita inestable (uno de los minerales de arcilla de alta hiperactividad expansiva). El aumento de volumen de los suelos por adición de humedad se debe, igualmente, a los procesos de edafización, a lo largo del tiempo. Ahora bien, los principales problemas a los que presentan estos suelos son las deformaciones que experimentan, las cuales superan la condición elástica y éstas no pueden ser previstas por la teoría de la elasticidad clásica o por la teoría de la plasticidad. Los movimientos provocados por los suelos expansivos tienen comúnmente un patrón irregular facilitando el desarrollo de esfuerzos que causan grandes daños a las estructuras y pavimentos apoyados sobre estos.

Desde que el problema de los suelos expansivos se ha hecho presente, se ha tratado de buscar correlaciones empíricas las cuales proporcionan indicaciones valiosas sin ser estas determinantes. Para conocer la causa principal del comportamiento de los suelos expansivos se llevaron a cabo investigaciones sobre tales geomateriales que permitieron reflejar mejor sus propiedades físicas y mecánicas (Castro, 1992). El proceso de expansión inicia cuando un suelo no saturado se humedece absorbiendo agua entre sus partículas y aumenta de volumen. Este aumento de volumen se debe a que los esfuerzos intergranulares del suelo se relajan y de esta manera se incrementa el volumen del suelo (Ulloa, 2007).

De conformidad con lo expuesto, en la presente investigación se evaluó el comportamiento fisicomecánico y químico de mezclas de arcillas extraídas del Barrio Aguas Calientes y La Ermita, de la ciudad de Cúcuta Norte de Santander, Colombia, con adición de pumita triturada

(cenizas volcánicas) en diferentes porcentajes, como una alternativa de tratamiento de este tipo de suelos.

### **1.3 Formulación del Problema**

¿En qué forma la adición de pumita (ceniza volcánica) afecta la condición de expansividad de un suelo arcilloso?

### **1.4 Objetivos**

**1.4.1 Objetivo general.** Analizar las propiedades de clasificación geotécnica, el comportamiento fisicomecánico y químico de suelo y mezclas de suelo de arcillas con el uso de la pumita triturada.

**1.4.2 Objetivos específicos.** Los objetivos específicos se muestran a continuación:

Caracterizar y clasificar geotécnicamente las muestras de suelos de acuerdo con las metodologías especificadas.

Preparar las muestras de pumita para ser utilizadas en el diseño de las mezclas de suelo-pumita.

Realizar la caracterización química del suelo natural, las mezclas de suelo-pumita y evaluar su comportamiento.

Realizar los ensayos de laboratorio geotécnicos de los suelos tratados con pumita triturada y evaluar su comportamiento geomecánico.

Analizar de forma crítica los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio.

## 1.5 Justificación de la Investigación

Se han desarrollado investigaciones que muestran que la adición de aglutinante a la arcilla potencialmente inestable, afectan apreciablemente la capacidad expansiva de estas: entre los aglutinantes utilizados se han empleado: [cenizas de carbón (Pedroza, Jiménez & Bacca, 1986), las enzimas orgánicas (Márquez & Granados, 1996), cenizas volantes (Caicedo, Contreras, Flórez & Zárate, 2008), colas de roca fosfórica (Contreras, 1987), cal (Barreto & Pérez, 1981), toba volcánica (Giler & Robles, 2021)], que han servido para reducir al máximo las alteraciones volumétricas generados por los cambios de humedad en el material.

Los terrenos de colinas, potencialmente urbanizables en Cúcuta registran arcillas con evidencia de variación volumétrica, razón por la cual, tales sedimentos han sido tratados de diversas formas, mediante mezclas con productos resultantes de procesos industriales, de construcción, entre otros.

De acuerdo con lo anterior, el impacto de este proyecto permitió estabilizar suelos arcillosos expansivos de la ciudad de Cúcuta usando pumita triturada, lo cual aumentó en el suelo: su resistencia y, la humedad de compactación óptima, y redujo el índice de plasticidad.

La investigación aportó información sobre las propiedades físico mecánicas y químicas de los suelos arcillosos de la ciudad de Cúcuta, tales como: la clasificación del suelo, el potencial de cambio Volumétrico, el porcentaje de expansión, la resistencia a la compresión; la composición de minerales, propiedades químicas mediante análisis DRX, FRX Y SEM y la efectividad de la pumita como agente estabilizador.

En la actualidad, las áreas físicas de estudio no cuentan con vías con buenas especificaciones

y, no son totalmente transitables en épocas de lluvias; las construcciones son, mayoritariamente, informales y no obedecen a cánones sismorresistentes; lo anterior favorece el surgimiento de patologías estructurales asociadas al efecto de expansión de los suelos sobre los cuales están erigidos.

## **1.6 Alcances y Limitaciones**

**1.6.1 Alcances.** Caracterización de los geomateriales empleados: pumita, arcilla, mezcla de suelo-pumita, en los Barrios Aguas Calientes y la Ermita de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander. Fueron desarrollados ensayos de laboratorio geotécnico, químico y analítico. La información obtenida aporta al conocimiento de los suelos y de las mezclas proyectadas.

**1.6.2 Limitaciones.** Se estableció en la propuesta de investigación como una posible limitante el apoyo de la comunidad y la toma de muestras; sin embargo, en la práctica, durante el desarrollo del proyecto tales limitantes no existieron. La comunidad del sector permitió la extracción del material y brindó acompañamiento en el sitio de excavación.

## **1.7 Delimitaciones**

**1.7.1 Delimitación espacial.** El proyecto de investigación está adscrito a las líneas de investigación de análisis de geo materiales del Grupo de Investigación en geotecnia ambiental GIGA, perteneciente al Departamento de Geotecnia y Minería de la UFPS, sede Cúcuta.

Las muestras de suelo fueron obtenidas de los Barrios Aguas Calientes y La Ermita en la ciudad de San José de Cúcuta, y la pumita (ceniza volcánica) empleada en este proyecto fue traída de los depósitos de materiales ígneos extrusivos erupcionados por el volcán Chimborazo,

en el Ecuador.

El trabajo de caracterización de suelo y, mezclas suelo-pumita, fue adelantado en el Laboratorio de Análisis de Materiales para la Construcción LABMAC del SENA, Centro de la Industria la Empresa y los Servicios CIES Cúcuta. El análisis de Capacidad de intercambio catiónico [CIC] se desarrolló en el laboratorio de Ciencias Ambientales del SENA y en Centro acuícola y agroindustrial de La Gaira, Santa Marta, El ensayo de Azul de metileno Spot test se realizó en el laboratorio de suelos civiles de la UFPS, los análisis de DRX y FRX se realizaron en el laboratorio de análisis químico de la UIS, mientras que la microscopía Electrónica de barrido SEM y el análisis de Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva se realizaron en el laboratorio de Centro de manufactura Textil y Cuero del SENA - Complejo sur Bogotá.

**1.7.2 Delimitación temporal.** La presente investigación fue propuesta en el primer semestre de 2022 y fue desarrollada durante el segundo semestre 2022 y el primer semestre 2023.

### 1.7.3 Delimitación conceptual.

**Suelos arcillosos.** Suelo arcilloso es una masa de sedimento mayormente de textura fina que contiene minerales de arcilla causante de su plasticidad y compresibilidad. Un suelo es clasificado fino si más del 50% pasa el tamiz 200 (0.075 mm). Un suelo fino es físicamente una arcilla si el índice de plasticidad obtenido en laboratorio ( $IP = L.L. - L.P$ ) es mayor que el índice de plasticidad que le corresponde para alcanzar la línea A en la carta de plasticidad de Casagrande para el límite líquido hallado en el laboratorio ( $IP_A = 0.73[LL-20]$ )

**Perfil de suelo.** El perfil de meteorización de suelos corresponde a la ordenación vertical de todos los horizontes de geo material producto del Intemperismo físico químico situados por encima de la roca sana. Cada capa presenta características diferentes; en un suelo maduro se pueden distinguir bien los niveles u horizontes lo cual permite su clasificación y estudio.

**Perfil estratigráfico.** Secuencia lítica que muestra la disposición en campo de las capas de geo materiales según fueron formados. Puede estudiarse a partir de datos de perforaciones, de datos de prospección geofísica (datos indirectos), o bien de cortes naturales o artificiales del terreno que muestran las rocas que conforman la columna estratigráfica.

**Límite de Contracción.** El límite de contracción es la frontera que divide dos de los estados del suelo (estado sólido y estado semi sólido); de esta manera se puede inferir que el límite de contracción tiene un porcentaje de humedad asociado y, en este punto de humedad si esta disminuye pasa a un estado sólido, pero si aumenta la humedad pasa a un estado semi sólido. En teoría el límite de contracción es aquel punto donde una pérdida de humedad no reduce el volumen de una muestra de suelo, pero si hace que su masa varíe.



Los términos Pumita, Capacidad de intercambio catiónico [CIC], Azul de metileno Spot test, Análisis de DRX y FRX, Microscopía Electrónica de barrido SEM y el análisis de Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva serán definidos más adelante.

## **2. Marco Referencial**

### **2.1 Antecedentes**

#### **2.1.1 Antecedentes internacionales.**

Estabilización de suelos cohesivos por medio de arenas volcánicas y cal viva. Trabajo de grado para optar el título como ingeniero civil. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. En esta tesis se evaluó el comportamiento de las cenizas de origen volcánico en la estabilización de suelos cohesivos; estas arenas son muy comunes en diferentes áreas de la construcción y existen en gran cantidad dentro del departamento de Guatemala como en otras áreas de ese país. Los materiales de origen volcánico son muy fáciles de encontrar en Guatemala, la mayoría de su territorio tiene influencia en sus suelos procedentes por eventos y actividad volcánica. (Ruano, 2012). Esta investigación aporta al proyecto información sobre estabilización de suelos cohesivos.

Estabilización química de suelos: Aplicaciones en la construcción de carreteras. Este artículo presenta algunos conceptos sobre estabilización química de suelos para la construcción de pavimento, en Chile. La investigación consultada aporta al proyecto la información sobre los diferentes conceptos de estabilización de suelos finos y granulares. (Solminihac, 1989).

Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en la provincia de San Roma. Universidad Nacional del Altiplano. En este trabajo de grado se

muestra como objetivo general determinar la influencia de la estabilización de suelos con cal en las propiedades mecánicas de los suelos plásticos (C.B.R.) y elaborar una guía básica para estabilización de suelos en caminos de baja intensidad vehicular en la provincia de San Román (Palli, 2015).

Estudio comparativo de la estabilización de suelos arcillosos con valvas de moluscos para pavimentación. En este trabajo de grado se llevó a cabo el uso de conchas pico de pato y conchas de abanico trituradas utilizando porcentajes para diferentes suelos. (Quezada, 2017).

### **2.1.2 Antecedentes nacionales.**

Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes. Desarrollo de metodologías aplicadas para el estudio de los suelos expansivos de la ciudad de Cúcuta en el que se presentan los resultados obtenidos en procesos de investigación usando como material estabilizador las cenizas volantes de la empresa Termo tasajero (Flórez, Caicedo, Zárate & Contreras, 2008).

Estabilización de un suelo con Cal y ceniza volante. Universidad Católica de Colombia. Trabajo de grado en el que se evaluó en laboratorio la resistencia mecánica bajo cargas monotónicas a tracción y compresión de varios cuerpos de prueba de Caolín, mediante adiciones de cal y ceniza volante al 2%, 4%, 6% y 8% teniendo como base el ensayo de Proctor estándar y el suelo en estudio. Previo a esto se realizó una caracterización de los materiales y el objetivo fue determinar el mejoramiento del suelo a través de comparaciones (Parra, 2018).

Uso de las cenizas de carbón como material estabilizante de arcillas expansivas. San José de Cúcuta, Colombia: UFPS, Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Se presentan resultados

obtenidos en la investigación desarrollada usando como material estabilizador las cenizas de carbón (Pedroza et al., 1986).

Caracterización de los suelos del sector Rinconada-Bellavista, Cúcuta - Los Patios. San José de Cúcuta, Colombia: UFPS, Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Trabajo en el que se presentan la caracterización de los suelos de San José de Cúcuta (Pedroza, Pineda & Meneses, 1988).

Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. Investigación realizada en dónde se muestran resultados experimentales mineralógicos llevados a cabo para caracterizar las arcillas expansivas y evaluar su predominio de minerales en el que se aplican ensayos de laboratorio químicos DRX, análisis térmico diferencial y microscopia de barrido (SEM) (Quintero & Gallardo, 2015).

Evaluación de arcillas caoliniticas-illíticas provenientes de la formación guayabo del área metropolitana de Cúcuta, Norte de Santander Colombia. En esta investigación se muestran los resultados obtenidos de análisis que permiten determinar las propiedades de las arcillas del área metropolitana de Cúcuta y potenciar su uso en la fabricación de materiales de construcción y en la elaboración de nuevos materiales cerámicos, generando impactos tecnológicos económicos y sociales en la región (Cáceres, Sánchez & Chaparro, 2017).

Estabilización de arcillas con silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) usando mezclas en peso y volumen en el sector sur este del área metropolitana de San José de Cúcuta, Colombia. Este trabajo de grado aporta a la investigación información sobre los suelos arcillosos analizados en la zona de estudio y procesos de caracterización física, mecánica y química. (Molina & Garzón. 2016).

Estabilización de arcilla con silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) usando mezclas en peso y volumen en la ciudadela Juan Atalaya, urbanización Cormoranes de San José de Cúcuta. Este trabajo aportó a la investigación procedimientos para la caracterización de los suelos arcillosos y el diseño de mezclas. (Becerra & Martínez, 2018).

Análisis comparativo para estabilización de suelos arcillosos usando mezclas en peso de cal, cemento y cenizas volantes. Este trabajo aportó a la investigación procesos de estabilización en el que se indican diferentes porcentajes de mezclas en peso. (Tolosa & Gaitán, 2019).

Análisis del comportamiento geomecánico de mezclas de suelo arcilloso de la formación león con adición de partículas de vidrio de reciclaje. En esta investigación se utilizó el material de vidrio de reciclaje triturado como estabilizador de suelos arcillosos, aportó a la investigación información sobre porcentajes de mezclas, medio de trituración para la pumita (ceniza volcánica) y ensayos de caracterización geotécnica. (Calderón & Camargo, 2020).

Testing Stabilization of high-plasticity clays used in sloping terrain by adding sodium silicate. En esta investigación se muestran métodos de estabilización química con silicato de sodio en arcillas de alta plasticidad (Flórez, Garzón & Molina, 2020).

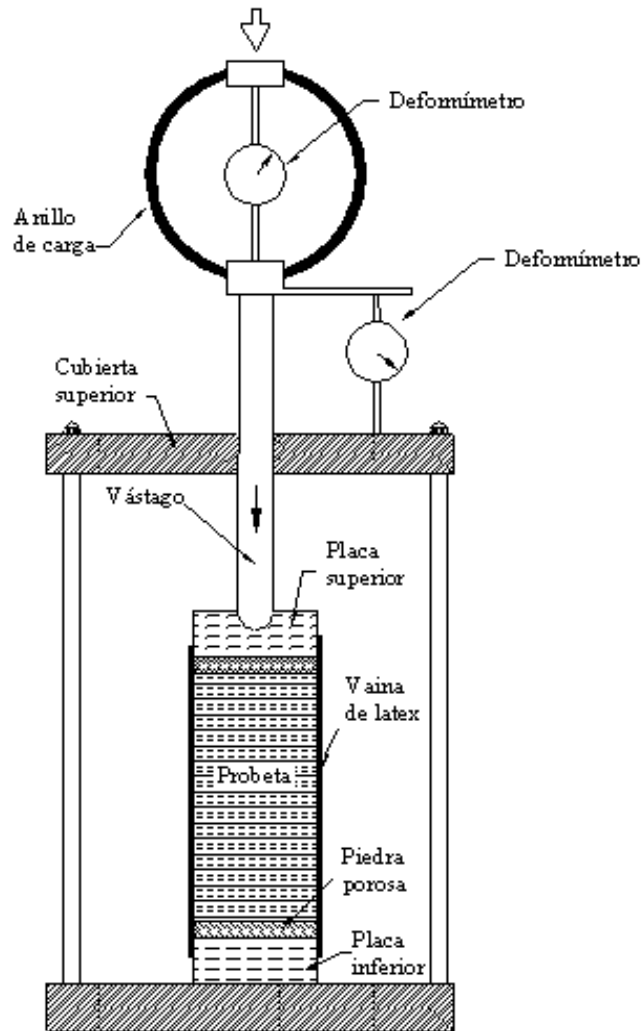
Diseño de pavimento flexible sobre suelos expansivos estabilizados usando ceniza volante y polvo de ladrillo. Proyecto de grado. Ingeniería civil. Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia. En esta investigación se abordó el estudio de la problemática que representan los suelos expansivos en la estructura de pavimento flexible. (Jiménez & Zamora, 2017).

Aplicación de un agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías. Universidad Francisco de Paula Santander. En este proyecto se realizó una monografía

sobre el análisis y determinación de la posible aplicación económica y viable de estabilizadores de suelos arcillosos usados para la construcción de vías en el territorio colombiano. Este trabajo consiste en la aplicación de la cáscara de huevo pulverizada cuya composición química mayoritaria es el Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) el cual representa un 94% de su masa total, composición minoritaria del 1% de Carbonato de Magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) y 1% de Fosfato Tricálcico ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) las cuales actuarán como agentes estabilizadores modificando las propiedades fisicoquímicas del suelo arcilloso (Olaya, 2018).

## **2.2 Marco Teórico**

**2.2.1 Ensayos de compresión.** El ensayo de compresión permite conocer la resistencia y comportamiento del geomaterial ante las fuerzas de compresión. La curva fuerza-deformación de un material posibilita la obtención de los parámetros elásticos del mismo y la carga máxima a la cual éste falla. El método clásico de resistencia a la compresión simple es destructivo y de corta duración y puede hacerse mediante técnica de carga o deformación controlada. Este ensayo no es aplicable a suelos granulares; si se efectúa a suelos cohesivos y rocas, sean las muestras inalteradas o no. La Figura 1 muestra un esquema del equipo utilizado para esta prueba.



**Figura 1. Ensayo de compresión inconfiada.** Fuente: Das (1997).

**2.2.2 Ensayos de laboratorio de suelos.** Las masas de suelos son material particulado de naturaleza variable; condición esta que no puede ser significativamente controlada. Tales geomateriales permiten su uso en estado natural o artificialmente modificado. Los ensayos físicos de suelos tienen como propósito identificar (o clasificar) el material, determinar sus propiedades físicas y establecer su comportamiento geomecánico. Estos ensayos se realizan a cantidades pequeñas y representativas de suelos (muestras). (Bowles, 1981). La Figura 2 ilustra un esquema de diagrama de fases del suelo, destacando los componentes sólido y fluido (agua y/o aire) que contiene la muestra,



**Figura 2. Relaciones volumétricas para masa original de suelo**

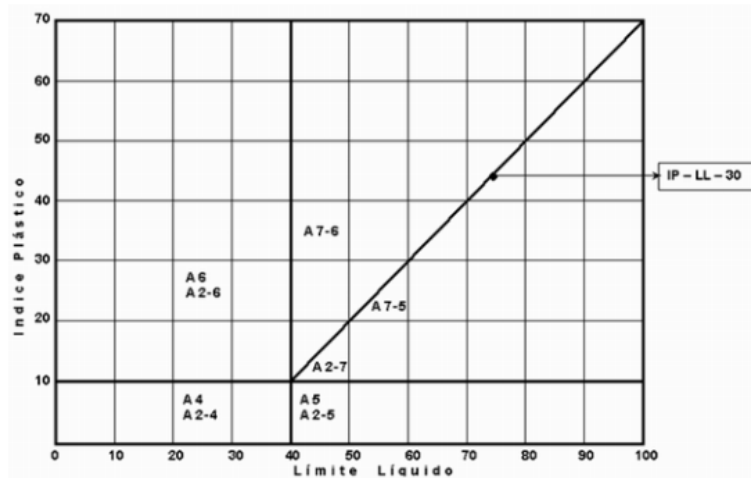
Fuente: Bowles (1981).

**2.2.3 Clasificación de suelos.** La clasificación consiste en asociar la masa térrea analizada a grupos preestablecidos de los sistemas taxonómicos existentes, de acuerdo con las características exigibles por cada sistema (unificado o AASHTO). Es útil para determinar la calidad relativa del material para uso en la construcción de subrasantes, terraplenes y otros rellenos. Los dos sistemas mencionados exigen el conocimiento de la granulometría y de la plasticidad de los materiales. El primer dato se obtiene mediante pruebas de granulometría (por tamizado o hidrómetro) y la realización de ensayos de plasticidad).

El sistema AASHTO, divide las masas de suelo en dos grupos mayores, como se muestra en la Tabla 180 - 1. Ellos son los granulares, con 35% o menos de pasante por el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200) y los limo-arcillosos, que contienen más de 35 % pasando por dicho tamiz.

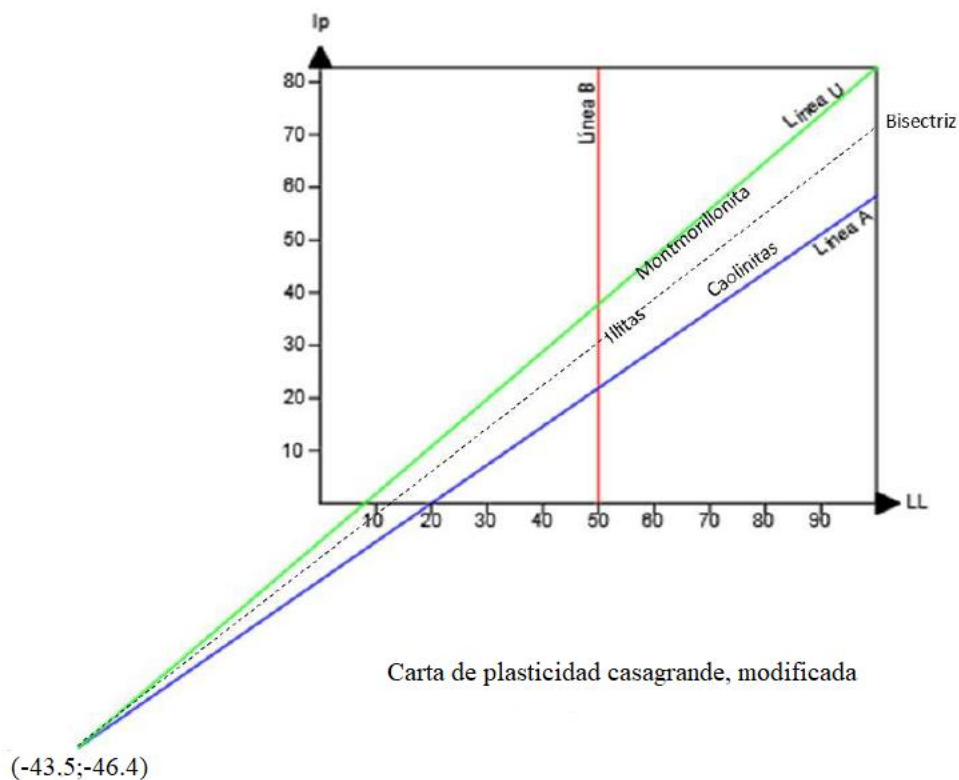
El “Sistema Unificado de Clasificación de Suelos” (SUCS), hace tal división textural de suelos , pero establece el 50% como límite del material pasa Tamiz 200 para definir un suelo

como grueso o fino. La Figuras 3 y 4 enseñan, respectivamente, las cartas de plasticidad del sistema AASHTO y de Casagrande modificada por Mitchell, para clasificar la componente fina contenida en las masas de suelo



**Figura 3. Diagrama para diferenciar los grupos AASHTO.** Fuente: INVIAS (2013).





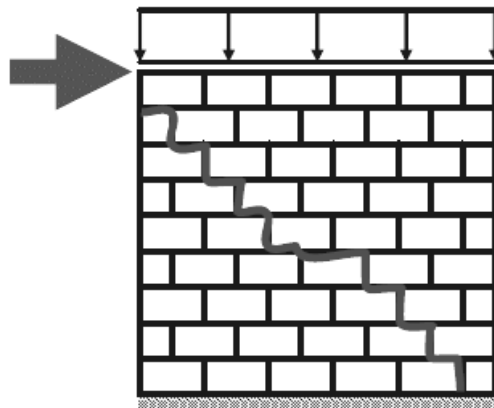
**Figura 4. Carta de plasticidad de casagrande, modificada por Mitchel con la intersección líneas A y U.** Fuente: Calderón & Camargo (2020).

**2.2.4 Diseño de mezclas.** El diseño de mezcla es el procedimiento de cálculo de las proporciones en que entran los materiales (suelo y aditivo, para el caso de la presente investigación) que van a ser mezclados. Usualmente las proporciones se establecen por peso y/o por volumen. En el ejercicio realizado fueron establecidas mezclas arcilla – pumita. Los porcentajes de los componentes fueron definidos por volumen y las mezclas se realizaron en húmedo, adicionando agua destilada. Una vez mezclados y humectados se procedió a realizar un proceso de homogenización y curado de las mezclas, mediante almacenamiento en bolsas a temperatura ambiente.

**2.2.5 Fallas estructurales causadas por expansividad de suelos arcillosos.** Los suelos

arcillosos al experimentar cambios de humedad (problema que se acusa con los cambios estacionales debido a los ciclos de humectación-deseccación así como a la ascensión del nivel freático) da lugar a la variación de su volumen, produciéndose movimientos por los asentamientos diferenciales de la cimentación, lo que puede llevar a la estructura a soportar esfuerzos superiores a los previstos en cálculo y por tanto producir patologías no admisibles, como lo son las grietas verticales e inclinadas que surgen en la estructura.

Los movimientos diferenciales de tales suelos provocan problemas de arrufo (cedimiento en la parte central de la edificación) y quebranto (cedimiento en los hombros de la edificación) combinados por empujes horizontales, que se manifiesta en fisuraciones en los paramentos de fachadas; rotura de elementos estructurales (fallas por cortante en nudos de entramado, trabajo en ménsula con grietas horizontales y/o inclinadas, rotura de forjados, vigas, muros de carga con grietas inclinadas y horizontales, etc.). El asiento diferencial excesivo da lugar al movimiento de los pilares o grupos de pilares, superándose el límite elástico de algunos elementos estructurales y, ocasionalmente rotura de cimentación. En los cimientos superficiales suele ocurrir la separación de esta, el afloramiento de grietas horizontales por empujes y, de grietas inclinadas por asiento diferencial. En las losas, suelen surgir grietas de flexión y distorsiones que pueden desembocar en giros y rotura de esta. En obras piloteadas mal diseñadas es común que se presente rotura de pilastras por cambio del estado de cargas, roturas por flexión, cortante o flexión y empujes sobre vigas riostras y encepados, así como hundimientos por retracción del suelo, etc. En los muros de sótano suelen aparecer grietas por empujes laterales. La Figura 5 ilustra una grieta desarrollada sobre un muro.

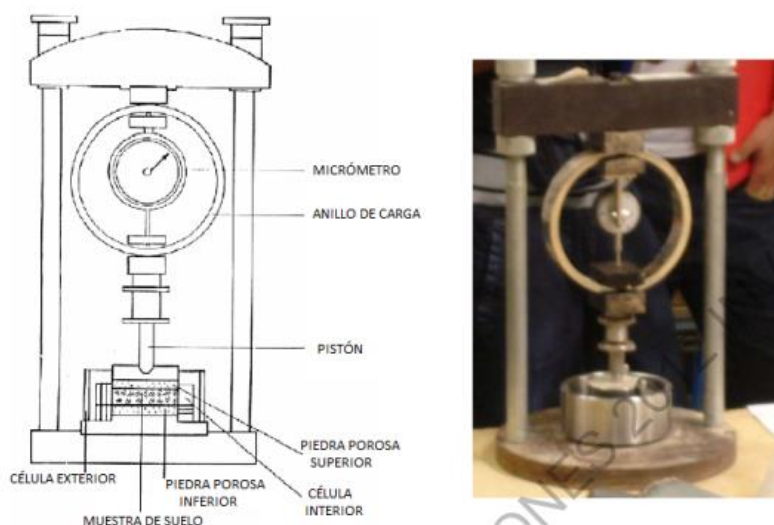


**Figura 5. Falla estructural en muro.** Fuente: Mistler (2006).

**2.2.6 Ensayo de lambe.** Es una prueba rápida de identificación orientada a evaluar la susceptibilidad de un suelo al hinchamiento o la retracción. Los ensayos de valoración de la expansividad que mejor reproducen este proceso consisten en colocar una muestra de suelo en una célula edométrica convencional, y determinar sobre la misma bien el cambio de volumen, o bien la tensión de hinchamiento que manifiesta la muestra como resultado de la humectación de esta, provocada por la inundación de la célula (debida a la cual el suelo cuenta con agua libre disponible).

El ensayo de “hinchamiento libre” consiste en la humectación permitiendo la expansión vertical de la probeta en la célula edométrica (el confinamiento lateral de la muestra en el equipo impide deformaciones horizontales). El ensayo de “determinación de la presión máxima de hinchamiento” impide precisamente esta expansión vertical, al aplicar la tensión vertical necesaria para compensar dicho hinchamiento. En la investigación se utilizó muestra de suelo seca en condiciones de humedad igual al LP, remoldeada y convenientemente compactada, e inundada completamente con agua. La muestra se mantuvo en tal condición durante 2 horas tomando lecturas del anillo dinamométrico y determinando el valor de la fuerza correspondiente en Newton. El índice de expansión fue tomado como el cociente entre el valor de la fuerza (en

Newtons) calculada y la sección transversal de la probeta expresada en  $\text{mm}^2$ . El índice de hinchamiento se expresó en MPa ( $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$ ). A partir de este valor fue obtenido gráficamente el cambio de potencial volumétrico (CVP), para determinar la condición expansiva del geomaterial en los grados no crítica, marginal, crítico o muy crítico. La Figura 6 ilustra el equipo de Lambe utilizado.



**Figura 6. Equipo de Lambe.** Fuente: INVIAS (2013).

**2.2.7 Expansión libre en probeta.** El método consiste en tomar una porción de suelo completamente mezclado que pase el tamiz No 40 ( $425 \mu\text{m}$ ) y recién secado al horno. Es recomendable tomar dos muestras de 10 g cada una, colocar cada muestra en una probeta graduada de 100 ml de capacidad. Mediante agitación con una varilla de vidrio se remueve el aire atrapado en los cilindros, permitiendo el asentamiento en ambos cilindros, se dejan en reposo por un lapso no menor a 24 horas para que las muestras de suelo alcancen el equilibrio volumétrico. Se registra el volumen que alcanza el suelo en cada cilindro y se determina el índice de expansión libre. La experiencia indica que existe una mayor consistencia entre los resultados de este ensayo

y los resultados obtenidos mediante pruebas edométricas, que la obtenida a partir de los límites de consistencia. Existen muchos criterios para determinar y predecir el potencial de expansión de un suelo fino a partir de los límites líquido y plástico (INVIAS, 2013). La tabla 1 muestra los criterios de valoración dados por diferentes autores de la expansividad a partir del Límite Líquido y la tabla 2 propone tal predicción a partir del índice de plasticidad.

**Tabla 1. Predicción de la expansividad a partir del límite líquido**

Grado de expansión	Límite Líquido	
	Chen	Norma IS 1498
Bajo	<30	20 – 35
Medio	30 – 40	35 – 50
Alto	40 – 60	50 – 70
Muy Alto	>60	70 – 90

Fuente: INVIAS (2013).

**Tabla 2. Predicción de la expansividad a partir del índice de plasticidad**

Grado de expansión	Índice de plasticidad		
	Holtz y Gibbs	Chen	Norma IS 1498
Bajo	<20	0 – 15	<12
Medio	12 – 34	10 – 35	12 – 23
Alto	23 – 45	20 – 55	23 – 32
Muy Alto	>32	>35	>32

Fuente: INVIAS (2013).

Por su parte, la tabla 3 propone la clasificación multicriterio del grado de expansividad

**Tabla 3. Predicción de la expansividad a través de otras medidas**

Grado de expansión	Contenido de coloides (% menor de 0,001 mm)	Límite de contracción	Índice de contracción	Índice de expansión libre (%)	Porcentaje de expansión en odómetro (Holtz y Gibbs)	Porcentaje de expansión en edómetro (Seed et al.)
Bajo	<17	>13	<15	<50	<10	0 – 1,5

Medio	12 – 27	8 – 18	15 – 30	50 – 100	10 – 20	1,5 – 5,0
Alto	18 – 37	6 – 12	30 – 60	100 – 200	20 – 30	5 – 25
Muy Alto	>27	<10	>60	>200	>30	>25

Fuente: INVIAS (2013).

**2.2.8 Ensayo de gravedad específica de los suelos.** La gravedad específica de los suelos es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas a igual temperatura. La temperatura generalmente usada como referencia es 20°C.

La gravedad específica de los sólidos de un suelo se usa en casi toda ecuación que exprese relaciones de fases de aire, agua y sólidos en un volumen dado de material. El término partículas sólidas, como se usa en ingeniería geotécnica, hace referencia a las partículas minerales que aparecen naturalmente y que prácticamente no son solubles en agua. Por lo tanto, la gravedad específica de materiales que contengan sustancias extrañas (como cemento, cal, etc.), materiales solubles en agua (como cloruro de sodio) y suelos que contengan sustancias con gravedad específica menor de uno, requieren un tratamiento especial o una definición diferente de la gravedad específica. La Tabla 4 ilustra los valores de  $G_s$  típicos para los suelos de uso común en ingeniería.

**Tabla 4. Resumen de los resultados de ensayos individuales de Gs de cada laboratorio**

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Tipo de suelo	Numero de laboratorios participantes	Valor promedio	Desviación estándar (1s)	Rango aceptable de dos resultados (d2s)
<b>Resultados en varios laboratorios (ensayo individual realizado por cada laboratorio)</b>				
CH	18	2,715	0,027	0,08
CL	18	2,673	0,018	0,05
ML	18	2,726	0,022	0,06
SP	18	2,660	0,007	0,02

Fuente: INVIAS (2013).

**2.2.9 Ensayo de Fluorescencia de rayos X (FRX).** La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra.

La FRX tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra. El único requisito es que ésta tenga un tamaño inferior a de la porta muestras. La figura 7 enseña una fotografía del laboratorio FRX del Instituto nacional de investigaciones nucleares.



**Figura 7. Laboratorio FRX instituto nacional de investigaciones nucleares.** Fuente: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (2021).

**2.2.10 Ensayo de Difracción de Rayos X (DRX).** La Difracción de Rayos X está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Los Rayos X tienen longitudes de onda de Angstroms, del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas. Al ser irradiados sobre la muestra a analizar, los Rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas. El método analítico del Polvo al Azar o de Debye-Scherrer consiste en irradiar con Rayos X sobre una muestra formada por multitud de cristales colocados al azar en todas las direcciones posibles. Para ello es aplicable la Ley de Bragg:  $n\lambda = 2d \cdot \text{Sen}\theta$ , en la que “d” es la distancia entre los planos interatómicos que producen la difracción. La figura 8 muestra un momento de la prueba DRX, servicios analíticos Alpha 1





**Figura 8. Ensayo DRX, servicios analíticos Alpha 1.** Fuente: Alpha1 (2021).

**2.2.11 Ensayo microscopía de barrido (SEM).** El sistema de formación de una imagen en microscopía electrónica de barrido está basado en el sistema óptico de reflexión. Según este, el objeto se ilumina frontalmente, siendo los haces reflejados responsables de la iluminación final. La técnica de microscopía electrónica capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. La Figura 9 presenta una fotografía ilustrando la prueba de con el microscopio de barrido electrónico de la UFPS Cúcuta



**Figura 9. Microscopio de barrido UFPS Cúcuta**

**2.2.12 Estabilización química.** Un suelo se considera estable cuando posee la resistencia suficiente para no sufrir grandes deformaciones ni excesivo desgaste en servicio por acción de las condiciones climáticas variables que se puedan presentar; el suelo estable debe conservar estas propiedades a través del tiempo. Un suelo natural puede tener a veces la composición granulométrica, la plasticidad y el grado de humedad adecuada, para que, siendo únicamente compactado, presente las características mecánicas que lo hacen utilizable como cimentación de una vía o camino.

La estabilización química consiste en añadir al suelo otros materiales, o productos químicos, que modifican sus propiedades, ya sea por una reacción fisicoquímica, o mediante la creación de una matriz que aglomere las partículas del suelo. Algunos autores como Bahar et al., (2004) y Billong et al., (2009) recomiendan la combinación de dos métodos, el de estabilización por métodos mecánicos de compactación y vibración y el de estabilización por métodos químicos, para obtener mayor resistencia y durabilidad. (Rivera, Aguirre, Mejía & Orobio, 2020, p.6)

Una última técnica es la estabilización biológica que consiste básicamente en la utilización de enzimas biológicas que al ser incorporadas al suelo actúan aumentando el grado de aglutinamiento y compactación de las partículas del suelo, como consecuencia de un intercambio catiónico en la estructura del suelo que da lugar a un proceso de cementación acelerado.

**2.2.13 Capacidad de intercambio catiónico.** La capacidad de intercambio catiónico es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos. Las arcillas de estos están cargadas negativamente, por lo que los suelos con mayores contracciones de arcillas exhiben capacidades de intercambio catiónico mayores.

La fase sólida de suelos está compuesta por una fracción mineral y orgánica, constituida por

la arcilla y el humus llamado complejo absorbente del suelo, los coloides cargados negativamente atraen cationes de la solución del suelo y los retienen.

La CIC es la suma total de cationes intercambiables de un suelo, cuanto mayor es la CIC mayor es la cantidad de cationes que éste puede retener. Se expresa en miliequivalentes por cada 100 g de suelo seco y se escribe meq/100 g. Los minerales de arcilla presentan usualmente valores de CIC entre 10 y 150 meq/100 g. La figura 10, enseña el comportamiento de la CIC en diferentes texturas del suelo



**Figura 10. Comportamiento de la CIC en diferentes texturas del suelo.** Fuente: Universidad Ecotec (2022).

**2.2.14 Buenas prácticas de laboratorio (BPL).** Por sus propias características, el trabajo en el laboratorio presenta una serie de riesgos de origen y consecuencias muy variadas, relacionados básicamente con las instalaciones, los productos que se manipulan (y también con las energías y organismos vivos) y las operaciones que se realizan con ellos. Con respecto a los productos debe tenerse en cuenta que suelen ser muy peligrosos, aunque normalmente se emplean en pequeñas cantidades y de manera discontinua. En consecuencia, la prevención de los riesgos en el

laboratorio presenta unas características propias que la diferencian de otras áreas productivas.

La organización del laboratorio debe permitir la correcta gestión de la prevención. Partiendo del propio compromiso de la dirección, el laboratorio debe estar adecuadamente jerarquizado para que la aplicación del principio de la seguridad en línea se pueda establecer sin problemas.

Si se cuenta con las adecuadas instalaciones, las técnicas de trabajo estudiadas e implantadas (tanto en orden a la calidad del trabajo, como a la seguridad) y el personal tiene una formación suficiente, en un buen número de actividades los riesgos se eludirían. En un laboratorio, independientemente de la naturaleza de los agentes utilizados, no ocurre lo mismo dado que el agente suele ser peligroso, y en definitiva el proceso a seguir es usualmente una reacción química o un cambio fisicoquímico con sus exigencias de aportes energéticos o bien sus liberaciones de energía. Por otra parte, el material básico de utilización es el vidrio, cuyas propiedades mecánicas no favorecen ciertamente la seguridad.

Esta situación conduce necesariamente a una atención especial por parte del trabajador del laboratorio, que podría concretarse en una serie de precauciones que deben mantenerse permanentemente durante el trabajo.

Estas precauciones pueden concretarse específicamente para cada laboratorio en función de su actividad, considerando minuciosamente los posibles incidentes que pueden ocurrir en el desarrollo de las diferentes técnicas.

En líneas generales, sin embargo, es posible detallar algunas precauciones o medidas generales, que como se verá a continuación, tienden a crear una determinada actitud en el personal. No una actitud de temor frente a los riesgos, pero sí una actitud de prudencia que es,

tras los métodos de control, el mejor recurso preventivo que puede ponerse en juego. La figura 11 permite ver un espacio de realización de buenas prácticas de laboratorio de materiales en el SENA regional Cúcuta.



**Figura 11. Buenas prácticas de laboratorio, laboratorio de materiales SENA Cúcuta.**

Fuente: autor

**2.2.15 Aseguramiento de la validez de los resultados.** De acuerdo con la norma ISO/IEC 17025:2017 en su numeral 7.7 Aseguramiento de la validez de los resultados, el laboratorio debe contar con un procedimiento para hacer el seguimiento de la validez de los resultados. Los datos resultantes se deben registrar de manera que las tendencias sean detectables y cuando sea posible, se deben aplicar técnicas estadísticas para la revisión de los resultados el cual se debe planificar y revisar.

El laboratorio debe hacer seguimiento de su desempeño mediante comparación con los resultados de otros laboratorios, cuando estén disponibles y sean apropiados. Este seguimiento se debe planificar y revisar y debe incluir, pero no limitarse a ensayos de aptitud y comparaciones

interlaboratorio. Los datos de las actividades de seguimiento se deben analizar, utilizar para controlar y cuando sea aplicable, mejorar las actividades del laboratorio. Todas estas actividades aseguran la validez de los resultados emitidos a los clientes y facilitan la interpretación de estos a la hora de desarrollar proyectos de investigación en laboratorios que se encuentren acreditados o en proceso de acreditación por un Organismo de acreditación nacional o internacional (ISO/IEC 17025, 2017).

## **2.3 Marco Conceptual**

**2.3.1 Arcillas.** Las arcillas según su textura son partículas térreas con diámetro menor a 0.002 mm; según su comportamiento, son sedimentos que exhiben plasticidad; desde el punto de vista mineralógico, la arcilla es un suelo cuyos componentes son minerales compuestos por silicatos de aluminio y de magnesio hidratados. Gran parte de los minerales arcillosos se pueden ubicar de forma sencilla en tres grupos según su configuración cristalina, en caolinitas, illitas y montmorillonitas.

**2.3.2 Pumita (Piedra pómez, cenizas volcánicas).** La pumita o más conocida como la piedra pómez, es una materia prima de origen volcánico (piroclastos), en cuya composición intervienen mayoritariamente la sílice y la alúmina, con porcentajes aproximados del orden de: 70% de Si O<sub>2</sub> y 13% de Al<sub>2</sub> O<sub>2</sub>. La pumita (piedra pómez) es una roca con alta porosidad, muy liviana (densidades entre 0,4 a 0,9 g/cm<sup>3</sup>), friable, eficaz aislante térmico y con propiedades puzolánicas. Son piroclásticos porosos, que se constituyen de vidrio en forma de espuma y que se forman durante un enfriamiento muy rápido de un magma ascendente de alta viscosidad. Estos son muy característicos de las vulcanitas claras y ácidas, como por ejemplo de la riolita, y por ello son de color blanco grisáceo hasta amarillento, raramente de color café o gris. El término "piedra

pómez" incluye todas las rocas piroclásticas porosas.

**2.3.3 Expansividad.** La expansividad es el proceso de aumento de volumen de la masa de suelo debido al aumento de una carga vertical; el suelo sufre un proceso inverso que supone una distribución de partículas; por esta razón se genera un incremento de volumen (Lambe, 1972).

**2.3.4 Contracción lineal.** La contracción lineal es la disminución de la muestra de suelo en una sola dimensión, expresada como un porcentaje de la dimensión original, cuando el contenido de agua se reduce desde un porcentaje dado hasta el límite de contracción.

El límite de contracción es el contenido máximo de agua por debajo del cual un secado adicional no causa una disminución de volumen de la muestra de suelo, pero por encima de cual un incremento en el contenido de agua sí produce un aumento en el volumen de la masa del suelo (INVIAS, 2013).

**2.3.5 Consistencia.** La consistencia es la facilidad relativa con la cual se puede deformar un suelo. Es la resistencia del suelo a ser deformado o amasado (remoldeado o roto), gobernada por las fuerzas físicas de adhesión y cohesión, las cuales dependen del contenido de humedad del material, es por esto por lo que la consistencia se expresa en términos de seca, húmeda y mojada.

La consistencia del suelo es la manifestación de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión que actúan dentro del mismo bajo varios estados de humedad, o sea, resistencia a la deformación o ruptura cuando se aplica una fuerza. La consistencia varía con la textura, materia orgánica, cantidad y naturaleza del material coloidal hasta cierto punto con la estructura y especialmente con el contenido de humedad (INVIAS, 2013).

**2.3.6 Plasticidad.** La plasticidad es la capacidad de un suelo de admitir deformación

permanente y, es una propiedad atribuible al contenido de partículas escamosas de tamaño coloidal presentes en los suelos. Las partículas escamosas además son responsables de la alta compresibilidad y la baja permeabilidad de los suelos.

En relación con la plasticidad de los suelos, durante un proceso de deformación, el volumen de una arcilla permanece constante. Por el contrario, el volumen de una arena cambia continuamente durante el mismo. Si se intenta deformar una masa de arena húmeda rápidamente, esta se desagrega (la arena es friable). En virtud de esto, puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material que permite resistir deformaciones rápidas, sin cambiar de volumen y sin agrietarse ni desagregarse.

La plasticidad es la propiedad que expresa la magnitud de las fuerzas de las películas de agua dentro del suelo ya que éstas permiten que el suelo sea moldeado sin romperse hasta un determinado punto. Es el efecto resultante de una presión y una deformación.

Albert Atterberg definió como plasticidad la capacidad que tenía un suelo de ser deformado sin agrietarse, ni producir rebote elástico. A su vez observó que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, que los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos duros con el secado, y que las arenas son desmenuzables en condiciones sueltas y secas. También observó que existían arcillas altamente plásticas y otras de baja plasticidad (INVIAS, 2013).

**2.3.7 Microscopía.** La microscopía es una técnica que sirve para Investigaciones geomineras, cristalográficas, mineralógicas y petrológicas. Estudio morfológico y estructural de las muestras; Caracterización microestructural de materiales. Identificación, análisis de fases cristalinas y transiciones de fases en diversos materiales tales como metales, cerámicos, materiales



compuestos, semiconductores, polímeros y minerales. Composición de superficies y tamaño de grano. Valoración del deterioro de materiales, determinación del grado de cristalinidad y presencia de defectos. Identificación del tipo de degradación: fatiga, corrosión, fragilización, etc.

El microscopio electrónico de barrido (SE, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes.

Al incidir el haz de electrones sobre la muestra, interactúa con ella y se producen diversos efectos que serán captados y visualizados en función del equipo que utilicemos (Scaï Uma, 2016).

**2.3.8 Mezcla.** El principal objetivo del diseño de la mezcla es establecer un contenido apropiado de materiales para la construcción. Debido a la gran variedad de aplicaciones del suelo tratado con diferentes materiales, se han desarrollado distintos métodos de diseño de las mezclas. Generalmente, la determinación del contenido de cal se basa en analizar el efecto de distintos porcentajes de cal respecto de una determinada propiedad de la mezcla (De Solminihac, Echeverria & Thenoux, 1989).

El tipo de mezcla más utilizada es el suelo-cemento compactado llamado comúnmente como suelo-cemento, este contiene una proporción de OPC entre 4-25 % en peso de suelo seco y se compacta para lograr mayor resistencia (Rivera et al., 2020).

**2.3.9 Agua destilada.** En la actualidad los laboratorios que usan agua tienen establecidos requisitos de calidad o pureza, así como métodos de producción y análisis de agua donde deben establecerse el ó los procesos para su purificación.

Este trabajo presenta los requisitos necesarios del agua para el uso en laboratorios, partiendo de las características establecidas por reconocidas instituciones u organismos internacionales que se dedican específicamente al establecimiento de los parámetros de referencia para la calidad del agua, tales como: American Society for Testing and Materials (ASTM); British Standards Institution (BSI); International Organization for Standardization (ISO). En Cuba está adoptada la Norma NC-ISO 3696: 2004 “Agua para uso en análisis de laboratorio. Especificaciones y método de ensayo” (Valdivia, Pedro & Gómez, 2010, p.2).

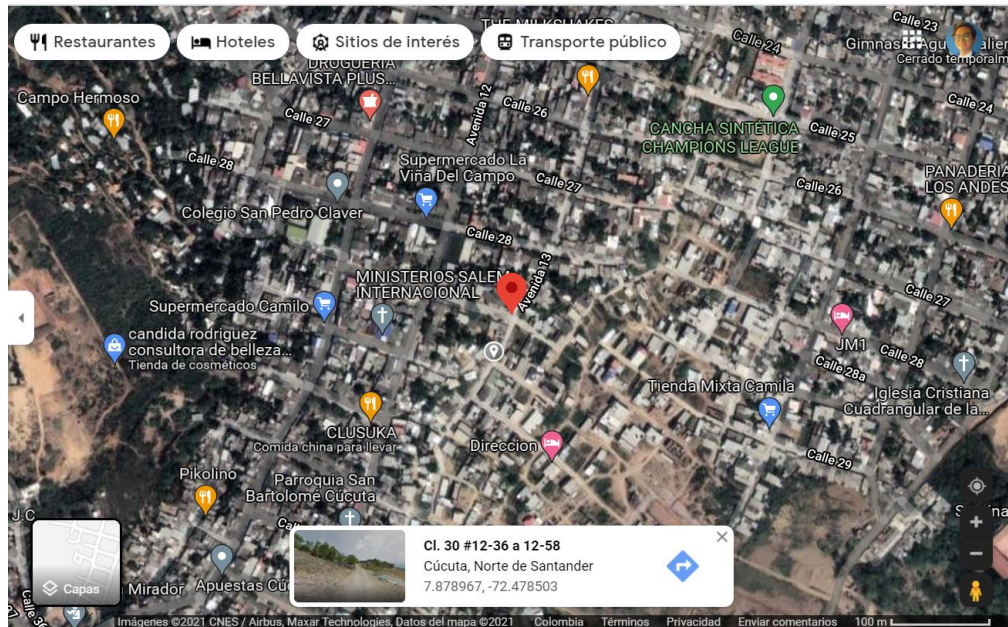
El agua destilada es agua que ha sido sometida a un proceso de evaporación y condensación del vapor obtenido para su purificación mediante un proceso llamado destilación. Por tanto, es un agua más pura que la que encontramos en la naturaleza y nos sirve para muchos aspectos de nuestro día a día, aunque no seamos muy conscientes de ello.

## **2.4 Marco Contextual**

El contenido de esta informe muestra la investigación realizada a mitad del año 2022 y principios del año 2023 en la ciudad de San José de Cúcuta, departamento Norte de Santander. La investigación fue desarrollada en el marco del quehacer investigativo del grupo de investigación de geotecnia ambiental (GIGA) del departamento de geotecnia y minería de la UFPS

Las Figuras 12 y 13 ilustran imágenes satelitales Google Earth mostrando la ubicación general de la zona de desarrollo del proyecto (Barrios Aguas Calientes y La Ermita, de la ciudad

de San José de Cúcuta, Colombia).



**Figura 12. Ubicación barrio Aguas Calientes, Cúcuta Norte de Santander, Zona de estudio.**

Fuente: Google Maps (2022).



**Figura 13. Ubicación espacial zona de trabajo del barrio la Ermita, Cúcuta Norte de Santander. Fuente: Google Maps (2022).**

## 2.5 Marco Legal

Acuerdo 065 (agosto 26 de 1996) por el cual se establece el estatuto estudiantil de la Universidad Francisco de Paula Santander, expedido por el Consejo Superior Universitario en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander; especialmente lo consagrado en el Título V: Del trabajo de grado (Consejo Superior Universitario UFPS, 1996) (CSU, 1996).

Acuerdo 051 (septiembre 13 de 2019) Estatuto estudiantil.

El desarrollo de esta investigación se justificará por las normas **INVIAS 2013** aplicables en la sección 100 que me permiten desarrollar los métodos de ensayo para suelos arcillosos.

**Normas APA.** Indican los requerimientos específicos de trabajos científicos. En el momento de realizar un escrito académico, es necesario utilizar fuentes de información de acuerdo con el tema que se desee trabajar. Del mismo modo, es necesario que en la presentación de los documentos académicos se citen todas aquellas fuentes consultadas. Es muy importante tener en cuenta que la citación para el desarrollo de algún escrito es obligatoria, de lo contrario, el texto se podría considerar como plagio. Esta falta se refiere a la utilización de producciones escritas u orales de otras personas dentro de un texto sin citarlas debidamente.

**INVIAS** – Instituto Nacional de Vías.

**INCONTEC** – Instituto Colombiano de normas Técnicas.

**NSR. 10.** Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, expedido en el 2010.

### 3. Diseño Metodológico

#### 3.1 Tipo de Investigación

La investigación corresponde al campo de la geotecnia y trata de mejorar las condiciones de un geomaterial abundante (arcilla) en la ciudad de Cúcuta. Se trata de una investigación aplicada en el que se aprovecha la capacidad aglutinante y neutralizante que tiene el material volcánico (pumita, cenizas volcánicas) para mejorar las propiedades de las arcillas frente a los cambios de humedad. La investigación es, igualmente, de enfoque experimental por cuanto se manipulan variables y, se controla la variación y comportamiento de estas. El carácter de investigación experimental del trabajo desarrollado descansa en la fuerte actividad de laboratorio realizado y evalúa el comportamiento físico químico y mecánico de los suelos en estado natural y el de las mezclas de arcilla-sustancia adicionada.

#### 3.2 Población y Muestra

**3.2.1 Población.** La población de estudio de la presente investigación está dada por los afloramientos de arcillas en el área metropolitana de Cúcuta. Para efectos de muestreo, la población se consideró infinita, en razón a la amplia variación geológica composicional, la profundidad y la extensión de los afloramientos.

**3.2.2 Muestra.** Para el desarrollo de la presente investigación se hizo un muestreo por conveniencia. Se seleccionaron dos (2) muestras de suelo arcilloso de la formación León (Tol) aflorante en el Barrio Aguas Calientes, y en el Barrio La Ermita de la ciudad de San José de Cúcuta, Colombia. El geomaterial fue extraído de una zona de corte y deslizamiento que se realizó para edificar una vivienda; no se consideró análisis estadístico ya que se extrajeron

muestras por conveniencia de acuerdo con los criterios básicos de seguridad para el autor. Fue enunciado en líneas previas que el sedimento aglutinante (la pumita o ceniza volcánica) empleada en este proyecto fue traída desde Ecuador tomadas del volcán Chimborazo.

### **3.3 Fases de la Investigación**

**3.3.1 Fase 1: Revisión Documental.** Durante esta fase del proyecto se trabajó en la revisión documental que ayudó a la construcción de todo el marco referencial, el diseño metodológico y la totalidad del documento. Fue tomada como fuente de consulta los trabajos de grado que reposan en la Biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander; la búsqueda bibliográfica enfatizó en artículos de investigación referentes al tema de estabilización de suelos arcillosos. Esta fase contribuyó al desarrollo de hojas de cálculo realizadas por el autor para la clasificación de suelos y ensayos mecánicos de fácil interpretación.

**3.3.2 Fase 2: Trabajo de Campo.** En esta etapa se encuentra contemplado el reconocimiento del sector, la selección de zonas de muestreo, y el reconocimiento geológico. El ejercicio de campo fue realizado por el autor del proyecto en compañía del director de este.

**3.3.3 Fase 3: Ensayos de Laboratorio.** Los ensayos de laboratorio realizados durante esta etapa permitieron obtener la información sobre la caracterización de los geo materiales (natural y tratado), precisar propiedades de plasticidad y clasificación, propiedades mecánicas, físicas, composición química y la interacción de los materiales. Además de la preparación de las muestras del suelo natural, la trituración de la pumita utilizada en las mezclas, la ejecución en laboratorio de las mezclas diseñadas, la revisión de las normas a aplicar, se realizaron las correspondientes pruebas de laboratorio, la preparación de las muestras para los ensayos químicos y su respectivo envío a los diferentes laboratorios.

En la realización de esta etapa surgieron preguntas sobre temas que podrían ser objeto de estudio para futuras investigaciones; las mismas se registran en este documento en el capítulo 7 “Recomendaciones”.

**3.3.4 Fase 4: Trabajo de Oficina.** Las actividades tomadas en cuenta como trabajo de oficina consistieron en los cálculos, diseños de formatos, procesamiento de datos, discusión de resultados, redacción y elaboración del documento final. Este trabajo se realizó después de finalizado el trabajo de laboratorio recopilando de esta manera toda la información y los datos obtenidos generando los resultados finales.

**3.3.5 Fase 5: Participación en eventos de investigación formativa.** Es de vital importancia que al realizar una investigación se genere la participación en eventos de divulgación científica y de esta manera dar visibilidad al proceso investigativo que se realiza en la Universidad Francisco de Paula Santander; dado a esto se participó en los siguientes eventos de divulgación científica con esta investigación:

Aula Investigativa del grupo de investigación en Geotecnia Ambiental GIGA realizada en los encuentros del II semestre 2022 (discusión del proyecto de investigación).

Ponencia oral en el evento de Redcolsi VIII encuentro regional de semilleros de investigación realizado los días 25, 26, 27, 28 de mayo de 2022 realizado en Cúcuta, en el cuál la investigación obtuvo un puntaje de 98/100 se ganó el derecho de representar a la UFPS en el XXV Encuentro Nacional y XIX Encuentro Internacional de semilleros de investigación en Medellín, este evento se ejecutó del 12 al 15 de octubre de 2022.

Ponencia modalidad poster en el XXV Encuentro Nacional y XIX Encuentro Internacional de

semilleros de investigación en Medellín, este evento se ejecutó del 12 al 15 de octubre de 2022.

En esta presentación se obtuvo un puntaje de 88/100.

Ponencia oral en el evento IX semana internacional de la ciencia, tecnología e innovación, este evento se ejecutó en la ciudad de San José de Cúcuta, Universidad Francisco de Paula Santander en noviembre 29, 30 y diciembre 1, 2 del 2022.

Transferencia de conocimiento Dirección de formación profesional Integral SENA, Bogotá, este evento se ejecutó de manera virtual como ponencia oral en marzo 21 de 2023.

Transferencia de conocimiento en el grupo de investigación GEOENERGÍA, socialización que se realizó el día 25 de mayo de 2023.

### **3.4 Planificación de Actividades**

La organización y planificación de actividades del proyecto estuvieron todas orientadas a la optimización de los tiempos de ejecución de cada actividad, el nivel de preparación para cada ensayo y la preparación de la pumita hicieron parte de la mayoría del tiempo empleado, una actividad mal planificada genera pérdida de tiempo, por lo tanto, cada actividad se enfocó en el cumplimiento de los objetivos específicos planteados.

### **3.5 Diseño de Experimentos**

**3.5.1 Hipótesis de trabajo en la investigación.** La hipótesis de trabajo se contempla a continuación:

**3.5.1.1 Hipótesis nula.** La hipótesis nula planteada es que las arcillas (objeto de evaluación) no generan cambios significativos en sus propiedades físico-mecánicas (plasticidad, actividad



expansiva, densidad máxima seca, etcétera) y químicas (Capacidad de intercambio catiónico, microscopía electrónica de barrido, Fluorescencia de rayos X, Difracción de rayos X, Espectroscopia de energía dispersiva) cuando se mezclan (o tratan) con pumita triturada (cenizas volcánicas) empleando agua destilada.

**3.5.1.2 Hipótesis alternativa.** La hipótesis alternativa formulada considera que las arcillas (objeto de evaluación) modifican sus propiedades físico-mecánicas y químicas cuando se mezclan (o tratan) con pumita triturada (cenizas volcánicas) empleando agua destilada, es decir, que el tratamiento de las arcillas con pumita triturada sí influye, de alguna forma, en las propiedades mencionadas en la hipótesis nula.

**3.5.2 Diseño de mezclas de suelo – pumita (cenizas volcánicas).** El diseño de mezclas de suelo – pumita se muestra a continuación:

**3.5.2.1 Condiciones para definir criterios de dosificación.** Las mezclas suelo-aditivo se concibieron en proporciones en peso y volumen de suelo seco. La literatura académica propone en las mezclas de suelos (suelo fino-suelo granular) para estabilizar mecánicamente las arcillas, las fracciones porcentuales sugeridas en la tabla 5 (Patrone & Prefumo, 2005). En general, las mezclas de arcilla –suelo granular (generalmente arena), parecen dar mejores resultados cuando el material adicionado varía en el rango de 10 al 30%, naturalmente dependiendo de la naturaleza expansiva de la arcilla. En la práctica, no parece razonable utilizar porcentajes superiores debido a los costos y a la dificultad que conlleva mezclas con mayores dosificaciones. Cuando se hacen mezclas arcilla-aditivo (estabilización química) rara vez la proporción del aditivo supera el 10%. En esta investigación, por tratarse de que el sedimento aditivo utilizado fue pumita que es un material eminentemente clástico, se adoptó el criterio de establecer mezclas bajo la premisa de

considerarlo como si fuera un sedimento granular. Por esta razón, se acogió la dosificación referenciada por Patrone & Prefumo, 2005; ver tabla 5.

**Tabla 5. Recomendaciones sugeridas por investigadores para diseño de mezclas de suelo**

<b>Límite Líquido (%)</b>	<b>Porcentaje de finos combinados presentes en el suelo granular</b>
Mayor a 50	15-30
Entre 30 y 50	10 -40
Menor a 30	5 – 50

Fuente: Patrone, & Prefumo (s,f).

**3.5.2.2 Criterios de dosificación aceptados para el diseño de mezclas de suelo – pumita (cenizas volcánicas).** Se hicieron pruebas piloto mezclando arcilla con pumita triturada y, se evaluaron las propiedades de plasticidad de las mezclas, observando que tales propiedades empiezan a mostrar variación apreciable cuando el porcentaje de pumita es superior al 15%.

Se tomaron tres porcentajes de pumita para ser usados en las mezclas (15%, 25% y 35%) debido a que concentraciones mayores de material inerte conllevan mayores requerimientos de pumita, mayor consumo de tiempo y, naturalmente, mayores costos. Además, como es expuesto en la revisión de literatura, mayores concentraciones de material de mezcla (pumita en este caso) resulta costoso e impráctico. La conformación de las mezclas se muestra en la Tabla 6. Se tomó en cuenta el criterio de mezcla suelo granular + arcilla en este proyecto, cuando se hacen mezclas de suelo + aditivo las dosificaciones rara vez están por encima del 10% de aditivo.

**Tabla 6. Dosificación de mezclas suelo-pumita**

<b>Mezclas (porcentaje en peso)</b>		
<b>Mezclas arcilla-pumita</b>		
85% de arcilla + 15% de pumita	75% de arcilla + 25% de pumita	65% de arcilla + 35% de pumita

**3.5.3 Diseño experimental aleatorizado.** El diseño de experimentos contemplado fue de índole aleatorizado, en el que se resalta un solo factor de tratamiento, que, para el caso en cuestión, será la pumita triturada; este factor consideró todos los niveles en cuanto al manejo de la expansividad con el 15%, 25% y 35% de aditivo. La identificación de las propiedades químicas fue evaluada para las mezclas con las dosificaciones mencionadas, concentrando el análisis a la mezcla 75% (suelo) - 25% (pumita).

### **3.6 Fuentes de Consulta de Información**

**3.6.1 Fuentes primarias.** La información primaria en esta investigación corresponde a la recolectada por el autor durante el trabajo de campo, en el laboratorio y el trabajo de oficina con respecto al material natural, y a la mezcla de suelo-aditivo.

**3.6.2 Fuentes secundarias.** Las fuentes de consulta secundarias están conformadas por los antecedentes, estudios y caracterizaciones realizados a suelos finos cohesivos, a arcillas, a las mezclas suelo-aditivo, al estudio de pumita como elemento estabilizante.

### **3.7 Técnicas y análisis de Procesamiento de Datos**

Se realizaron tablas y gráficas, en lenguaje de Microsoft Excel, con el fin de dar unidad documental a los datos, facilitar su procesamiento y observar, de manera visual, el comportamiento de los resultados.

En la presente investigación no se realizó análisis estadístico a los resultados, solo se contempló la variación empleando el material en sus diferentes porcentajes, esto en razón a que exige un número importante de datos y, el tamaño de la muestra requerida para hacer la prueba de compactación modificada, limitó el número de muestras sometidas a la prueba de compactación

(Proctor modificado) y, al alto número de muestras, consume alto tiempo y tal comprobación se salía de los objetivos fundamentales del proyecto.

## 4. Desarrollo de la Investigación

### 4.1 Selección de la Fuente de Arcilla

Las muestras de arcillas fueron tomadas a partir de la ejecución de calicatas practicadas en afloramientos de arcilla terciarias de la formación León (Tol), localizadas en la calle 29, calle 30, Av. 12. Av. 13. Av. 14 y Av. 16. Del barrio Aguas Calientes; En la calle 37 con Av. 9 del barrio La Ermita, de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia.

Estas arcillas corresponden a sedimentos micro laminados, con lentes de yeso y trozos de carbón entre lámina. Las arcillas mostraron un comportamiento untuoso en estado húmedo y friable, en condición seca.

### 4.2 Caracterización y Clasificación Geotécnica de las Arcillas en Estudio

En este proyecto, la exploración conllevó la ejecución de sondeos exploratorios tipo calicata y apique, hechos manualmente y, la toma manual de muestras alteradas.

**4.2.1 Sondeos y toma de muestras.** Durante la exploración se realizaron dos (2) apiques manuales a una profundidad de 1,50 m y se tomó una muestra de una zona de deslizamiento provocado por remoción en masa, distribuidas según se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7. Descripción del trabajo de campo realizado**

Sitio de muestreo	Geoforma	Número de excavaciones exploratorias	Descripción	Número de muestras
Barrio Aguas Calientes	Corte	1	1 apique manual a profundidad de 1,50 m	3
Barrio Aguas Calientes	Explanación	1	1 apique manual a profundidad de 1,50 m	3
Barrio la Ermita	Corte	1	Toma sobre deslizamiento de tierra	3

**4.2.1.1 Fuente: Barrio Aguas Calientes.** El Barrio Aguas Calientes, está ubicado en el municipio de Cúcuta en La comuna 3 en sitios estratégicos como la Calle 29, calle 30, Av. 12. Av. 13. Av. 14 y Av. 16. Su clima es cálido y su temperatura promedio es de 28° C (35° en el día y 23° en la noche). Es una zona (próxima a la ciudadela La Libertad) sujeta a procesos de remoción en masa, e inundaciones en las partes bajas, a procesos erosivos y, como toda la ciudad con amenaza sísmica alta.

En el sector evaluado existen edificaciones de bajas especificaciones, construidas con un amplio espectro de materiales (madera, zinc, ladrillo, teja de asbesto-cemento, concreto). En la proximidad al lote de estudio se nota expansión urbana tradicional de muy bajas especificaciones. Las arcillolitas revelaron condición seca y friable, meteorizada, abigarrada (amplio espectro de colores, con predominio de los tonos marrón amarillento grisáceo, pardo grisáceo a verduzco con pigmentos de oxidación). Fueron practicadas dos excavaciones tipo calicata para exploración. Las figuras 14 y 15 muestran el predio evaluado y una panorámica del sector.



**Figura 14. Localización del proyecto, sector Aguas Calientes A1, Cúcuta, Colombia**



**Figura 15. Localización del proyecto, sector Aguas Calientes A2, Cúcuta, Colombia**

**4.2.1.2 Fuente: Barrio La Ermita.** El sector tomado como fuente 2 hace parte del Barrio La Ermita, Cúcuta, Norte de Santander. En la fecha de la exploración, se observó ocurrencia reciente de un proceso de remoción en masa complejo causado por el uso inadecuado del agua y la afluencia copiosa de precipitación, tipo deslizamiento rotacional-traslacional. Tal movimiento dejó al descubierto un corte litológico del material, el cual corresponde a una delgada capa de coluvión que yace sobre la secuencia micro estratificada de arcillolitas de la formación León. Las figuras 16 Y 17 muestra fotografías del área tomadas con posteridad al deslizamiento.



**Figura 16. Localización del proyecto, sector la Ermita, Cúcuta, Colombia**



**Figura 17. Localización del proyecto, sector la Ermita, A3 zona afectada Cúcuta, Colombia**

**4.2.2 Preparación de muestras y ejecución de ensayos para clasificación geotécnica.** Las pruebas de mecánica de suelos realizadas (Contenido de humedad, lavado sobre tamiz #200, Límite líquido, Límite plástico, índice de plasticidad, Índice de expansión libre empleando aparato de Lambe, Índice de expansión libre en probeta, Gravedad específica, Proctor modificado, compresión inconfiada) siguieron los procedimientos establecidos en las normas



INVÍAS 2013, señaladas en la Tabla 8. Su ejecución fue materializada en el laboratorio de análisis de materiales para la construcción (LABMAC) del SENA Centro de la Industria la Empresa y los Servicios, Cúcuta, Norte de Santander. La Tabla 8 relaciona las pruebas y la norma INVÍAS considerada.

**Tabla 8. Normas de procedimientos de pruebas de laboratorio de suelos**

<b>Prueba</b>	<b>INVÍAS</b>
Contenido de Humedad	E – 122 – 13.
Lavado tamiz 200	E – 214 – 13
Límite Líquido	E – 125 – 13
Límite Plástico	E – 126 – 13
Expansión Lambe	E – 120 – 13
Expansión Libre probeta	E – 132 – 13
Proctor modificado	E – 14 – 13
Compresión Inconfinada	E – 152 – 13
Gravedad específica	E – 128 – 13

**4.2.2.1 Contenido de humedad.** Durante la ejecución de este ensayo, se tomaron las muestras en campo en los diferentes sitios elegidos, se realizó el proceso en las instalaciones del laboratorio de análisis de materiales para la construcción secadas con horno eléctrico calibrado, en recipientes herméticos no corrosivos. El proceso de cálculo de datos durante este ensayo se realizó en una hoja de cálculo Excel, en donde se especificaron los datos de entrada, el número de identificación, masa del recipiente, masa del recipiente más muestra húmeda, y la masa del recipiente más la muestra seca. Ver Figura 18. Los datos y resultados se presentan en tablas y gráficas (Ver anexo 1). La tabla 9 muestra los resultados de humedad obtenidos.



**Figura 18. Contenido de humedad**

**Tabla 9. Porcentajes de humedad**

Número de Muestra	Porcentaje de Humedad
1	4,77
2	4,33
3	4,77
4	4,38
5	4,44
6	4,60
7	4,74
8	4,75
9	4,77

**4.2.2.2 Transporte de las muestras.** Las muestras extraídas de cada sitio fueron embaladas en costales debidamente rotulados y, almacenadas en áreas próximas a cada sitio de muestreo. Las muestras fueron trasladadas hacia el laboratorio del SENA en donde se almacenaron en la zona de recepción de muestras del laboratorio de análisis de materiales para la construcción LABMAC.

**4.2.2.3 Secado de las muestras.** Se realizó el proceso de secado de las muestras en un horno eléctrico debidamente calibrado a temperatura de 60°C simulando la temperatura ambiente para agilizar el secado (Ver Figura 19).

**Figura 19. Secado de muestras para ejecución de los ensayos**

**4.2.2.4 Tamizado de las muestras.** Se realizó un tamizaje previo de cada muestra de geo material por fuente se seleccionaron las submuestras para los ensayos de Límite Líquido y Límite Plástico, índice de expansión libre en probeta, Índice de expansión en Lambe y, de compactación Proctor modificado; para las dos primeras pruebas nombradas se hizo el tamizado sobre la malla 40 y, para el último de los ensayos citados, el material de prueba correspondió al que pasa el tamiz 4. La figura 20 presenta la textura obtenida de una muestra tipo, producto del proceso de disgregación y tamizado.



**Figura 20. Tamizaje previo y disgregación de muestras**

**4.2.2.5 Límite líquido.** La determinación de este valor fue practicada a nueve (9) muestras extraídas. Los valores resultantes variaron entre 66,62% y 70,13%, dando a entender de esta manera que las arcillas tienen una compresibilidad media a alta. La tabla 10 contiene los datos obtenidos de límite líquido para la totalidad de las muestras y la Figura 21 ilustra el cierre de los dos cortes de la cazuela Casagrande en 13 mm, como lo indica la norma INV E 125 - 13. El procesamiento de la información fue realizado en hojas de cálculo Excel que establece la clasificación correspondiente en el sistema unificado y AASHTO (ver anexo 2).



**Figura 21. Ensayo de límite líquido**

**Tabla 10. Valores de límite líquido**

Número de Muestra	Límite Líquido
1	67,50
2	66,62
3	67,29
4	68,25
5	68,06
6	68,10
7	69,74
8	69,62
9	70,13

**4.2.2.6 Límite plástico.** Fueron realizadas un total de nueve (9) pruebas de Límite Plástico cuyos valores oscilaron entre 26,46% y 28,85% (ver anexo 2). La tabla 11 contiene la totalidad de los valores hallados del LP y, la Figura 22 muestra un registro fotográfico de momentos puntuales durante la ejecución de las pruebas de límite plástico en sus 3 mm y los rollitos de arcilla formados en el proceso de determinar el límite plástico hasta no poder seguir enrollando.



**Figura 22. Ensayo de límite Plástico**

**Tabla 11. Valores de los límites plásticos**

Número de Muestra	Límite Plástico
1	26,46
2	26,46
3	26,55
4	28,13
5	28,05
6	27,88
7	28,76
8	28,72
9	28,85

**4.2.2.7 Granulometría (lavado sobre el tamiz 200).** Un total de nueve (9) muestras fueron sometidas a lavado sobre tamiz 200. De cada submuestra se seleccionaron 300 g. Este ejercicio permitió establecer que el porcentaje de finos (pasa tamiz 200) varía entre 96,77% y 97,57%. La tabla 12 muestra los resultados de la totalidad de las muestras. La Figura 23 representa el proceso de lavado usando un tamiz de lavado debidamente calibrado. (Ver Anexo 3).



**Figura 23. Procedimiento de ensayo de lavado sobre tamiz 200**

**Tabla 12. Valores de granulometría (lavado tamiz #200)**

Número de Muestra	Pasante #200
1	97,43
2	97,00
3	97,13
4	96,85
5	96,77
6	96,83
7	97,53
8	97,50
9	97,57

**4.2.2.8 Índice de expansión libre (ELP).** El ensayo de expansión libre en probeta fue realizado a las 9 muestras. En la prueba se utilizó como líquido no polar kerosene y agua; de esta manera, se pudo comparar la expansión indicada por las muestras, a partir del volumen leído en cada una de las probetas (con kerosene y agua). Ver Tablas 13, 14 y 15, mostrando los valores de ELP para las diferentes fuentes. (Ver Anexo 4).

**Tabla 13. Porcentajes de ELP del sector Aguas Calientes A1**

Ubicación	Muestra	Volumen en agua	Volumen en Kerosene	Índice de expansión libre en probeta (%)
Aguas Calientes A1	1	25,00	12,00	108,30
	2	26,00	12,00	116,70
	3	27,00	12,00	125,00

**Tabla 14. Porcentajes de ELP del sector Aguas Calientes A2**

Ubicación	Muestra	Volumen en agua	Volumen en Kerosene	Índice de expansión libre en probeta (%)
Aguas Calientes A2	4	26,00	12,00	116,70
	5	26,00	12,00	116,70
	6	25,00	12,00	108,30

**Tabla 15. Porcentajes de ELP del sector la Ermita**

Ubicación	Muestra	Volumen en agua	Volumen en Kerosene	Índice de expansión libre en probeta (%)
La Ermita	7	26,00	12,00	116,70
	8	26,00	12,00	116,70
	9	25,00	12,00	108,30

**4.2.2.9 Expansión en lambe.** El ensayo de expansión en Lambe fue realizado a las 9 muestras. En la prueba se utilizó el método por humedad según el límite plástico; de esta manera, se pudo comparar la expansión indicada por las muestras, a partir del cambio potencial volumétrico y la clasificación según PVC con su índice de hinchamiento. Ver Tablas 16, 17 y 18, mostrando los valores de ELP para las diferentes fuentes. (Ver Anexo 5).



**Tabla 16. Porcentajes de Expansión LAMBE del sector Aguas Calientes A1**

Ubicación	Muestra	CPV	Clasificación CPV	Hinchamiento (Mpa)
Aguas Calientes A1	1	6,47	Muy critico	0,24
	2	6,30	Muy critico	0,24
	3	6,39	Muy critico	0,24

**Tabla 17. Porcentajes de Expansión LAMBE del sector Aguas Calientes A2**

Ubicación	Muestra	CPV	Clasificación CPV	Hinchamiento (Mpa)
Aguas Calientes A2	4	6,55	Muy critico	0,25
	5	6,47	Muy critico	0,24
	6	6,55	Muy critico	0,25

**Tabla 18. Porcentajes de Expansión LAMBE del sector la Ermita**

Ubicación	Muestra	CPV	Clasificación CPV	Hinchamiento (Mpa)
La Ermita	7	6,64	Muy critico	0,25
	8	6,51	Muy critico	0,25
	9	6,51	Muy critico	0,25

**4.2.2.10 Gravedad específica.** El ensayo de gravedad específica se realizó a las 9 muestras obtenidas. Los valores de gravedad específicas comprendieron entre 2,717 a 2,722 siendo este resultado un valor adimensional, se empleó un baño maría respectivamente calibrado, picnómetros calibrados en laboratorio y termómetros calibrados (ver anexo 6).

**4.2.2.11 Ensayo modificado de compactación (Próctor modificado).** La prueba de ensayo modificado de compactación fue realizada a tres (3) muestras, uno por cada sondeo. La densidad seca máxima varió entre 1828 a 1836 kg/m<sup>3</sup>. La figura 24 muestra parte del proceso de realización del ensayo. La tabla 19 muestra los valores obtenidos para este ensayo. (Ver Anexo 7).



**Figura 24. Secuencia ensayo modificado de compactación**

**Tabla 19. Información prueba Proctor modificado-arcillas**

Ubicación	Muestra	Clasificación	Densidad máxima seca (kg/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
Aguas Calientes A1	1	CH	1828	16,0
Aguas Calientes A2	4	CH	1830	16,0
La Ermita	7	CH	1836	15,0

**4.2.2.12 Compresión inconfiada.** La prueba de ensayo modificado de compactación fue realizada a tres (3) muestras, uno por cada sondeo. Los valores de compresión inconfiada se encuentran en la tabla 20. La figura 25 muestra el proceso de ensayo de compresión inconfiada. (Ver Anexo 8).

**Tabla 20. Información prueba compresión inconfiada-arcillas**

Ubicación	Muestra	Humedad (%)	q <sub>u</sub> (Kpa)	C <sub>u</sub> (Kpa)	Deformación (%)
Aguas Calientes A1	1	19,41	74,90	37,45	16,00
Aguas Calientes A2	4	19,40	72,78	36,39	15,56
La Ermita	7	19,97	72,58	36,29	13,82



**Figura 25. Ensayo de compresión inconfiada**

**4.2.3 Interpretación y análisis de resultados de laboratorio.** Los datos obtenidos de laboratorio y en campo fueron transcritos en formatos establecidos por el laboratorio de análisis de materiales para la construcción. Todo el procesamiento de los datos encontrados se desarrolló en hojas de cálculo Excel que cumplen con las normas citadas para cada ensayo.

Las muestras, de naturaleza arcillosa, presentaron baja humedad (en el rango de 4,33% a 4,77%). El porcentaje de finos arcillosos osciló en el rango de 96,77% a 97,57%, con promedio de 97,18%. Así mismo, las 9 muestras presentaron valores de LL mayores a 50%, clasificando como arcillas de alta compresibilidad (CH), para lo cual se definen como de baja compresibilidad (L) las que tienen un  $LL < 30$ ,  $15 < IP < 25$ ). Las 9 muestras revelaron ser arcillas de alta plasticidad ( $25 < IP < 40$ ). El mayor rango de valores de Límite plástico (LP) lo presentaron las muestras de la fuente 3 y, el menor rango de este parámetro lo tiene la fuente 2. Los valores de LP oscilaron entre 18,27% y 27,15%.

La naturaleza arcillosa de los suelos analizados condujo la definición del porcentaje de finos aplicando la prueba de lavado sobre el tamiz 200. El máximo porcentaje de finos (PT200) lo revelaron las muestras de las 3 fuentes, y el mínimo porcentaje de finos lo registró la fuente 2 (Aguas Calientes A2), La mayor diferencia entre los valores límites de los rangos de porcentaje de finos por sitio de muestreo, lo presenta la fuente 3. El mayor rango de valores de Límite

plástico (LP) lo presentaron las muestras de la fuente 3 y, el menor rango de este parámetro lo tiene la fuente 1. Los valores de LP oscilaron entre 26,46% y 28,85%.

El índice de plasticidad revela la capacidad de deformación permanente que tiene un suelo cohesivo. El grado de plasticidad de un suelo se define, en este documento, de conformidad con consulta bibliográfica realizada, según el criterio indicado en la Tabla 21.

**Tabla 21. Descripción cualitativa de la plasticidad a partir del IP**

<b>IP</b>	<b>&lt; 4</b>	<b>4 -7</b>	<b>7 -15</b>	<b>15 – 25</b>	<b>25 -40</b>	<b>&gt; 40</b>
Descripción	Nula	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta

De acuerdo con estos rangos, las muestras, presentan muy alta plasticidad ( $IP > 40$ ). En cuanto a los resultados obtenidos del ensayo de Expansión Libre en Probeta de acuerdo con la Norma Sismo Resistente de 2010 (NSR 10) título H, en la tabla H.9.1-1 se producen los criterios de laboratorio más aceptados para el reconocimiento de los suelos expansivos basados en altos valores del límite líquido, del índice de plasticidad, contenido de partículas coloidales y bajos valores de límite de contracción. Para las fuentes obtenidas los valores oscilaron entre 108.30% y 116,70% lo cual indica que su potencial de expansión es muy alto.

Existen muchos criterios para identificar y predecir el potencial de expansión de un suelo fino a partir de los límites líquido y plástico, pero en este caso mediante el aparato de LAMBE se puede medir la presión de expansión máxima desarrollada por un espécimen de suelo remoldeado y compactado en laboratorio bajo condiciones controladas, para las fuentes seleccionadas el valor cuantitativo del Potencial de cambio volumétrico (CPV) se encuentre entre 6,30 y 6,64 siendo este cualitativamente caracterizado como condición del suelo Muy Crítico.

### 4.3 Preparación del Material de Tratamiento de la Arcilla (Pumita)

**4.3.1 Trituración del material.** En las instalaciones del laboratorio LABMAC se procedió al proceso de conminución por impacto y vibración o reducción del material pumita (ceniza volcánica) a los tamaños apropiados para el diseño de las mezclas con la arcilla; para ello se empleó como equipo la máquina de los Ángeles (Ver Figuras 26 y 27); el trabajo de disgregación realizado por la máquina de los Ángeles se asimiló a un molino de bolas, dada la carga de impacto y vibración que ejercen las esferas de acero contra la pumita (ceniza volcánica) generando abrasión y trituración hasta llevar la pumita a condición de polvo.



**Figura 26. Molino de bolas para trituración de pumita**



**Figura 27. Polvo de pumita triturada por molino de bolas**

## 4.4 Tratamiento de Muestras con pumita Triturada y Evaluación del Comportamiento Geomecánico con Agua Destilada

**4.4.1 Mezclas arcilla – pumita.** Fueron diseñadas y elaboradas mezclas usando agua destilada (Ver figura 28) y, polvo de pumita triturada elaborado a partir de rocas de pumita con tamaños de 3”. El tratamiento de las mezclas se realizó en las instalaciones de LABMAC.



**Figura 28.** Agua destilada para ensayos

**4.4.2 Diseño de las mezclas suelo-pumita.** Se seleccionaron las 9 muestras para ser tratadas con mezclado con pumita triturada. Se diseñaron 3 muestras una con 15% de pumita triturada en peso seco y volumen, la segunda con 25% y la tercera con 35% de pumita triturada en peso seco y volumen.

**4.4.3 Procesamiento de datos de laboratorio.** Los datos, de campo y laboratorio, consignados en formatos previamente diseñados o adaptados, fueron objeto de procesamiento en Hoja Excel los cuales se describen en la continuación.

**4.4.3.1 Ensayos de límite líquido realizado a las mezclas arcilla – pumita.** Las pruebas mencionadas se realizaron conforme a las normas INVIAS E 125 – 13 correspondientes. Las mezclas suelo - pumita, se elaboraron en seco, pero los ensayos de plasticidad de las mezclas resultantes requirieron de humectación, para lo cual se utilizó agua destilada suministrada por la

empresa PINZUAR. A cada tipo de ensayo le fueron realizados los ensayos presentando los resultados de límite líquido efectuado a cada una de las mezclas [(85% de arcilla + 15% de pumita); (75% de arcilla + 25% de pumita); (65% de arcilla + 35% de pumita)]. (Ver Tablas 22 a 24) y (Anexo 9).

**Tabla 22. Valores del límite líquido en mezclas de arcilla con 15% pumita + agua destilada**

Fuente	Número de Muestra	Límite Liquidode la arcilla	Dato Ensayo 15%
Aguas Calientes A1	1	67,50	53,84
	2	66,62	53,37
	3	67,29	53,39
Aguas Calientes A2	4	68,25	52,39
	5	68,06	52,69
	6	68,10	51,99
La Ermita	7	69,74	52,14
	8	69,62	51,90
	9	70,13	51,07

**Tabla 23. Valores del límite líquido en mezclas de arcilla con 25% pumita + agua destilada**

Fuente	Número de Muestra	Límite Liquidode la arcilla	Dato Ensayo 25%
Aguas Calientes A1	1	67,50	33,12
	2	66,62	33,16
	3	67,29	32,16
Aguas Calientes A2	4	68,25	32,01
	5	68,06	31,94
	6	68,10	31,48
La Ermita	7	69,74	31,91
	8	69,62	32,33
	9	70,13	32,27

**Tabla 24. Valores del límite líquido en mezclas de arcilla con 35% pumita + agua destilada**

Fuente	Número de Muestra	Límite Liquidode la arcilla	Dato Ensayo 35%
Aguas Calientes A1	1	67,50	34,47
	2	66,62	34,48

Aguas Calientes A2	3	67,29	34,59
	4	68,25	33,49
	5	68,06	33,28
La Ermita	6	68,10	33,41
	7	69,74	33,88
	8	69,62	34,23
	9	70,13	34,56

**4.4.3.2 Ensayos de límite plástico.** Las pruebas mencionadas se realizaron conforme a las normas INVIAS E 126 – 13 correspondientes y se muestran en las tablas 25 a 27. (Ver Anexo 9).

**Tabla 25. Valores del límite plástico en mezclas de arcilla con 15% pumita + agua destilada**

Fuente	Número de Muestra	Límite plástico de la arcilla	Dato Ensayo 35%
Aguas Calientes A1	1	26,46	23,64
	2	26,46	23,95
Aguas Calientes A2	3	26,55	23,95
	4	18,13	22,84
	5	28,05	22,99
La Ermita	6	27,88	22,89
	7	28,76	23,30
	8	28,72	23,45
	9	28,85	23,22



**Tabla 26. Valores del límite plástico en mezclas de arcilla con 25% pumita + agua destilada**

Fuente	Número de Muestra	Límite plástico de la arcilla	Dato Ensayo 25%
Aguas Calientes A1	1	26,46	23,61
	2	26,46	23,93
Aguas Calientes A2	3	26,55	23,60
	4	18,13	23,41
	5	28,05	23,35
La Ermita	6	27,88	23,13
	7	28,76	23,30
	8	28,72	23,38
	9	28,85	23,98

**Tabla 27. Valores del límite plástico en mezclas de arcilla con 35% pumita + agua destilada**

Fuente	Número de Muestra	Límite plástico de la arcilla	Dato Ensayo 35%
Aguas Calientes A1	1	26,46	24,05
	2	26,46	24,00
Aguas Calientes A2	3	26,55	24,34
	4	18,13	23,98
	5	28,05	23,89
La Ermita	6	27,88	23,77
	7	28,76	23,96
	8	28,72	24,59
	9	28,85	24,43

**4.4.3.3 Índice de plasticidad.** El índice de plasticidad es el rango de contenidos de agua dentro del cual un suelo se comporta plásticamente. Numéricamente es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (LL-LP), para el caso de las mezclas 15%, 25% y 35% los resultados de IP se presentan en las tablas 28 a 30. (Ver Anexo 9).

**Tabla 28. Valores del IP en mezclas de arcilla con 15% pumita + agua destilada**

<b>Fuente</b>	<b>Número de Muestra</b>	<b>IP de la arcilla</b>	<b>Dato Ensayo 15%</b>
Aguas Calientes A1	1	41,05	30,20
	2	40,16	29,42
Aguas Calientes A2	3	40,73	29,44
	4	40,12	29,55
	5	40,01	29,71
La Ermita	6	40,22	29,10
	7	40,98	28,84
	8	40,90	28,46
	9	41,27	27,84

**Tabla 29. Valores del IP en mezclas de arcilla con 25% pumita + agua destilada**

<b>Fuente</b>	<b>Número de Muestra</b>	<b>IP de la arcilla</b>	<b>Dato Ensayo 25%</b>
Aguas Calientes A1	1	41,05	9,51
	2	40,16	9,23
Aguas Calientes A2	3	40,73	8,57
	4	40,12	8,61
	5	40,01	8,59
La Ermita	6	40,22	8,35
	7	40,98	8,61
	8	40,90	8,96
	9	41,27	8,29

**Tabla 30. Valores del IP en mezclas de arcilla con 35% pumita + agua destilada**

<b>Fuente</b>	<b>Número de Muestra</b>	<b>IP de la arcilla</b>	<b>Dato Ensayo 35%</b>
Aguas Calientes A1	1	41,05	10,41
	2	40,16	10,48
Aguas Calientes A2	3	40,73	10,25
	4	40,12	9,51
	5	40,01	9,39
La Ermita	6	40,22	9,64
	7	40,98	9,91
	8	40,90	9,63
	9	41,27	10,13

De las observaciones, se encuentra que las mezclas realizadas con agua destilada mostraron disminución de la plasticidad, al comparar la reducción del IP de las mezclas, en términos de la influencia del porcentaje de pumita adicionado, las muestras que tuvieron mejor comportamiento (reducción de la plasticidad) con el porcentaje de pumita adicionado fue del 25%.

**4.4.3.4 Índice de expansión libre en probeta.** El ensayo de expansión libre en probeta (ELP) fue realizado a la totalidad de las muestras de arcilla natural y a la totalidad de las muestras de mezclas de arcilla + pumita del 25%. Se utilizó kerosene suministrado por el laboratorio LABMAC y agua destilada dando resultados que se muestran en la tabla 31. (Ver Anexo 10).

**Tabla 31. Valores del ELP en mezclas de arcilla con 25% pumita + agua destilada**

Fuente	Número de Muestra	% de ELP de la arcilla	Dato Ensayo 25%
Aguas Calientes A1	1	108,3	66,7
	2	116,7	58,3
Aguas Calientes A2	3	125,0	66,7
	4	116,7	58,3
	5	116,7	66,7
La Ermita	6	108,3	75,0
	7	116,7	66,7
	8	116,7	66,7
	9	108,3	66,7

Esta variable mostró, para la totalidad de las mezclas, mejoramiento notable; es decir, se reduce más de la mitad la expansión libre en probeta.

**4.4.3.5 Expansión en lambe.** El ensayo de expansión lambe fue realizado a la totalidad de las muestras de arcilla natural y a la totalidad de las muestras de mezclas de arcilla + pumita del 25%. Se utilizó el equipo de LAMBE suministrado por el laboratorio LABMAC y agua destilada dando resultados que se muestran en la tabla 32 a 34. (Ver Anexo 11).

**Tabla 32. Porcentajes de expansión Lambe del sector aguas calientes A1 + 25% pumita**

Ubicación	Muestra	CPV	Clasificación CPV	Hinchamiento (Mpa)
Aguas Calientes A1	1	4,79	Marginal-critico	0,18
	2	4,66	Marginal-critico	0,18
	3	4,95	Marginal-critico	0,19

**Tabla 33. Porcentajes de expansión lambe del sector aguas calientes A2 + 25% pumita**

Ubicación	Muestra	CPV	Clasificación CPV	Hinchamiento (Mpa)
Aguas Calientes A2	4	4,66	Marginal-critico	0,18
	5	4,53	Marginal-critico	0,17
	6	4,62	Marginal-critico	0,18

**Tabla 34. Porcentajes de expansión lambe del sector la ermita + 25% pumita**

Ubicación	Muestra	CPV	Clasificación CPV	Hinchamiento (Mpa)
La Ermita	7	4,49	Marginal-critico	0,17
	8	4,53	Marginal-critico	0,17
	9	4,49	Marginal-critico	0,17

**4.4.3.6 Gravedad específica.** El ensayo de gravedad específica fue realizado a la totalidad de las muestras de arcilla natural y a la totalidad de las muestras de mezclas de arcilla + pumita del 25%. Se utilizó como equipo un baño maría respectivamente calibrado, picnómetros calibrados en laboratorio y termómetros calibrados suministrado por el laboratorio LABMAC y agua destilada. Los valores de gravedad específica comprendieron entre 2,639 a 2,659 siendo este resultado un valor adimensional, se

empleó un picnómetro aforado y un baño de maría. (ver anexo 12). La figura 29 muestra el proceso de eliminación de vacíos mediante calor en baño de maría.



**Figura 29. Eliminación de aire mediante secado Gs**

**4.4.3.7 Ensayo modificado de compactación (Proctor modificado).** La prueba de ensayo modificado de compactación fue realizada a tres (3) muestras, uno por cada sondeo. La densidad seca máxima varió entre 1925 a 1975 kg/m<sup>3</sup>. La tabla 35 muestra los valores obtenidos para este ensayo para las 3 muestras seleccionadas. (Ver Anexo 13).

**Tabla 35. Información prueba Proctor modificado-arcillas + 25% pumita**

Ubicación	Muestra	Clasificación	Densidad máxima seca (kg/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
Aguas Calientes A1	1	CH	1925	12,0
Aguas Calientes A2	4	CH	1964	12,0
La Ermita	7	CH	1975	11,5

**4.4.3.8 Compresión inconfiada.** La prueba de ensayo modificado de compactación fue realizada a tres (3) muestras, uno por cada sondeo. Los valores de compresión inconfiada se encuentran en la tabla 36. La figura 30 muestra el proceso de ensayo de compresión inconfiada. (Ver Anexo 14).

**Tabla 36. Información prueba compresión inconfiada-arcillas + 25% pumita**

Ubicación	Muestra	Humedad (%)	$q_u$ (KPa)	$C_u$ (KPa)	Deformación (%)
Aguas Calientes A1	1	25,75	114,81	57,40	10,95
Aguas Calientes A2	4	25,91	113,86	56,93	11,69
La Ermita	7	25,98	113,78	56,89	9,55

**Figura 30. Compresión inconfiada mezcla arcilla + 25 % pumita**

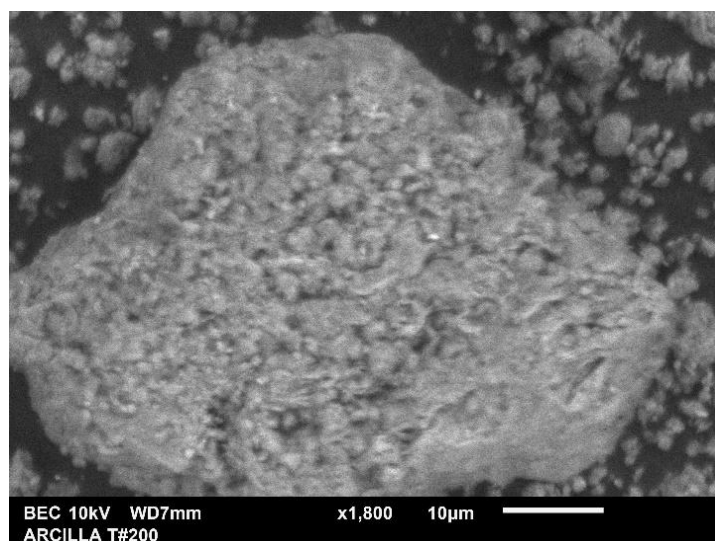
## 4.5 Caracterización Mineralógica

**4.5.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM).** La microscopía electrónica se fundamenta en la emisión de un barrido de haz de electrones sobre la muestra, los cuales interactúan con la misma produciendo diferentes tipos de señales que son recogidas por detectores. Finalmente, la información obtenida en los detectores es transformada para dar lugar a una imagen de alta definición, con una resolución de 0,4 a 20 nanómetros. Como conclusión, obtenemos una imagen de alta resolución de la topografía de la superficie de nuestra muestra.

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Tiene una gran

profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, que significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas a una alta magnificación. La preparación de las muestras es relativamente fácil pues la mayoría de SEM sólo requieren que estas sean conductoras.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio del centro de manufactura en textil y cuero del SENA Complejo Sur Bogotá D.C. Se utilizó para este ensayo un microscopio Jeol JSM—6010LA aplicando la técnica bajo vacío de esta manera se lograron obtener las imágenes microscópicas para la arcilla natural de la Ermita, la pumita triturada y la mezcla de 75 % arcilla + 25 % pumita. para identificar mediante este método como fue la modificación que sobre la estructura química del suelo ejecuta la pumita con este porcentaje de mezcla. La figura 31 muestra la imagen de la arcilla natural con una ampliación de 10  $\mu\text{m}$ . (Ver Anexo 15).



**Figura 31. Imagen microscópica de arcilla natural La Ermita**

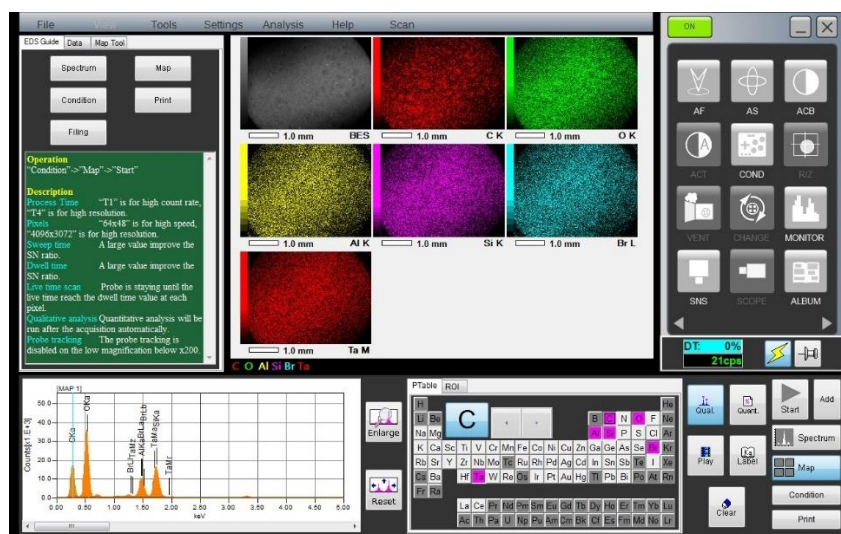
**4.5.2 Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva.** La espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS, también abreviada EDX o XEDS) es una técnica analítica que permite la caracterización química/análisis elemental de materiales. Una muestra excitada por una fuente de energía (como el haz de electrones de un microscopio electrónico) disipa parte de la energía absorbida al expulsar un electrón de núcleo-capa. Luego, un electrón de la capa externa de mayor energía procede a ocupar su lugar, liberando la diferencia de energía como un rayo X que tiene un espectro característico basado en su átomo de origen. Esto permite el análisis de la composición de un volumen de muestra dado que ha sido excitado por la fuente de energía. La posición de los picos en el espectro identifica el elemento, mientras que la intensidad de la señal corresponde a la concentración del elemento.

El Mapeo elemental EDS Como se indicó anteriormente, un haz de electrones proporciona suficiente energía para expulsar electrones del núcleo y la capa y provocar la emisión de rayos X. La información de composición, hasta el nivel atómico, se puede obtener con la adición de un detector EDS a un microscopio electrónico. A medida que la sonda de electrones escanea la muestra, se emiten y miden rayos X característicos; cada espectro EDS registrado se asigna a una posición específica en la muestra. La calidad de los resultados depende de la intensidad de la señal y la limpieza del espectro. La intensidad de la señal depende en gran medida de una buena relación señal-ruido, en particular para la detección de elementos traza y la minimización de la dosis (lo que permite un registro más rápido y resultados sin artefactos). La limpieza afectará la cantidad de picos espurios vistos; esto es consecuencia de los materiales que componen la columna de electrones.

Para esta investigación se realizó el mapeo EDS con el microscopio Jeol JSM-6010LA a la muestra de la arcilla natural obtenida del barrio la Erita, la mezcla de 75% arcilla + 25% pumita y



la pumita triturada, la figura 32 muestra un mapeo EDS de la arcilla obtenida del barrio la Ermita. (Ver Anexo 16).



**Figura 32. Imagen EDS de arcilla natural barrio La Ermita**

**4.5.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).** La capacidad de intercambio catiónico es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos. Las arcillas de estos están cargadas negativamente, por lo que los suelos con mayores contracciones de arcillas exhiben capacidades de intercambio catiónico mayores.

La fase sólida de suelos está compuesta por una fracción mineral y orgánica, constituida por la arcilla y el humus llamado complejo absorbente del suelo, los coloides cargados negativamente atraen cationes de la solución del suelo y los retienen. La CIC es la suma total de cationes intercambiables de un suelo, cuanto mayor es la CIC mayor es la cantidad de cationes que éste puede retener. Se expresa en miliequivalentes por cada 100 g de suelo seco y se escribe meq/100 g. Los minerales de arcilla presentan usualmente valores de CIC entre 10 y 150 meq/100 g. En esta investigación los datos se emitieron en cmol (+) / Kg.

Para la investigación se realizó el ensayo de Capacidad de Intercambio Catiónico CIC a la muestra obtenida del barrio la Ermita y a la mezcla de 75% arcilla + 25% pumita triturada para observar el intercambio de cationes que hay entre la arcilla y la pumita, las muestras fueron enviadas al laboratorio de ciencias ambientales, centro acuícola y agroindustrial de Gaira del SENA en la ciudad de Santa Marta, empleando la norma NTC 5268:2014 en el que se evidenció el incremento del CIC de la arcilla natural siendo 22,36 cmol (+)/ Kg a 25,23 cmol (+)/ Kg con la adición del 25% de pumita. (Ver Anexo 17).

**4.5.4 Análisis de la superficie específica mediante azul de metileno (Spot test).** El área superficial específica es una propiedad que sirve como referencia para un análisis primario. Se llevaron a cabo ensayos con el método de azul de metileno llamado en inglés “spot test”, por su economía, sencillez y relativa rapidez.

El azul de metileno ( $C_{16}H_{18}N_3O_3S$ ) es un tinte que en solución acuosa se ioniza ( $C_{16}H_{18}N_3S^+$ ) y así es absorbido en las superficies cargadas negativamente de las arcillas. Para esta investigación se realizó el ensayo de azul de metileno para la muestra obtenida del barrio la Ermita y también a la mezcla de 75% arcilla + 25% pumita de esta. Siguiendo el procedimiento descrito por Santamarina se obtuvieron los resultados. Tomando como criterio de comparación los valores dados por Santamarina en una de sus tablas proyectadas en su trabajo, podemos suponer que el suelo es en su mayoría compuesto por minerales del grupo illítico (80-100  $m^2/g$ ). (Ver Anexo 18).

## **5. Análisis de Datos de Campo y Laboratorio - Discusión de Resultados**

### **5.1 Discusión de Datos de Laboratorio Geotécnicos**

De acuerdo con las muestras obtenidas de las diferentes zonas de estudio encontramos que las pruebas hechas a las arcillas en su condición natural reflejan un estado arcilloso, micro estratificado, abigarrado, plástico expansivo y que en estado seco se puede encontrar friable.

Se aplicó el criterio de expansividad según la NSR-10 Título H en el que se evidenció que las muestras clasifican en la zona de expansión Alta y muy crítica y registran compresibilidad, plasticidad y expansividad alta.

Las mezclas de suelo con adición del 25% de pumita triturada mejoran las condiciones iniciales de las arcillas (reducen la compresibilidad, decrementan la plasticidad, bajan la expansividad, aumentan la densidad seca máxima en procesos de compactación y aumentan los parámetros de resistencia a la compresión inconfiada).

### **5.2 Discusión de Datos de Laboratorio Químicos**

Las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido SEM tomadas con el microscopio Jeol JSM—6010LA muestran primeramente las partículas de la arcilla de estudio que en el espacio se encuentran libremente sin presencia de agua.

Las imágenes correspondientes a la pumita triturada (ceniza volcánica) se evidencia su forma laminar cristalina con puntas y picos en sus extremos, los cuales permiten adherirse a la arcilla y así eliminar los vacíos de esta. Las imágenes correspondientes a la mezcla de 75% arcilla + 25% pumita, muestran como interactúa a nivel microscópico, lo que el ojo humano no puede ver, los granos de pumita creando una especie de campo alrededor de los granos de la arcilla llenando los vacíos y evitando así que

absorban cantidades de agua, de esta manera los campos creados por la pumita evitan que los granos de arcilla se expandan en presencia del agua y así la pumita le aporta mayor resistencia al suelo y disminuye la expansión.

## 6. Conclusiones

Este proyecto innovó el uso de la pumita (ceniza volcánica) aplicado a la estabilización de suelos expansivos; de esta manera el proyecto soluciona la problemática de orden geotécnico que representa la inestabilidad de los suelos arcillosos asociados a los cambios de volumen por la variación del contenido de humedad.

La pumita (ceniza volcánica) es un material que poco se ha utilizado en la industria de la construcción, se ha empleado como material agregado para concretos livianos y en algunos casos como cementante, en esta investigación se obtuvo resultados que permiten identificar los cambios que genera la pumita (ceniza volcánica) en los suelos arcillosos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la adición de la pumita triturada (ceniza volcánica) al suelo arcilloso enseñó una reducción del límite líquido, decrementó del índice de plasticidad, de la superficie específica y un aumento de la estabilidad del suelo.

### 6.1 Conclusiones Específicas Relacionadas con el Cumplimiento de los Objetivos

1. En cuanto al objetivo específico 1 se seleccionaron muestras dentro del área metropolitana de San José de Cúcuta tres sitios fuentes en el cual se tomaron las muestras de arcilla expansiva (Aguas Calientes 1, Aguas Calientes 2 y la Ermita) lugares en los cuales se evidenció desarrollo urbano. Se realizó la caracterización y clasificación geotécnica a un total de nueve (9) muestras tomadas en las tres fuentes de extracción, todas las nueve (9) muestras clasificaron como arcillas de compresibilidad alta [CH] de acuerdo con el sistema de clasificación Unificada SUCS.

La granulometría (lavado sobre tamiz No 200) indicó que se trata de un suelo fino, más

del 95% pasa por el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N°200). De acuerdo con el análisis del ensayo de límites de Atterberg, todas las muestras clasifican como arcillas de alta compresibilidad (CH).

Los resultados de índice de expansión Libre en Probeta indicaron que estos suelos se encuentran en categoría de expansión Alta a Muy Alta de acuerdo con el título H de la norma Sismo Resistente (NSR -10) tabla H 9.1-1

Empleando la norma INVIAS E 120 – 13, se caracterizó la expansión usando el aparato de LAMBE y se evidenció que los suelos de estas zonas de estudio presentan índices de expansión Alta y Muy Alta.

En cuanto a la gravedad específica de las arcillas evaluadas, se evidenció que los datos obtenidos en laboratorio oscilan de 2,717 a 2,722 valores adimensionales que indican que las muestras que fueron tomadas son arcillas.

Por otra parte, las arcillas evaluadas mostraron datos de densidad seca máxima en el ensayo de Proctor modificado los valores de 1828  $\text{kg/m}^3$  a 1836  $\text{kg/m}^3$ , con humedades optimas en el rango de 15% y 16%.

Según lo anterior, se identificó que para el ensayo de compresión inconfiada los resultados obtenidos de resistencia a la compresión no confinada se encuentran en 72 KPa a 75 KPa, y para la resistencia al corte de 36 KPa a 38 KPa en estado natural.

2. El desarrollo del segundo objetivo específico, el laboratorio de análisis de materiales para la construcción del SENA Centro de la Industria la Empresa y los Servicios (CIES), de la ciudad de San José de Cúcuta, suministro 30 Kg de pumita (ceniza volcánica) en estado

sólido con forma de rocas de tamaño Máximo de 5 cm que posteriormente fue reducida mecánicamente mediante el uso de un molino de bolas (máquina de los Ángeles) del mismo laboratorio LABMAC, a un tamaño tal que pasara por el tamiz N° 4. Este proceso tomó alrededor de 5 días.

3. En procura de lograr el tercer objetivo específico, se realizaron ensayos de microscopía electrónica de barrido (SEM) para el suelo natural y la mezcla de suelo-pumita, en este ensayo se evidenció que en las imágenes tomadas por el microscopio Jeol JSM-6010 LA para el caso de la arcilla en estado natural muestran las partículas de arcilla, de igual manera para la pumita triturada (ceniza volcánica), se mostró como cada partícula de pumita (ceniza volcánica) presenta una forma de diaclasas o placas laminares, con puntas y picos en sus extremos, dichos picos son los causantes de que al añadir la pumita en un porcentaje del 25%, se adhieran a las partículas de arcilla formando una especie de campo protector para evitar la expansión de los granos de arcilla al absorber cantidades representativas de agua, en las imágenes de la mezcla de 75% arcilla + 25% pumita, se evidenció como se adhieren las partículas de pumita a los granos de arcilla formando agregados que llenan los vacíos y crean este campo protector, que a su vez, le aportan resistencia al suelo y evitan la absorción del agua y la expansión de la arcilla.

En cuanto a las imágenes detectadas por el mismo microscopio en este caso usando la técnica de Imágenes de espectroscopía de energía dispersiva (EDS), se mostró cualitativamente los minerales presentes que logra captar el microscopio en mapeo elemental para la arcilla natural siendo estos elementos presentes Aluminio (Al), Silicio (Al), Calcio (C), Oxígeno (O). En cuanto a la pumita se logró observar que el mapeo elemental mostró cualitativamente los minerales de: Sodio (Na), Potasio (K), Tántalo

(Ta), Bromo (Br), Aluminio (Al), Silicio (Si), Carbono (C) y Oxígeno (O). Al mezclar el 75% de arcilla + 25% de pumita, el mapeo elemental identificó los minerales de Sodio (Na), Magnesio (Mg), Potasio (K), Tántalo (Ta), Bromo (Br), Aluminio (Al), Silicio (Si), Carbono (C) y Oxígeno (O) lo cual demostró que el suelo natural se mezcló correctamente con la pumita y logró crear una reacción química entre los mismos.

La interacción de la pumita con la arcilla se identificó con el ensayo de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), para este ensayo, se obtuvieron resultados para la arcilla natural un CIC de 22,38 cmol (+) /Kg, al adicionarle el 25% de pumita fue beneficioso ya que aumenta su capacidad de intercambio catiónico y el resultado que se obtuvo fue de 25,23 cmol (+) /Kg, para entender mejor esto, las arcillas en su superficie están cargadas negativamente, la arcilla tiene la capacidad de formar un enlace iónico con las diferentes bases intercambiable como los encontrados en la imagen mostrada del EDS de la mezcla. La pumita aporta mayor capacidad de carga a la superficie de la arcilla, debido a esto, con la mezcla del 25% de pumita aumenta la resistencia mecánica de la arcilla permitiendo que exista un equilibrio electrónico entre la fase sólida y la fase acuosa.

Por otra parte se realizó el ensayo de azul de metileno a la arcilla natural y a la mezcla de 75% arcilla + 25% pumita, se observó que la cantidad de azul de metileno para la arcilla natural fue de 4,5 y para la mezcla de suelo-pumita fue de 2,9 permitiendo la estabilización del suelo, de esto se realizó el cálculo de superficie específica para la arcilla dando como resultado 110,12 m<sup>2</sup>/g y para la mezcla de 75% arcilla + 25% pumita dando como resultado 70,96 m<sup>2</sup>/g, según estos datos se logra la estabilización del suelo con la adición del 25% de pumita al suelo natural.



4. En términos del objetivo específico cuatro Se realizó la caracterización y clasificación geotécnica a un total de nueve (9) muestras tomadas en las tres fuentes de extracción, empleando mezclas del 15%, 25% y 35% de pumita añadida al suelo. Para el caso de la adición del 15% de pumita a las muestras se observó que reduce considerablemente el límite líquido y el índice de plasticidad, pero no demasiado como para cumplir con los estándares de estabilización, debido a ello se realizó la mezcla de 25% de pumita añadida, de los que se obtuvo resultados que mostraron disminución del límite líquido en un 50% y el Índice de Plasticidad en 79% lo cual permitió la estabilidad del suelo arcilloso. La mezcla del 35% de pumita añadida mostró que los resultados dados generan una reacción contraria, debido a que a mayor cantidad de pumita añadida las propiedades se mantienen cercanas al 25% y agregarle más material generaría mayor tiempo de preparación de material y costos.

Según los datos anteriores observados, la mezcla que mejor dio resultados en cuanto a disminución del Índice de plasticidad fue el de 25%, por esto, se tomó este porcentaje para aplicarlo a los demás ensayos, para el caso del ensayo de índice de expansión libre en probeta, se le realizó el ensayo a las nueve (9) muestras teniendo en cuenta el 25% de pumita añadida, se evidenció que la expansión libre en probeta disminuyó en un 47% logrando así de esta manera la estabilidad del suelo pasando de estar en categoría Muy alta a Medio.

Por otra parte, los datos mostrados en el ensayo de Expansión empleando el aparato de LAMBE, se observó que, para todas las muestras obtenidas, empleando el 25% de pumita añadida al suelo el Cambio de Potencial Volumétrico pasa de ser Muy Crítico a Marginal-Crítico disminuyendo el CPV y el Índice de hinchamiento controlando la expansión de la

arcilla presentado en estado natural.

En cuanto a la gravedad específica, para las nueve (9) muestras seleccionadas, los resultados mostraron disminución del valor de gravedad específica y se observó que con el 25% de pumita añadida al suelo, pasa de estar en estado arcilloso a un estado limo arenoso según el valor adimensional.

Teniendo en cuenta lo anterior, se le aplicó el ensayo de Proctor Modificado a tres (3) de las nueve (9), seleccionando una por cada fuente, añadiendo el 25% de pumita, aumenta la densidad seca máxima y disminuye la humedad óptima del suelo, logrando la estabilidad de este.

A su vez se realizó el ensayo de compresión Inconfinada, se añadió el 25% de pumita al suelo, y se encontró que la resistencia a la compresión no confinada  $q_u$  aumenta en un 34% y la resistencia al corte  $C_u$  33% logrando la estabilidad del suelo y aumentando su resistencia.

5. Para lograr el quinto objetivo específico, se utilizó la herramienta Excel, para realizar los cálculos en plantillas programables que permitieron la fácil interpretación de los resultados obtenidos en laboratorio, estas plantillas siguieron los cálculos especificados en cada norma de ensayo sin quitar ni añadir algo dando cabida a la trazabilidad de las mismas, por otra parte se utilizaron equipo que cuentan con trazabilidad metrológica vigente que permitieron obtener resultados confiables, trazables y medibles.

## **6.2 Aprendizajes en Investigación Formativa**

Durante la ejecución de este proyecto se alimentaron y refrescaron los conocimientos adquiridos

durante el proceso formativo, el trabajo arduo proporcionó nuevo conocimiento con respecto al tema objeto de investigación, Se adquirió destreza en el diseño y elaboración de formatos prácticos para los cálculos de los datos obtenidos en laboratorio, se ganó experiencia en la ejecución de ensayos de laboratorio tanto geotécnicos como conocimiento de información de los ensayos químicos, se aprendió la interpretación de los resultados de ensayo para análisis de información geotécnica, se pudo socializar los avances de la investigación en espacios de comunidad de ciencia e investigación por último se obtuvo mejor relación interpersonal con cada persona que intervino en los procesos de ensayo desde el envío de muestras hasta la obtención de los resultados.

### **6.3 Productos de la Investigación Adelantada**

Se presentan los siguientes productos de investigación desarrollados a lo largo de la ejecución de este proyecto:

Discusión de la propuesta y avances del proyecto en el espacio “Aula Investigativa” del Semillero SIIGIGA y el grupo de investigación GIGA.

Ponencia oral en el evento de Redcolsi VIII encuentro regional de semilleros de investigación realizado los días 25, 26, 27, 28 de mayo de 2022 realizado en Cúcuta, en el cuál la investigación obtuvo un puntaje de 98/100 se ganó el derecho de representar a la UFPS en el XXV Encuentro Nacional y XIX Encuentro Internacional de semilleros de investigación en Medellín, este evento se ejecutó del 12 al 15 de octubre de 2022.

Ponencia modalidad poster en el XXV Encuentro Nacional y XIX Encuentro Internacional de semilleros de investigación en Medellín, este evento se ejecutó del 12 al 15 de octubre de 2022. En esta presentación se obtuvo un puntaje de 88/100.

Ponencia oral en el evento IX semana internacional de la ciencia, tecnología e innovación, este evento se ejecutó en la ciudad de San José de Cúcuta, Universidad Francisco de Paula Santander en noviembre 29, 30 y diciembre 1, 2 del 2022.

Transferencia de conocimiento Dirección de formación profesional Integral SENA, Bogotá, este evento se ejecutó de manera virtual como ponencia oral en marzo 21 de 2023.

Socialización del proyecto terminado en el salón del grupo de investigación GEOENERGÍA el día 25 de mayo de 2023.

Documento impreso y digital del informe final de la investigación

Diseño de Hojas de cálculo en Microsoft Excel para el cálculo de propiedades geotécnicas del suelo.

Artículo de divulgación (en proceso).

## 7. Recomendaciones

Adelantar otras posibilidades de investigación en diferentes áreas de la ciencia utilizando la pumita.

Duplicar la investigación con otras fuentes diferentes de la ciudad de San José de Cúcuta.

Aplicar la metodología con la ampliación de ejecución para la estabilización de suelos expansivos en campo y terreno.

Zonificar los afloramientos de las formaciones arcillosas de la diferenciación composicional y de comportamiento geomecánico que las arcillas registran.

Aumentar la documentación local con respecto a la composición química y mineralógica de las arcillas de las diferentes zonas de la ciudad.

Se recomienda complementar la información con ensayos de Difracción de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Bases Intercambiables para analizar más a fondo la interacción química.

Elaborar un estudio de costos de producción de trituración de pumita para aplicarla en campo.

## Referencias Bibliográficas

- Arias, F. (2012). *Técnicas de Investigación*. Recuperado de:  
[https://prezi.com/4v8dq\\_jm5muk/tecnicas-de-investigacion/](https://prezi.com/4v8dq_jm5muk/tecnicas-de-investigacion/)
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Norma Sismo Resistentes NSR-10 Título H, Estudios Geotécnicos*. Bogotá: NSR.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2017). *Norma Sismo Resistentes NSR-10 Título H, Estudios Geotécnicos*. Bogotá: NSR.
- Avilés, L. (2004). Definición interacción suelo estructura. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 2(61), 23-55.
- Bowles, J. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. México. Mc Graw-Hill.
- Cáceres, V., Sánchez, J. & Chaparro, A. (2017). Evaluación de arcillas caoliniticas-illiticas provenientes de la formación guayabo del área metropolitana de Cúcuta, Norte de Santander Colombia. *Revista ION*, 4(2), 1-15.
- Calderón Correa, A y Camargo Delgado, J. (2020). Análisis del comportamiento geomecánico de mezclas de suelo arcilloso de la formación león con adición de partículas de vidrio de reciclaje. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Camacho, T., Reyes, Ó. & Mayorga C. (2008). *Definición suelos arcillosos*. Recuperado de:  
<https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10036>
- Dabrio, C. & Hernando, S. (2019). *Manual de estratigrafía*. Recuperado de:  
<https://geologicas.ucm.es/estratigrafia>

De Solminihac, H., Echeverria, G. & Thenoux, G. (1989). Estabilización química de suelos:

Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. *Ingeniería de Construcción*, 4(6), 53-78.

Departamento de Ciencias Geológicas. (2007). *Definición perfil estratigráfico*. Recuperado de:

[https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Subsuelo\\_print](https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Subsuelo_print)

Duitama, L., Espitia, C., Mojica, J., Quintero, J. & Romero, F. (2004). Composición

mineralógica y química de las arcillas empleadas para cerámica roja en las zonas de Medellín, Itagüí y Amagá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(4), 1-10.

Escalante, T. (2019). *Marketing social y la concientización en la salud del docente universitario, caso Universidad de Guayaquil, año 2019*. Tesis de grado. Universidad de Guayaquil.

Guayaquil, Ecuador.

Flórez, C. (2010). Fallas geológicas. *La Opinión*. Recuperado de:

<https://www.laopinion.com.co/actualidad/cucuta-una-ciudad-que-convive-con-fallas-geologicas>

Florez, C., Caicedo, Z., Zárate, R. & Contreras, B. (2016). Estabilización química de suelos

expansivos de san José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes. *Respuestas*, 13(2), 19–31. <https://doi.org/10.22463/0122820X.536>

Flórez, C., Garzón, A. & Molina, R. (2020). Testing Stabilization of high-plasticity clays used in

sloping terrain by adding sodium silicate. *Journal of Physics: Conference Series* 5(2), 1-7.

Giler, F. & Robles, A. (2021). Uso de toba volcánica como solución de suelos expansivos.

*Ciencia y Educación*, 2(4), 1-30.

González, C., Montaña, A. & Castro, D. (2012). Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto. *El Hombre y la Máquina*, 38(12), 59-65.

Ibañez, J. (2008). *Definición perfil del suelo*. Recuperado de:

<https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/10/02/102439>

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. (2021). *Fluorescencia de Rayos – X Longitud de onda*. Recuperado de:

[https://www.inin.gob.mx/sitios/views/detalleopcion.cfm?cve\\_area=LABFON&codigo\\_opc=180005006](https://www.inin.gob.mx/sitios/views/detalleopcion.cfm?cve_area=LABFON&codigo_opc=180005006)

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. (2021). *Instalaciones Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/inin/acciones-y-programas/instalaciones-del-instituto-nacional-de-investigaciones-nucleares-73294>

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 101 – 13, Investigación de suelos y rocas para propósitos de ingeniería*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 120 – 13, Determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de Lambe*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 122 -13 Determinación en laboratorio del contenido de agua Humedad de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 125 -13, Determinación del límite líquido de los suelos*.



Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 126 – 13, Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 127 – 13, Determinación de los factores de contracción de los suelos*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 180 – 13 Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras SISTEMA AASHTO*). Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 181 – 13 Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *INV E 214 – 13, Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75  $\mu$ m N°200 en los agregados pétreos mediante lavado*. Bogotá: INVIAS.

Isotools. (2017). ISO/IEC 17025:2017, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Recuperado de:  
<https://www.isotools.org/2017/12/12/iso-iec-17025-nueva-version-2017/>

Linares, J., Huertas, F. & Capel, J. (2008). Definición de Arcilla. Características y comportamiento. *In Universidad de Granada*, 2(2), 479–490.

M&M Instrumentos Técnicos S.A.S. (2021). *Tamiz*. Recuperado de:  
<https://www.myminstrumentostecnicos.com/tag/tamiz/>

National Lime Association. (2006). *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*.

Recuperado de: [https://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf](https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf)

- Palli, E. (2015). *Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en la provincia de San Roma*. Tesis de grado. Universidad Nacional Del Altiplano. Puno, Perú.
- Parra, M. (2018). *Estabilización de un suelo con Cal y ceniza volante*. Tesis de grado. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Paul, A. (2018). *Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías*. Tesis de grado. Universidad Nacional abierta y a Distancia. Bucaramanga, Colombia.
- Pedroza R., Á. (1992). *Patología de la arcilla: Enfoque geotécnico*. Cúcuta: Camacol.
- Pedroza, Á. (1984). *Partial review of expansive soils prepared on basis of existent knowledge*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.
- Pedroza, Á. (1998). *Caracterización geológica, mineralógica y geotécnica de los suelos arcillosos que afloran en el área metropolitana de Cúcuta*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.
- Pedroza, Á. (2002). *Clase I - 1. Unidades geomorfológicas de Cúcuta*. Cúcuta: UFPS.
- Pedroza, Á., Badillo, R. & Leal, A. (2015). *Influencia de la densificación de suelos arcillosos en su resistencia a la compresión confinada*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.
- Pedroza, Á., & Gonzáles, G. (2004). *Caracterización del macizo arcilloso localizado en el costado sur-occidental del sector doña nidia de la ciudad de Cúcuta*. Tesis de grado.

Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

Pedroza, Á., Bosch, N. & Quevedo, J. (1989). *Evaluación y tratamiento de una arcilla expansiva en el terreno sector industrial de la zona franca de Cúcuta*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

Pedroza, Á., Castellanos, Y. & Díaz, A. (2017). *Determinación del contenido de humedad en arcillas, mediante el uso del horno microondas*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

Pedroza, Á., Ibarra, M. & Ruiz, M. (1989). *Organización y análisis de información geotécnica existente en el casco urbano de la ciudad de Cúcuta y determinación de correlaciones entre variables geotécnicas*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

Pedroza, Á., Jiménez, R. & Bacca, C. (1986). *Uso de las cenizas de carbón como material estabilizante de arcillas expansivas*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

Pedroza, Á., Pineda, S. & Meneses, F. (1988). *Caracterización de los suelos del sector Rinconada-Bellavista, Cúcuta - Los Patios*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

Pedroza, Á., Prada, C. & Ramírez, L. (1988). *Estudio preliminar para un proyecto de normalización de suelos en la ciudad de Cúcuta – Zona de estudio: Bellavista, Municipio de Los Patios*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

- Pedroza, R. (1986). *Laboratorio de mecánica de suelos recursos de error en la determinación en el laboratorio de las propiedades geotécnicas de los suelos*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.
- Quintero, L. & Gallardo, R. (2016). Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. *Revista Ingenio*, 8(1), 83–92. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2050>
- Rivera, J., Aguirre, A., Mejía, R. & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos – Materiales convencionales y activados alcalinamente. *Informador Técnico*, 84(2), 202–226. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>
- Ruano, D. (2012). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de arenas volcánicas y cal viva*. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Siza, C. (2018). *Análisis de la piedra pómez como material biodegradable y filtrante en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la curtiduría artesanal Palahua, ubicado en la parroquia Totoras, del cantón Ambato y la provincia de Tungurahua*. Tesis de grado. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.
- Torres, J., Gutiérrez, J. & Beltrán, H. (2020). Compactación, Una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Revista de la Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 1-5.  
Recuperado de:  
[http://revistas.ucundinamarca.edu.co/index.php/Ciencias\\_agropecuarias/article/view/225](http://revistas.ucundinamarca.edu.co/index.php/Ciencias_agropecuarias/article/view/225)
- Universidad Ecotec. (2022). *AGR-100 Agricultura General*. Recuperado de:  
[https://www.ecotec.edu.ec/material/material\\_2019F1\\_AGR100\\_01\\_130045.pdf](https://www.ecotec.edu.ec/material/material_2019F1_AGR100_01_130045.pdf)

Valdivia, R., Pedro, S. & Gómez, M. (2010). Agua para uso en laboratorios. *Boletín Científico Técnico INIMET*, 4(1), 3-10. Recuperado de:

<https://www.redalyc.org/pdf/2230/223017807002.pdf>

Vocabulario Internacional de Metrología. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Recuperado de:

<https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>

**Anexos**